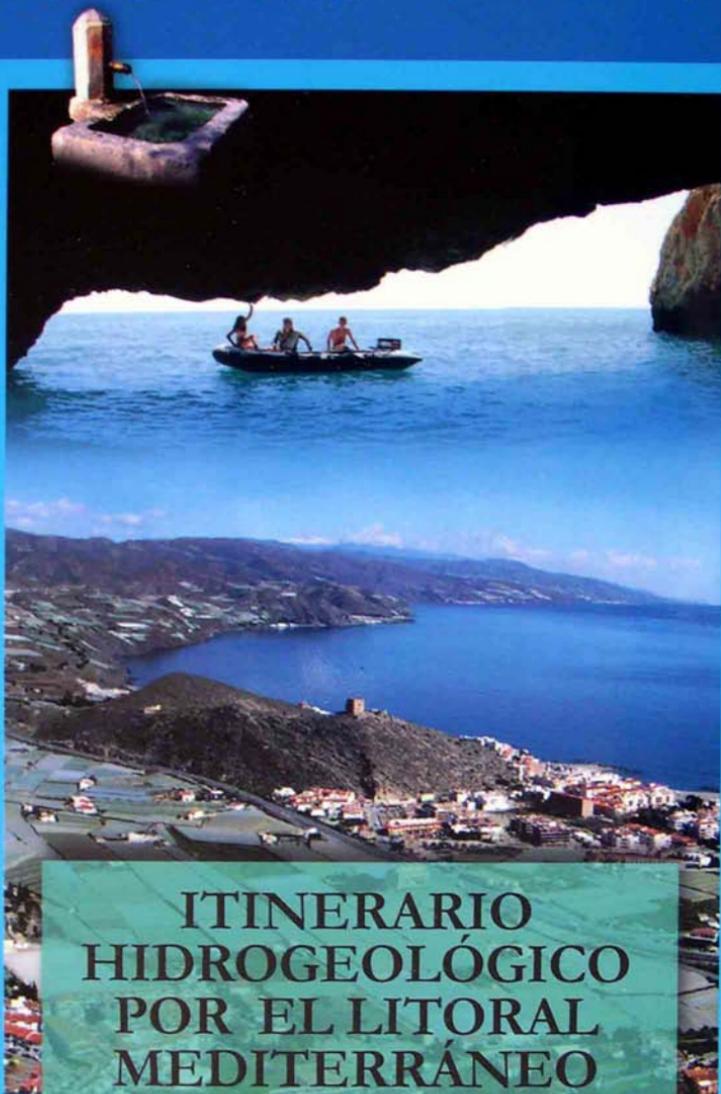


**ITINERARIO
HIDROGEOLÓGICO
POR EL LITORAL
MEDITERRÁNEO
ANDALUZ**

**LUIS SÁNCHEZ DÍAZ
ANTONIO CASTILLO MARTÍN (eds)**



**ITINERARIO
HIDROGEOLÓGICO
POR EL LITORAL
MEDITERRÁNEO
ANDALUZ**

**LUIS SÁNCHEZ DÍAZ
ANTONIO CASTILLO MARTÍN (eds)**

ITINERARIO HIDROGEOLÓGICO
POR EL
LITORAL MEDITERRÁNEO ANDALUZ

LUIS SÁNCHEZ DÍAZ
ANTONIO CASTILLO MARTÍN (eds)

ITINERARIO HIDROGEOLÓGICO
POR EL
LITORAL MEDITERRÁNEO ANDALUZ

GRANADA
2005

Este libro ha sido publicado por la Editorial de la Universidad de Granada, con fondos de la Agencia Andaluza del Agua, al amparo del correspondiente Contrato de Investigación suscrito entre ambas instituciones

Editores - Coordinadores: Luis Sánchez Díaz y Antonio Castillo Martín

Autores:

José Miguel Alonso Blanco	Geólogo consultor
Bartolomé Andreo Navarro	Universidad de Málaga
José Benavente Herrera	Universidad de Granada
María Luisa Calvache Quesada	Universidad de Granada
Francisco Carrasco Cantos	Universidad de Málaga
Antonio Castillo Martín	CSIC y Universidad de Granada
J.Javier Cruz San Julián	Universidad de Granada
José Luis García Aróstegui	Instituto Geológico y Minero de España
Juan Gisbert Gallego	Universidad de Almería
Sara Jorreto Zaguire	Universidad de Almería
Cristina Liñán Baena	Universidad de Málaga
Luis Molina Sánchez	Universidad de Almería
Isaac Pérez Ramos	Universidad de Málaga
Antonio Pulido Bosch	Universidad de Almería
Luis Sánchez Díaz	Universidad de Granada
Francisco Sánchez Martos	Universidad de Almería
Ignacio Vadillo Pérez	Universidad de Málaga
Angela Vallejos Izquierdo	Universidad de Almería

Reservados todos los derechos. Está prohibido reproducir o transmitir esta publicación, total o parcialmente, por cualquier medio, sin la autorización expresa de Editorial Universidad de Granada, bajo las sanciones establecidas en las leyes.

© LOS AUTORES.

© UNIVERSIDAD DE GRANADA Y AGENCIA ANDALUZA DEL AGUA
ITINERARIO HIDROGEOLÓGICO POR EL LITORAL MEDITERRÁNEO ANDALUZ.

ISBN: . Depósito legal:

Edita: Editorial Universidad de Granada, Campus Universitario de Cartuja. Granada.

Fotografía: Las fotografías que ilustran este libro han sido facilitadas por los autores que firman los correspondientes apartados; en caso contrario, se indica el autor de las mismas

Fotocomposición: Taller de Diseño Gráfico y Publicaciones, S.L. Granada

Portada: Josemaría Medina

Imprime:

Printed in Spain

Impreso en España

PRÓLOGO

INTRODUCCIÓN

A.CASTILLO¹ y L.SÁNCHEZ-DÍAZ²

¹CSIC y Universidad de Granada; ²Universidad de Granada



Figura 1. Croquis del itinerario general

Este libro recoge, como su propio nombre indica, un itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz, desde Estepona (Málaga) hasta Cabo de Gata (Almería), a lo largo de más de 350 km de línea de costa. En él se han considerado los acuíferos más significativos, 14 en total, cada uno de ellos tratado por especialistas de las universidades de Málaga, Granada y Almería.

Este libro es una puesta al día de lo que fue el trabajo de investigación de doctorado de uno de los editores del mismo (LSD). La idea inicial surgió tras consultar otros itinerarios y guías geológicas, y, en especial, el «Itinerario geológico de la Cordillera Bética» (ALFARO et al., 1999), pensando que un itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz podía ser de interés general, dado el enorme valor económico y ambiental de las aguas subterráneas en dicho sector.

El objetivo básico del libro es la divulgación de las aguas subterráneas existentes en el litoral mediterráneo andaluz, verdadero epicentro del desarrollo agrícola y turístico de Andalucía, donde el agua tiene un valor esencial en su desarrollo. El tratamiento del texto se ha intentado que sea lo más asequible posible, pensando especialmente en geólogos, ingenieros, docentes de ciencias naturales, gestores de aguas y, en general, en todas aquellas personas con un cierto interés por las aguas subterráneas.

Con esa finalidad, en cada acuífero se ha propuesto un itinerario que enlaza las paradas más representativas del mismo, todo ello realizado por los especialistas que firman los diferentes recorridos de campo. En algún caso, dado el evidente interés hidrogeológico, se han incluido visitas a acuíferos o puntos de agua localizados fuera de los sistemas considerados, como ha sido el caso de las fuentes de Marbella (de Beninar), embalses de La Concepción y de Rules, y los azudes y manantiales de Vélez-Benaudalla, entre otros.

El itinerario completo se describe para realizarlo en dirección este (desde Málaga a Almería), a través de la autovía A-7 (Málaga) y de la CN-340, que recorren todo el litoral mediterráneo andaluz. Para las penetraciones hacia el interior se utilizan otras carreteras nacionales o locales; sólo en casos excepcionales se recurre a pequeños desplazamientos a pie, allí donde otros medios de locomoción no han sido posibles.

Se ha intentado, dentro de las modestas posibilidades presupuestarias de la edición, ilustrarlo al máximo. Para cada acuífero se presenta una localización geográfica del itinerario propuesto, utilizando en todos los casos el mapa oficial de carreteras de Andalucía editado por la Junta de Andalucía (COPT, 2003); completan la descripción los apartados destinados a interés hidrogeológico y situación actual, síntesis hidrogeológica, y, por último, el tratamiento más detallado del itinerario con las paradas seleccionadas. Ello se complementa con abundantes esquemas y cortes hidrogeológicos, así como de fotografías panorámicas. La simbología empleada es la usual en representaciones hidrogeológicas.

ORGANIZACIÓN Y CUESTIONES PREVIAS

Como se ha comentado, el itinerario propuesto abarca desde Estepona (Málaga) hasta Cabo de Gata (Almería), en cuyo litoral se han diferenciado 14 sistemas acuíferos, la mayor parte de ellos detríticos, aunque no faltan también los carbonatados y los mixtos. En la figura 1 se presenta un esquema del litoral con la localización aproximada de los acuíferos considerados. A título meramente orientativo, el itinerario ha sido recorrido y sincronizado en tiempo para posibilitar su realización por días; en concreto, se ha dividido en cinco jornadas completas, para aquellos que prefieran ese sistema de visita. Se ha tenido en cuenta, dentro de lo posible, que las localidades de final de trayecto tuvieran las máximas posibilidades turísticas y de alojamiento; en concreto, estas son: Málaga, Almuñécar, Castell de Ferro (o alternativamente Motril), Almería y San José; en anexos se acompaña una relación de páginas web institucionales de dichas poblaciones, otras páginas útiles (turismo y medio ambiente, espacios protegidos...), así como los principales lugares de interés turístico de dichas poblaciones.

El plan de visita previsto para los diferentes días se expone a continuación (Fig. 1):

Primer día: Estepona - Málaga

- 1. Acuíferos de Marbella - Estepona
- 2. Acuíferos de S^a Blanca y S^a Mijas
- 3. Acuífero de Fuengirola

Segundo día: Málaga - Almuñécar

- 4. Acuífero del Bajo Guadalhorce
- 5. Acuífero de Vélez Málaga
- 6. Acuífero de las Alberquillas (Nerja)

Tercer día: Almuñécar - Castell de Ferro

- 7. Acuífero de Almuñécar
- 8. Acuífero de Motril-Salobreña
- 9. Acuíferos de Castell de Ferro y Carchuna

Cuarto día: Castell de Ferro - Almería

- 10. Acuíferos de Albuñol
- 11. Acuífero de Adra
- 12. Acuíferos del Campo de Dalías

Quinto día: Almería - San José

- 13. Acuíferos de Andarax
- 14 Acuífero del Campo de Níjar y aguas subterráneas de Cabo de Gata

MARCO FÍSICO

– *Marco geográfico, socioeconómico y climático*

El territorio contemplado en esta guía vierte sus aguas al Mediterráneo, formando parte de la Cuenca Mediterránea Andaluza, antigua Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE), organismo transferido recientemente a la Junta de Andalucía.

Mientras que en el sector litoral predominan las llanuras aluviales y deltáicas, si bien normalmente de escaso desarrollo, hacia el interior del continente existe una cadena montañosa paralela a la costa, caracterizada por relieves abruptos; estas montañas están integradas mayoritariamente por rocas carbonatadas pertenecientes a la Cordillera Bética, y más concretamente al Complejo Alpujarride; tampoco faltan las elevaciones constituidas por esquistos de la misma unidad geológica, en este caso de casi nulo interés hidrogeológico. De oeste a este encontramos las Sierras Blanca y de Mijas, Montes de Málaga, Sierras de Tejeda, Almirajara, los Guájares, Sierra de Lújar, La Contraviesa, Sierra de Gádor, Sierra Alhamilla y Sierra de Gata.

La densidad de población es alta en la franja litoral, disminuyendo drásticamente hacia el interior. Mientras que la media de Andalucía es del orden de 80 habitantes por km², en la zona litoral es del orden de 150 habitantes por km², superándose los 300 habitantes en la zona costera de Málaga (Costa del Sol).

La población asentada en el litoral tiene una fuerte componente estacional, incluso dentro de meses no estivales, como corresponde al turismo de sol y playa, y a una cada vez mayor tasa de extranjeros residentes. Considerando la población de hecho (INE, 2004), las localidades con mayor número de habitantes serían Málaga con 550.000 y Almería con 180.000 habitantes; a estas le seguirían Marbella, que roza los 120.000 habitantes, Torremolinos, Roquetas de Mar, Vélez-Málaga, El Ejido y Motril, en torno a 60.000 habitantes, Estepona, con cerca de 50.000 habitantes, y las localidades de Nerja y Almuñécar con poblaciones próximas a los 20.000 habitantes.

Como se ha comentado, el turismo es un factor socioeconómico de primera magnitud en el área de estudio, siendo la principal fuente de riqueza.

za y empleo del área, si bien en la parte oriental, el modelo agrícola de hortofruticultura intensiva reporta mayores ingresos. El turismo surge de forma más evidente a partir de la década de los 60 del siglo pasado, desarrollándose a pasos agigantados en los últimos años, con multitud de instalaciones hoteleras, apartamentos, campings, campos de golf, áreas de servicio, etc. Se concentra, sobretodo, en el área costera, y especialmente en la provincia de Málaga, donde se observa un incremento vertiginoso, que ha convertido ese tramo litoral en un lugar privilegiado del turismo europeo. En los meses de verano llega a triplicarse la población de estas zonas, lo que conlleva problemas de servicios a los ayuntamientos de la zona, y, en especial, dificultades de abastecimiento de agua, que es consumida en altas dotaciones debido a las características climáticas y de servicios del sector (zonas ajardinadas, piscinas, campos de golf...).

Como se había comentado, también juega un papel económico dominante la agricultura bajo plástico, y de especies tropicales y de primor, especialmente en el sector oriental del litoral mediterráneo andaluz, al amparo del idóneo clima existente y de las relativas disponibilidades de agua. En concreto, se trata, sobre todo, de técnicas de cultivos de horticultura forzados con cubierta de plástico (invernaderos, microtúneles, acolchados, etc.), que están proliferando espectacularmente en la provincia de Almería, así como de cultivos dedicados a la fruticultura intensiva (cítricos, chirimoya, aguacate, mango, etc.), principalmente en las localidades granadinas de Motril, Salobreña y Almuñécar.

La pluviometría del litoral visitado en el itinerario es extremadamente variable de unos lugares a otros (Fig. 2); en general, se observa, de oeste a este, la existencia de un acusado descenso pluviométrico, que varía de los 1.000 mm/año en la provincia de Málaga a menos de 300 mm/año en la de Almería (ITGE-JA, 1998). Esto es debido a que los principales mecanismos de precipitación corresponden a los frentes atlánticos, que recorren el litoral desde el golfo de Cádiz hacia Almería.

Otra variación de las precipitaciones es la impuesta por la altitud y orientación de las cadenas montañosas prelitorales (efecto barrera), de forma que las cabeceras de las diferentes cuencas reciben aportaciones mayores, así como las orientaciones meridionales. El efecto de la humedad y de las precipitaciones ocultas (rocío e intercepción) son notoriamente superiores en las zonas expuestas a los frentes mediterráneos, lo que se traduce en una mayor disponibilidad de agua y una menor evapotranspiración, con cubiertas vegetales bien desarrolladas, especialmente en la mitad occidental del litoral estudiado.

Las temperaturas medias son del orden de los 19 °C, con una gran modulación intraanual, debida a la cercanía del mar. La enorme masa de agua del mar hace de «termotasto», ejerciendo su acción a través de factores tales como el régimen de brisas, la humedad y las corrientes marinas.

La conjunción de todos estos factores hace que en las zonas costeras, y en las próximas a éstas, se disfrute de inviernos y veranos más suaves que en las zonas de interior.

El clima varía de subtropical cálido y húmedo de la costa de Málaga y parte de Granada, al semiárido, cálido y seco, de la costa oriental de Granada y de Almería; las montañas prelitorales gozan de temperaturas más frías.

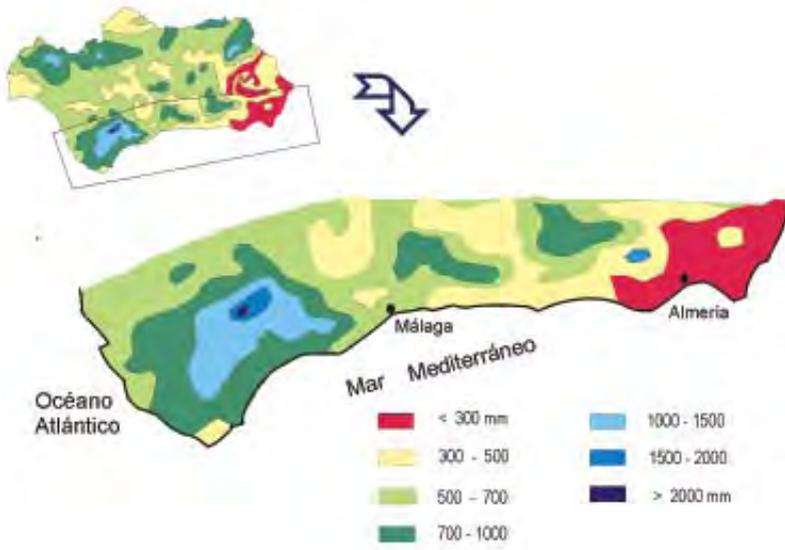


Figura 2. Precipitaciones medias anuales de Andalucía para el periodo 1951-1992 (a partir de ITGE-JA, 1998)

SÍNTESIS GEOLÓGICA

El territorio estudiado se localiza, desde el punto de vista geológico, en el interior de las Cordilleras Béticas (Figs. 3, 4 y 5), y en él están representados dos grandes conjuntos de materiales; por una parte los detríticos postorogénicos del relleno neógeno-cuaternario de depresiones y franjas costeras, y por otro, los materiales preorogénicos carbonatados y esquistosos pertenecientes a la Zona Interna de las Cordilleras Béticas (Complejo Alpujárride).

En la Zona Interna se distinguen tres grandes unidades superpuestas, que de abajo a arriba corresponden a los complejos Nevado-filábride, Alpujárride y Maláguide (Fig. 3).

El Complejo Nevado-filábride está formado, a su vez, por varias unidades superpuestas, cuya característica común, desde el punto de vista litoestratigráfico, es estar constituidas por formaciones metamórficas, en su mayor parte pertenecientes al Paleozoico, si bien los términos más altos de la serie son del Trías. Estos materiales afloran en el sector central del macizo de Sierra Nevada y en la Sierra de los Filabres (de las que toma su nombre), constituyendo el núcleo del edificio Bético (Fig. 6). Los materiales pertenecientes a este complejo geológico quedan más al norte del territorio contemplado en este itinerario.

El Complejo Alpujárride se encuentra superpuesto tectónicamente al anterior, y está constituido por varias unidades, estructuradas también en mantos de corrimiento superpuestos. Su presencia en la comarca de la Alpujarra (y en otras muchas) le valió el nombre con el que se conoce esta unidad geológica. Desde el punto de vista litoestratigráfico, las unidades alpujárrides presentan, como característica común, un conjunto basal de micaesquistos, filitas y cuarcitas, en su mayor parte paleozoicas, y otro superior, carbonatado, de edad triásica. Dentro de este conjunto se diferencian varios mantos que se mencionan en algunos apartados del presente trabajo. Algunos de ellos son el de Lújar, Cástaras, Víboras, Alcázar, Trevenque, Murtas, Adra, La Herradura, las Guájaras, etc (Fig. 7). El elevado número de mantos de corrimiento individualizados en el Complejo Alpujárride y la tectonización interna que presentan, originan una elevada compartimentación en sistemas hidrogeológicos diferentes, de complejas interrelaciones y geometría. Todos los acuíferos carbonatados contemplados en este itinerario, o limítrofes al mismo, pertenecen a este Complejo (sierras Blanca, de Mijas, Almirajara-Tejeda-Guájares, Lújar, Gádor y Alhamilla).

Por último, el Complejo Maláguide se superpone a su vez a los anteriores, y está constituido por un basamento paleozoico y una cobertera mesozoica y terciaria (Fig. 8). Aunque estos materiales están muy tectonizados, no muestran evidencias de metamorfismo, a excepción de su parte basal. Los extensos afloramientos existentes en las proximidades de Málaga le dieron nombre al Complejo. El interés hidrogeológico de sus materiales es escaso, y no existe ningún acuífero del itinerario ligado a los mismos.

Las formaciones neógeno-cuaternarias están compuestas por depósitos detríticos, acumulados en áreas deprimidas del conjunto Bético; en general, corresponden a depresiones tectónicas, y franjas litorales y aluviales de los ríos y ramblas que desembocan en el sector costero. Los materiales sedimentarios de acarreo proceden de la desmantelación de los relieves preexistentes, sobre los que se asientan, los cuales constituyen en todos los casos sus bordes y substrato.

Dentro de estas formaciones postorogénicas, hay que destacar, como una peculiaridad, la presencia de importantes afloramientos de rocas volcánicas ácidas en el sector de Cabo de Gata, en la provincia de Almería.

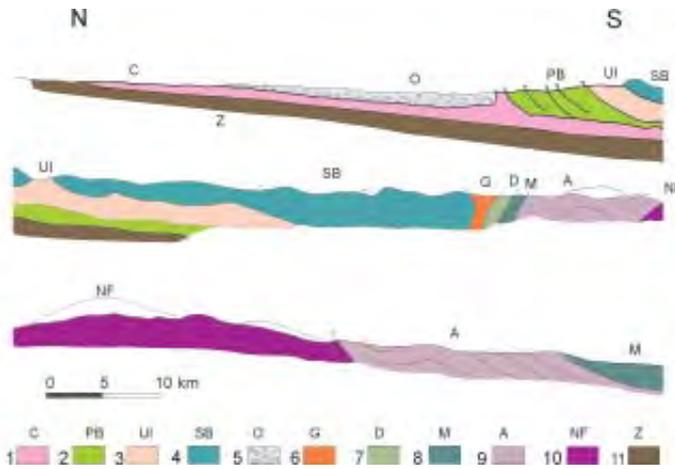


Figura 3. Esquema de la disposición general de las grandes unidades estructurales de la Cordillera Bética, de norte a sur. 1: cobertera autóctona en la antefosa y borde de las Zonas Externas; 2: Prebético; 3: unidades intermedias; 4: Subbético; 5: olistostromas y unidades alóctonas de origen subbético o intermedio en la antefosa; 6: unidades alóctonas del Campo de Gibraltar o afines; 7: Dorsal Bética; 8: Complejo Maláguide; 9: Complejo Alpujárride; 10: Complejo Nevado-filábride; 11: zócalo herciniano en el antepaís (FONTBOTÉ y VERA, 1983)



En la imagen se pueden distinguir tres grandes conjuntos de materiales geológicos del litoral mediterráneo andaluz. En primer término, materiales detríticos neógeno-cuaternarios, pertenecientes a la depresión del Campo de Dalías; en segundo plano, materiales carbonatados alpujárrides, en este caso de las sierras de Gádor y de Turón; al fondo, con nieve, relieves esquistas del núcleo de Sierra Nevada, perteneciente al Complejo Nevado-filábride (foto cortesía de Agustín Martín Algarra)

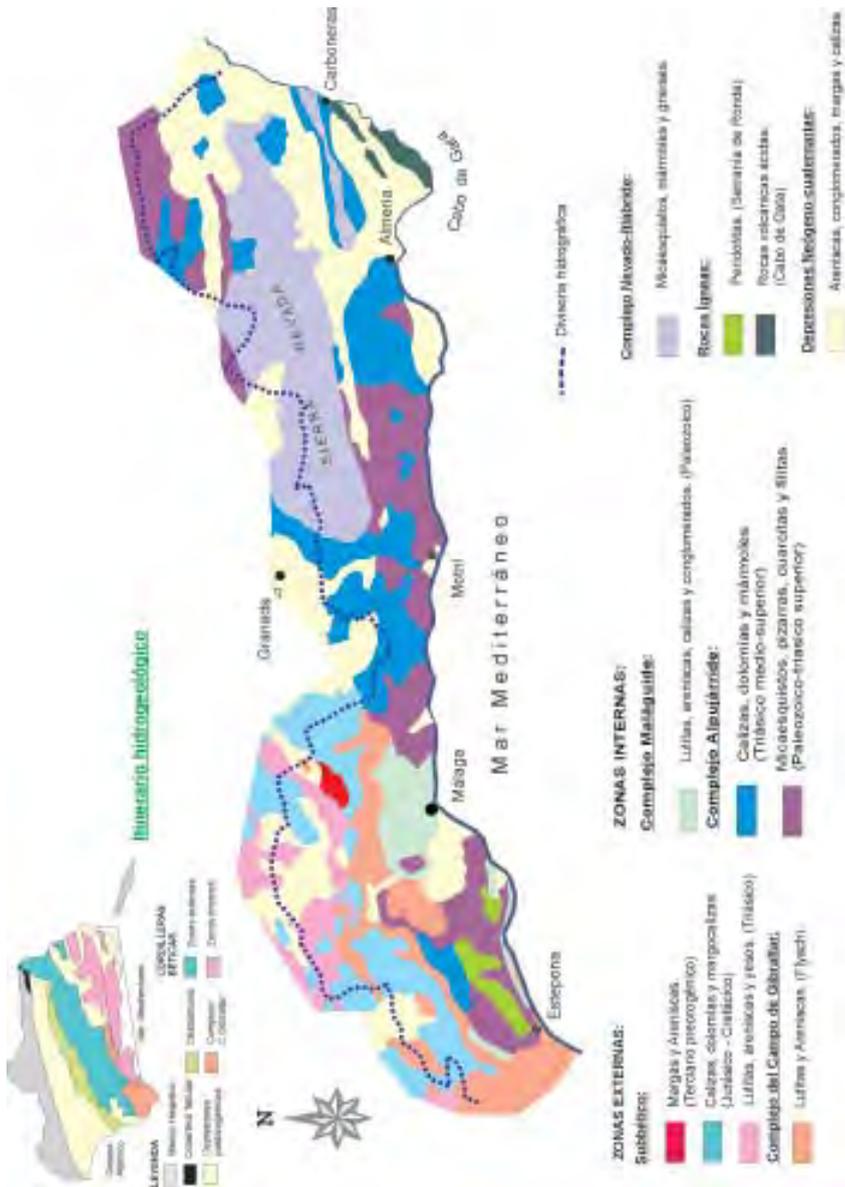


Figura 4. Esquema geológico del litoral mediterráneo de Andalucía (a partir de ITGE-JA, 1998)

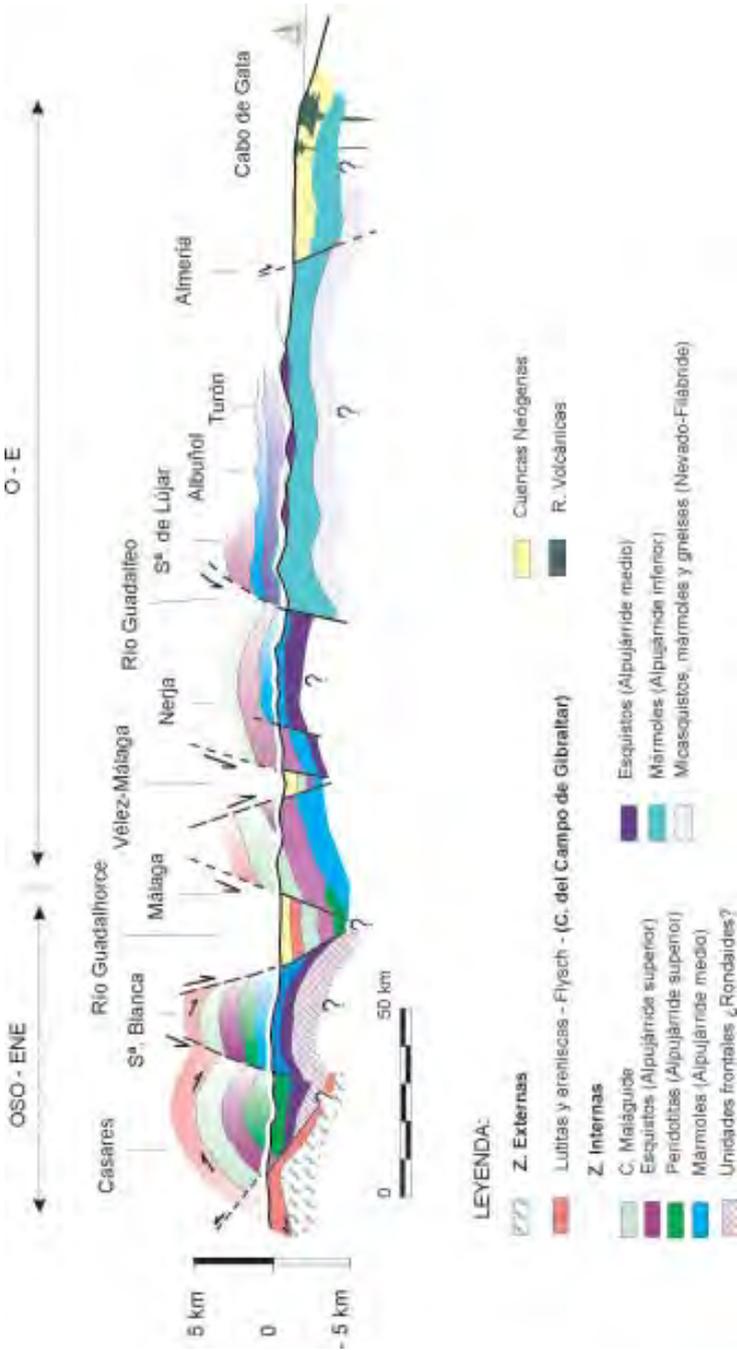


Figura 5. Corte tectónico esquemático de la Cordillera Bética subparalelo a la costa, desde Casares a Cabo de Gata (según MARTIN ALGARRA)

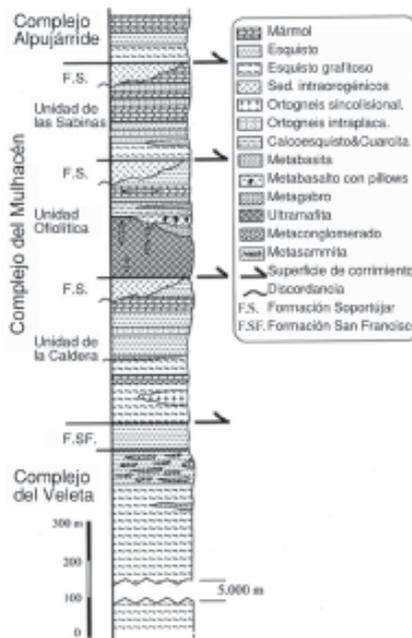


Figura 6. Serie estratigráfica sintetizada del Complejo Nevado-filábride (tomada de PUGA, en VERA, 2004)

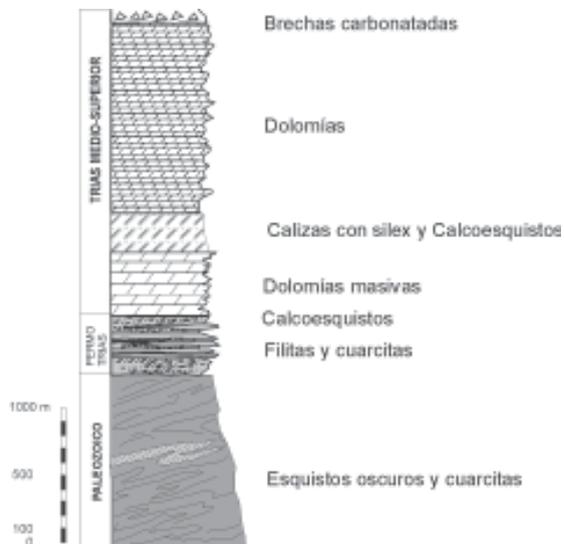


Figura 7. Serie estratigráfica simplificada del Complejo Alpujárride (a partir de VERA, 2004)



Figura 8. Serie estratigráfica simplificada del Complejo Maláguide (a partir de VERA, 2004)

SÍNTEISIS HIDROGEOLÓGICA

El itinerario propuesto transcurre en toda su extensión por la Cuenca Mediterránea Andaluza, a lo largo de más de 350 km, atravesando multitud de cuencas independientes, que vierten al mar Mediterráneo (Figs. 1 y 9). En general, se trata de pequeñas cuencas, si bien existen cuatro de mayor extensión, que serían las de los ríos Guadalhorce, Guadalfeo, Adra y Andarax.

La aportación total de esta Demarcación se ha evaluado en 2.500 hm³/año, de los cuales sólo se consideran disponibles (regulados) 1.000 hm³/año; de éstos, 560 hm³/año corresponden a recursos superficiales, mientras que el resto son subterráneos (ITGE-JA, 1998). La distribución espacial de estos recursos es heterogénea, de forma que hay algunos excedentes en la parte occidental, la más húmeda como se comentó anteriormente, mientras que el déficit de la parte oriental es muy severo (provincia de Almería).

El consumo de agua para diferentes usos (abastecimiento, regadío e industria) se ha estimado en 1.150 hm³/año (ITGE-JA, 1998), lo que equivale a admitir que la cuenca es deficitaria en su conjunto, con un déficit medio anual en torno a 150 hm³, que son extraídos de las reservas de los diferentes sistemas

Entre los acuíferos litorales considerados, podemos establecer tres tipos según la litología predominante: detríticos, carbonatados y mix-

tos. Aparte de la litología, existen también grandes diferencias hidrogeológicas y de recursos entre ellos; en general, los acuíferos detríticos costeros poseen unos recursos propios muy reducidos, siendo la mayor parte de sus aportaciones transferidas desde cauces de superficie, retornos de riegos y por entradas desde acuíferos carbonatados limítrofes, aspectos de gran importancia en la planificación hidrológica de la cuenca.

Los acuíferos detríticos neógeno-cuaternarios jalonan todo el litoral, destacando los instaurados en las depresiones aluviales y tectónicas de mayor entidad, como son las del Bajo Guadalhorce, Motril-Salobreña y Campo de Dalías.

En general, constituyen acuíferos libres, si bien a escala más de detalle son multicapa, por el confinamiento hidráulico ejercido por niveles arcillosos, especialmente los que presentan facies deltáicas. Las salidas se producen principalmente por bombeos, si bien en algunos casos existen salidas notables de aguas al mar, mientras que los manantiales son excepcionales.

Los acuíferos carbonatados considerados en este itinerario pertenecen al Complejo Alpujárride; de ellos, sólo entran en contacto con el mar el sector meridional del sistema acuífero de Sierra Tejada-Almijara-Guájares, (acuífero de las Alberquillas), el sector de Calahonda-Castell de Ferro y el borde oriental de la vertiente meridional de la Sierra de Gádor.

Entre los acuíferos carbonatados relacionados con acuíferos detríticos costeros, pero sin relación directa con el mar, cabe destacar los siguientes: sierras Blanca y de Mijas, que se descargan hacia los acuíferos detríticos de Marbella-Estepona y del Bajo Guadalhorce; carbonatado de los Guájares, en relación con el aluvial del río Verde de Almuñécar; Sierra de Lújar y Sierra de Escalate-Espartinas, en relación con el aluvial de Motril-Salobreña; «ventana tectónica» carbonatada de Albuñol, en relación con el aluvial del mismo nombre; «ventana tectónica» carbonatada de Turón-Pañarrodada, en relación con el río y acuífero detrítico de Adra; y borde meridional de Sierra de Gádor, relacionado directamente con los acuíferos del Campo de Dalías.

Los recursos propios de los acuíferos carbonatados de cabecera corresponden casi exclusivamente a infiltración de aguas de precipitación. Las salidas mayoritarias tienen lugar a través de manantiales, siendo de menor entidad, aún, las extracciones por captaciones (sondeos y galerías); en algún caso, como ya se ha comentado, existen también descargas ocultas al mar. Una parte importante de la regulación se obtiene mediante embalses y azudes de derivación, de mayor o menor entidad, asentados sobre los principales ríos del área (ríos Verde de Marbella, Vélez, Guadalfeo y Adra).

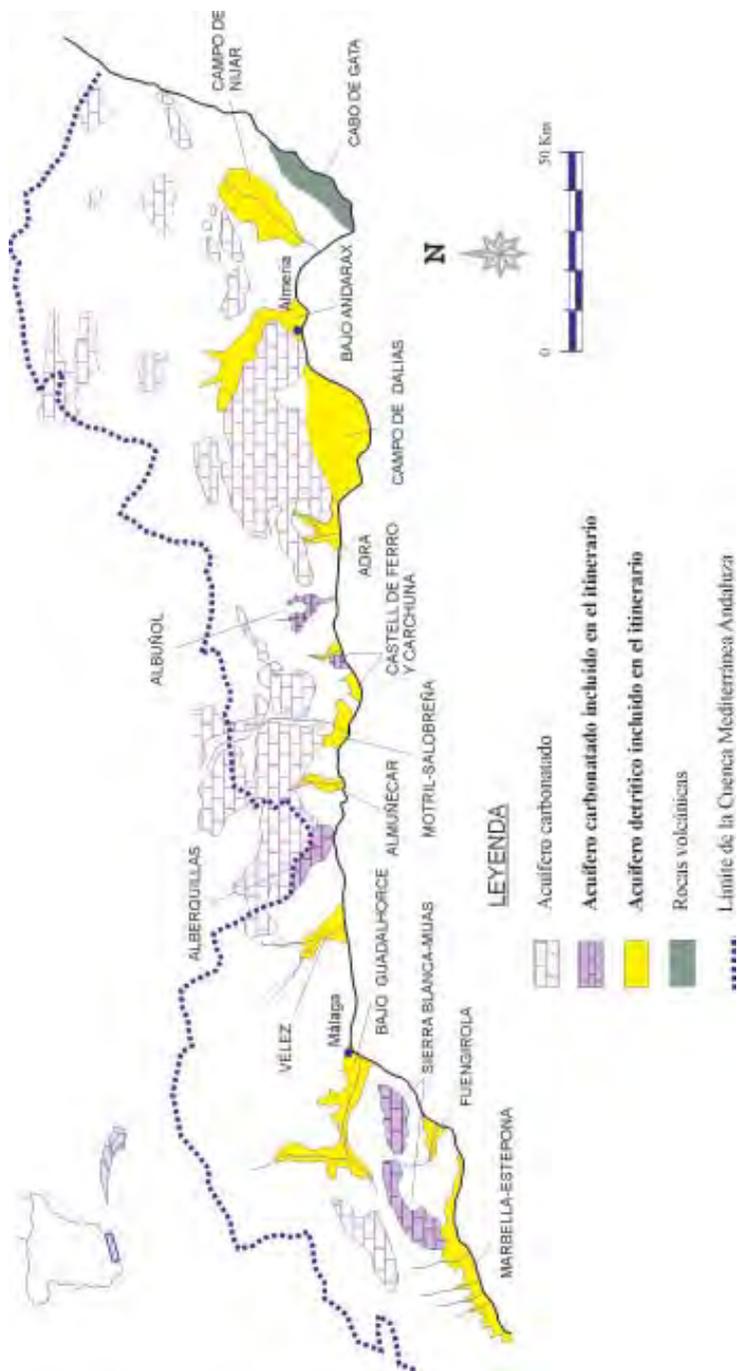


Figura 9. Esquema de los principales acuíferos incluidos en el itinerario

Los acuíferos mixtos se caracterizan por poseer bordes y substratos carbonatados, en conexión hídrica con los materiales detríticos que constituyen el cuerpo acuífero principal y que recubren a los anteriores; el de mayor entidad de los de este tipo es el acuífero del Campo de Dalías.

Los niveles de explotación de los acuíferos considerados en este itinerario son muy variables en el espacio y en el tiempo, como sucede en general con todos los acuíferos del arco mediterráneo. En el momento actual, y hablando siempre a nivel general (sin entrar en aspectos de detalle), podemos hacer la siguiente clasificación de acuíferos por su nivel de explotación:

- Acuíferos excedentarios, entre los que destaca el acuífero detrítico de Motril-Salobreña, el carbonatado de las alberquillas y el detrítico de Adra.
- Acuíferos sobreexplotados, como los del Campo de Dalías y Campo de Níjar.
- Acuíferos con sobreexplotaciones temporales, acuíferos de Vélez-Málaga, Bajo Guadalhorce y detrítico de Almuñécar.
- Acuíferos con sectores sobreexplotados, como pueden ser los de Marbella-Estepona, detrítico de Fuengirola, carbonatado de Sierra Blanca- Sierra Mijas y detrítico del Bajo Andarax.



Figura 10. Estado actual (1995-2005) de la intrusión marina en los acuíferos estudiados en el itinerario (a partir de ITGE-JA, 1998 y autores de este libro)

El mayor riesgo de la sobreexplotación de acuíferos litorales es la salinización de los mismos por intrusión marina. La entidad espacial y temporal de esta y su grado de reversibilidad es muy diferente para los acuíferos estudiados (Fig. 10 y tabla 1).

En la provincia de Málaga se ha detectado intrusión marina puntual o local en los acuíferos detríticos de Marbella- Estepona, Fuengirola y detrítico de Vélez-Málaga, mientras que en el Bajo Guadalhorce la intrusión es de carácter zonal. No presentan indicios de sobreexplotación los acuíferos carbonatados de Sierra Blanca-Sierra Mijas y el de las Alberquillas (Sierra Tejeda – Almirajara),

En la provincia de Granada se ha detectado intrusión marina generalizada en el acuífero detrítico de Almuñécar, mientras que los de Castell de Ferro y Carchuna presentan intrusión de tipo zonal. No hay indicios de intrusión marina en el acuífero detrítico de Motril-Salobreña.

En la provincia de Almería se ha detectado intrusión marina generalizada en el Campo de Dalías, de carácter local en el Bajo Andarax, mientras que no presentan intrusión los acuíferos detríticos de Albuñol, Adra y Campo de Níjar (este último por no estar en contacto con el mar, si bien presenta una severa sobreexplotación).

Acuíferos de Málaga:	Estado de la intrusión
1. Detríticos de Marbella - Estepona	Intrusión local o puntual
2. Carbonatado de Sierra Blanca-Mijas	Sin intrusión
3. Detrítico de Fuengirola	Intrusión local o puntual
4. Detrítico del Bajo Guadalhorce	Intrusión zonal
5. Detrítico de Vélez-Málaga	Intrusión local o puntual
6. Carbonatado de las Alberquillas (Nerja)	Sin intrusión

Acuíferos de Granada:	Estado de la intrusión
7. Detrítico de Almuñécar	Intrusión generalizada
8. Detrítico de Motril-Salobreña	Sin intrusión
9. Detrítico-carbonatado Castell de Ferro	Intrusión zonal
10. Detrítico-carbonatado de Albuñol	Sin intrusión

Acuíferos de Almería:	Estado de la intrusión
11. Detrítico de Adra	Sin intrusión
12. Detrítico del Campo de Dalías	Intrusión generalizada
13. Detrítico del Bajo Andarax	Intrusión local o puntual
14. Detrítico del Campo de Níjar	Sin intrusión
Aguas subterráneas del Cabo de Gata	Sin intrusión

Tabla 1. Estado actual de la intrusión marina en los acuíferos presentados en el itinerario

La lucha contra la sobreexplotación de estos acuíferos litorales pasa por el incremento de los recursos y/o la disminución de su explotación; las medidas más usuales para conseguir ello pasan por realizar trasvases desde sistemas excedentarios más o menos limítrofes, reutilizar aguas residuales o desalar aguas de mar, aparte de la cada vez más necesaria adopción de medidas de ahorro y eficiencia de las aguas servidas.

También se consideran de importancia las acciones de recarga en los cauces de los ríos que los atraviesan, como pueden ser en las graveras o mediante la construcción de balsas de percolación en los tramos más permeables (CARRASCO y GUZMÁN DEL PINO, 1988). No en vano, los ríos y cauces de la vertiente mediterránea tienen un bajo índice de regulación, debido al carácter esporádico y torrencial de las aportaciones, unido a la dificultad técnica de realizar obras de regulación superficial.

En la tabla 2 se resumen las principales cifras del balance de los acuíferos recorridos en el itinerario previsto, muchas de ellas recogidas en el Atlas hidrogeológico de Andalucía (ITGE-JA, 1998), y otras aportadas directamente por los autores de este libro:

◆ **Acuíferos costeros de Málaga:**

ACUÍFEROS	SUPERFICIE (km ²)	ENTRADAS (hm ³ /año)	EXPLOTACIÓN (hm ³ /año)
1. Detríticos de Marbella-Estepona	80	33-45	30
2. S ^a Blanca-S ^a Mijas	200	57	62
3. Detrítico de Fuengirola	20	10	5
4. Bajo Guadalhorce	115	55	30
5. Detrítico de Vélez-Málaga	30	33	35
6. Las Alberquillas (Nerja)	60	24	14

◆ **Acuíferos costeros de Granada:**

ACUÍFEROS	SUPERFICIE (km ²)	ENTRADAS (hm ³ /año)	EXPLOTACIÓN (hm ³ /año)
7. Detrítico de Almuñécar	5	11-17	9
8. Detrítico de Motril-Salobreña	42	34	8
9. Detríticos de Castell de Ferro y Carchuna	4	3,5	3
	5	2,5	0,5
10. Acuíferos de Albuñol	23	9	4

◆ **Acuíferos costeros de Almería:**

ACUÍFEROS	SUPERFICIE (km ²)	ENTRADAS (hm ³ /año)	EXPLOTACIÓN (hm ³ /año)
11. Detrítico de Adra	22	25	16
12. Campo de Dalías	330	100	130
13. Bajo Andarax	250	17-23	16-17
14. Campo de Nijar y Cabo de Gata	157	11-14	16
		-	-

Tabla 2. Estado actual del balance de los acuíferos incluidos en el itinerario (según ITGE-JA, 1998 y autores de este libro)

ITINERARIOS
POR LOS ACUÍFEROS DEL LITORAL
MEDITERRÁNEO ANDALUZ

CAPÍTULO PRIMERO ACUÍFEROS DE MARBELLA-ESTEPEONA

L.SÁNCHEZ-DÍAZ¹ y A.CASTILLO²

¹Universidad de Granada; ²CSIC y Universidad de Granada



*Figura 11. Mapa de situación del itinerario propuesto.
La foto superior muestra la llanura litoral acuifera que se extiende al
suroeste de Marbella, en dirección a Estepona
(foto cedida por Distribuidora Editorial Costa del Sol, S.A.)*

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Los acuíferos que aquí se tratan se asientan en la franja litoral, de 40 km de longitud, comprendida entre las localidades de Estepona, al oeste, y Punta Ladrones, al este, en el extremo occidental de la Costa del Sol de Málaga. Dicha franja limita al noroeste con relieves de Sierra Bermeja, al noreste con los de Sierra Blanca y al sur con el mar Mediterráneo.

Los cauces que, desde dichos relieves, atraviesan perpendicularmente el sector son numerosos y de régimen fuertemente irregular; entre ellos destacan, de oeste a este, los ríos Padrón, Castor, Valerín, Guadalmanza, Guadalmina, Guadaiza, Verde y Real.

El sector está atravesado longitudinalmente por la A-7 (CN-340), y en él destacan las poblaciones de Estepona, San Pedro de Alcántara y Marbella (Fig. 11).

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Los acuíferos objeto de estudio se localizan en un área de fortísima demanda urbana, en pleno corazón de la Costa del Sol Occidental, donde la población actualmente censada es de 500.000 habitantes, mientras que las puntas estacionales superan 1.400.000 habitantes; además del consumo urbano, el sector se caracteriza por una extraordinaria abundancia de campos de golf, y de zonas residenciales con jardines y piscinas, todo ello de altos consumos de agua. Por ese motivo, las demandas estivales están al límite de los recursos actualmente disponibles, generando problemas puntuales de sobreexplotación, con procesos de intrusión marina. Afortunadamente, la recarga de los acuíferos ante las aportaciones invernales es muy favorable, produciéndose rápidas extrusiones (JAÉN PERAL et al, 2003). La existencia de una desaladora (Marbella), con capacidad para aportar hasta 20 hm³/año, aliviará, a medio plazo, la situación en periodos de escasez de recursos. La reutilización de aguas residuales depuradas en el riego de campos de golf y jardines es otra de las actuaciones que se llevan a cabo en la zona, en la que se emplean actualmente del orden de 3 hm³/año.

El abastecimiento del área, y especialmente de las localidades de Marbella y Estepona, procedía antiguamente de recursos subterráneos, tanto de pozos y sondeos, como de manantiales próximos. No obstante, el incremento de la demanda estival hizo necesaria la regulación de las aguas superficiales, a través de la construcción del embalse de La Concepción, que entró en funcionamiento en el año 1972.

Actualmente, las aguas subterráneas representan entre la cuarta y la quinta parte de la demanda urbana servida, límite para mantener la explotación de los acuíferos de forma sostenible.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

Los materiales acuíferos están integrados por formaciones detríticas pliocuaternarias, las cuales se extienden por la franja litoral entre Marbella y Estepona, ocupando una extensión de 80 km². El Plioceno está integrado por una alternancia de conglomerados, arcillas y arenas; el tramo más productivo es el basal, compuesto por conglomerados, los cuales se encuentran generalmente confinados, entre los 60 y 120 m de profundidad, por niveles arcillosos. El Cuaternario lo integran arenas de playa, conglomerados de pie de monte, así como arenas y gravas aluviales del relleno de los cauces de los ríos Padrón, Castor, Valerín, Guadalmanza, Guadalmina, Guadaiza, Verde y Real (Fig.12).

Los materiales pliocuaternarios recubren a un substrato Paleozoico, perteneciente a los complejos Maláguide y Alpujárride, e integrados, mayoritariamente, por esquistos y filitas de baja permeabilidad. En sectores más aislados, el substrato lo constituyen series flyschoides del Campo de Gibraltar, tales como areniscas, calizas tableadas, conglomerados y arcillas. De forma excepcional, el substrato también está compuesto por rocas ultrabásicas (peridotitas) de permeabilidad muy baja.

Los materiales acuíferos pliocenos y cuaternarios están conectados hidráulicamente entre sí, produciéndose intercambio de flujo en uno u otro sentido dependiendo de la época y de las circunstancias concretas de cada sector (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988). La excesiva longitud de la franja pliocuaternaria (40 km) en relación con la anchura promedio de la misma (2 km) y con su moderado espesor saturado, produce fenómenos de compartimentación hidráulica a efectos de explotación y gestión, razón por la cual se alude a varios sectores acuíferos. Entre ellos habría que mencionar, de oeste a este, el aluvial del Padrón, San Pedro, aluvial del Guadalmina, Aloha-Puerto Banús, aluvial del río Verde, Señorío, y el acuífero de Marbella núcleo y sector oriental.

La alimentación de estos acuíferos se realiza, sobre todo, a partir de la infiltración desde cauces de superficie, lo que supone una aportación comprendida entre 21 y 26 hm³/año; la infiltración de la precipitación supone una partida de 8 a 14 hm³/año; por último, el retorno de regadío es del orden de 4 a 5 hm³/año. Las entradas ocultas se consideran prácticamente despreciables, salvo, quizás, en el borde norte de la población de Marbella, a partir del acuífero carbonatado de Sierra Blanca. Así pues, los recursos estimados son del orden de 33 a 45 hm³/año (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988).

La descarga se realiza fundamentalmente a través de bombeos para satisfacer la demanda urbana (también de zonas verdes y campos de golf), en una cuantía próxima, en la actualidad, a 30 hm³/año, de los que el 60 % procederían de niveles cuaternarios y el resto de materiales pliocenos. El

resto serían salidas ocultas al mar, concentradas en épocas especialmente húmedas. Los materiales acuíferos aluviales son los que presentan mejores rendimientos, debido a su mayor transmisividad y a la disponibilidad de aportes procedentes de la infiltración desde los cauces que los atraviesan.

Así pues, aunque, a nivel de balance, el acuífero presenta cierto equilibrio, incluso con una moderada descarga hacia el mar, la proliferación de captaciones está causando descensos de niveles piezométricos, especialmente preocupantes en explotaciones concentradas junto a la línea de costa, sobre todo si se trata de sectores con escasa recarga (Guadalmina, Guadaiza, Verde y sector oriental de Marbella).

Los piezómetros no influidos por explotaciones presentan oscilaciones estacionales debidas al régimen pluviométrico normal, comprendidas entre 6 y 8 m en los sectores más alejados del mar, e inferiores a 1 m en la franja costera (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988).

La facies hidroquímica predominante es bicarbonatada cálcica o magnésica, en relación directa con la alimentación dominante a través de la infiltración de aguas superficiales procedentes de macizos carbonatados situados al norte. En algunos puntos de la desembocadura de los ríos Verde, Guadaiza y Guadalmina se detectan aguas cloruradas sódicas, en concordancia con los procesos de salinización comentados anteriormente.



Figura 12. Esquema hidrogeológico de los acuíferos de Marbella - Estepona (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988)

PARADA 1. SONDEO DE ABASTECIMIENTO A ESTEPONA

La parada se localiza en la margen derecha del río Padrón, en el pozo denominado Padrón Alto. Para llegar hasta él, hay que tomar la salida de la autovía que hay pasado el puente sobre el río Padrón, en dirección a la "escuela de arte ecuestre". Transcurridos unos 3 km, se toma un carril a mano izquierda que cruza el río, y que a 300 m termina junto al pozo en cuestión.

Según el Servicio Municipal de Aguas de Estepona, del orden del 80-85% de las aguas de abastecimiento proceden del embalse de La Concepción (parada 5), mientras que el resto son aguas subterráneas procedentes

Itinerario propuesto:

- ❖ **Parada 1.** Sondeo de abastecimiento a Estepona de Sierra Bermeja y de captaciones localizadas en los aluviales de los ríos Padrón, Monterroso y Morales
- ❖ **Parada 2.** Desembocadura del río Verde
- ❖ **Parada 3.** Planta desaladora de la Costa del Sol Occidental (Marbella)
- ❖ **Parada 4.** Recarga ptuición que el acuífero de Marbella localizada en el aluvial del río Padrón, y es una de las más importantes en el abastecimiento a Estepona. Consta de un pozo colector situado en la margen derecha del río, conectado con una galería trans-

Otras paradas:

- ❖ **Parada 5.** Embalse de La Concepción longitud de 38,5 m, y, esta a su vez, con dos galerías longitudinales, de 25 m cada una. En los meses de verano funciona de forma intermitente, en función del menor caudal circulante por el aluvial, mientras que el resto del año lo hace de forma continua.

PARADA 2. DESEMBOCADURA DEL RÍO VERDE

La parada se sitúa en la margen derecha del río Verde de Marbella, en su desembocadura, junto al Hotel Meliá Marbella.

En dicha zona se ha formado un pequeño estuario, debido a que en condiciones normales el nivel piezométrico llega a alcanzar la superficie topográfica a unos 500 m de la línea de costa. Se trata de una zona de mezcla de agua de mar y dulce que se produce durante las mareas y se acentúa con los temporales. El agua de este estuario presenta conductividades comprendidas entre 10.000 y 30.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En la proximidad de esta parada se encuentra el edificio de bombeo de agua de mar de la desaladora de Marbella (parada 3), así como los primitivos sondeos con los que se intentó dotar de caudal a la planta, hoy abandonados.

Tradicionalmente, el aluvial del río Verde se ha venido explotando de forma sistemática en función de la demanda. Durante la sequía acaecida entre 1992-95, la escasez de agua en el embalse de La Concepción obligó a mantener los bombeos a fin de garantizar el suministro de agua para la población, lo que originó graves procesos de intrusión marina.

A partir del año 1997, la empresa concesionaria del Servicio Municipal de Aguas de Marbella (AQUAGEST SUR, S.A.) adoptó un modelo de explotación más racional, basado en criterios hidrogeológicos, gracias a los cuales se ha conseguido incrementar el volumen de recursos extraídos sin inducir procesos de salinización.

La modulación constante de los caudales de bombeo en función de las posibilidades del acuífero (a través de controles de nivel y de conductividad) ha resultado ser un método eficaz contra la intrusión marina, garantizando la sostenibilidad de la explotación. En el momento que se produce un aumento significativo de la conductividad eléctrica y/o los niveles caen hasta 1 m por encima del nivel del mar, se procede a la reducción del volumen de extracción hasta la incorporación de nuevos aportes al acuífero.

La respuesta del acuífero a este sistema de explotación ha sido muy favorable. Como ejemplo, baste señalar que la explotación en el año 2002 ha llegado a superar en un 50% los volúmenes captados en 1998, aún cuando la pluviometría fue inferior en un 45%. La conductividad del agua bombeada se mantuvo entre 600 y 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig 13).

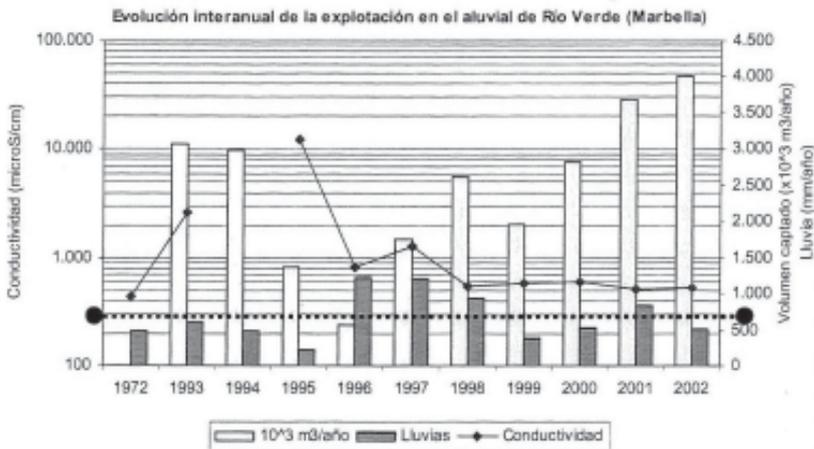


Figura 13. Evolución interanual de la explotación y de la conductividad en el aluvial del río Verde, junto al régimen de lluvias



Captación de abastecimiento a Estepona (pozo Padrán Alto). En el cauce del río puede observarse parte de la galería transversal de captación y la escollera de retención de aguas (parada 1)



Desembocadura del río Verde de Marbella (parada 2)

PARADA 3. PLANTA DESALADORA DE LA COSTA DEL SOL OCCIDENTAL (MARBELLA)



Vista general del interior de la planta desaladora

Para acceder a la planta desaladora es necesario tomar el desvío de la A-7 (CN-340) indicado como "Istán y Nagüeles". La planta se encuentra en la margen izquierda del río Verde, muy cerca del citado cruce. Para visitarla se deberá contactar previamente con la empresa responsable (ACOSOL, S.A).

La planta desaladora tiene como área de influencia la Costa del Sol Occidental, desde las poblaciones de Torremolinos hasta Manilva. Se trata de una de las mayores plantas construidas para abastecimiento urbano en Europa. Al respecto, nuestro país ocupa el quinto lugar del mundo en cuanto a número de plantas en funcionamiento y el octavo por volumen de producción de agua desalada.

La desaladora se construyó para garantizar el suministro urbano en época de sequía, tras las restricciones sufridas entre los años 1992-95. No obstante, el rápido aumento de la población es muy probable que, a falta de nuevos recursos, sitúe a esta planta como un elemento rutinario más de la red de distribución de recursos del sistema del embalse de La Concepción, sobre todo en los meses estivales.

El agua que se utiliza para la desalación se toma directamente del mar a través de una torreta de captación sumergida a 10 m de profundidad y situada a 500 m de la línea de costa. En un principio, se planificó una batería de sondeos en el aluvial del río Verde, junto a la desembocadura; con ello se pretendía captar agua sin turbidez, de mejor calidad para la

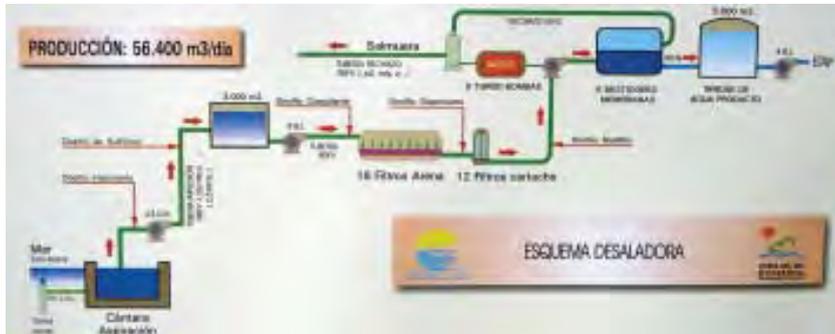


Figura 14. Proceso de desalación seguido en la planta de Marbella (parada 3), (esquema cedido por ACOSOL, S.A.). (A) Sala de bombeo de agua de mar. (4 bombas con capacidad para impulsar 500 l/s cada una). (B) Filtros de arena. (C) Bastidores de membranas y (D) Tanque de agua desalada, lista para su envío a la ETAP

desalación, pero los caudales bombeados fueron insuficientes, posiblemente por un mal diseño y/o ejecución de la citada batería de sondeos.

El agua de mar llega por gravedad al edificio y sala de bombeo (Fig.14A), junto a la desembocadura del río Verde, en donde se eleva a la desaladora,

situada a 2,5 km de distancia; allí se efectúa una filtración en tanques de arena (Fig.14B) y se bombea a alta presión (70 kg/cm^2) para efectuar una nueva y definitiva filtración por ósmosis inversa, a través de una serie de elementos separadores, denominados "membranas orgánicas semipermeables" (Fig. 14C).

La planta desaladora está diseñada para producir $56.400 \text{ m}^3/\text{día}$ de agua dulce, lo que supone la aportación de unos recursos del orden de $20 \text{ hm}^3/\text{año}$, con un contenido en sales inferior a $0,4 \text{ g/l}$. El agua se incorpora a la ETAP para su tratamiento y distribución en red a los municipios de la mancomunidad de la Costa del Sol Occidental. El coste estimado del agua producida es de $0,40$ a $0,60 \text{ i/m}^3$ (según información facilitada por ACOSOL, S.A.).

PARADA 4. RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE MARBELLA

En el acuífero del Señorío (Marbella), se realizan, desde el año 2000, actuaciones de recarga artificial por parte de la empresa AQUAGEST SUR, S.A.; para ello, se aprovechan los excedentes invernales del manantial de Camoján, un aliviadero natural de Sierra Blanca situado a mayor cota (tipo trop plein) que el manantial principal, el de Nagüeles (ANDREO, 1997). El objeto de esta actuación es aumentar la regulación del sistema, incrementando así los recursos disponibles.

El acceso al azud de Camoján, donde se realiza la toma de agua que se inyecta en el acuífero, es relativamente compleja, por lo que es conveniente seguir el siguiente itinerario; situados en la avenida de Ricardo Soriano en sentido San Pedro de Alcántara, llegaremos a la plaza Monseñor Rodrigo Bocanegra, al final de la cual giraremos a la derecha tomando la calle Don Jaime del Moral y Aragón, cruzando la autovía y siguiendo en dirección a Sierra Blanca. Transcurrido un kilómetro desde el cruce con la autovía alcanzaremos la urbanización Cascada de Camoján, para girar a la derecha tomando la avenida de la Cascada hasta el cruce con la calle 3 a unos 300 metros; de nuevo giramos a la derecha y recorriendo dicha calle llegaremos al arroyo Camoján. Desde este punto, bajaremos por la margen izquierda, encontrando el azud a unos 280 m de distancia.

Desde antiguo se ha intentado regular el borde meridional del acuífero kárstico de Sierra Blanca para el abastecimiento de Marbella y su zona de influencia. Sin embargo, el manantial de Nagüeles, su principal punto de drenaje en ese borde, muestra un comportamiento propio de sistemas con escaso poder de regulación, indicativo de una karstificación funcional alta (ANDREO, 1997), con puntas de caudal de hasta 1.100 l/s y fuertes y rápidas decrecidas estivales; lo mismo le ocurre al manantial de Camoján (de 0 a 300 l/s). Este comportamiento, y el escaso rendimiento obtenido en

sondeos situados en dicho borde, influyó en la decisión de recargar los excedentes, como mejor medio de regulación de los recursos drenados por ese borde de Sierra Blanca.

Aguas abajo del manantial, en el arroyo del mismo nombre, se encuentran las obras de captación y conducción del agua hasta los sondeos de inyección (primitivamente de bombeo), siguiendo el itinerario antes comentado. Se trata de una pequeña toma en el propio cauce, que permite la laminación de la corriente, con toma de fondo y válvula para regular caudales. Desde ahí, el agua discurre por gravedad a través de una tubería de 4 km de longitud hasta conectar con los sondeos de inyección. En estos se han mantenido las bombas para facilitar su limpieza; junto a la columna de impulsión se instalaron sendas tuberías de inyección de 90 - 100 mm de diámetro, con extremo en la zona saturada. En superficie se instaló un sistema de válvulas para permitir la inyección de agua y el vertido a un arroyo próximo de las aguas de limpieza. El equipamiento del sistema se completó con contadores y tubos piezométricos en los pozos de inyección, más dos piezómetros de seguimiento situados en las proximidades. Las instalaciones están diseñadas para admitir caudales punta de hasta 100 l/s, aunque en principio, los caudales de inyección no superan los 80 l/s. En la figura 15 se expone un corte hidrogeológico esquemático del sector y de la recarga artificial comentada.

Como se ha comentado, el manantial de Camoján responde muy rápidamente a los impulsos pluviométricos, con decrecidas igualmente veloces. Por esta razón, la recarga se activa sólo en los periodos de crecidas (dos o tres al año), y una vez transcurridos 2 ó 3 días, para aminorar los arrastres arenosos que podrían provocar colmataciones. El caudal de entrada se regula a las condiciones de funcionamiento (nivel a boca de sondeo y presión de 7 a 8 kg/cm²), y suele oscilar entre 15 y 40 l/s. Una vez concluida la recarga, se procede a la limpieza de los sondeos de inyección, bombeando desde ellos hasta que el agua sale sin turbidez.

A pesar de que la recarga tiene efectos muy localizados en el sector de actuación, los resultados obtenidos han permitido la recuperación de niveles hasta cotas históricas, manteniendo controlada la interfase marina en el sector costero y permitiendo el bombeo de los caudales inyectados (Fig. 13).

Los bombeos se realizan desde una batería de sondeos situados aguas arriba de la recarga (realizados en el año 1995, en plena sequía). Los resultados obtenidos desde el año 2000 pueden considerarse muy satisfactorios; el caudal medio inyectado ha sido de 0,17 a 0,25 hm³/año (JAÉN PERAL et al, 2003), lo que corresponde aproximadamente a un 10 % de los recursos del acuífero del Señorío. El sobrecoste que suponen las labores de mantenimiento del sistema ascienden a 0,03 €/m³, cantidad muy moderada al haberse aprovechado instalaciones de bombeo preexistentes (reacondicionadas en parte para la inyección).

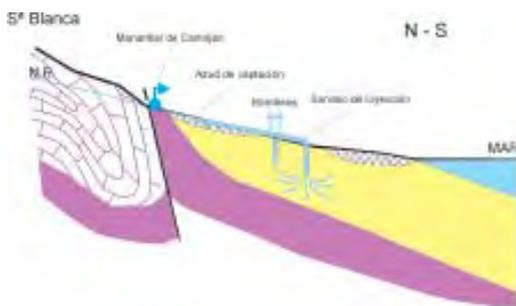


Figura 15. En la parte superior, toma de agua en el arroyo de Camoján para recarga artificial del acuífero del Señorío (Marbella) (parada 4); en la inferior, manantial de Camoján en crecida (foto cortesía de Bartolomé Andreo Navarro) y corte hidrogeológico esquemático del sector acuífero del Señorío (Marbella) y de la recarga artificial comentada (litologías en Fig.12).

PARADA 5. EMBALSE DE LA CONCEPCIÓN

El embalse de La Concepción, en el río Verde, se encuentra unos 4 km al norte de Marbella, por la carretera que va a la localidad de Istán. Para visitar la zona de presa, desde este acceso, es necesario autorización del Organismo de Cuenca, ya que esta se encuentra cerrada al público.

El embalse regula las aguas del río Verde y, mediante azudes y derivaciones, parte de los ríos Guadalmina, Guadaiza y Almanza, situados al oeste (Fig.16). La capacidad de regulación del embalse es de 57 hm³/año; volumen que en años normales es suficiente para garantizar el suministro urbano de su zona de influencia. Concretamente, el embalse surte aproximadamente el 80 % de la demanda de la mancomunidad de municipios de la Costa del Sol Occidental, compuesta por: Benahavís, Benalmádena, Casares, Estepona, Fuengirola, Istán, Manilva, Marbella, Mijas, Ojén y Torremolinos.

Desde la presa se transporta el agua a la estación de tratamiento de agua potable de la mancomunidad (ETAP), de la que parten dos ramales de tubería a lo largo de la costa, uno por el este, hasta Torremolinos, y el otro por el oeste hasta el límite del término municipal de Manilva (Fig. 16).



Figura.16. En la parte superior, embalse de La Concepción (parada 5) y en la inferior, estado actual de la infraestructura de abastecimiento de la Costa del Sol Occidental (facilitada por ACOSOL S.A.)

CAPÍTULO 2 ACUÍFEROS DE SIERRA BLANCA Y SIERRA DE MIJAS

B. ANDREO, F. CARRASCO e I. VADILLO
Universidad de Málaga



Figura 17. Mapa de situación del itinerario previsto. La foto superior corresponde al borde sur de Sierra Blanca occidental, área de recarga de los manantiales de Nagüeles y Camoján, tomada desde Puerto Banus

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Las Sierras Blanca y de Mijas forman parte de la cadena montañosa que limita al norte la Costa del Sol, entre las ciudades de Torremolinos al este y Marbella al oeste (Fig.17). Estas sierras constituyen la divisoria hidrográfica entre el Bajo Guadalhorce al norte y el Mar Mediterráneo al sur.

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Las Sierras Blanca y de Mijas, dada su situación estratégica en un área de elevada demanda de agua como la Costa del Sol, constituyen acuíferos de gran interés, por los recursos hídricos que almacenan y la buena calidad natural de los mismos. Para un periodo histórico (1963/64-1993/94), los recursos medios se han estimado en 53 hm³/año (ANDREO et al., 2002). Son acuíferos cuya alimentación se produce por infiltración de agua de lluvia y la descarga tiene lugar, de modo natural, por manantiales y, a través de bombeos, en los numerosos sondeos que existen, sobre todo en la Sierra de Mijas. Desde el punto de vista hidrogeológico, es posible distinguir tres sectores (ANDREO, 1997): Sierra Blanca occidental, Sierra Blanca oriental y Sierra de Mijas.

El sector occidental de Sierra Blanca está formado por acuíferos que presentan un funcionamiento hidrogeológico de tipo kárstico. Son los sistemas que presentan menos recursos y reservas de agua y su regulación mediante sondeos resulta bastante complicada, especialmente lejos del entorno inmediato de los manantiales. Los sondeos realizados son poco productivos y permiten bombear caudales bajos. En estas circunstancias, los acuíferos funcionan en régimen de descarga natural y el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos es limitado.

Por su parte, el sector oriental de Sierra Blanca constituye un acuífero de tipo fisurado, también llamado de flujo difuso. Los sondeos permiten la regulación parcial de sus recursos y, además, la explotación de sus reservas en épocas de déficit pluviométrico. En este caso hay un aprovechamiento del agua mayor que en Sierra Blanca occidental y, en épocas de sequía, los manantiales se secan debido a los bombeos.

La Sierra de Mijas está formada, también, por acuíferos de flujo difuso. La mayoría de los sondeos perforados en esta sierra son bastante productivos, porque atraviesan tramos de mármoles fracturados. La regulación de sus recursos mediante sondeos es total y se explota una parte de sus abundantes reservas, lo cual ha generado un aumento progresivo de los descensos piezométricos con el tiempo (ANDREO et al., 2000 y 2002). En algunos sondeos de la Sierra de Mijas oriental, el nivel piezométrico ha llegado a estar del orden de 100 m por debajo de la cota de los manantiales. Durante los años húmedos se ha producido una recuperación importante del nivel piezométrico, incluso han llegado a manar los manantiales. No obstante,

debido al aumento de las extracciones, ha sido necesario que después de un periodo de sequía (por ejemplo 1993/94 y 1994/95) se produjeran varios años húmedos (1995/96 a 1997/98) para que la recuperación fuera completa. Es decir, la Sierra de Mijas tiene una elevada capacidad de almacenamiento de agua, pero se debe hacer un aprovechamiento sostenido de ésta y no aumentar las extracciones en el futuro para evitar la sobreexplotación.

Además de la disminución de la cantidad de agua almacenada en la Sierra Blanca oriental y en la Sierra de Mijas existen peligros potenciales de deterioro de la buena calidad natural de las aguas subterráneas (ANDREO et al., 2003): vertederos de residuos sólidos, urbanizaciones, gasolineras, carreteras, cementerios. De hecho, en el sector occidental de Sierra Blanca, al norte de Marbella, se ha producido la contaminación del acuífero por los lixiviados procedentes del vertedero de residuos sólidos de esta ciudad (VADILLO et al., 2005).

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

En las Sierras Blanca y de Mijas afloran materiales pertenecientes a la unidad de Blanca, dentro del Complejo Alpujárride de la Cordillera Bética. Se pueden distinguir tres sectores desde el punto de vista geológico (ANDREO, 1997): sector occidental de Sierra Blanca, sector oriental de Sierra Blanca y Sierra de Mijas. En el sector occidental de Sierra Blanca afloran, principalmente, mármoles azules calizos, de edad Trías superior y presentan algunas manifestaciones kársticas (cavidades, lapiaz). El sector oriental de Sierra Blanca y la Sierra de Mijas están formadas por mármoles blancos dolomíticos del Trías medio, muy diaclasados, con escasas formas kársticas conocidas. El sustrato de los mármoles triásicos está formado por metapelitas (migmatitas, gneises y esquistos) que afloran en el borde meridional de las dos sierras. Sierra Blanca y Sierra de Mijas están separadas por un afloramiento de peridotitas de la unidad de Los Reales, también del Complejo Alpujárride, en el área del Puerto Pescadores (Figs.18 y 19). Discordantes sobre los materiales alpujárrides afloran margas y arenas del Plioceno y brechas y conglomerados del Cuaternario en los bordes norte y este de la Sierra de Mijas.

Los mármoles triásicos que afloran en estas sierras forman acuíferos cuya geometría está condicionada por la estructura geológica (Fig. 19). Así, en el sector occidental de Sierra Blanca y en la Sierra de Mijas, los núcleos anticlinales ocupados por metapelitas originan divisorias hidrogeológicas que, junto con las fracturas NNE-SSW y NNW-SSE, han dado lugar a la compartimentación en sistemas acuíferos; en los sinclinales tumbados de los bordes se originan geometrías en "fondo de saco". El sector oriental de Sierra Blanca presenta una geometría casi tabular, aunque puede existir una divisoria hidrogeológica en la parte este del sector, en relación con un núcleo anticlinal.

Las cotas de surgencia de los manantiales y las cotas piezométricas en los sondeos son diferentes según el sector considerado (LINARES y TRENADO,

1981; DEL VALLE et al., 1983; ANDREO, 1997). A partir de la estructura geológica y la cota de surgencia de los manantiales, ANDREO (1997) distinguió ocho sistemas acuíferos (Fig. 18): tres en Sierra Blanca occidental (Istán, Marbella y Ojén), uno en Sierra Blanca oriental (Coín) y cuatro en la Sierra de Mijas (Alhaurín El Grande, Mijas, Benalmádena y Torremolinos).

En el sector occidental de Sierra Blanca los manantiales de sus bordes surgen a diferentes cotas (Fig. 18): 330-440 m s.n.m. en la parte septentrional (manantiales de Istán y Moratán, respectivamente), 175-192 m s.n.m. en la meridional (manantiales de Nagüeles y Camoján) y 290-405 m s.n.m. en la oriental (Fuente Cañada y Ojén). En los manantiales de este sector se registran bruscos aumentos de caudal ante las precipitaciones, pasan de estar prácticamente agotados a drenar caudales de varios centenares de l/s. Las aguas de estos manantiales presentan baja mineralización (conductividad eléctrica < 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$), son de facies bicarbonatada cálcica y experimentan importantes diluciones por la infiltración rápida de las aguas de lluvia. Por tanto, los sistemas acuíferos del sector occidental de Sierra Blanca presentan un comportamiento típicamente kárstico (ANDREO et al., 1997 y 2000; ANDREO y CARRASCO, 1999).

En el sector oriental de Sierra Blanca, los manantiales presentan variaciones de caudal menos pronunciadas y más amortiguadas en el tiempo, excepto el manantial de Coín cuyo caudal varía más por los bombeos que se llevan a cabo en sus inmediaciones. Las aguas subterráneas son más mineralizadas (conductividad eléctrica > 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y la composición química es bicarbonatada cálcico-magnésica, con mayores concentraciones en magnesio, sílice y sulfatos, iones normalmente asociados a flujos lentos. La composición química de las aguas varía lentamente en respuesta a la recarga. Estos datos indican que se trata de un acuífero fisurado, poco karstificado, de flujo difuso (ANDREO et al., 1997 y 2000; ANDREO y CARRASCO, 1999).

En la Sierra de Mijas, los manantiales también están situados a cotas diferentes según el área de que se trate (Fig. 18): 280-300 m s.n.m. en Alhaurín El Grande, 400-485 m s.n.m. en Mijas, 210-220 m s.n.m. en Benalmádena, 125-145 m s.n.m. en Alhaurín de La Torre y 55-74 m s.n.m. en Torremolinos. Al igual que en Sierra Blanca oriental, las variaciones de caudal de los manantiales en respuesta a las precipitaciones se producen de forma muy amortiguada por la gran inercia de los sistemas. Los datos históricos de caudal correspondientes a los manantiales de Torremolinos, durante el periodo no influenciado por bombeos (1961-1973), permiten constatar que la punta de la crecida se registra varios meses después del máximo de precipitaciones (ANDREO, 1997). Las aguas son de facies bicarbonatada cálcico-magnésica y presentan una mineralización similar a las aguas de Sierra Blanca oriental (conductividad eléctrica > 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Análogamente, presentan una escasa variabilidad hidroquímica, porque drenan acuíferos de tipo fisurado, con un comportamiento más próximo al de flujo difuso que al típicamente kárstico (ANDREO et al., 1997 y 2000; ANDREO y CARRASCO, 1999).

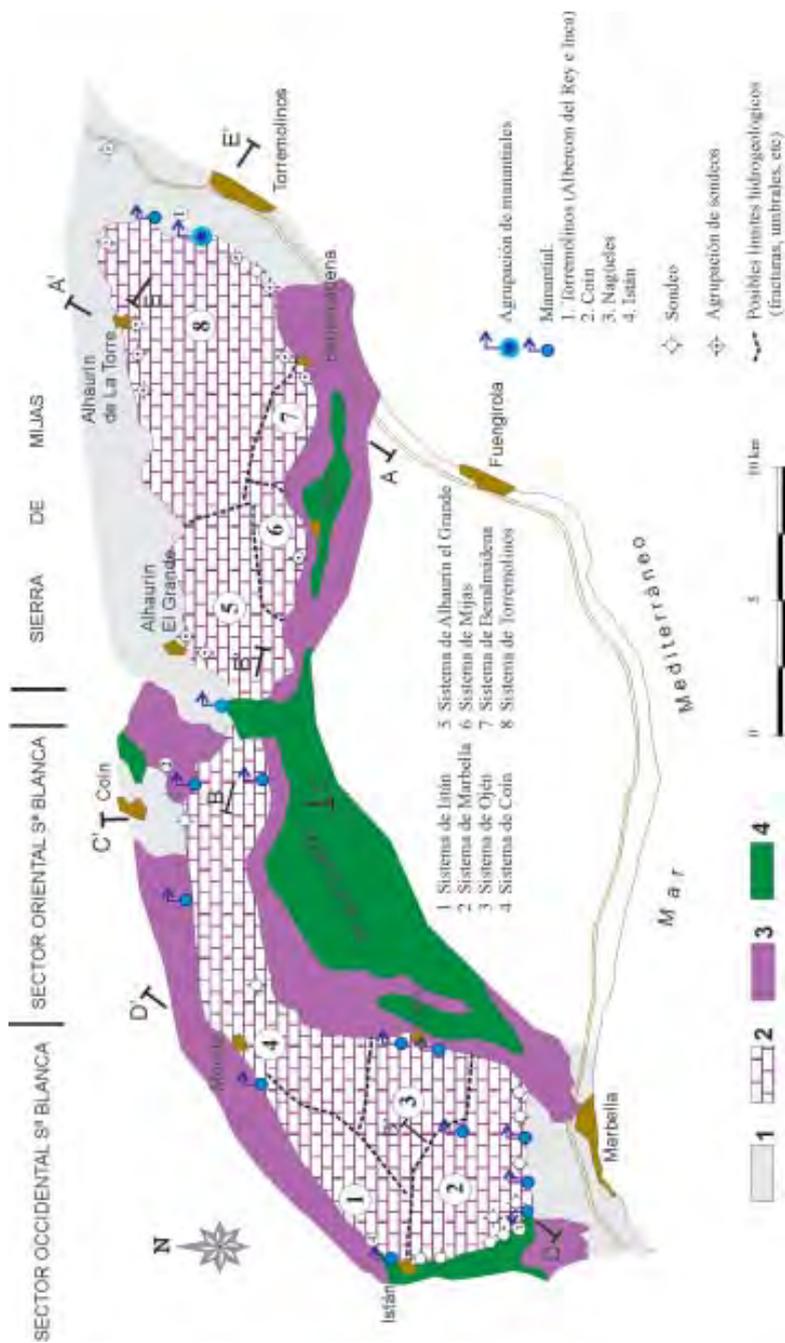


Figura 18. Mapa hidrogeológico de las Sierras Blanca y Mijas (ANDREO, 1997). (1) sedimentos pliocenos y cuaternarios; permeabilidad media; (2) mármoles triásicos; permeabilidad alta (3) metapelitas paleozoicas; permeabilidad baja y (4) peridotitas; permeabilidad baja

Los sondeos perforados en los mármoles azules calizos del sector occidental de Sierra Blanca, en general, atraviesan pocos tramos fracturados y/o con conductos kársticos. Los caudales de retorno observados durante las perforaciones a rotoperCUSión son de pequeña magnitud (generalmente < 3 l/s). No obstante, en las proximidades de los manantiales, el flujo se realiza a través de conductos kársticos principales.

Las columnas de sondeos perforados en los mármoles dolomíticos del sector oriental de Sierra Blanca y de la Sierra de Mijas muestran la existencia de tramos fracturados y poco karstificados, más abundantes en las proximidades de los puntos de surgencia. El caudal de retorno de los sondeos, en general superior a 10 l/s, aumenta de modo significativo a medida que se atraviesan tramos fisurados.

Con respecto al caudal específico de los sondeos, los valores más elevados en los sondeos del sector occidental de Sierra Blanca (varios l/s.m) son del orden de los más bajos obtenidos en el resto del área. En el sector oriental de Sierra Blanca y en la Sierra de Mijas, el caudal específico puede superar 100 l/s.m en algunos sondeos. En cualquier caso, los caudales específicos más elevados se registran, generalmente, en las proximidades de los manantiales.

Por lo tanto, en el sector occidental de Sierra Blanca, la regulación de recursos por medio de sondeos es complicada y depende del número y tamaño de los conductos kársticos intersectados (el cual suele ser bajo); los sondeos raramente permiten bombear caudales continuos superiores a 5-10 L/s. Sin embargo, en el sector oriental de Sierra Blanca y en la Sierra de Mijas, prácticamente todos los sondeos permiten extraer caudales más elevados, varias decenas e incluso centenares de l/s en algunos puntos (Coín, Torremolinos y Arroyo de La Miel), lo cual redundo en un mayor aprovechamiento de los acuíferos.

El balance medio anual de las Sierras Blanca y de Mijas para el periodo 1990/91-1993/94 (ANDREO et al., 2000) parte de una precipitación media de 117 hm³/año, de la cual: el 51% se evapotranspira (60 hm³/año), el 42 % se infiltra (49 hm³/año) y el 7 % restante origina escorrentía (8 hm³/año). Los recursos medios para este periodo se estiman en 57 hm³/año. Las salidas medias controlables ascienden a 62 hm³/año (28 por manantiales y 34 por bombeos); por tanto, se extraen 13 hm³/año más de lo que se infiltra como media anual, debido fundamentalmente a la explotación que se produce en la Sierra de Mijas. Para un periodo histórico (1963/64-1993/94), la lluvia media fue de 122 hm³/año y los recursos medios 53 hm³/año (ANDREO et al., 2002). Actualmente, la mayor parte del agua se utiliza para abastecimiento urbano; sólo los municipios del interior (Istán, Ojén, Coín, Alhaurín El Grande y Alhaurín de La Torre) utilizan agua para riego.

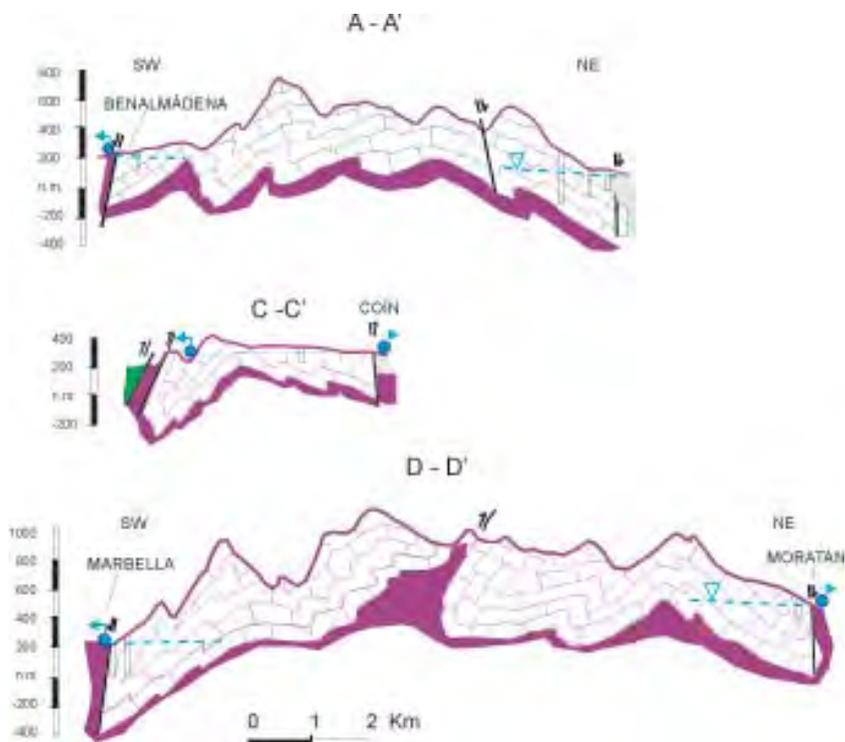


Figura 19. Cortes hidrogeológicos de las sierras Blanca y Mijas (ver situación y leyenda en la figura 18)

La estrecha dependencia del agua subterránea que tienen las poblaciones colindantes a las Sierras Blanca y de Mijas, sobre todo a esta última, no lleva asociado, sin embargo, el desarrollo de medidas destinadas a la protección de la buena calidad natural que tienen las aguas subterráneas para todos los usos. Antes al contrario, los acuíferos, que presentan una vulnerabilidad moderada-alta a la contaminación (ANDREO et al., 2003), se encuentran sometidos a una fuerte presión antrópica debido al desarrollo turístico del área: construcción de urbanizaciones, canteras y focos puntuales de contaminación (vertederos de residuos sólidos, gasolineras, cementerios, etc.). Este tipo de actividades son abundantes en la Sierra de Mijas, especialmente en el sector oriental de la misma, donde la presión urbanística es mayor. Todavía no se han detectado indicios significativos de contaminación de las aguas subterráneas en la Sierra de Mijas, pero en la Sierra Blanca occidental ya se ha producido la contaminación del agua subterránea del acuífero por la infiltración de lixiviados procedentes del vertedero de residuos sólidos de Marbella (VADILLO et al., 2005).

PARADA 1. PARAJE DE NAGÜELES

Al NW del albergue de Nagüeles (Marbella), se encuentra el manantial del mismo nombre, situado a la cota 175 m s.n.m., al cual se accede desde la autovía de circunvalación de Marbella (salida de Nagüeles). El manantial surge en el contacto de falla normal existente entre los mármoles triásicos y las metapelitas del Paleozoico (Figs. 18 y 19, corte D), que en este punto aparecen fosilizados por materiales cuaternarios de pie de monte. El caudal del manantial varía entre 0 y 1.000 l/s; responde rápidamente a las precipitaciones con bruscos aumentos de caudal y disminuciones de la mineralización del agua, lo cual demuestra su comportamiento kárstico. La propia existencia de una cavidad como la de Nagüeles, en las inmediaciones de la surgencia, pone de manifiesto la karstificación que afecta localmente al sistema.

En el entorno del manantial de Nagüeles se hicieron 7 sondeos para intentar obtener agua con la que paliar la sequía sufrida en 1995, algunos de ellos a escasos metros del manantial. Todos los sondeos tienen un nivel piezométrico coherente con la descarga natural que se produce por la surgencia de Nagüeles, pero sólo uno de ellos, situado en la cantera que hay al norte, a 200 m de distancia, intersectó conductos kársticos que conducen el agua hacia el manantial. Ello permitió la explotación del acuífero, no sin problemas de turbidez del agua, pero se produjo un importante descenso del nivel piezométrico, debido a las escasas reservas de agua explotables. Al este del manantial de Nagüeles, durante el mismo periodo de sequía, se hicieron 6 sondeos más, con resultado igualmente negativo, en el sentido de que no permiten una explotación continuada razonable, con caudales de varios l/s.

PARADA 2. MANANTIAL DE COÍN

El manantial de Coín se encuentra al sur de la localidad del mismo nombre, al lado de la carretera que lleva al Puerto de los Pescadores, y constituye el principal punto de descarga natural del sector oriental de Sierra Blanca (Figs 18 y 19, corte C). Emerge en el contacto entre los

mármoles dolomíticos blancos y los sedimentos margosos del Plioceno inferior.

Este manantial registra caudales máximos del orden de 1.500 l/s y se agota por la regulación mediante bombeos que se llevan a cabo para abastecimiento urbano y para riego. Los bombeos se realizaban, originalmente, en una fractura abierta en la que surge el manantial y, más tarde, en sondeos situados en las inmediaciones, los cuales permiten extraer caudales de varias decenas de l/s. En cualquier caso, el sistema amortigua mucho la respuesta ante las precipitaciones; las variaciones de caudales y de piezometría se producen de forma bastante inercial. Lo mismo ocurre con las variaciones hidroquímicas. Es decir, se trata de un acuífero de flujo difuso en el que el agua circula por multitud de fisuras poco ensanchadas por disolución.

De camino a la siguiente parada se puede observar una gran extensión del acuífero que presenta una forma plana, conocida en la región como Llanos de Coín y que forma parte del área de recarga del manantial de Coín. No llega a ser endorreica, aunque en este sector la escorrentía superficial puede considerarse despreciable frente a la infiltración.

PARADA 3. PUERTO DE LOS PESCADORES

Entre las Sierras Blanca y de Mijas está el Puerto de los Pescadores y, en las inmediaciones de la Venta de los Morenos, se puede hacer una parada para observar las peridotitas de la unidad de los Reales que se extienden por el sur, hacia Sierra Alpujata (Fig. 18), cabalgando sobre los mármoles de Blanca-Mijas. En esta zona los mármoles han sido laminados, prácticamente en su totalidad, bajo las peridotitas (Figs. 18, corte B, y 20); a veces han quedado englobados restos de ellos y de gneises en el seno de las peridotitas. Un sondeo de investigación hecho por el IGME en 1983, con 200 m de profundidad, únicamente atravesó peridotitas. Del mismo modo un estudio de geofísica electromagnética efectuado en esta área no detectó la existencia de enclaves carbonatados importantes debajo de las peridotitas.

Las peridotitas son materiales de baja permeabilidad, aunque están fracturadas y presentan una zona de alteración con capacidad para transmitir y almacenar el agua subterránea, sobre todo cuando están alimentadas lateralmente por los mármoles acuíferos. Esto explica la existencia de manantiales en las peridotitas, con caudales continuos de hasta decenas de l/s, los cuales se encuentran a cota más baja que la superficie piezométrica en la Sierra Blanca oriental y en la Sierra de Mijas occidental. Por tanto, existe un cierto drenaje desde ambas sierras hacia las peridotitas, pero difícilmente una transferencia de recursos entre ellas.

Finalmente, cabe llamar la atención sobre el uso del agua de la Sierra de Mijas para riego de un campo de golf (Alhaurín Golf), en un área de elevada demanda de agua, donde se producen descensos piezométricos importantes en épocas de sequía.

PARADA 4. SONDEOS DE BENALMÁDENA

En el casco urbano de Benalmádena Pueblo (Figs. 18 y 19, corte A), por encima de la antigua carretera Torremolinos-Mijas, se encuentra la batería de sondeos de Castillejos, también llamada del Cerro de La Cruz, propiedad del Ayuntamiento de Benalmádena y gestionada por la Empresa Municipal de Aguas (EMABESA). En este lugar hay cinco sondeos perforados desde el año 1974 hasta la actualidad, con profundidades progresivamente mayores desde 82 hasta 290 m, debido al descenso continuado del nivel piezométrico que se ha producido como consecuencia de la explotación del acuífero. En algunas épocas el nivel ha estado a más de 100 m de profundidad, por debajo de la cota de surgencia de los manantiales. Actualmente solo se explota un sondeo. Más al oeste del lugar de parada, hay otros dos sondeos de abastecimiento a Benalmádena.

Al sur de los sondeos, también en el casco urbano de Benalmádena, pero a cota más baja, se encuentran los puntos de descarga natural del acuífero (manantiales de El Chorrillo y La Cazalla) que están secos desde 1990. Los caudales conjuntos de ambos manantiales, en condiciones naturales, eran del orden de decenas de l/s.

Una panorámica hacia el este permite observar la aglomeración urbana de la Costa del Sol y el avance de ésta hacia la Sierra de Mijas, de la cual ya hay una parte urbanizada. Esto conlleva la disminución de la superficie de recarga de acuífero y la ubicación de actividades potencialmente contaminantes (carreteras, urbanizaciones, gasolineras, cementerios, vertederos de residuos sólidos), además de un aumento de la explotación del agua subterránea para abastecimiento urbano.

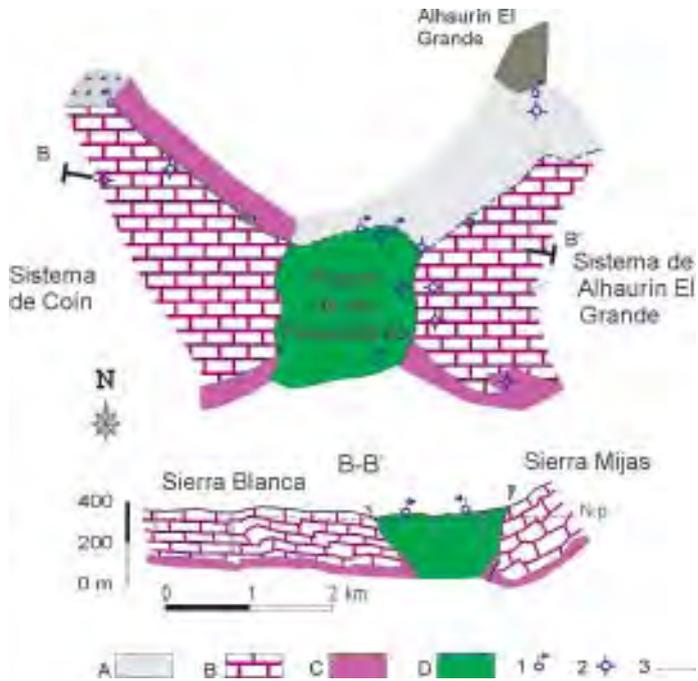


Figura 20. Mapa y corte hidrogeológico de las peridotitas del Puerto de los Pescadores (parada 3) (a partir de ANDREO, 1997). Leyenda: (A) materiales neógeno-cuaternarios; (B) mármoles; (C) gnéises; (D) peridotitas; (1) manantial; (2) sondeo; (3) nivel piezométrico



Ensayo de bombeo en la batería de sondeos de Arroyo de La Miel (Benalmádena) (parada 4)

PARADA 5. MANANTIALES DE TORREMOLINOS

Se trata de varios manantiales que emergen en el borde oriental de la Sierra de Mijas, en el contacto entre los mármoles triásicos y las margas del Plioceno (Figs. 18, corte E, y 21). En el paraje conocido como Manantiales de Torremolinos, cerca del parque acuático de esta localidad (Aqua-park), se ha llevado a cabo un acondicionamiento para visitas turísticas del entorno de las dos surgencias más importantes (Albercón del Rey e Inca), donde se encuentra un antiguo molino. Los manantiales han pasado por tres épocas claramente diferenciadas: una primera, cuando los manantiales descargaban en régimen natural, otra segunda en la que hubo algo de influencia de los bombeos (desde 1973 a 1980) y, otra final, en la que los manantiales han estado totalmente regulados por los bombeos y sólo han emergido después de fuertes lluvias. El caudal medio histórico de todos los manantiales, durante el periodo no influenciado, fue del orden de 450 l/s.

El estudio de los datos correspondientes al periodo no influenciado ha puesto de manifiesto que se trata de un sistema muy inercial, que tarda mucho en responder a las precipitaciones y que almacena abundantes reservas (ANDREO, 1997). Se trata de un sistema acuífero cuyo comportamiento es de flujo difuso.

Los abundantes sondeos realizados en el sistema, particularmente en las proximidades de los manantiales de Torremolinos, permiten constatar que, efectivamente, el acuífero no presenta grandes cavidades kársticas en su interior, sino más bien abundantes fracturas agrandadas por disolución, en las que se almacenan importantes reservas de agua que son explotadas para abastecimiento urbano. Como consecuencia de la explotación que se está llevando a cabo se producen descensos piezométricos superiores a 10 m/año en algunos puntos. Téngase en cuenta que en el sistema de Torremolinos se extraen del orden de 10 hm³/año más de lo que entra como media anual.

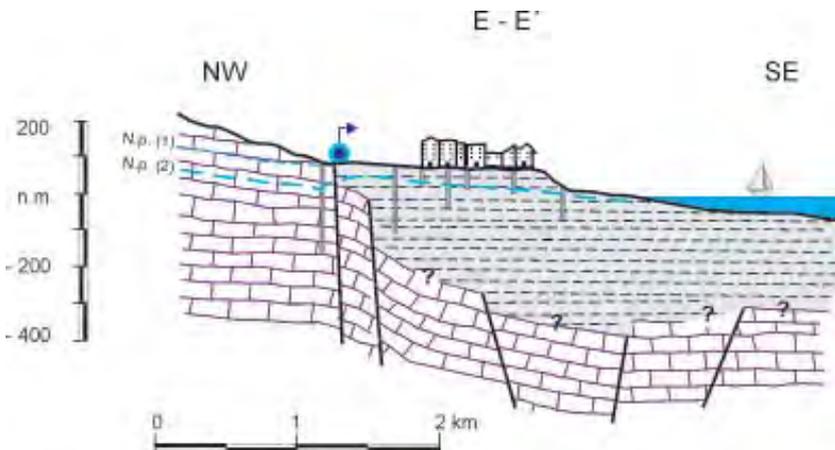


Figura 21. Detalle y vista del entorno de los manantiales de Torremolinos antes de ser acondicionados como están actualmente para visita turística. Al fondo se observa el acuífero de la Sierra de Mijas; abajo corte hidrogeológico en la parte oriental de la Sierra donde se interpreta la estructura de los mármoles acuíferos por debajo del acuífero detrítico costero. N.p.(1) es el nivel piezométrico en régimen natural y N.p. (2) el nivel piezométrico resultante a consecuencia de los bombeos (ver Fig. 18) (ANDREO, 1997)

CAPÍTULO 3 ACUÍFERO DE FUENGIROLA

L.SÁNCHEZ-DÍAZ¹, J.BENAVENTE¹ y A. CASTILLO²
¹Universidad de Granada; ²CSIC y Universidad de Granada



Figura 22. Mapa de situación del itinerario previsto. En la foto superior, vista general de Fuengirola hacia el oeste (foto cedida por la Distribuidora Editorial Costa del Sol, S.A.); en la inferior, río Fuengirola muy cerca de la desembocadura, con la Sierra de Mijas al fondo

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El acuífero coincide con la franja litoral del núcleo de Fuengirola (a 40 km al oeste de la ciudad de Málaga) y, sobre todo, con la llanura aluvial del río del mismo nombre (Fig. 22).

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Se trata de un acuífero de pequeña extensión (20 km²) y moderados recursos (10 hm³/año). Los rápidos procesos de intrusión y extrusión marina, el limitado poder regulador del acuífero y las alternativas de gestión para aumentar dicha regulación, quizás sean los aspectos más destacables desde el punto de vista hidrogeológico. Otro aspecto a resaltar es la existencia de aguas con diferentes calidades, según tramos (en la vertical), sectores (en la horizontal) y épocas (en el tiempo), algo habitual en estos acuíferos detríticos costeros, heterogéneos desde el punto de vista litológico y sometidos a una fuerte presión antrópica.

El acuífero está situado en un área con elevada demanda de agua para abastecimiento urbano y agrícola, especialmente en verano, que no puede satisfacerse con la explotación del acuífero; aún así, la moderada extracción de aguas subterráneas (de 4 a 6 hm³/año) es suficiente para causar situaciones puntuales y estacionales de sobreexplotación. Los procesos de intrusión marina se manifiestan en los sectores más transmisivos del acuífero, como es el caso del tramo inferior del aluvial del río Fuengirola. Sin embargo, el acuífero manifiesta rápidas recargas en épocas húmedas, con buenas condiciones de reversibilidad de las condiciones de salinización. Después de haberse comprobado insuficiente la captación de recursos subterráneos del acuífero en cantidad y calidad suficientes para el abastecimiento urbano, la población se surte, en su mayor parte, con agua transvasada principalmente desde el embalse de La Concepción, con caudales servidos que varían entre 25.000 y 40.000 m³/día (en verano).

La calidad de las aguas subterráneas se ha deteriorado con los años, no sólo por procesos de salinización, sino también por enriquecimientos de nitratos ligados a fertilizantes agrícolas y por presencia de microorganismos patógenos procedentes de fugas y vertidos de aguas residuales. Por causas naturales, algunas captaciones profundas, que explotan, al parecer, conglomerados de base del Plioceno, presentan, además, valores anómalamente altos de metales pesados de origen natural.

La mejor calidad de las aguas subterráneas existentes en el entorno de Fuengirola es la que poseen las formaciones carbonatadas del sistema acuífero de la Sierra de Mijas (sistema acuífero independiente y tratado en otra parte de este itinerario), así como la franja de peridotitas alteradas, si bien, en este último caso, con recursos muy limitados.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

El acuífero detrítico pliocuaternario de Fuengirola (LOPEZ GETA et al., 1988, LINARES GIRELA, 1997 e ITGE-JA, 1998) corresponde a la franja litoral, comprendida entre la línea de costa y, aproximadamente, la cota 100. El substrato acuífero está integrado por materiales preorogénicos constituidos por esquistos de baja permeabilidad, de edad paleozoica (complejos Alpujárride y Maláguide).

Sobre este substrato se dispone, de forma discordante, una formación de edad Plioceno, formada por una alternancia de conglomerados, arenas y arcillas margosas, cuya permeabilidad de conjunto es media-baja. Estos materiales afloran, sobre todo, en el borde norte (el más elevado) de la franja litoral de Fuengirola, ocupando una extensión de 8 km² y un espesor medio del orden de 100 m, aunque algunos sondeos recientes parecen haber superado localmente los 200 m. Estas perforaciones profundas han cortado un conglomerado atribuido a la base del Plioceno, de 50 m de espesor, que aporta caudales relativamente elevados (60 l/s), si bien con calidades deficientes para el consumo humano por su elevada concentración en algunos metales pesados. El funcionamiento hidrogeológico de este nivel, confinado en algunos sectores, es una incógnita en el momento actual.

Los materiales cuaternarios, depositados sobre la formación pliocena anteriormente descrita, están constituidos, en su mayor parte, por el aluvial del río Fuengirola (y de otros cauces menores: arroyos Real y Pajares) y, en menor medida, por otros tipos de sedimentos indiferenciados, así como por depósitos de playa en la franja litoral. Se trata de gravas, arenas y limos de una relativamente alta permeabilidad de conjunto; ocupan una extensión de 10 km² y su espesor es muy variable de unos sectores a otros, desde pocos metros hasta casi el centenar en el tramo bajo del río Fuengirola (Fig. 23B).

Los materiales pliocenos y cuaternarios descritos se hallan conectados hidráulicamente entre sí, constituyendo un único acuífero, denominado acuífero detrítico pliocuaternario de Fuengirola (objeto de este epígrafe). Pese a ello, los cambios bruscos de permeabilidades entre ambas formaciones ocasionan importantes variaciones piezométricas, de calidad de las aguas y de rendimiento de las captaciones que los explotan.

La piezometría establecida para los materiales acuíferos aluviales (donde se sitúan la mayoría de las captaciones) muestra una estrecha relación con los cursos superficiales y, más concretamente, con el río Fuengirola. En general, la superficie piezométrica se halla próxima a superficie, adquiriendo una disposición descendente hacia la línea de costa; en las partes más elevadas del acuífero, el nivel piezométrico se halla a unos 25 m de profundidad, lo que provoca una alimentación inferida desde las aguas de

escorrentía, situación que se iguala, o puede llegar a invertirse, en épocas muy húmedas, en los tramos bajos de los ríos y arroyos.

No obstante, la situación actual presenta algunos conoides de depresión en los tramos inferiores del aluvial, donde se concentra la extracción de aguas subterráneas; la mayor transmisividad del acuífero en dicho sector (con extracciones localizadas de hasta 40 l/s) favorece también la rápida penetración de agua del mar cuando se producen descensos de nivel por debajo de la cota cero.

La geometría del acuífero aluvial saturado, una banda relativamente estrecha, es una de las razones que explicarían el efecto "pistón" que las aguas de recarga ejercen sobre la cuña salina del tramo inferior en épocas húmedas, lo que favorece la rápida reversibilidad de los procesos de intrusión, como se ha comentado anteriormente.

Los recursos del acuífero pliocuaternario se estiman alrededor de 10 hm³/año (según datos propios sin publicar), si bien otras evaluaciones llegan a duplicar esa cantidad. La razón de esta disparidad de estimaciones estaría en la difícil cuantificación de la recarga por infiltración de aguas de superficie y retorno de riegos, la partida de alimentación mayoritaria. A partir de unos recursos totales de 45 hm³/año (aguas superficiales y subterráneas) calculados para la cuenca vertiente al acuífero (150 km²), se estima, por comparación con lo que ocurre en otros sistemas mejor conocidos, que la recarga inducida desde las aguas de superficie puede ser del orden de 8 hm³/año; la recarga por precipitación directa sobre el acuífero (equivalente a los recursos propios del acuífero, sensu estricto) es del orden de 2 hm³/año.

La descarga del acuífero se produce a través de extracciones por bombeo, del orden de 5 hm³/año, y mediante descarga oculta al mar, partida estimada en otros 5 hm³/año, aunque, como es lógico, estas cifras son cambiantes con los años. Una explotación mayor, que tendiera a igualar las extracciones con los recursos, provocaría un importante conoide de depresión y, consecuentemente, una penetración hacia el continente de la cuña salina. No hay que olvidar que gran parte de la descarga subterránea al mar se produce durante el invierno, ante la insuficiente capacidad reguladora de este acuífero.

Por esa razón, se plantea la posibilidad de recargar el acuífero con los abundantes excedentes superficiales y con aguas residuales previamente tratadas, como métodos efectivos de aumentar los recursos, la regulación del sistema y, consecuentemente, de luchar contra la intrusión marina (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988). Por el contrario, una mayor regulación de las aguas superficiales de la cuenca mediante la construcción de embalses de cabecera (en proyecto), produciría el efecto opuesto, es decir, una disminución de la recarga y, consecuentemente, una mayor vulnerabilidad del acuífero frente a la intrusión.

Las aguas del acuífero aluvial son de moderada mineralización (de 0,7 a 1 g/l de sólidos disueltos) y bicarbonatadas cálcico-magnésicas, salvo en las zonas próximas a la línea de costa, donde son de tipo clorurado sódico, con una salinidad de varios g/l, debido a procesos de intrusión marina actuales o relictos, si bien las calidades fluctúan bastante de invierno a verano.

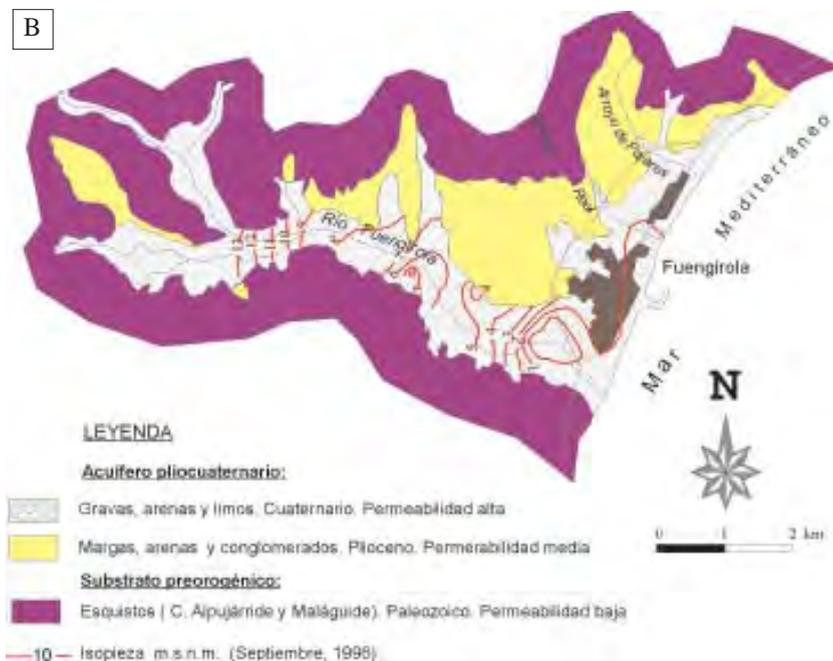


Figura 23. (A) Foto del aluvial del río Fuengirola donde se concentran los principales bombeos. (B) Esquema hidrogeológico del acuífero (a partir de ITGE-JA, 1998)

El agua procedente de los tramos pliocenos presenta generalmente una calidad más deficiente. La mineralización es mayor (superior a 1 g/l), con valores elevados de hierro y manganeso de origen natural, sobre todo, en los sondeos profundos que captan el conglomerado basal.

Las aguas del cercano sistema acuífero carbonatado (mármoles) de la Sierra de Mijas (que es tratado en otra parte de este itinerario), así como las que circulan por la franja de alteración de las peridotitas, son de excelente calidad, con una salinidad de 0,5 g/l y de tipo predominantemente bicarbonatado cálcico - magnésico.

PARADA 1. PANORÁMICA DEL ACUÍFERO DESDE LA DESEMBOCADURA DEL RÍO FUENGIROLA Y SONDEOS PROFUNDOS EN EL CASCO URBANO

Esta parada se sitúa junto al Castillo de Sohail (s.XII), al que se accede desde el km 215 de la A-7 (CN-340), en la entrada oeste de Fuengirola desde Marbella.

Desde las torres del citado Castillo se tiene una buena visión del tramo inferior del río de Fuengirola, así como de los relieves preorogénicos que limitan el acuífero por el norte, y que corresponden a la Sierra de Mijas. En este sector, las aguas subterráneas se hallan muy próximas a superficie, casi a la cota del mar (Fig. 23); en esas condiciones, el acuífero es muy vulnerable a la intrusión, ya que pequeños descensos de cota piezométrica por debajo del nivel del mar provocan un rápido avance de la cuña salina, que aprovecha para ello, además, los niveles altamente permeables de los depósitos de playa y aluviales que dominan bajo el cauce del río Fuengirola.

A un kilómetro río arriba se localiza la principal zona de bombeo del acuífero (sondeos Realenga, Romería, Conde, etc.), donde cada una de las extracciones localizadas pueden llegar a los 40 l/s; en ese lugar se suele formar un conoide piezométrico en estiaje, con procesos más o menos intensos de intrusión marina (Fig.23). Algunos autores han propuesto el desplazamiento hacia el continente de este núcleo de bombeo, como medida contra la intrusión, y de posibilidad de incremento de la explotación (mayor regulación). En épocas de aguaceros, este cauce, cuya cuenca ver-



Panorámica del aluvial de Fuengirola desde el Castillo de Sohail (parada 1)



Detalle de la desembocadura del río Fuengirola

tiente es de 120 km², puede descargar esporádicamente importantes caudales de agua al mar (varios m³/s). La derivación permanente de las aguas en cabecera y su recarga en el acuífero, así como los riegos (o careos) con altas dotaciones en épocas húmedas, son alternativas válidas para aumentar la regulación de las aguas y frenar, de paso, la intrusión en la franja litoral. Por el contrario, la regulación superficial a través de embalses reduciría la recarga y haría más vulnerable al acuífero frente a los procesos de salinización.

De otra parte, en el casco urbano de Fuengirola existen, al menos, dos sondeos de cierta profundidad (de 200 a 300 m), que atraviesan en su totalidad el acuífero pliocuaternario y captan, posiblemente, el tramo conglomerático basal del Plioceno, con un espesor de 50 m. Los caudales captados son del orden de 70 l/s, lo que es reflejo del carácter fuertemente transmisivo de ese nivel conglomerático inferior, en contacto con el basamento impermeable, si bien, como ya se ha comentado, la calidad es deficiente para el abastecimiento urbano por la salinidad (más de un 1 g/l) y, sobre todo, por los elevados contenidos en metales pesados (hierro y manganeso, cuyos valores son del orden de 2 a 5 mg/l, y de 0,15 a 0,5 mg/l, respectivamente). Está por estudiar aún cuál es el funcionamiento hidrogeológico de este nivel acuífero profundo, y sobre todo, cómo se alimenta y descarga.



Sondeo profundo en la calle Isla Gomera de Fuengirola

En la foto se observa donde se localiza el sondeo de la calle Isla Gome-
ra; la otra captación se ubica en la plaza González Anaya, donde el nivel
conglomerático se halla confinado bajo un tramo de más de 150 m de
margas azules.

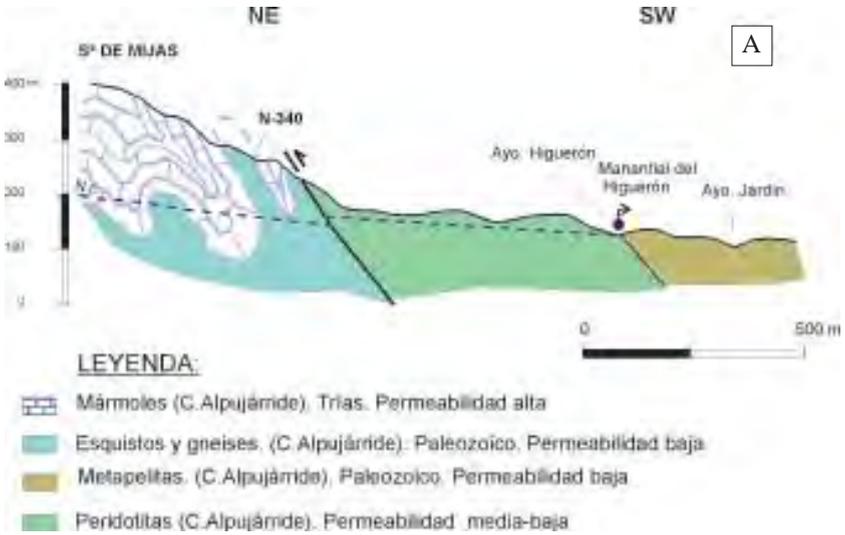
PARADA 2. PANORÁMICA DESDE LAS INMEDIACIONES DE LOS MANANTIALES DEL HIGUERÓN

Esta parada se sitúa junto al restaurante del Higuero, a 100 m de la A-
7 (CN-340) por el desvío de Mijas (Figs. 22 y 24).

Desde el lugar se tiene una amplia, aunque algo lejana, panorámica del
acuífero pliocuaternario y, sobre todo, de los relieves preorogénicos que lo
circunscriben, y que constituyen su substrato. El mayor interés de esta
parada es, precisamente, el reconocimiento hidrogeológico de estos mate-
riales preorogénicos; la parada se asienta sobre peridotitas (rocas ultrabási-
cas), aunque muy próximo al lugar se observa también el acuífero carbonatado
(en tonos blancos) de la Sierra de Mijas. El interés hidrogeológico de las
peridotitas es reducido y se centra en su franja superior de alteración.
Diversos sondeos realizados en el sector han permitido constatar que dicha
franja tiene una potencia del orden de la veintena de metros, y una relativa
permeabilidad. Precisamente, a ese tramo se asocia el manantial del Higue-
rón (realmente un conjunto de surgencias más o menos difusas), próximo
al lugar de la parada, y de complicada visita por construcciones que difi-
cultan el acceso. El agua procede de la recarga de precipitación y fluye a
través de la capa de alteración de las peridotitas hasta su contacto con
metapelitas muy poco permeables (del Complejo Maláguide) que ejercen
de barrera impermeable al flujo (Fig. 24A).

Actualmente, estas surgencias se hallan prácticamente secas (Fig. 24C),
pero hace años aportaban un caudal de 3 l/s que, junto con un pozo
situado en sus inmediaciones, llegaron a proporcionar hasta 5 l/s, caudal
suficiente para cubrir el abastecimiento histórico del antiguo núcleo de
Fuengirola. Existen otros manantiales también asociados a las peridotitas,
de similares características, como es el caso del manantial de La Mina
(Fig. 24D).

La calidad química de este tipo de aguas es excelente, ya que su salini-
dad es del orden de 0,5 g/l y carecen de indicios de contaminación (situa-
ción que puede complicarse en el futuro con la continua urbanización en
laderas situadas cada vez a mayor cota).



Manantial del Higueroñ

Manantial de La Mina

Figura 24. (A) y (B) Corte hidrogeológico y foto panorámica del mismo, en el área del Higueroñ (parada 2). (C) y (D) Manantiales en peridotitas

CAPÍTULO 4 ACUÍFERO DEL BAJO GUADALHORCE

VADILLO, F. CARRASCO y B. ANDREO
Universidad de Málaga



Figura 25. Mapa de situación del itinerario previsto. En la foto superior, vista general de la desembocadura del río Guadalhorce, con la ciudad de Málaga al fondo; en la inferior, vista del sector aluvial donde se ubican importantes urbanizaciones junto a la desembocadura del río

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El acuífero detrítico del Bajo Guadalhorce se localiza en la depresión del mismo nombre, al suroeste de la ciudad de Málaga (Fig. 25). Está limitado al norte por los afloramientos maláguides de los Montes de Málaga, al oeste por los relieves de la Sierra de Mijas y al sureste por el mar Mediterráneo, por lo que puede considerarse como un acuífero detrítico costero.

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

El acuífero presenta una superficie de unos 270 km² y se encuentra en un área turística de gran demanda de agua. Los recursos hídricos de este acuífero son utilizados para el abastecimiento a la población, actividades agrícolas y, en menor medida, actividades industriales.

El abastecimiento urbano a la ciudad de Málaga proviene en su mayor parte del agua de los embalses situados agua arriba de El Chorro. Sin embargo, este acuífero es importante como apoyo para el abastecimiento durante los meses estivales, cuando se puede llegar a triplicar la población en esta zona por motivos turísticos. En las poblaciones de menor entidad, como Álora, Campanillas, Cártama, Churriana, Pizarra o San Julián, las captaciones realizadas en el acuífero abastecen a urbanizaciones y/o cortijos diseminados en esos núcleos.

Las actividades agrícolas en la llanura aluvial del Bajo Guadalhorce se han visto favorecidas por las conducciones de riego que parten de los embalses de El Chorro. No obstante, debido a valores medios-bajos de la precipitación media anual (500-600 mm) ha sido necesario un suplemento hídrico para los cultivos en las épocas estivales, lo que ha generado la proliferación de obras de captación en el acuífero.

Algunos importantes bombeos para uso industrial (fábrica de Cervezas San Miguel y planta de envasado de Coca-Cola) se concentran en el sector final del río. Además, hasta los años 90 también era importante el volumen extraído en la planta de procesado de caña de azúcar "La Azucarera" y la fábrica de aceite "Minerva"; el cese de la actividad industrial de ambas fábricas ocasionó la desaparición de la demanda correspondiente.

En los últimos años se han modificado las actividades implantadas en la superficie del acuífero, lo que ha ocasionado cambios en su balance hídrico y la aparición de riesgos de contaminación. Caben citar las obras de encauzamiento del río Guadalhorce en el sector de la desembocadura; la ampliación de los polígonos industriales del Guadalhorce, Santa Teresa y Villa Rosa; la construcción de instalaciones deportivas (Palacio de De-

portes Martín Carpena y Estadio Deportivo); implantación de grandes centros comerciales (Plaza Mayor); la promoción de viviendas en antiguos terrenos agrícolas y la actual construcción de la segunda pista para el aeropuerto internacional "Pablo Ruiz Picasso".

Desde el punto de vista de la calidad química, las aguas subterráneas del Bajo Guadalhorce se caracterizan por tener valores altos en conductividad eléctrica (salinidad), cloruros, sodio, sulfatos y nitratos, entre otros. En algunas zonas, estas características químicas hacen no recomendable su uso para abastecimiento urbano. El origen de esta mineralización se debe a la infiltración de agua del río, con un elevado contenido en sales disueltas, producto de los manantiales salinos de cabecera y de los procesos de intrusión marina en las zonas más cercanas a la costa (LINARES et al., 1988).

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

Desde el punto de vista geológico, el acuífero del Bajo Guadalhorce se localiza en la cuenca sedimentaria de Málaga, una depresión postorogénica de edad terciaria de la Cordillera Bética. El substrato de la cuenca está constituido por mármoles alpujárrides de edad triásica en el sector meridional, pizarras y areniscas maláguides en el borde norte y arcillas cretácico-terciarias del FLYSCH del Campo de Gibraltar en zonas más occidentales de la cuenca.

El relleno sedimentario está formado por una sucesión de materiales de edad Neógeno-Cuaternario (SANZ DE GALDEANO y LÓPEZ GARRIDO, 1991). Los primeros materiales que forman esta secuencia sedimentaria son calcarenitas y conglomerados de edad Mioceno, con espesores superiores a 100 m. El Plioceno está constituido por un paquete de margas de espesor superior a 500 m, en cuya base se encuentran conglomerados y hacia techo intercalaciones arenosas de poco espesor (generalmente inferiores a 20 m). Dicha serie pliocena termina con sedimentos arenosos hacia los bordes de la cuenca. La secuencia sedimentaria culmina con una formación aluvial de edad cuaternaria, constituida por cantos rodados, gravas, arenas y limos, depositada por el río Guadalhorce en la parte central de la cuenca, depósitos de abanicos aluviales en los bordes de la cuenca y depósitos de playa en el sector costero (Fig. 26).

El acuífero detrítico del Bajo Guadalhorce es considerado un acuífero multicapa, propio del depósito y heterogeneidad de los procesos sedimentarios en la cuenca. Hay cuatro formaciones litológicas con importancia hidrogeológica (LINARES et al., 1988): las calcarenitas y conglomerados del Mioceno superior; los depósitos conglomeráticos de la base del Plioceno (acuífero inferior plioceno); las intercalaciones arenosas de la parte

alta de la serie pliocena (acuífero superior plioceno); y los sedimentos detríticos depositados por el río Guadalhorce (acuífero aluvial). El aprovechamiento hídrico de las calcarenitas miocenas es muy limitado y en el caso de los conglomerados del Plioceno inferior casi inexistente, por lo que, en la actualidad, sólo se explotan como acuíferos las intercalaciones arenosas del Plioceno superior y los materiales cuaternarios aluviales.

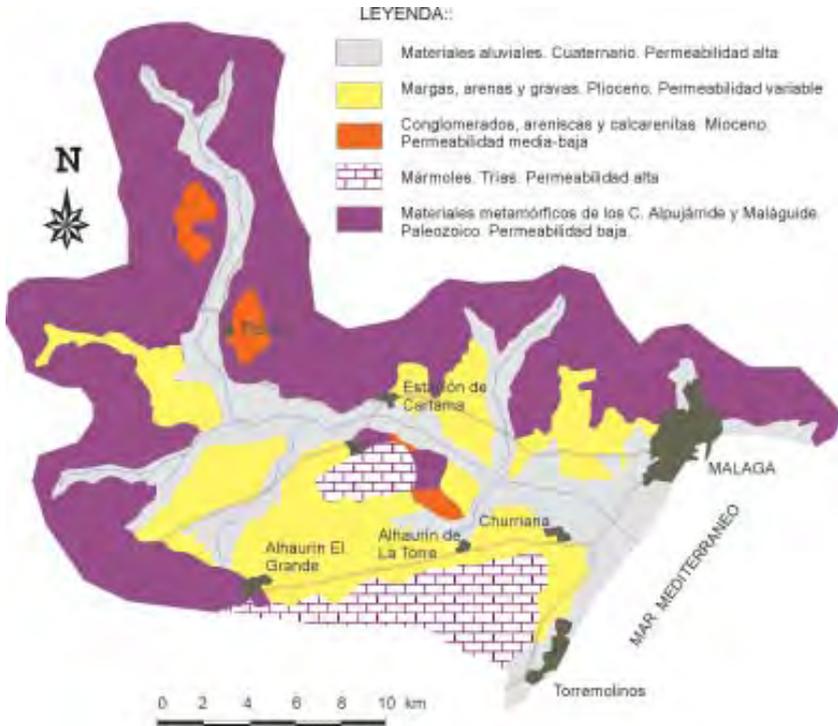


Figura 26. Esquema hidrogeológico del acuífero del Bajo Guadalhorce (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988)

El acuífero superior plioceno presenta continuidad longitudinal cercana a los 3 km, según el eje de la depresión del Guadalhorce, y lateral, con una anchura de hasta 1-2 km en la confluencia de los ríos Campanillas y Guadalhorce. En algunos sectores, el acuífero superior plioceno está en contacto con materiales detríticos del acuífero aluvial cuaternario, por lo que, en estos casos, se considera un acuífero libre. Es frecuente, sin embargo, que existan intercalaciones arcilloso-limosas que separen hidrogeológicamente ambos acuíferos (LINARES et al., 1995).

El acuífero aluvial está formado por depósitos detríticos (gravas, arenas y limos) originados por el río Guadalhorce durante el Cuaternario. La cambiante actividad fluvial en dicho periodo ha generado una migración del río de sur a norte, dejando un paleocauce en la actual margen derecha. Los materiales que rellenan este paleocauce tienen un espesor de entre 30-50 m y se caracterizan por presentar mayor tamaño de grano que los depósitos de la margen izquierda, con espesores inferiores a 20 m.

Los mapas de isopiezas realizados en aguas altas (mayo de 1996) muestran una descarga subterránea, con un gradiente medio del 1'5 ‰, hacia el cauce del río Guadalhorce (río ganador) y también hacia el mar, que es hacia donde se dirige toda la descarga natural del sistema (Fig. 27). En algunos puntos, como el sondeo del "Campo de Golf", se detectan depresiones piezométricas puntuales motivadas por bombeos.

Durante los periodos habituales de estiaje, las cotas piezométricas suelen ser negativas en las zonas próximas a la costa y a los puntos de bombeo (Fig. 27); no obstante, los niveles se recuperan con facilidad en épocas de recarga. La superficie piezométrica, en estos casos, ha presentado formas abiertas al mar, lo que ha dado lugar a procesos de intrusión marina, más acentuados en la margen izquierda del río (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988; CARRASCO et al., 2003).

La mayoría de las captaciones en el acuífero del Bajo Guadalhorce se concentran en el borde costero y, dentro de este sector, en la margen derecha del cauce actual, donde se encuentra el paleocauce citado y la mayor transmisividad.

Los valores de transmisividad en el acuífero aluvial oscilan entre 300 m²/día y 12.000 m²/día, con valores más frecuentes próximos a 9.000 m²/día. La permeabilidad es del orden de 10⁻³ m/s y la porosidad eficaz del 10%.

No se dispone de datos fiables sobre las entradas y salidas del sistema, por lo que es complicado realizar un balance hídrico. Una recopilación de los balances en este acuífero (ANDREO et al., 2002) pone de manifiesto la disparidad de estimaciones realizadas; no obstante, puede presuponerse una recarga total del orden de 55 hm³/año, de los que 30 hm³/año son bombeados a través de las captaciones existentes en el acuífero (25 hm³/año del acuífero cuaternario y 5 hm³/año del acuífero superior plioceno),

20 hm³/año son drenados hacia el mar en forma de escorrentía superficial y 5 hm³/año de forma oculta.

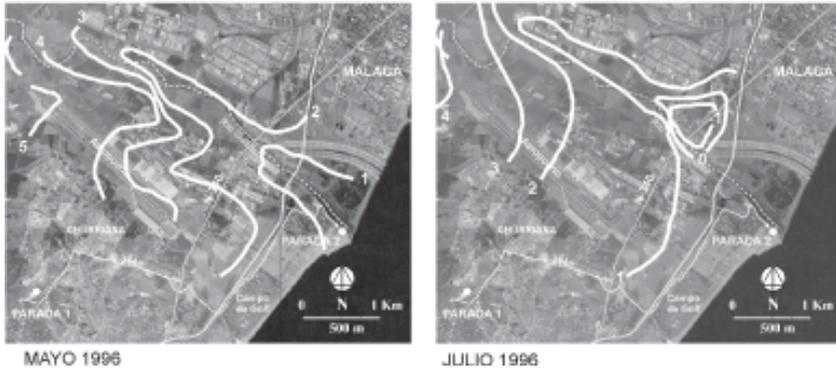


Figura 27. Mapas de isopiezas (valores en m) del sector costero del Bajo Guadalhorce en aguas altas (mayo 1996) y bajas (julio 1996)

Por lo que respecta a la calidad de las aguas, en la mayor parte del área acuífera presentan facies mixtas. En las zonas próximas a la costa, e incluso en algunos puntos de la parte central del acuífero, se han detectado facies cloruradas sódicas. En menor medida, existen facies bicarbonatadas cálcicas en las proximidades de la Sierra de Mijas. La conductividad eléctrica del agua aumenta desde el borde costero (valores comprendidos entre 3.000 y 5.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) hacia el interior (menos de 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Los contenidos en cloruros, fluctúan entre 70 mg/l y más de 2.000 mg/l en los sectores con conoides a causa de bombeos; en general, las concentraciones de cloruros son del orden de varios centenares de mg/l.

En general, la hidroquímica del acuífero del Bajo Guadalhorce muestra la influencia de la mineralización de las aguas de infiltración a su paso por los materiales aluviales, de las aguas de regadío procedentes del embalse del Guadalhorce, del agua de retorno de los riegos y de los aportes laterales, principalmente desde el acuífero carbonatado de la Sierra de Mijas. Todo ello origina una salinidad variable según los sectores y los procesos predominantes, que se incrementa por procesos de intrusión marina en los lugares cercanos a la costa, donde se localizan bombeos intensivos.

Los registros de salinidad realizados en la zona de la desembocadura ponen de manifiesto una modificación en la calidad natural del agua del acuífero por la existencia de intrusión marina por su margen derecha, a

través de los niveles arenosos del Plioceno y del paleocauce aluvial, donde la permeabilidad es más elevada, motivada por los bombeos que son más importantes en esta margen del río. Sin embargo, debido a las altas transmisividades de los materiales aluviales, durante las épocas de recarga se produce un lavado efectivo del acuífero, que permite recuperar su calidad natural.

PARADA 1. PANORÁMICA DEL ACUÍFERO DEL BAJO GUADALHORCE

Desde la A-7 (CN-340), en sentido Málaga, se toma la salida del aeropuerto, y después la que indica Parador de Golf; en esa salida se toma la carretera A-366 dirección Churriana (Fig. 25). A unos 3 km, en una rotonda se toma el Camino del Pilar, y a 200 m, a la derecha, el Camino de la Sierra. Tras 1 km más, se estaciona el autobús (en coche puede

Itinerario propuesto: (Fig. 25)

- ❖ **Parada 1.** Panorámica del acuífero del Bajo Guadalhorce.
- ❖ **Parada 2.** Desembocadura del río Guadalhorce.

se toma a la derecha por la calle Mediterráneo y Sofía, hasta acceder a un cerro-mirador, desde donde se divisa una amplia panorámica del aluvial del Bajo Guadalhorce.

Desde este punto es posible apreciar las transformaciones en el uso del suelo en el Bajo Guadalhorce. Hacia el noroeste (aguas arriba del río) se observa un predominio de áreas de cultivo, pero hacia el sureste proliferan las promociones urbanísticas, polígonos industriales y superficies comerciales.

PARADA 2. DESEMBOCADURA DEL RÍO GUADALHORCE

Se recorre la carretera A-366 en sentido inverso hasta el Parador de Golf y en este punto se circula por la carretera que discurre hacia el noreste, hasta llegar a la Urbanización Guadalmar. La parada 2 se encuentra en la desembocadura del río por su margen derecha.

Hacia el noroeste se observa el Paraje Natural del río Guadalhorce, un humedal generado artificialmente por inundación de graveras abandonadas, donde hay un importante punto de nidificación de aves acuáticas.



Vista del acuífero del Bajo Guadalhorce desde la parada 1.



Vista del sector de desembocadura del río Guadalhorce. Se observa la proliferación de construcciones hasta los límites del Paraje Natural, situado enfrente.

El tramo bajo del valle del Guadalhorce constituye una planicie de muy escaso desnivel, que se ensancha hacia el sur, donde entra en contacto con el litoral mediterráneo. Toda esta área corresponde a un antiguo estuario colmatado por depósitos aluviales cuaternarios del río Guadalhorce, compuestos mayoritariamente por arenas, limos y arcillas.

El entorno de la desembocadura corresponde con el área natural de inundación del río, en la que el trazado meandriforme del río ha dado lugar a un brazo no funcional (Madre Vieja del Guadalhorce), y a numerosas charcas y zonas de marismas en la margen izquierda del río.

A partir de los años 70, los planes de ordenación urbana permiten un uso residencial e industrial muy cercano a los límites del río. En la actualidad, el problema de la ocupación del entorno del Guadalhorce se ha agravado con la construcción de urbanizaciones, polígonos industriales e instalaciones deportivas. Todas estas construcciones dan lugar a desviaciones e incluso obstrucciones en las vías naturales de drenaje (PERLES ROSELLÓ et al., 1999).

A lo largo de la historia se han producido frecuentes inundaciones en la desembocadura del Guadalhorce como consecuencia de su topografía llana, trazado meandriforme que disipa gran parte de la energía del agua y la cercanía del mar, que contribuye con su dinámica a generar un ambiente pantanoso y húmedo. De este riesgo natural ya eran conscientes los fenicios, como queda probado por el asentamiento del Cerro del Villar, situado en la única elevación existente en la zona de desembocadura del río Guadalhorce.

Desde este emplazamiento es posible observar que el nivel del río en la desembocadura está situado por encima del nivel del suelo de la urbanización Guadalmar, acrecentando el riesgo de inundación. Este riesgo natural se constató durante la inundación producida en 1989, que originó importantes pérdidas y daños en la ciudad de Málaga. Con objeto de paliar los posibles efectos de inundaciones futuras, se ha llevado a cabo la construcción de un nuevo encauzamiento del río Guadalhorce.

CAPÍTULO 5 ACUÍFERO DE VÉLEZ-MÁLAGA

J. L. GARCÍA ARÓSTEGUI¹ y J. J. CRUZ-SANJULIÁN²

¹IGME; ²Universidad de Granada



Figura 28. Mapa de situación del itinerario previsto; en la foto superior, vista panorámica del acuífero de Vélez, con el pueblo y Sierra Tejeda al fondo; en la foto inferior, ensayos de recarga realizados en abril de 1994

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El acuífero de Vélez, constituido por depósitos aluviales y deltaicos, está situado en el sector costero central de la comarca de La Axarquía, a unos 30 km al este de Málaga (Fig. 28). Esta llanura deltaica ha sido tradicionalmente utilizada para la agricultura, especialmente en las "vegas" de Vélez-Málaga, a cuyo extenso término municipal pertenece la mayor parte de la superficie del acuífero.

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Hasta mediados de la década de los años noventa del pasado siglo, no existía en la cuenca del río Vélez (610 km²) ningún sistema de regulación superficial. En estas condiciones, para el abastecimiento a la población se utilizaban mayoritariamente captaciones de aguas subterráneas, mientras que al riego se destinaban, sobre todo, aguas superficiales, siendo así que los cultivos se concentraban en las "vegas" de la parte baja de la cuenca. Estos riegos se realizaban sobre los afloramientos del acuífero detrítico (aproximadamente en una veintena de kilómetros cuadrados), lo que daba lugar a la existencia de una recarga adicional del acuífero, representada por el "retorno de riegos" correspondiente. Por su parte, las aguas superficiales excedentarias circulaban hacia el mar y el caudal de esta descarga, por lo menos de forma estacional, podía ser importante. A partir de finales de los años setenta, el aumento paulatino de la demanda para abastecimiento y riego, con una ampliación sustancial de la superficie dedicada a los cultivos subtropicales sobre las laderas del valle aluvial, provocó el incremento del caudal bombeado en un número creciente de captaciones de agua subterránea. La explotación de las aguas subterráneas contribuyó así a un considerable desarrollo económico de esta comarca, pero la falta de una adecuada planificación pronto dio lugar a la aparición de los clásicos síntomas de sobreexplotación. En efecto, en los estiajes se registraban importantes descensos de los niveles piezométricos, especialmente en ciclos secos, y empezó a advertirse un progresivo deterioro de la calidad del agua subterránea, indiscutiblemente asociada a la intrusión marina.

Actualmente, el régimen hidrológico del acuífero detrítico de Vélez está condicionado por el sistema del embalse de La Viñuela, construido entre los años 1986 a 1994. Dicho sistema, incluido dentro del histórico Plan Guaro, está constituido por la presa de La Viñuela (173 hm³ de capacidad) y ocho presas de derivación para trasvasar los principales ríos de la cuenca hacia dicho embalse (Fig. 29). Se logra regular así una superficie de unos 440 km², lo que supone el 72% de la superficie total de la cuenca hidrográfica. Las aguas embalsadas se destinan al riego de los cultivos situados en cotas por debajo de 140 metros, al abastecimiento de los núcleos urbanos de la Costa del Sol Oriental (entre Málaga y Nerja) y, eventualmente, pueden contribuir al suministro de la ciudad de Málaga.



Figura 29. Cuenca hidrográfica del río Vélez: principales elementos de observación hidrológica y regulación.

La entrada en servicio del embalse se produjo en el año 1989 y durante el primer quinquenio de la década de los noventa, coincidiendo con un importante periodo de sequía, se fueron terminando las obras complementarias (presas de derivación y canales principales de abastecimiento y riego). En este periodo, el acuífero vio reducidos considerablemente sus recursos hídricos, con unos descensos de niveles cada vez más acusados en los estiajes. La situación más alarmante se alcanzó a finales del verano de 1995, con escasas reservas en el embalse y en el acuífero, lo que afectó al abastecimiento a la población y al regadío. Las importantes aportaciones pluviométricas de los años 1996 y 1997 pusieron fin al periodo de sequía. Se produjo el llenado completo del embalse e, incluso, hubo que realizar varios desembalses en previsión de intensas precipitaciones. Durante estos años se regularizó el abastecimiento a la población, iniciado en 1994, y comenzaron a realizarse desembalses para riego. Los niveles piezométricos del acuífero se recuperaron con rapidez a principios de 1996 y la cuña de intrusión marina retrocedió considerablemente.

En la actualidad, el acuífero no presenta problemas significativos de intrusión marina y los niveles piezométricos se mantienen a cotas relativamente altas, salvo en el sector aluvial del río Benamargosa (principal afluente del río Vélez por la margen derecha), donde la recarga se ha visto prácticamente limitada a los recursos generados a partir de las precipitaciones sobre la porción de cuenca situada aguas abajo de los trasvases y a los retornos de riego.

La importancia evidente de los problemas planteados ha promovido la realización de diversas investigaciones hidrogeológicas, entre cuyos objetivos prioritarios destacan los relativos a la comprensión del funcionamiento del acuífero, con especial énfasis en los procesos de intrusión marina, al impacto de la construcción del embalse de La Viñuela sobre el régimen hidrológico del acuífero y al uso conjunto (CHSE, 1987 y 1997; GARCIA-AROSTEGUI, 1998; IGME, 1988). En consecuencia, el acuífero de Vélez es uno de los que dispone actualmente de una mayor densidad de puntos de control piezométrico e hidroquímico (intrusión marina) de toda la Cuenca Mediterránea Andaluza. Esto, a su vez, supone que la infraestructura de control disponible y el conocimiento adquirido del acuífero permiten considerarlo como un "buen laboratorio natural" para estudiar, a escala real, diferentes cuestiones hidrogeológicas del máximo interés, entre las que podrían citarse el estudio de la zona no saturada, el flujo subterráneo y el transporte en medios porosos, los estudios de recarga, los procesos de intrusión-extrusión marina, las técnicas de gestión integrada, etc.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

El acuífero de Vélez está constituido por depósitos detríticos groseros (gravas y arenas), que representan formaciones aluviales y deltaicas de edad cuaternaria. El substrato y los bordes del acuífero están integrados

por materiales metapelíticos de los complejos Alpujárride y Maláguide de la Cordillera Bética (principalmente esquistos de edad paleozoica), así como por limos y arcillas limosas del Plioceno, todos ellos de muy baja permeabilidad.

La geometría de los depósitos detríticos está condicionada por las fracturas que afectan al substrato. Las mayores potencias aparecen en el sector central, en la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, donde se alcanzan los 75 m de espesor, así como en el sector deltaico, con más de 60 m de potencia y en donde se han diferenciado dos tramos acuíferos separados por un nivel limo-arcilloso poco permeable (Fig. 30). Otra característica geométrica del acuífero, de interés hidrogeológico, es la existencia, a unos 4 km de la costa, de un estrechamiento coincidente con una elevación del substrato que se sitúa a la cota del nivel del mar. Esta estructura permite distinguir un sector continental del acuífero y un sector costero que, en épocas de intensa sequía (finales del estiaje del año 1995), han llegado a quedar independizados debido al descenso de los niveles piezométricos por debajo de la cota del mencionado umbral. Esta situación resulta además ventajosa desde el punto de vista hidrogeológico, ya que imposibilitaría un hipotético avance de la intrusión marina aguas arriba de dicha zona. La permeabilidad media del acuífero es de unos 70 m/día, si bien se han obtenido valores entre 30 y 300 m/día.

La recarga del acuífero se debe mayoritariamente a la infiltración de las aguas de los ríos Vélez y Benamargosa. También contribuyen a la recarga las aguas procedentes del retorno de riegos, especialmente en aquellas áreas en las que aún no se utiliza la técnica de riego localizado. La descarga principal del sistema corresponde a las extracciones por bombeo en más de 400 puntos, con un caudal en torno a 35 hm³/año (hasta 1995), cifra a la que habría que sumar las salidas superficiales al mar y las salidas subterráneas a lo largo del borde costero. Tras la entrada en funcionamiento del sistema de La Viñuela, la explotación por bombeo se ha reducido considerablemente.

La distribución espacial en el acuífero de las facies hidroquímicas es bastante simple (Fig. 31). En el sector estrictamente aluvial del acuífero, las facies hidroquímicas son mayoritariamente bicarbonatadas cálcico-magnésicas, propias de la disolución de materiales calizo-dolomíticos. A medida que progresa el flujo, las facies evolucionan en el seno del acuífero a bicarbonatadas-sulfatadas cálcico-magnésicas. En el sector situado ligeramente aguas arriba del "umbral" del substrato se produce un incremento notable de la salinidad, como consecuencia de la agricultura intensiva, tanto en la margen derecha como en la izquierda, aunque en esta última influye también el riego con aguas residuales. En el sector deltaico se observa una mayor diversidad de facies hidroquímicas: existen aguas bicarbonatadas, aguas bicarbonatadas-sulfatadas y también cloruradas sódicas, con elevada salinidad, especialmente en la margen derecha del río Vélez.

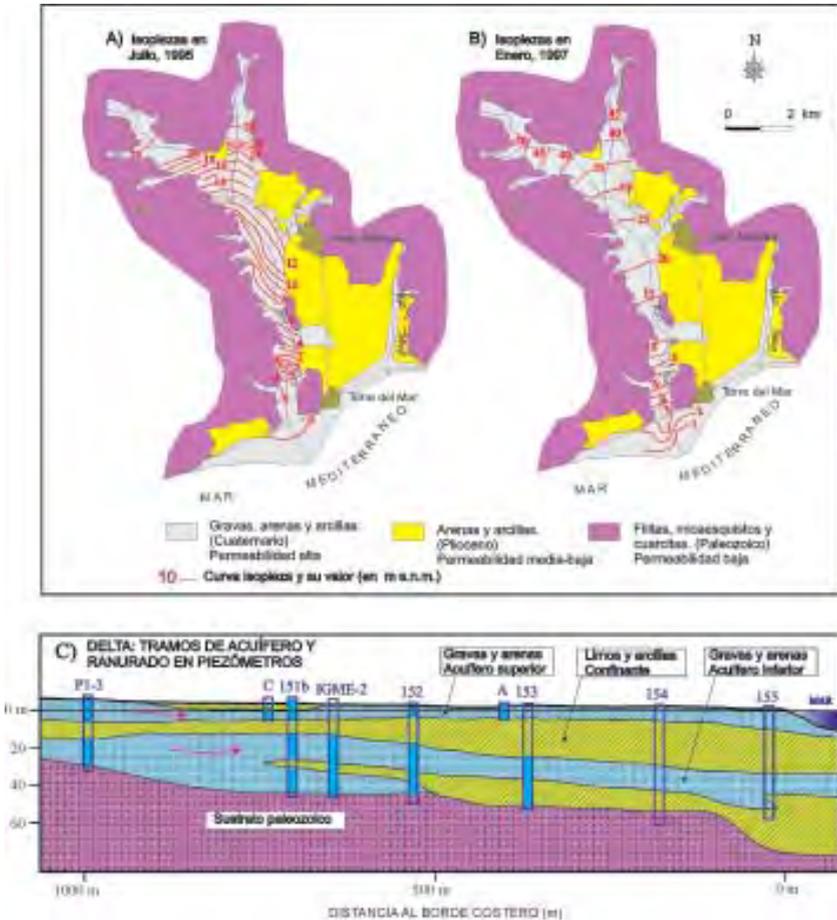


Figura 30. (A) y (B) Piezometría del acuífero en julio de 1995 (seca) y enero de 1997 (periodo húmedo). (C) Corte hidrogeológico del delta, coincidente con el cauce del río: identificación de los acuíferos superior e inferior y ranurado de los piezómetros en cada nivel.

Durante la década de los noventa, el problema de la escasez de recursos hídricos debido a la pertinaz sequía se vio agravado por el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas. La concentración de bombeos en el sector costero provocó la progresión de la intrusión marina y, con ello, la salinización de numerosas captaciones. Por otra parte, la agricultura intensiva que se desarrolla sobre el acuífero conlleva la aplicación de elevadas

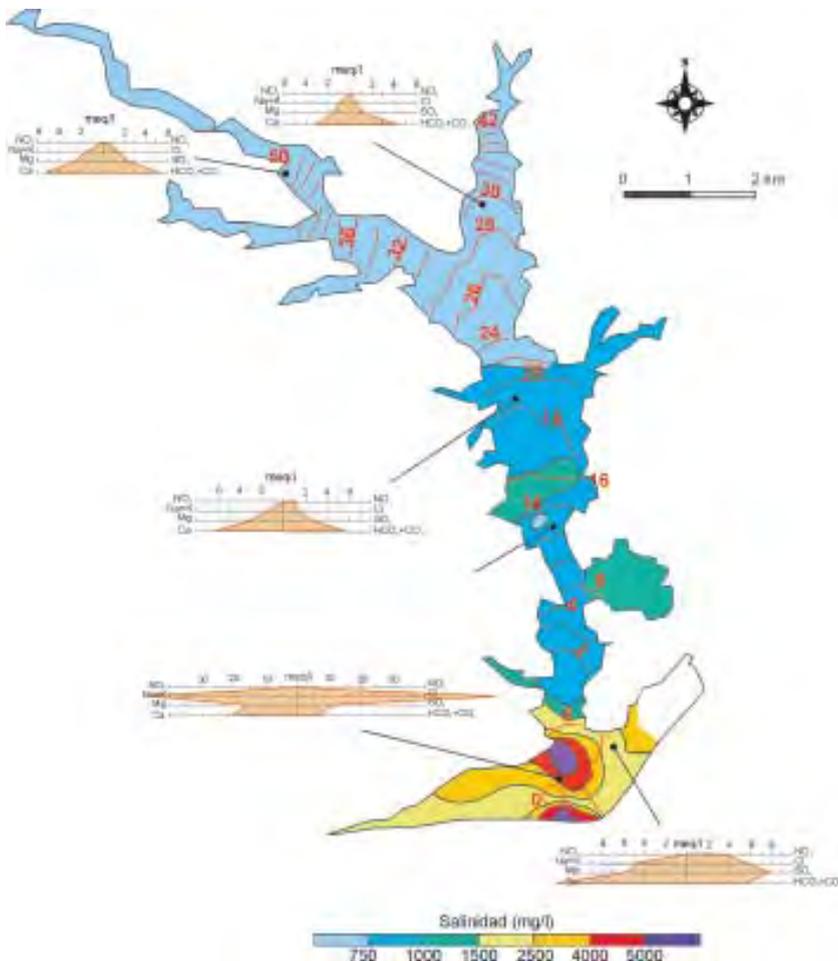


Figura 31. Distribución espacial de los principales elementos hidroquímicos, piezometría (en m) y salinidades. Situación correspondiente a julio de 1994.

dosis de fertilizantes (hasta 400 kg N/ha/año en algunos cultivos), que han dado lugar a altos contenidos en nitratos en las aguas. Durante los años hidrológicos 1993/94 y 1994/95, el 70% de las captaciones existentes presentaban contenidos en nitratos superiores a 50 mg/l, con valores máximos que superaban los 250 mg/l en los sectores central y deltaico. El problema de la contaminación por nitratos persiste en la actualidad y algunos estudios también han puesto de manifiesto la presencia de plaguicidas.

El itinerario propuesto permite reflexionar sobre la gestión de los recursos hídricos en cuencas de ámbito mediterráneo, sobre el impacto de la construcción de presas en el régimen hidrológico de acuíferos situados aguas abajo, sobre los efectos derivados de la explotación intensiva en acuíferos costeros y sobre la contaminación de aguas subterráneas de origen agrícola.

PARADA 1. EMBALSE DE LA VIÑUELA



Embalse de La Viñuela (febrero, 1996); parada 1.

El embalse de La Viñuela se encuentra a unos 10 km al noroeste de la ciudad de Vélez Málaga. El acceso a la parada propuesta, desde la CN-340, se efectúa tomando la salida hacia Vélez Málaga por la A-335. En el km 15 de la A-335 hay que desviarse tan sólo 1 km por la A-336 para llegar a la cerrada del embalse.

Desde el emplazamiento elegido pueden observarse con claridad las tres principales unidades de relieve de la cuenca hidrográfica del río Vélez. En la parte septentrional resaltan los escarpes calizos subbéticos y alpujárrides de las sierras de Camarolos, del Rey, Enmedio, Alhama, Tejeda y Almjara, de oeste

a este respectivamente. En estas sierras se alcanzan las mayores altitudes del sector: los picos de la Torca (1.500 m), Gallo (1.356 m), Vilo (1.412 m) y La Maroma (2.065 m). Más al sur, con una alineación este-oeste, se sitúa el corredor de Colmenar-Periana, que constituye un área deprimida, con una notable diversidad litológica (fundamentalmente margas y arcillas), y en la que se localiza el vaso del embalse de La Viñuela. Este corredor separa los fuertes relieves calizos del norte de las colinas situadas al sur, con formas más suaves y redondeadas, en las que afloran materiales esquistosos de las zonas internas béticas y donde se apoya la cerrada del embalse.

Los recursos medios del sistema del embalse de La Viñuela, de regulación hiperanual, se han estimado en 93 hm³/año, los cuales suponen el 72% del total de la cuenca (CHSE, 1987). Existe además la posibilidad de transferir aguas desde el arroyo de La Madre (cuenca endorreica de Zafarraya). El esquema de sistema puede observarse en la figura 29.

Mediante un modelo matemático de flujo se ha analizado el impacto del sistema de La Viñuela en el régimen hidrológico del acuífero de Vélez y se han simulado varias alternativas de gestión embalse-acuífero. Una de las opciones más interesantes simuladas corresponde a la posibilidad de reducir las extracciones de aguas subterráneas, especialmente en el sector costero, y atender las demandas de riego a partir de las aguas embalsadas. Esta simulación refleja una situación parecida a la que se observa actualmente, aunque se está produciendo un vertido de agua subterránea al mar.

El acuífero carece de plan de gestión. Resulta necesaria una gestión integrada de aguas, que establezca el uso conjunto embalse-acuífero e incorpore al sistema los recursos adicionales procedentes de la depuración de los efluentes urbanos. La recarga artificial del acuífero con estos efluentes convenientemente tratados evitaría o limitaría drásticamente los problemas de intrusión marina.

PARADA 2. DELTA DEL RÍO VÉLEZ

La parada puede realizarse en el puente metálico sobre el río Vélez, situado junto al km 269 de la antigua CN-340, a la entrada de Torre del Mar en dirección a Nerja. En este sector del litoral se observan sedimentos marinos de edad pliocena y las fértiles vegas instaladas en los afloramientos de los depósitos aluviales y deltaicos cuaternarios del río Vélez.

En este sector se concentran gran cantidad de captaciones, aunque los caudales bombeados son actualmente pequeños. Se trata, sobre todo, de pozos de excavación manual, de gran diámetro y profundidad menor de 15 m, como es el caso de algunas de las captaciones de las comunidades de regantes de Almayate o Torre del Mar. Siguiendo el cauce del río, por su margen derecha, a unos 300 m, se encuentran las estaciones de alerta del SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) y SAICA (Siste-



Río Vélez, en aguas altas y muy cerca de su desembocadura.

ma Automático de Información de la Calidad de las Aguas), situadas ligeramente aguas abajo de la antigua batería de sondeos para el abastecimiento a la costa occidental del término municipal de Vélez Málaga.

El nivel piezométrico se encuentra muy próximo a la superficie (< 2 m), aunque con variaciones a lo largo del año. En las figuras 30A y 30B se muestran los mapas piezométricos de julio de 1995 y de enero de 1997, que corresponden a sendas situaciones hidrológicas extremas históricas, de sequía y aguas altas, respectivamente. En el primer caso, se observan cotas piezométricas por debajo del nivel de mar hasta unos 2 km de la costa, con un conoide de bombeo en el que se alcanzan cotas piezométricas de hasta -2 m. En el periodo húmedo, por el contrario, se observa que muy cerca de la línea de costa se alcanzan ya alturas piezométricas de 1 m s.n.m. La evolución temporal de los niveles piezométricos en todo el acuífero muestra importantes variaciones a lo largo de los años, con mayores fluctuaciones en los piezómetros situados aguas arriba y menores en los más cercanos a la costa. En la zona existe una amplia red de piezómetros para el control de los niveles de agua y de la salinidad, tanto en el acuífero superior como en el inferior (Fig. 30C). Uno de estos piezómetros es el IGME-2, ranurado en el acuífero inferior, cuyos datos históricos muestran como varían inversamente la salinidad del agua y la cota piezométrica, y cuyo control puso muy claramente de manifiesto el importante proceso de extrusión marina del año 1996.

CAPÍTULO 6 ACUÍFERO DE LAS ALBERQUILLAS (NERJA)

F. CARRASCO, I. VADILLO, C. LIÑÁN e I. PÉREZ
Universidad de Málaga



Figura 32. Mapa de situación del itinerario previsto. En la foto superior, vista del sector costero de Nerja, acantilados de Maro y Cerro Gordo, al fondo. En el escarpe de la carretera se observa la falla del río de la Miel.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El sector acuífero se extiende desde la localidad de Nerja, situada en el extremo oriental de la provincia de Málaga, hasta Cerro Gordo en la provincia de Granada. Se encuentra en la estribación meridional de la Sierra Almijara, caracterizada por un relieve abrupto, muy escarpado, con altas montañas cercanas al mar surcadas por profundos barrancos perpendiculares a la línea de costas. Pertenece al Parque Natural de las sierras de Tejeda-Almijara-Alhama.

En el lugar donde la Sierra Almijara conecta con el mar Mediterráneo se ha originado una costa acantilada, con fuertes pendientes y pequeñas playas y calas de reducidas dimensiones, que constituye un enclave privilegiado de gran belleza paisajística. Son los acantilados de Maro-Cerro Gordo (CARRASCO, 1999), Paraje Natural de unos ocho kilómetros de longitud (Foto superior de la figura 32).

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Que el agua ha estado muy ligada al desarrollo histórico de esta región lo prueban diversas infraestructuras realizadas en la antigüedad para el aprovechamiento del agua: acequias, albercas y depósitos. En este sentido, aún se conservan dos importantes construcciones: en el barranco de Maro se encuentra el pintoresco acueducto del Águila, construido en el siglo XIX para llevar agua a los molinos de la vieja fábrica de azúcar de San Joaquín de Maro, y, en la desembocadura del río de la Miel, están las ruinas de una antigua fábrica de papel, conocida popularmente como el "Molino de Papel", fundada durante el reinado de Carlos III y que funcionó desde finales del siglo XVIII hasta finales del XIX.

En la región existen bastantes surgencias de agua, de ahí el nombre árabe de la localidad de Nerja: Naxira, que significa manantial abundante. Cabe destacar el manantial de Maro, los Hoyos, los Patos, El Bolichero y La Fuente Santa. Existen otras surgencias de menor entidad, como la fuente del Esparto, El Continuo, Sanguino, Huerto Romero, surgencias del río de la Miel y el manantial de las Alberquillas (ANDREO y CARRASCO, 1993a).

La Sierra Almijara está formada, en su mayor parte, por mármoles triásicos del Complejo Alpujárride, que constituyen un importante acuífero originado por procesos de fracturación y karstificación. Su importancia es debida a que la región se abastece, en la actualidad, de aguas subterráneas procedentes de este acuífero. El abastecimiento urbano de las poblaciones de Competa, Frigiliana y Nerja se realiza a partir de sondeos realizados en él y, además, existen diferentes captaciones para comunidades de regantes.

El grado de explotación a que está sometido el acuífero no es relativamente alto en su conjunto. Sin embargo, debido a la existencia de una posible compartimentación en bloques se producen sobreexplotaciones locales en algunos de los compartimentos que lo constituyen. En el borde meridional se han realizado bastantes sondeos, en los que se efectúan bombeos que originan importantes descensos piezométricos y han afectado al caudal de los manantiales más inmediatos. Por ello, algunos manantiales significativos, como El Bolichero y La Fuente Santa se encuentran actualmente secos debido a que están regulados por los sondeos realizados para el abastecimiento de Nerja. Los bombeos que tienen lugar en sondeos próximos al mar, en particular en el sector del arroyo de Cantarriján, producen ocasionalmente intrusión marina.

La Sierra Almijara presenta importantes manifestaciones kársticas, entre las que destaca la Cueva de Nerja. Existen, además, grutas submarinas en los acantilados de Cerro Gordo, por donde se produce una descarga de agua dulce al mar, procedente del acuífero carbonático. Esto reduce la salinidad del agua del mar en los puntos de surgencia sumergidos, puestos de manifiesto por los conocedores de la zona y por la existencia de comunidades marinas peculiares en su cercanía.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

La región está situada en la Zona Interna de la Cordillera Bética, en la que afloran materiales metamórficos pertenecientes al Complejo Alpujárride y sedimentos detríticos postorogénicos (IGME, 1980).

El Complejo Alpujárride está constituido por varias unidades de las cuales la de La Almijara es la que tiene mayor representación. La serie estratigráfica alpujárride comienza por una secuencia de esquistos atribuidos al Paleozoico y Trías inferior, de gran espesor (hasta 1.000 m). Sobre ella existe una potente serie de mármoles dolomíticos del Trías medio, con unos 400 m de espesor y por encima un tramo constituido por mármoles calizos con niveles de calcoesquistos, cuya potencia varía entre 30 y 100 m, atribuidos al Trías superior (SANZ DE GALDEANO, 1986 y ANDREO et al., 1993).

Los materiales postorogénicos pertenecen al Plioceno y al Cuaternario, y están constituidos por sedimentos detríticos marinos y continentales (ANDREO et al., 1993; GUERRA-MERCHÁN y SERRANO, 1993). También existen diferentes afloramientos de travertinos, de edad Pleistocena (DURÁN, 1996).

La estructura general de los materiales alpujárrides corresponde a un conjunto de unidades superpuestas, plegadas y falladas, que originan formas de gran complejidad. En el sector costero de Nerja, el manto de La Almijara pre-

senta una geometría casi tabular, buzando unos 20° hacia el sur, que corresponde a un sinclinal vergente con el flanco meridional invertido (corte III, Fig. 33).

Esta estructura queda truncada por el sur debido a la existencia de fallas de dirección WNW-ESE y NW-SE, como la de Frigiliana-Nerja o la del río de La Miel (foto superior de la figura 32), que han jugado un papel muy importante en la estructuración de la región. En los materiales pliocénicos y cuaternarios también se han dejado notar los efectos de la actividad geotectónica, lo que pone de manifiesto el levantamiento que ha experimentado el borde sur de la Sierra Almijara desde el Mioceno a la actualidad.

Los mármoles de la Sierra Almijara pertenecen a la unidad hidrogeológica Tejada-Almijara-Guájares, que tiene una extensión de 542 km² y ocupa parte de las provincias de Málaga y Granada (IGME, 1983; SGOP, 1991, ANDREO y CARRASCO, 1993a; CASTILLO y CARMONA, 2000). El sector meridional de esta unidad hidrogeológica tradicionalmente se ha denominado acuífero de las Alberquillas (Fig. 33).

El acuífero de las Alberquillas tiene una forma alargada y estrecha de dirección NW-SE, con una superficie de afloramiento de unos 70 km². Se extiende desde las proximidades de la población de Canillas de Albaida hasta el mar (DIPUTACIÓN DE MÁLAGA, 1988). Está formado por materiales alpujárri-des, cuya litología consiste, en general, en un conjunto carbonático permeable que se dispone sobre otro metapelítico de baja permeabilidad. Recientemente se ha redefinido como una unidad hidrogeológica compartimentada (CHS-IGME, 2004). Su límite meridional está definido por la falla de Frigiliana-Nerja, que lo separa de los esquistos de los mantos de Guájares y Almijara. Estos materiales suponen una barrera que determina la dirección del flujo subterráneo y origina la ubicación de los principales puntos de drenaje natural.

El acuífero es bastante heterogéneo, con importantes variaciones en el grado de karstificación, puestas de manifiesto por la presencia de manantiales a diferentes altitudes, variaciones en la cota del nivel piezométrico y por el caudal obtenido en los sondeos que lo explotan. Las transmisividades más significativas están comprendidas entre 80 y 900 m²/día.

La alimentación de la unidad de las Alberquillas procede de la infiltración de la precipitación (14 hm³/año) y de la recarga subterránea de la unidad de La Almijara, con la que se encuentra en continuidad hidrogeológica, estimada en 8-10 hm³/año.

La descarga de la unidad se produce a través de manantiales, situados en su mayoría en el contacto con las formaciones de baja permeabilidad que condicionan su límite meridional, entre los que destaca el manantial de Maro, por aportes difusos localizados en los cauces de los ríos que la atraviesan (ríos Torrox, Higuero, Chillar y de La Miel) y por bombeos en sondeos. También se produce una descarga subterránea hacia las formaciones pliocuaternarias adyacentes (surgencias en los travertinos de Maro, corte hidrogeológico central de la figura 33) y hacia el mar.



Vista de la vertiente meridional de la Sierra Almijara



Acueducto del Águila

Los bombeos tienen lugar en sondeos ubicados, fundamentalmente, en los ríos Torrox, Higuera y Chillar. En este último se encuentran las captaciones de abastecimiento a Nerja, en las que se producen descensos piezométricos importantes durante los bombeos, aunque el acuífero se recupera rápidamente en periodos húmedos. La explotación por bombeo asciende a valor comprendido entre 8 y 14 hm³/año, recursos que son utilizados para abastecimiento urbano y regadío.

A consecuencia de los bombeos, en ciertos sectores del acuífero (tales como el barranco de Cantarriján), el nivel dinámico se sitúa por debajo del nivel del mar, por lo que se produce intrusión marina, particularmente durante periodos prolongados de sequía.

Las facies químicas predominantes son bicarbonatadas cálcicas y cálcico-magnésicas, a excepción del manantial de Maro, que presenta facies sulfatada-bicarbonatada. En general, se trata de aguas poco mineralizadas (200-400 mg/l).

Sobre el acuífero existen varios focos puntuales de contaminación, como un vertedero de residuos sólidos urbanos en el barranco de Maro, actualmente clausurado, varias canteras para extracción de áridos y algunos establos de escasa entidad, aunque no existen indicios importantes de afección.

Itinerario propuesto: (Fig. 32)

- ❖ **Parada 1.** Cueva de Nerja
- ❖ **Parada 2.** El manantial de Maro
- ❖ **Parada 3.** Cerro Gordo

El itinerario consiste en hacer un reconocimiento hidrogeológico del sector costero de Nerja, dentro del acuífero de las Alberquillas, con la realización de tan solo tres paradas: la Cueva de Nerja, el manantial de Maro y el acantilado de Cerro Gordo (Fig. 32). No obstante, la región ofrece muchas más posibilidades para reconocimientos geológicos e hidrogeológicos, que las dificultades de acceso a grupos numerosos o de aparcamiento del autobús y del tiempo disponible dentro del itinerario planteado en este libro no permiten realizar, pero que aconsejamos para aquellos que quieran conocer mejor la región. Nos estamos refiriendo al cauce del río Chillar, con los sondeos de abastecimiento a Nerja, y a los cañones que existen aguas arriba, a los caminos forestales que se adentran en la Sierra Almijara, a la falla del río de La Miel, al cauce de este río, al barranco de Cantarriján, a las numerosas calas del acantilado costero, a la vista de los acantilados desde el cerro de La Torre de Maro y al afloramiento plioceeno de la playa de Burriana, que desgraciadamente ha sido urbanizado en los últimos años.

PARADA 1. CUEVA DE NERJA

Se accede a partir de la autovía A-7 (CN-340) por la salida 295. Existe un aparcamiento para autobuses en las inmediaciones de la cueva. La Cueva de Nerja es uno de los monumentos naturales más visitados de España, con una media aproximada de 500.000 personas por año. La distribución mensual presenta valores mínimos en los primeros y últimos meses del año (entre 11.000 y 20.000 personas/mes) y máximos en el mes de Agosto (entre 90.000 y 120.000 personas/mes).

El conjunto de la cavidad se divide, a efectos prácticos, en dos zonas bien diferenciadas (Fig. 34)

- Sector habilitado al turismo, denominado Galerías Bajas o Galerías Turísticas, que corresponde al tercio más meridional de la cueva. Están constituidas por una sucesión de salas separadas por edificios de espeleotemas orientadas en sentido N 35° E, con un eje principal de unos 250 metros de longitud,

- Resto de la cavidad, que abarca las Galerías Altas y las Galerías Nuevas, que constituye los dos tercios más internos de la cueva. Es el sector no habilitado al turismo, continúan con la orientación general norte-sur, aunque, en el detalle, muestran un trazado laberíntico y constituyen una sucesión de grandes salas, separadas por pequeñas porciones del macizo rocoso, caos de bloques o grandes volúmenes de reconstrucciones litoquímicas.

La Cueva de Nerja es una de las cavidades kársticas más singulares de Andalucía. Sus características geológicas y geomorfológicas sitúan a esta cueva como un punto de interés geológico de gran valor patrimonial en el contexto andaluz debido a la espectacularidad de sus salas, con abundantes y variados espeleotemas, su yacimiento arqueológico y las pinturas rupestres (DURÁN et al., 1996, CARRASCO et al., 1998a). Todo ello, junto con la situación geográfica, en un enclave turístico por excelencia, hace que sea unos de los lugares más visitados de la Costa del Sol y, al mismo tiempo, una importante fuente de riqueza para la comarca.

Al margen de esta importancia económica, la Cueva de Nerja tiene un alto interés científico, pues constituye un excelente registro fósil de la historia geológica regional de los últimos millones de años. Especialmente interesante es la sedimentación química ocurrida, al menos, desde el Pleistoceno medio a la actualidad; también conserva grabados los rasgos paleoclimáticos, neotectónicos y paleohidrológicos más destacables de la región.

Está ubicada en la vertiente meridional de la Sierra Almijara, a 158 m de altitud y a 800 m de distancia de la línea de costa actual. Es una cueva de desarrollo horizontal, con unos 750 m de longitud y un desnivel máximo de 68 m, de manera que se encuentra situada entre las cotas 127 y 195 m s.n.m. Sus salas y galerías, de grandes dimensiones, ocupan un volumen de unos 300.000 m³ y siguen una orientación aproximada norte-sur, adaptadas a las principales direcciones de fracturación.

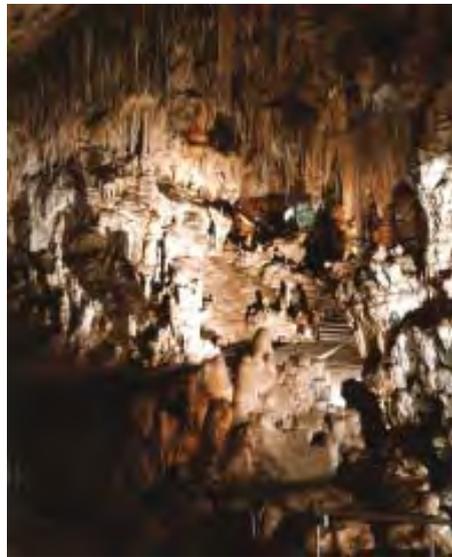
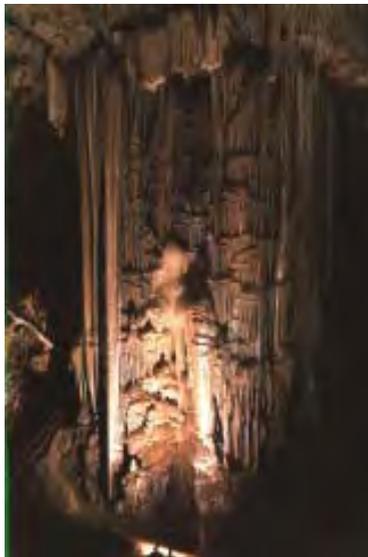


Figura 34. Mapa y detalle de espeleotemas y concrecciones de la Cueva de Nerja

La cavidad se desarrolla en los mármoles dolomíticos de la unidad de La Almirajara. Como resultado de la actividad neotectónica, la cueva está situada actualmente en la zona no saturada del acuífero, por encima del nivel piezométrico (CARRASCO et al., 1998b). Sus espeleotemas epiacuáticos indican que estuvo parcialmente inundada y ponen de manifiesto el descenso sufrido por el nivel piezométrico como consecuencia de la elevación de la Sierra Almirajara.

La génesis de la cueva se inició con posterioridad a la estructuración en mantos de la Cordillera Bética. A lo largo del Mioceno medio y superior los mármoles de la Sierra de Almirajara ya estuvieron expuestos a los procesos de disolución por el agua de infiltración que circulaba por las numerosas diaclasas y superficies de estratificación del macizo rocoso. Progresivamente, los ensanchamientos de estas discontinuidades originaron las grandes salas de la cueva.

En el Plioceno, la cueva se encontraba en las proximidades de los puntos de descarga natural del acuífero y pudo permanecer parcialmente inundada. En el Pleistoceno, la región de Nerja estuvo sometida a frecuentes e importantes variaciones climáticas. Se han determinado (DURÁN, 1996) varios periodos de mayor importancia en el crecimiento de los espeleotemas, que coinciden básicamente con los últimos estadios isotópicos de carácter cálido. En el Holoceno continuó la actividad química y la sedimentación detrítica en las proximidades de la entrada a la cavidad.

En la actualidad, debido al descenso del nivel de base, la cueva se encuentra situada en la zona no saturada del acuífero y la actividad kárstica es muy escasa por el bajo caudal de los goteos, condicionados por la escasa precipitación anual, la elevada evapotranspiración potencial y la reducida cubierta vegetal productora de CO₂. Todo ello condiciona que la cueva esté bastante seca y los goteos sean de escaso caudal.

El agua de lluvia penetra en los mármoles, circula a través de ellos y acaba goteando en el interior de la cueva. En general, los caudales de goteo son muy bajos en toda la cueva, con valores menores en invierno y primavera y más altos en verano. La tendencia se interrumpe en los meses de abundantes lluvias, cuando se registra una crecida como respuesta rápida a la recarga.

A la vista de esta evolución, puede indicarse que existe una circulación lenta del agua de lluvia a través del tramo de mármoles que hay encima de la cueva, produciéndose un desfase estacional desde la entrada de la precipitación hasta su salida por los puntos de goteo. Se trata, por lo tanto, de un sistema muy inercial, que tarda mucho tiempo en responder ante la lluvia y, por tanto, presenta un gran poder modulador de la señal de entrada (precipitación). No obstante, cuando tienen lugar lluvias abundantes se produce un aumento rápido de caudal. El tiempo de tránsito de las aguas de lluvia desde que se infiltran hasta que surgen por goteo en la cueva (6 a 8 meses, excepto en periodos de abundantes lluvias, que es de unos 2 meses) ha podido determinarse a partir de análisis químicos e isotópicos de las aguas (CARRASCO et al., 1996, ANDREO et al. 2002).



Goteos en el interior de la Cueva de Nerja

Las aguas de goteo son de facies bicarbonatada magnésico-cálcica debido a la naturaleza dolomítica de los mármoles por los que circulan, y de mineralización media-baja, con una conductividad media variable entre 392 y 547 $\mu\text{S}/\text{cm}$, según los puntos (ANDREO y CARRASCO, 1993b). La temperatura media de estas aguas es más baja en la zona visitable (18,6 - 18,9 °C) que en la no visitable (entre 19,2 y 20 °C), debido probablemente a la proximidad de la primera a las entradas naturales de la cueva y a la existencia de un menor recubrimiento de rocas sobre la cueva. Las aguas de goteo de la zona visitable tienen mayor mineralización, con clara influencia de las aguas de infiltración procedentes del riego de los jardines en las zonas más externas de la cavidad.

Prácticamente todas las muestras de agua de goteo tomadas en el interior de la cueva están sobresaturadas en calcita, y son, por lo tanto, aguas incrustantes que producen la precipitación de carbonato cálcico que contribuye al crecimiento de las formaciones, pero el bajo caudal actual de goteo hace que este crecimiento sea muy lento. Por este motivo, la actividad kárstica que hay en la cueva, en relación con las aguas de infiltración, queda limitada a la escasa y lenta formación de espeleotemas por precipitación de carbonato cálcico.

El estudio de los parámetros medioambientales (temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 del aire y temperatura de la roca) se efectúa mediante una serie de sensores distribuidos por las diferentes salas, lo que permite establecer las variaciones que sufre el microclima de la cueva en relación con el número de visitantes que recibe y con la iluminación artificial utilizada. También se lleva a cabo un muestreo sistemático del agua de lluvia y de los goteos en el interior de la cueva.

PARADA 2. EL MANANTIAL DE MARO

Para realizar esta parada es conveniente dejar el vehículo a la salida del pueblo de Maro. El manantial se encuentra muy próximo al km 296 de la A-7 (CN-340), desde el que parte un carril del lado izquierda de la carretera (en dirección Almuñécar), que a unos 100 m llega al manantial.

El manantial de Maro es actualmente el principal punto de descarga natural del acuífero de las Alberquillas. Está situado a la cota 120 m s.n.m y tiene un caudal medio próximo a 250 l/s. El hidrograma del manantial presenta bruscos aumentos de caudal como respuesta a las precipitaciones, lo cual pone de manifiesto un importante grado de karstificación funcional del sistema (ANDREO y CARRASCO, 1993a, LIÑÁN et al., 2000).

Las aguas del manantial son de facies variable, desde bicarbonatada a sulfatada cálcico-magnésica, El alto contenido en sulfatos debe estar relacionado con la existencia de evaporitas en las series carbonatadas alpujárris.



El manantial de Maro (noviembre 2002)



Caño de Maro; caída del agua del manantial de Maro al mar, através de un de un escarpe de travertinos (marzo 2000) (foto de Luis Sánchez Díaz)



Cueva de las Palomas, en los acantilados de Cerro Gordo (fotos de Antonio Castillo Martín)



Cueva de las Palomas vista desde el interior (foto de Antonio Castillo Martín).

des, deducida por la alta correlación entre las concentraciones de calcio y sulfatos. Presenta una conductividad media de $700 \mu\text{S}/\text{cm}$, con una temperatura media ligeramente superior a $18,8 \text{ C}^\circ$ (LIÑÁN et al., 2000). Las aguas están algo saturadas en calcita y en dolomita. La evolución temporal de las características químicas del agua del manantial pone de manifiesto un efecto de dilución, que es particularmente evidente en la conductividad



Vista aérea del sector costero de Nerja y Maro, donde se señala el emplazamiento de la Cueva de Nerja (parada 1), el acueducto del Aguila y el manantial y caño de Maro (parada 2) (foto cortesía de Carlos Sanz de Galdeano)

eléctrica y en las concentraciones de calcio y sulfatos. Esta dilución coincide con el aumento de caudal originado por las lluvias, lo cual confirma un comportamiento típicamente kárstico (CARRASCO et al., 1996, LIÑÁN et al., 2000).

PARADA 3. CERRO GORDO

La parada se realiza en el mirador de Cerro Gordo. Se accede a partir de la desviación que existe en la CN-340 situada a la derecha de nuestra marcha (hacia Almuñécar), y antes de la entrada del túnel que atraviesa este cerro.

Cerro Gordo es un promontorio de los mármoles de la Sierra Almijara, de topografía acentuada, con una enorme pared de 150 m de altura que cae hacia el mar, donde se hunde unos 20 metros bajo su superficie. En las paredes rocosas, y hasta 8 o 9 metros por debajo del nivel del mar, la continua acción erosiva del agua ha socavado diversas grutas, entre ellas, la Cueva de las Palomas, a la que se puede acceder desde el mar.

Constituye la zona de descarga al mar del acuífero de las Alberquillas. Las surgencias submarinas, conocidas por los pescadores locales, se estudiaron por medio de sensores de temperatura aerotransportados (ESPEJO et al., 1988). Las anomalías reveladas por medio de imágenes de infrarrojos, apoyadas por técnicas oceanográficas e hidrogeológicas, indican una disminución de la salinidad del agua y de la temperatura en el límite costero del acuífero debido a una descarga submarina que ha sido estimada en varios hm³/año.

CAPÍTULO 7 ACUÍFERO DE ALMUÑÉCAR

J.BENAVENTE¹, L.SÁNCHEZ-DÍAZ¹ y A. CASTILLO²
¹Universidad de Granada; ²CSIC y Universidad de Granada



Figura 35. Mapa de situación del itinerario propuesto. Foto superior, sector de desembocadura del río Seco, en la playa de San Cristóbal. Foto inferior, el río Verde a su paso por la barriada de Torrequevas.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El acuífero aluvial de Almuñécar se encuentra situado en el extremo occidental del sector costero de la provincia de Granada. Ocupa la parte más baja de las cuencas hidrográficas de los ríos Verde y Seco, que nacen en Sierra Almijara (Fig. 35). La extensión de ambas cuencas es de 96 y 21 km², respectivamente.

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Durante los últimos veinte años, el acuífero aluvial de Almuñécar ha sido objeto, con relativa frecuencia, de sobreexplotación estacional, lo que ha dado lugar a procesos más o menos severos de intrusión marina en el mismo. Los primeros indicios preocupantes tuvieron lugar a principios de los ochenta, aunque la situación más crítica coincidió con la sequía de los años 1992 a 1995.

En el caso del aluvial del río Verde, en épocas de estiaje -debido al incremento en los bombeos- se han llegado a identificar descensos locales del nivel piezométrico de unos 5 m bajo el nivel del mar. En tales periodos, captaciones situadas 2 km tierra adentro, como es el caso del sondeo del barranco de Itrabo, indicado en la foto panorámica de la parada 1, han experimentado problemas de salinización. En época invernal, coincidiendo con la recarga del acuífero y el descenso de los bombeos, ocurre el proceso contrario: el importante flujo de agua dulce al mar produce el lavado del acuífero. Estos ciclos de intrusión-extrusión se producen de manera rápida debido a la alta permeabilidad del acuífero (FERNÁNDEZ RUBIO et al., 1988).

Esta problemática ha llevado a la elaboración y ejecución de actuaciones y planes específicos, tales como la ordenación de extracciones, explotación de acuíferos carbonatados de cabecera, trasvases desde la cercana cuenca del río Guadalfeo y reutilización de aguas residuales (actualmente se ha construido una planta junto al cauce del río Verde, cuyas aguas se están recargando en parte: foto panorámica de la parada 1).

La situación ha mejorado notablemente desde el trasvase del río Guadalfeo, pues no se ha vuelto a producir una bajada tan importante de los niveles de agua en el acuífero, si bien es verdad que no se ha padecido una sequía tan continuada como la de aquellos años.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

Este acuífero corresponde a las formaciones aluviales de los ríos Verde y Seco, los cuales desembocan al este y oeste, respectivamente, del núcleo urbano de Almuñécar, situado originalmente en un cerro que co-

rresponde a un afloramiento de rocas metamórficas que se prolonga ligeramente hacia el mar (Peñón del Santo, fácilmente perceptible en la foto superior de la página de portada de este acuífero). En la actualidad, el desarrollo urbanístico ha hecho que Almuñécar se extienda más allá de ambos cauces, especialmente a lo largo del paseo marítimo y alrededores inmediatos.

El acuífero está constituido por arenas y gravas con una fracción pequeña de limos, por lo que tanto su porosidad intergranular como su permeabilidad son elevadas. Estos materiales están encajados en un potente conjunto metapelítico que constituye el substrato impermeable (Fig. 36). El aluvial del río verde ocupa una extensión próxima a los 5 km², y su espesor varía desde unos 40 m, a la altura de la vecina localidad de Jete, hasta unos 60-80 m en la costa (ITGE-JA, 1998). La superficie y espesores del aluvial del río seco son inferiores.

Se trata de un acuífero libre en la mayor parte de su extensión. La posición del nivel piezométrico es variable según la época del año. En febrero-abril, en situación de aguas altas, muestra un flujo continuo hacia el borde costero. En septiembre-noviembre, en situación de aguas bajas, se pone de manifiesto, aproximadamente 2 km tierra adentro, un conoide de depresión más o menos generalizado, el cual ha llegado a presentar, según se ha citado, cotas negativas de unos 5 m, situación hidrodinámica que origina la intrusión marina referida. Ambas circunstancias son patentes en los mapas de isopiezas que se presentan más adelante (Fig. 38).

La recarga media del acuífero se ha estimado entre 11 y 17 hm³/año (ITGE-JA, 1998), la mayor parte de la cual se relaciona con la infiltración de aguas circulantes por los dos cauces principales. A este respecto, es particularmente destacable el efecto del río Verde, pues su aportación es permanente (aunque a la altura de Almuñécar esto no sea apreciable, porque su caudal es derivado aguas arriba). Ello obedece a que este río recibe el drenaje de una serie de surgencias en su sector de cabecera (sierras de Almijara y Cázulas). Por el contrario, el régimen hidrológico del río Seco es fuertemente irregular, permaneciendo sin flujo durante largos periodos de tiempo. El propio nombre de los ríos es una clara referencia a su régimen típico de aportaciones.

El que la recarga del acuífero esté determinada estrechamente por las aportaciones fluviales implica, entre otros aspectos, que los caudales subterráneos circulantes van a experimentar variaciones considerables entre años de sequía y otros de anormal pluviosidad. Esto se refleja en los hidrogramas incluidos en la figura 36, donde se advierte el efecto de la sequía de 1992-1995 y su recuperación tras las importantes aportaciones del año 1996. Se comprueba este comportamiento tanto en los niveles registrados en un piezómetro de control como en los caudales de la galería de las Angosturas, de la que luego se tratará con más detalle.

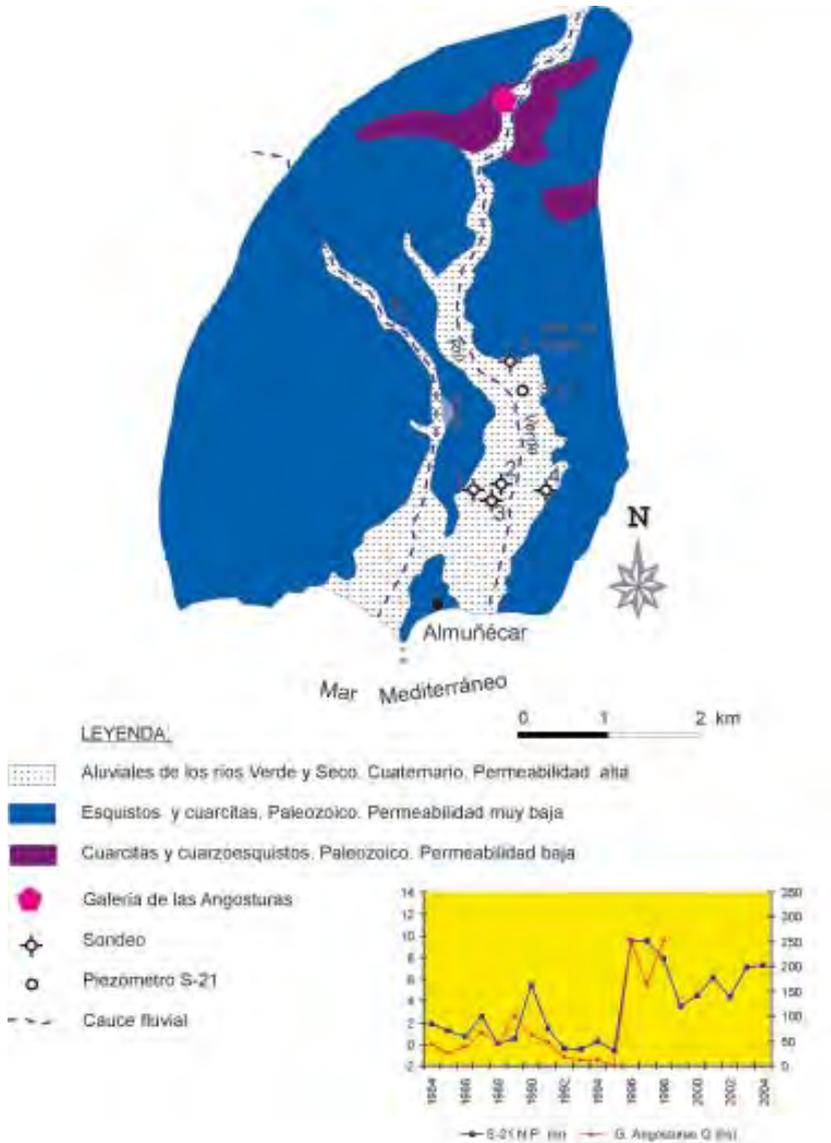


Figura 36. Esquema hidrogeológico del acuífero aluvial de los ríos Verde y Seco de Almuñécar (sintetizado de AVIDAD y GARCÍA DUEÑAS, 1981 y DIPUTACIÓN DE GRANADA-ITGE, 1990). Hidrograma de la galería de las Angosturas (1984-1998) y niveles en un piezómetro del río Verde (1984-2004) (Fuente: CHSE)

La descarga del acuífero se produce por bombeos, del orden de 9 hm³/año, concentrados en los meses estivales. El resto de la descarga, unos 3 hm³/año, se produce subterráneamente hacia el mar, presumiblemente durante la época de aguas altas. El total asciende a unos 12 hm³/año (ITGE-JA, 1998).

Si se consideran las diferencias estacionales entre los volúmenes estimados de recarga y descarga en el acuífero, habría que hacer una distinción entre el balance en la estación húmeda, donde se produce la salida de agua dulce al mar, y en la estación seca, donde la ausencia de agua subterránea se verá suplida con la intrusión de agua del mar (CALVA-CHE, 1991).

Las aguas son de tipo bicarbonatado cálcico y buena calidad natural. Las mejores características se registran en el aluvial del río Verde, aguas arriba de la rambla de Itrabo, donde la salinidad total no suele superar los 600 mg/l. Aguas abajo de dicho sector llegan a ser patentes los efectos de la intrusión marina y en muchas captaciones se aprecia, sobre todo durante el estiaje, un incremento de salinidad total hasta valores de 5.000 mg/l, con aguas de tipo clorurado sódico (ITGE-JA, 1998). Los contenidos en nitratos se encuentran dentro de los límites admitidos por la legislación (< 50 mg/l).

Itinerario propuesto: (Fig.35)

- ❖ **Parada 1.** Panorámica del aluvial del río Verde
- ❖ **Parada 2.** Galería de las Angosturas

La parada 1 ha sido seleccionada porque desde ella se tiene una buena panorámica del aluvial del río Verde y, en particular, del área donde normalmente se concentran los bombeos en época de sequía, lo cual induce la intrusión marina, según se ha mencionado anteriormente.

La parada 2 se dedica a la galería de las Angosturas, obra de captación romana o incluso más antigua. Tiene interés histórico por tratarse del antiguo abastecimiento a Almuñécar y por la forma de conducción de sus aguas, mediante acueductos romanos en buen estado de conservación.

PARADA 1. PANORÁMICA DEL ALUVIAL DEL RÍO VERDE

La parada se realiza a la salida (hacia Motril) de la localidad de Almuñécar (Fig. 35), a la altura del km 316 de la CN-340. Desde aquí se observa en primer término el cauce del río Verde y su aluvial, donde se asienta la

Vega de Almuñécar, en la que predomina el cultivo de frutos tropicales, tales como la chirimoya y el aguacate, muy típicos de esta zona. Al fondo, los relieves carbonatados de Sierra Almijara y, en segundo plano, las meta-pelitas que constituyen el substrato y los bordes impermeables de dicho aluvial (foto panorámica).

También se pueden apreciar numerosas captaciones, que generalmente en época de estiaje experimentan procesos de salinización, las cuales disminuyen la calidad de sus aguas debido a un aumento importante de cloruros a causa de los procesos ya mencionados de intrusión marina. También se observa el pozo de abastecimiento del barranco de Itrabo (nº 5 en la Fig. 36), que llegó a salinizarse en la sequía de 1995; está a cota 26 m.s.n.m, y alcanza una profundidad de 41 m; su explotación es del orden de 0,7 hm³/a. Muy próximo a él se encuentra la estación de tratamiento de aguas residuales.

El abastecimiento a la localidad de Almuñécar se realiza desde diversos puntos (Fig. 37):

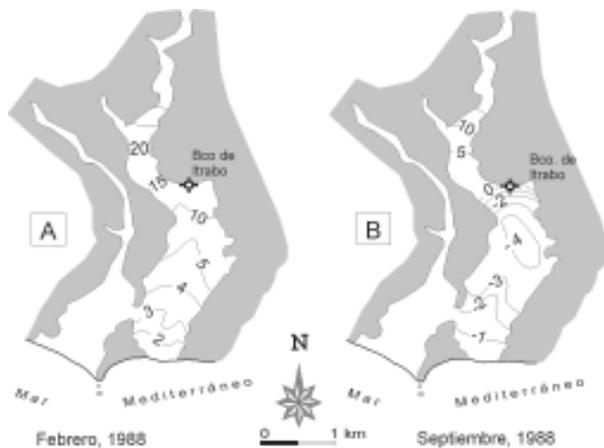
- Trasvase desde el río Guadalfeo:	2,5	hm ³ /a
- Galería de las Angosturas:	0,8	"
- Sondeo en el barranco de Itrabo:	0,7	"
- Sondeos en el aluvial del río Verde:	0,3	"
- Sondeos en el arroyo de Cantarriján:	0,1	"
Total		4,2 hm ³ /a

En la Vega de Almuñécar, el Ayuntamiento dispone de cuatro captaciones (números 1 a 4 de la figura 36) que toman el agua del acuífero aluvial del río Verde. Los sondeos son de características similares; se encuentran a cotas entre 12 y 14 m.s.n.m. y llegan a una profundidad de 55 m. Tienen capacidad para aportar un caudal de 60 l/s cada uno.

Para reducir los riesgos de salinización nunca funcionan dos a la vez. Se han llegado a detectar valores por encima de los 8.000 mg/l de cloruros en diciembre de 1989. Ello está provocado por las elevadas extracciones que se producen en periodos de estiaje, precedido de periodos poco lluviosos, lo cual induce un descenso importante del nivel piezométrico (Fig. 38).



Figura 37. Localización de los principales puntos de abastecimiento a la localidad de Almuñécar. Las cifras representan la extracción media en hm³/año de los últimos 5 años (1999-2004)



- LEYENDA:**
- Aluviales de los ríos Verde y Seco. Cuaternario
 - Materiales paleozoicos
 - ~ Isopieza (m.s.n.m.)

Figura 38. Mapas de isopiezas del aluvial de Almuñécar. (A) Isopiezas en aguas altas; (B) Isopiezas en aguas bajas (modificado de ITGE-JA, 1998)

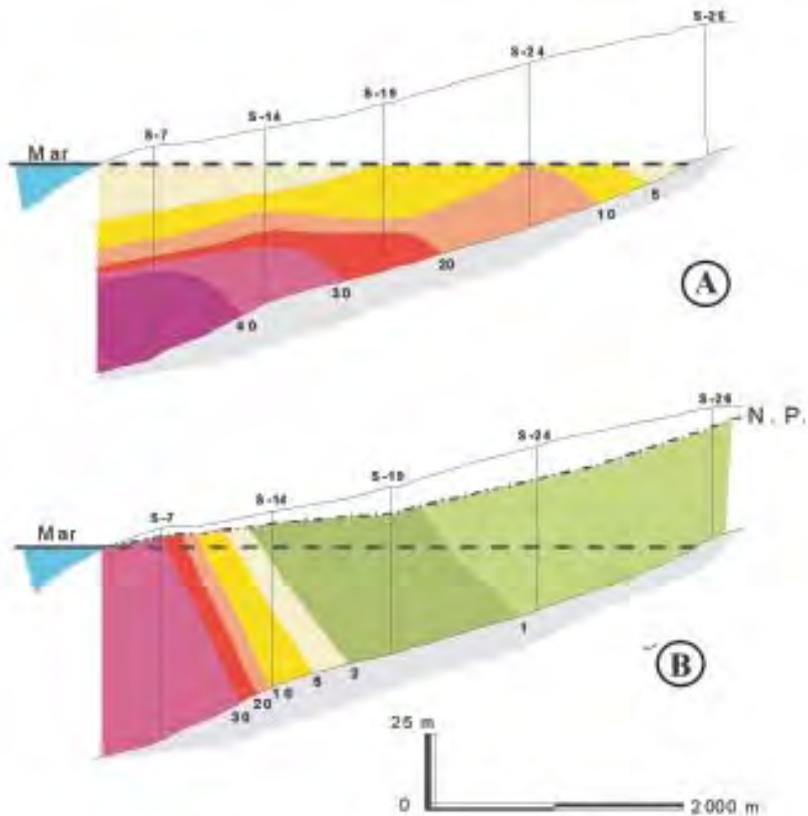


Figura 39. Panorámica del aluvial del río Verde desde la parada 1 e isovalores de conductividad eléctrica del agua en agosto de 1995 (A) y febrero de 1996 (B). (simplificado de BENAVENTE et al., 2004, a partir de datos originales de CARRASCO et al, 2000).

En la figura 39 se representa un corte longitudinal del acuífero con indicación de diferentes valores de conductividad medidos en distintas épocas. El caso A muestra los efectos de la intrusión marina en condiciones muy favorables a dicho proceso, pues corresponde al verano de 1995, tras un importante periodo de sequía. El caso B refleja el efecto de lavado producido como consecuencia de la importante recarga acaecida a comienzos de 1996. No obstante, la distribución de salinidades en el sector costero que resulta en este último caso es relativamente anómala.

PARADA 2. GALERÍA DE LAS ANGOSTURAS

Para llegar a esta galería se toma la carretera desde Almuñécar hacia la localidad de Jete (carretera de la Cabra), en cuyo término municipal se encuentra dicha captación. El lugar se encuentra a 8 km de Almuñécar y a 1 km de la señal que nos indica el límite de esta localidad con el cercano municipio de Jete. Desde la carretera, convenientemente señalizada por un cartel, se puede ver en la margen derecha del río Verde la gruta de la Virgen de las Aguas. El primer registro de la galería se encuentra al atravesar el río Verde desde la margen izquierda, lugar donde existe un estrecho carril que lleva directamente a la galería, situada a unos 50 m del cauce del río.

Se trata de una captación a cota 55 m.s.n.m, seguramente realizada en el lugar en que en tiempos históricos (púnicos o romanos) existía una surgencia. Esta captación ha sido la única fuente de abastecimiento a la localidad de Almuñécar hasta los años 70 del siglo pasado. La longitud de dicha galería es desconocida y fue realizada en el propio aluvial del río Verde en la época púnica o romana, siendo la anchura del acuífero en ese punto de unos 45 m tan sólo. Es probable que dicho estrechamiento del valle fluvial ofreciese las condiciones hidrogeológicas favorables para la aparición de la surgencia mencionada (GARCÍA GARCÍA et al., 1981).

Esta galería capta las aguas subálveas del río Verde y se inicia en una pequeña gruta donde la devoción popular situó una Virgen de hierro fundido, cuya negra silueta puede verse desde la carretera. Se conoce como la Virgen Negra o Virgen de las Aguas.

Las aguas aflorantes fueron conducidas mediante canales y acueductos hasta el pueblo de Almuñécar, algunos de los cuales se conservan aún en la zona y se pueden ver a lo largo del recorrido. Se trata de la obra arquitectónica de mayor longitud que existe en España (DEL MORAL MARTÍN, 1994).

La conducción de aguas en su conjunto constaba de los siguientes elementos: galería enterrada, canal sobre muros, seis obras en arcada, túnel de trasvase de cuenca, arquetas, sifón y depósito final. Estos dos últimos han desaparecido con el tiempo. El túnel de trasvase mencionado se encuentra a la altura de la barriada de Torrecuevas y lleva las aguas hasta el río Seco.



Entorno y situación de la galería de las Angosturas, cerca de la parada 2



Grua de la Virgen de las Aguas, donde comienza la galería de las Angosturas (Jete) y uno de los primeros registros de la misma (febrero, 2005)



Acueducto de Torrecuevas. Destacan sus arcadas de medio punto, típicamente romanas. Desde aquí se inicia el túnel de trasvase al río Seco



Acueducto romano situado en la margen izquierda del río Seco, por donde discurría el agua trasvasada desde el río Verde, del cual destaca su doble arcada

Respecto a los caudales que fluyen por esta galería, en los aforos efectuados en los años 60 se llegaron a medir caudales de 350 l/s; en los años 80 los caudales disminuyeron por debajo de 100 l/s, y en los 90 (a partir del año 1996, de muy alta pluviosidad) se midieron valores por encima de los 250 l/s (ver Fig. 36: hidrograma de las Angosturas).

El incremento de las extracciones y los efectos de las sequías han originado una importante reducción en el caudal aportado por esta galería. En la actualidad sólo alcanza los 60 l/s de caudal medio, y se llega a secar en época de estiaje. Aproximadamente unos 45 l/s son destinados en la actualidad para abastecimiento a La Herradura y Almuñécar, mientras que el resto es utilizado para regadío.

CAPÍTULO 8 ACUÍFERO DE MOTRIL-SALOBREÑA

J.BENAVENTE y M^a.L.CALVACHE
Universidad de Granada

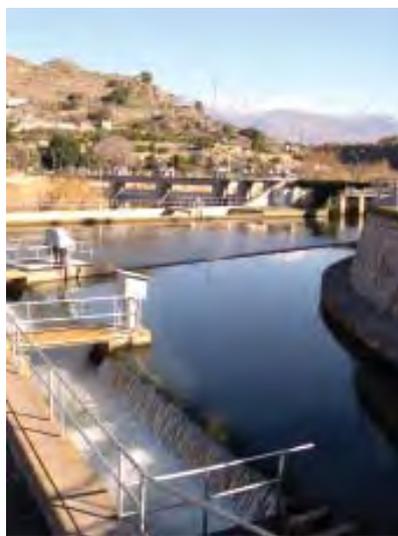


Figura 40. Mapa de situación del itinerario previsto. Foto superior, vista general del acuífero desde el Castillo de Salobreña. Foto inferior, azud de derivación de Vélez-Benaudalla, en el río Guadalfeo (fotos de Antonio Castillo Martín)

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Este acuífero se localiza en el sector de desembocadura del río Guadalfeo, cuya cuenca -que drena la vertiente suroccidental de Sierra Nevada y el Valle de Lecrín- ocupa una superficie total de 1.295 km² (Fig. 40).

El acuífero de Motril-Salobreña, de morfología prácticamente llana (Fig 40, foto superior), se extiende desde las elevaciones constituidas por los macizos carbonatados de Espartinas y Escalate, hasta el mar Mediterráneo. El tramo fluvial inmediatamente aguas arriba del acuífero presenta interés paisajístico debido al encajamiento del río en el macizo de Escalate, en el sector conocido como garganta de Cañizares o Tajos de los Vados.

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

El acuífero de Motril-Salobreña es el más importante de la costa granadina, tanto por sus recursos como por su extensión. Sus aguas son aprovechadas para abastecimiento humano, uso industrial y como complemento de regadíos. En comparación con otros acuíferos costeros granadinos, destaca por la mejor calidad química de sus aguas y por no haber mostrado hasta la actualidad problemas de salinización por intrusión marina.

El acuífero de Motril-Salobreña deberá gestionarse conjuntamente con el embalse de Rules, una vez que éste entre en funcionamiento. La gestión debería a su vez contemplar la optimización de un esquema de regulación que integre los acuíferos de cabecera y el acuífero aluvial.

La concentración del turismo en la zona es importante, aunque todavía no como en la Costa del Sol Occidental. Aunque se llega a triplicar en el verano la población, no presenta, según se ha dicho, problemas de intrusión marina.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

En la descripción hidrogeológica del acuífero de Motril-Salobreña debe incluirse la de los afloramientos carbonatados permeables de Escalate-Espartinas, que constituyen parte de sus bordes.

También parece conveniente incluir un breve comentario sobre el acuífero carbonatado de la Sierra de Lújar, tanto por su proximidad como por el hecho de que su descarga afecta al caudal del río Guadalfeo poco antes de discurrir sobre el acuífero de Motril-Salobreña.

- *Acuífero de la Sierra de Lújar*

Este acuífero está compuesto por calizas y dolomías del Complejo Alpujarride (Trías medio-superior), con intercalaciones de margocalizas y arcillas, cuya potencia se estima en 1.300 m (Fig. 41). Su estructura geológica es bastante compleja, debido a su disposición en mantos de corrimiento y a su intensa fracturación, lo que se refleja en su comportamiento hidrogeológico, ya que su drenaje natural se hace a cotas dispares.

Su principal recarga se estima que es por infiltración directa de la precipitación, del orden de 53 hm³/año. Además, el río Guadalfeo aporta del orden de 400 l/s, lo que hace un total de recursos medios de 66 hm³/año (ITGE, 1991).

La descarga corresponde a las surgencias de Vélez de Benaudalla, Algarrobo y Rules, con un caudal conjunto aproximado de 1.000 l/s. Para el resto de manantiales se estima una descarga de 200 l/s. Toda esta descarga va al cauce del río Guadalfeo. Su magnitud es prácticamente la misma que los recursos evaluados.

Las aguas son bicarbonatadas cálcico-magnésicas en su mayor parte, aunque en el manantial de Rules son sulfatadas-cloruradas cálcicas, con valores de mineralización sensiblemente más elevados.

- *Acuífero de Escalate - Espartinas*

Se localiza al suroeste de la Sierra de Lújar (Fig. 41) y ocupa gran parte del borde noroeste de la vega de Motril-Salobreña. Es atravesado por el río Guadalfeo, que lo divide en dos partes: Espartinas al noroeste y Escalate al sureste. Entre ambos aparece la espectacular garganta de Cañizares. Se trata de dos afloramientos de materiales carbonatados alpujarrides, en medio de los cuales se sitúa el acuífero detrítico correspondiente a los depósitos aluviales del río Guadalfeo.

Existe una interconexión entre este acuífero y el aluvial del río Guadalfeo. En el borde occidental del macizo de Espartinas puede existir conexión con formaciones carbonatadas que afloran con más extensión hacia el sector de cabecera del río Verde de Almuñécar; el borde sur corresponde al contacto con los materiales del acuífero Motril-Salobreña, hacia el cual drena en parte. El resto de los bordes corresponde a límites impermeables.

La recarga del acuífero procede de las precipitaciones y de la percolación de cursos superficiales.

Las salidas por bombeo son escasas y se localizan en el borde sur del macizo de Espartinas. La principal descarga visible se hace por el manantial de Pago Alto, situado en el contacto entre el material carbonatado y el aluvial. Otro manantial significativo, del que antes se abastecía Motril, se

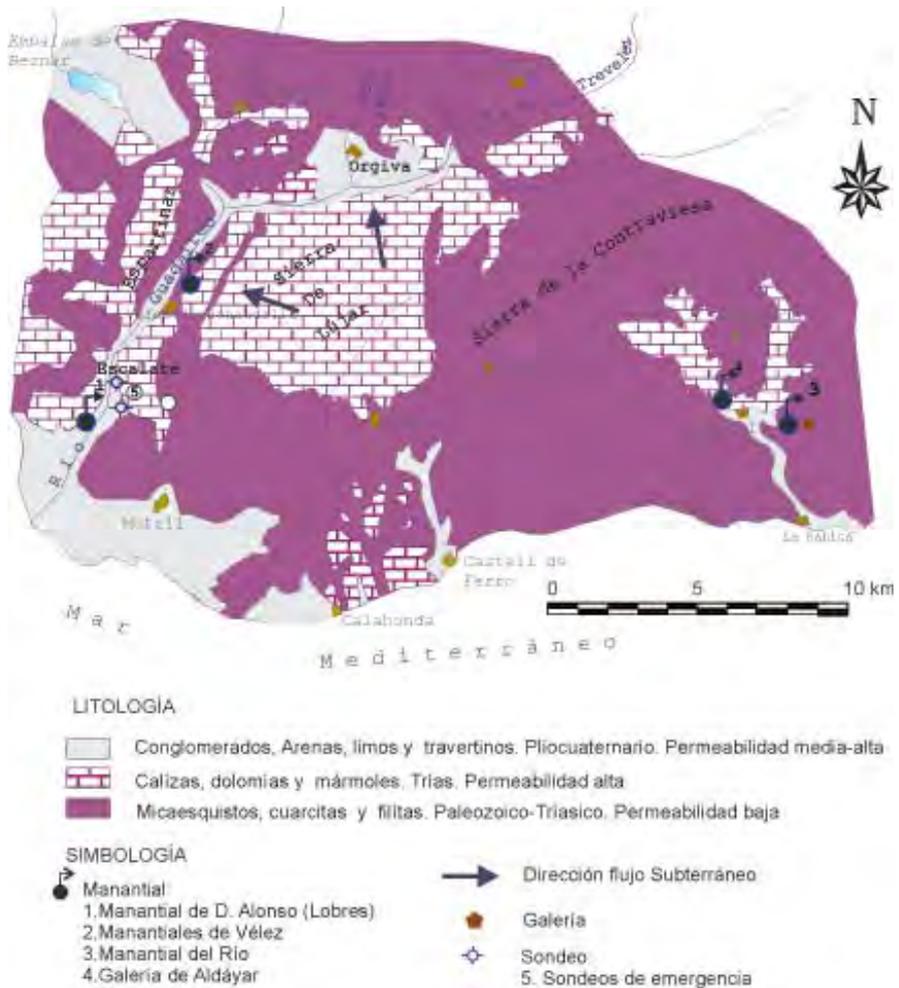


Figura 41. Esquema hidrogeológico del acuífero de la Sierra de Lújar y sectores de su entorno (a partir de DIPUTACION DE GRANADA-ITGE, 1990)

vio afectado por las obras de construcción de la actual carretera nacional. Una obra hidráulica que merece la pena reseñar es la denominada "galería de subálveas", que discurre a cierta profundidad en el acuífero aluvial en este sector, aunque en la actualidad se ha visto reducida su productividad debido a las explotaciones realizadas en sus proximidades.

Por último, cabe mencionar que en el extremo suroeste del acuífero carbonatado existen una serie de pequeños manantiales termales alineados según una fractura de dirección N80E, cuya temperatura de surgencia alcanza los 25°C. Son los denominados manantiales de Lobres, en la actualidad casi agotados (BENAVENTE y CALVACHE, 1981; SOTO, 1998).

- Acuífero aluvial de Motril-Salobreña

Se trata de una llanura suavemente inclinada hacia el mar, cuya extensión es de 42 km², en su mayor parte formada por depósitos aluviales (gravas, arenas y limos), cuyo origen se debe fundamentalmente al río Guadalfeo y cursos menores de las ramblas de Molvízar y del Puntalón. Existen además materiales conglomeráticos y una estrecha franja correspondiente a depósitos de playa (arenas y gravas) circunscritos al borde litoral de 11 km de longitud (Fig. 42).

El substrato está constituido por materiales metapelíticos alpujárrides de carácter impermeable y por materiales carbonatados en su parte septentrional, donde se ponen en contacto con el acuífero de Escalate-Espartinas. El espesor de los materiales cuaternarios aluviales es de unos 20 m al norte y de más de 200 m en la desembocadura del río.

Destaca el afloramiento carbonatado donde se asienta el pueblo de Salobreña, que actúa como colector de parte del flujo subterráneo de los materiales aluviales. A su pie surgen los manantiales del Gambullón y La Raja.

El análisis de la piezometría del acuífero pone de manifiesto que existe alimentación subterránea procedente del sector septentrional, en relación con el acuífero carbonatado de Escalate-Espartinas. Además, existe recarga procedente de los principales cursos superficiales y se aprecia el carácter preferencial del flujo subterráneo a lo largo de determinados sectores.

Los últimos estudios (IBAÑEZ, 2005) cifran en unos 34 hm³/año los recursos medios del acuífero de Motril-Salobreña, considerado desde el comienzo de la vega propiamente dicha (azud del Vínculo). La recarga se produce fundamentalmente por la infiltración del río Guadalfeo, que se estima en unos 11,5 hm³/año, por el retorno del agua de riego (10 hm³/año), y, en menor grado, por la infiltración de la precipitación (estimada en unos 3,5 hm³/año). Otras entradas al acuífero son la alimentación lateral a partir del acuífero de Escalate-Espartinas, del orden de 4 hm³/año, y el flujo subterráneo procedente del tramo aluvial, aguas arriba del azud del Vínculo, estimado en 5 hm³/año.

La descarga por bombeos se estima en unos 7,5 hm³/año. Las salidas que se producen en el cauce del río en el sector próximo a la desembocadura son del orden de 0,5 hm³/año, el resto, unos 26 hm³/año, deben drenarse subterráneamente hacia el mar (IBAÑEZ, 2005).

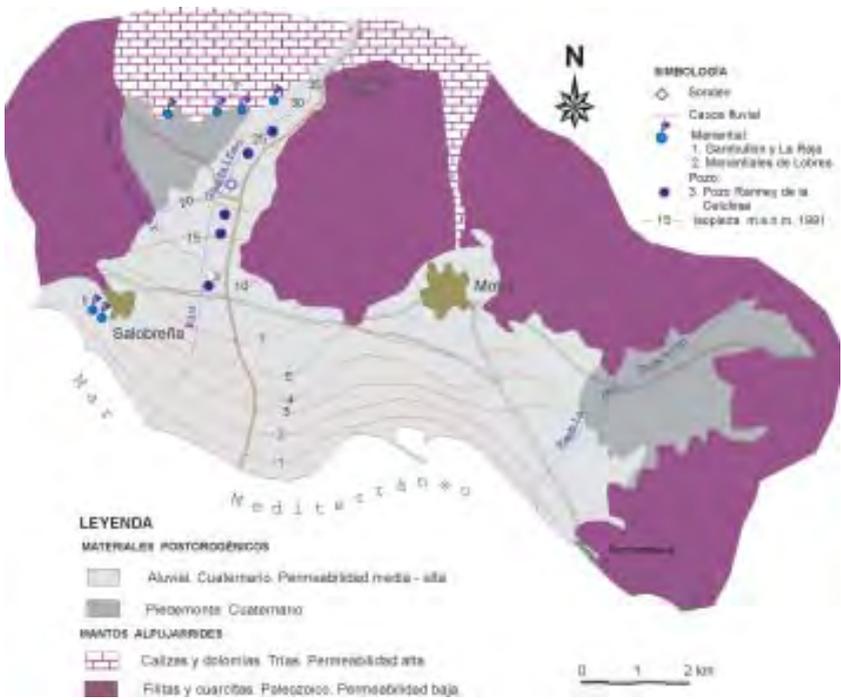


Figura 42. Esquema hidrogeológico del acuífero aluvial de Motril-Salobreña (a partir de ITGE, 1991)

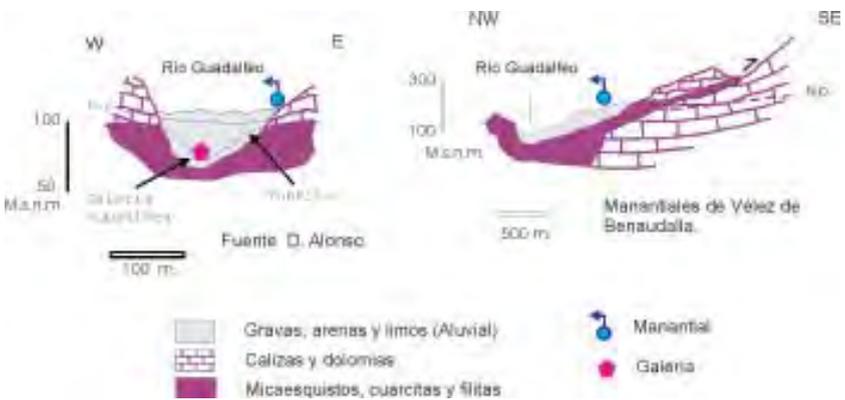


Figura 43. Tipología de manantiales del aluvial del río Guadalfeo y de la Sierra de Lújar (ITGE, 1991)

Se trata, pues, de un acuífero con drenaje importante al mar, preferentemente por el paleocauce del río Guadalfeo, que es el eje de la descarga más importante del acuífero (SOTO, 1998), por lo que no se aprecian síntomas de intrusión marina.

En general, se puede decir que el acuífero presenta una buena calidad de sus aguas, con escasos contenidos salinos y con una facies hidroquímica mayoritaria bicarbonatada mixta. Se puede hacer una cierta zonación hidroquímica, ya que en el sector occidental las aguas son bicarbonatadas cálcicas y en el oriental y central son bicarbonatadas cálcico-sódicas (CALVACHE et al., 2003)

Itinerario propuesto: (Fig.40)

- ❖ **Parada 1.** Panorámica de la Vega y manantiales del Gambullón y de La Raja
- ❖ **Parada 2.** Pozo tipo "Ranney" y panorámica del área
- ❖ **Parada 3.** Manantiales de Vélez de Benaudalla y afloramiento de travertinos
- ❖ **Parada 4.** Embalse de Rules
- ❖ **Parada 5.** Desembocadura del río Guadalfeo

**PARADA 1. PANORÁMICA DE LA VEGA Y MANANTIALES
DEL GAMBULLÓN Y DE LA RAJA**

La parada se realiza a la altura del km 326 de la CN-340, a la entrada de la localidad de Salobreña (desde Almuñécar). Desde este punto se divisa, entre otras cosas, el afloramiento carbonatado sobre el que se asienta el núcleo de Salobreña, el lugar donde nace el manantial del Gambullón y parte de la Vega de Salobreña .

Para llegar hasta los manantiales, se toma la carretera de entrada al pueblo y luego la desviación a la playa y a la vega. Antes de llegar a la playa, se toma un camino que discurre por la base del peñón carbonatado, donde se encuentran las surgencias referidas arriba.

Se trata de unos manantiales que nacen al pie del afloramiento carbonatado donde se asienta la localidad de Salobreña. El caudal conjunto es de varias decenas de litros por segundo. Este caudal es superior al que puede ser explicado por la infiltración sobre dicho afloramiento, por lo que debe existir una conexión con el acuífero detrítico, dentro del cual, la masa marmórea intensamente karstificada, que constituye el Peñón, actuaría a manera de colector.



Vista del Peñón de Salobreña, donde nace el manantial del Gambullón, desde la parada 1 (foto de Antonio Castillo Martín)



Detalle de la surgencia del Gambullón (foto de Antonio Castillo Martín)



Pozo "Ranney", en la orilla del río Guadalfeo y cerca del cruce de la CN-340 con la CN-323, en la parada 2 (foto de Antonio Castillo Martín)



Afloramiento de travertinos de Vélez de Benaudalla desde la parada 3; cerca de donde se localizan importantes manantiales del drenaje de la Sierra de Lújar; en primer plano el río Guadalfeo y la CN-323, con Sierra Nevada al fondo (foto de Antonio Castillo Martín).



Detalle de los travertinos de Vélez de Benaudalla (foto de Antonio Castillo Martín)



Azud de Vélez (foto de Antonio Castillo Martín)

El propio nombre del manantial de "La Raja" alude al sistema típicamente kárstico de circulación del agua dentro de esta masa marmórea. Estas discontinuidades abiertas son fácilmente visibles desde el camino de acceso.

PARADA 2. POZO TIPO "RANNEY" Y PANORÁMICA DEL ÁREA

La parada se sitúa junto al río Guadalfeo, muy próxima al cruce de la CN-340 con la CN-323. Allí se encuentra un pozo con drenes horizontales radiales, tipo "Ranney", perteneciente a la Empresa Nacional de Celulosa de Motril.

Las captaciones de este tipo se componen de un pozo central colector, de gran diámetro (entre 3 y 4 m) con paredes y fondo impermeables (Fig. 44). Lateralmente, los drenes radiales, en uno o varios niveles, se adentran en el acuífero y se componen en general de tubos filtrantes de pequeño diámetro, entre 100 y 300 mm, pudiendo alcanzar de 50 a 150 m de longitud. Su abertura en el pozo está cerrada por una compuerta que puede ser maniobrada desde el exterior.

La característica principal de este tipo de captaciones es que, cuando se sitúan sobre niveles muy permeables, como pueden ser los que jalonan el cauce del río Guadalfeo, permiten la obtención de caudales más elevados que los sondeos convencionales. Así, en este punto, se pueden bombear caudales de varios centenares de litros por segundo con escasa depresión del nivel freático.

PARADA 3. MANANTIALES DE VÉLEZ DE BENAUDALLA Y AFLORAMIENTO DE TRAVERTINOS

Desde la CN-340, muy cerca de la parada anterior, se toma el desvío hacia Granada por la CN-323; en el trayecto se atraviesa la espectacular garganta formada por los materiales carbonatados de Escalate-Espartinas, antes comentada. En el recorrido a lo largo de esta garganta, se observan junto a la carretera una serie de sondeos localizados en los materiales carbonatados. Han sido realizados recientemente por el Organismo de Cuenca y permiten obtener caudales en torno a los 100 l/s. El objeto de dichas captaciones era el complemento de abastecimiento en caso de emergencia.

Unos pocos kilómetros más adelante, pasado el cruce de Vélez Benaudalla, se llega a varios manantiales que se encuentran en el borde derecho de la carretera y que, en cascada, vierten sus aguas al río Guadalfeo (Fig. 43). Asociados a ellos aparecen importantes afloramientos de travertinos.

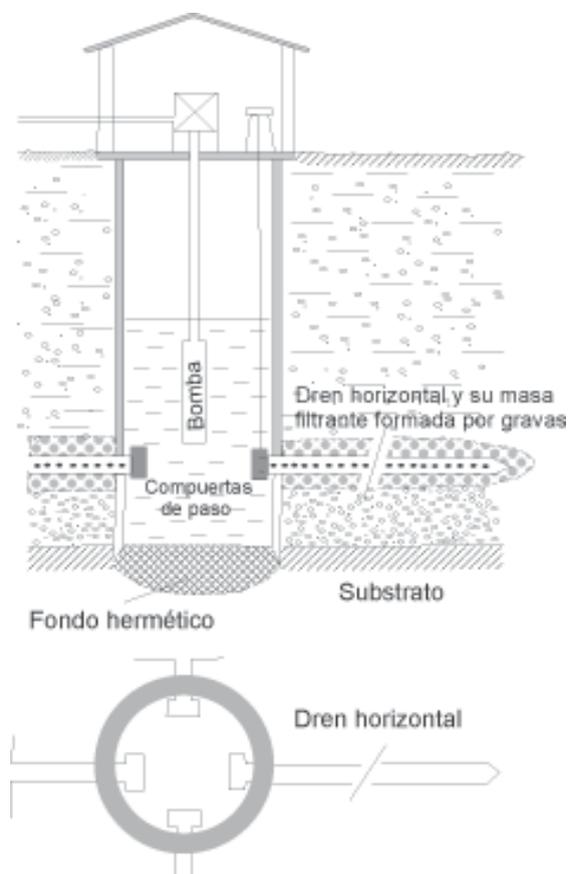


Figura 44. Esquema-tipo de un pozo con drenaje radial, tipo "Ranney" (CASTANY, 1975)

A la izquierda del cruce hacia Vélez de Benaudalla se localiza el denominado azud de Vélez (Foto inferior de la figura 40). En esta obra hidráulica se conduce el agua del río Guadalfeo a través de un canal que discurre por su margen izquierda y que, unos kilómetros aguas abajo, salva la rambla de Escalate mediante un airoso acueducto. Cerca de este último punto existe también otro azud más antiguo, denominado de Lobres o del Vínculo, del cual parten una serie de acequias para el riego en las vegas de Motril y Salobreña. Desde el mencionado acueducto, las aguas del río Guadalfeo son conducidas para su uso como abastecimiento a la ciudad de Motril y para el riego en sectores de vega próximos a esta población y otros más orientales de Carchuna y Castell de Ferro.

PARADA 4. EMBALSE DE RULES

Continuando la CN-323, a la altura del km 178, hallamos el embalse Rules, la siguiente parada.

Este embalse se sitúa inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Guadalfeo e Izbor. Recoge aguas de la vertiente sur de Sierra Nevada, del Valle de Lecrín, de la ladera septentrional de la Sierra de Lújar y de algunos barrancos de la Sierra de La Contraviesa, contabilizando una cuenca vertiente de 1.070 km², y una aportación media de 210hm³/año.

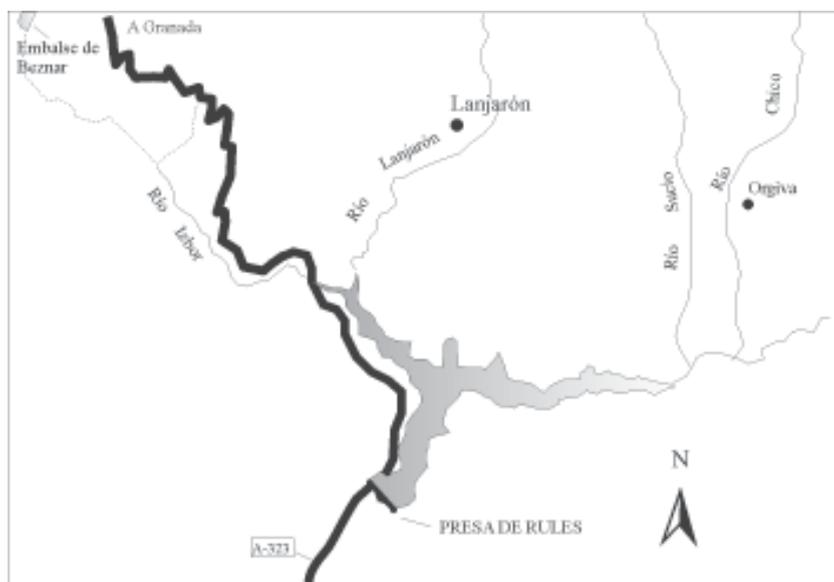


Figura 45.. Esquema de situación y de los principales cauces que desembocan en el embalse de Rules.

El sistema hidráulico Rules-Béznar regulará un 85% de las aportaciones de la cuenca (CHSE, 1999), con 118 hm³ de capacidad útil. El propósito es abastecer a la población de la costa granadina, garantizar el regadío de los productos extratempranos, cultivos de invernadero, frutos tropicales y defender contra avenidas catastróficas las infraestructuras del Bajo Guadalfeo. Se ha previsto un aprovechamiento hidroeléctrico a pié de presa o combinado con el existente de Izbor.

La presa es de gravedad, arqueada, con un solo arco de 500 m de radio. La fábrica es de hormigón vibrado convencional y se asienta sobre materiales esquistosos cuarcíticos muy fracturados, debido a la alta tectonización del Complejo Alpujárride en ese sector de la Cordillera Bética.



Embalse de Rules; parada 4 (foto cortesía de Manuel López Chicano)



Desembocadura del río Guadalfeo, cerca de la parada 5; al fondo se observa la garganta de Cañizares (en el macizo de Escalate-Espartinas) y, detrás, los relieves de Sierra Nevada (foto de Antonio Castillo Martín)

Algunas de las características de este embalse se resumen a continuación (CHSE, 1999):

- Caudales punta de avenidas

T = 10 años	635 m ³ /s
T = 100 años	1.730 m ³ /s
T = 1.000 años	3.020 m ³ /s
PMF	6.240 m ³ /s

- Volumen de avenida

T = 10 años	35,00 hm ³
T = 100 años	107,00 hm ³
T = 1.000 años	205,00 hm ³
PMF	462,00 hm ³

PARADA 5. DESEMBOCADURA DEL RÍO GUADALFEO

Desde la playa de Salobreña, se toma el paseo litoral en dirección este. Dicho paseo, en la actualidad, no llega a atravesar el cauce del río, pero permite situarse en la margen derecha de la zona de su desembocadura. Desde este punto, caminando poca distancia, se pueden observar unas zonas húmedas que se producen por la intersección de las superficies freática y topográfica. En un contexto hidrogeológico similar se ha generado el pequeño humedal conocido como "Charca de Suárez", que se localiza aproximadamente 1 km más hacia el este, el cual goza de protección ambiental.

Desde esta parada, si se mira hacia el norte, se tiene una panorámica en la que se puede distinguir a lo lejos los macizos carbonatados de Escalate y Espartinas y las formaciones de pié de monte relacionadas con ellos, la sierra de Lújar y los materiales metapelíticos impermeables, así como el propio acuífero aluvial en primer plano. Al fondo, si hace un día claro, se pueden observar las cumbres de Sierra Nevada.

Existe un camino que discurre paralelo al cauce por su margen izquierda. Si se sigue éste y se camina aproximadamente 1 km se puede encontrar, semiculto en un cañaveral, y junto a una instalación de captación de emergencia de abastecimiento a Motril, un sondeo de investigación surgente. Se trata de una perforación que alcanza casi 200 m de profundidad. Es probable que el carácter surgente derive de la existencia de componentes verticales de flujo a una cierta profundidad, circunstancia lógica si se tiene en cuenta el contacto entre agua dulce y agua salada que debe producirse en la vertical de dicho sondeo.

CAPÍTULO 9 ACUÍFEROS DE CASTELL DE FERRO Y CARCHUNA

M^a.L.CALVACHE
Universidad de Granada



Figura 46. Mapa de situación del itinerario propuesto. Foto superior, detalle del acuífero de Castell de Ferro. Foto izquierda, acantilados kársticos en el trayecto Calahonda.-Castell de Ferro (fotos de Antonio Castillo Martín)



LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Los acuíferos de Castell de Ferro y Carchuna se localizan en las poblaciones citadas, al sur de la provincia de Granada (Fig. 46). El acuífero aluvial de Castell de Ferro limita al norte con la Sierra de Lújar y su extensión es de 4 km²; el acuífero de Carchuna, cuya extensión aproximada es de 5 km², se encuentra limitado al noreste por el pico Conjuros y al oeste por el Cabo de Sacratif. Al sur, ambos se ponen en contacto con el mar Mediterráneo.

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

El interés hidrogeológico del acuífero de Castell de Ferro radica en la influencia que tienen, en el borde costero, los materiales carbonatados altamente transmisivos, en contacto con el acuífero detrítico. El Cerro del Castillo de Castell de Ferro y el de El Aguila, situado en el borde occidental, están constituidos por materiales carbonatados intensamente karstificados que poseen una permeabilidad bastante más elevada que la que muestra el acuífero detrítico. Este hecho explicaría la deficiente calidad del agua subterránea mostrada por el acuífero para procesos de intrusión poco importantes (CALVACHE, 1991).

Actualmente, la situación ha mejorado desde que en los años 90 entró en funcionamiento el trasvase desde el río Guadalfeo, disminuyendo considerablemente las extracciones de aguas subterráneas.

El acuífero de Castell de Ferro está declarado en el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur como un sistema con problemas de intrusión marina. En efecto, numerosos han sido los estudios que han puesto de manifiesto este problema.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

- Acuífero de Castell de Ferro

Está constituido por materiales detríticos aportados por las ramblas Ancha y de Gualchos, que desembocan al oeste y este de Castell de Ferro, respectivamente. Estos dos cursos en raras ocasiones llevan agua, sólo en momentos de abundantes precipitaciones. También existen algunos depósitos conglomeráticos correspondientes a antiguos lechos, ahora colgados sobre el cauce actual. La morfología del acuífero es alargada, con una longitud de unos 8,5 km y tan solo 700 m de anchura máxima. El espesor mayor (60 m) se alcanza en el borde costero y en la confluencia de las dos ramblas citadas.

La cuenca está constituida por materiales alpujárrides (Fig. 47). La mayor parte del substrato y bordes del acuífero son materiales metapelíti-

cos que, a efectos prácticos, se pueden considerar como impermeables. En la cuenca también existen pequeños afloramientos de materiales carbonatados, aunque su importancia como acuíferos es limitada debido a su escasa superficie. A pesar de ello, el contacto entre el acuífero detrítico y dos de estos afloramientos en el sector costero tiene un efecto crucial en el funcionamiento hidrogeológico del sistema.

La piezometría pone de manifiesto conoides de depresión en el sector de la rambla Ancha, coincidiendo con la zona donde se concentran la mayor parte de los bombeos del acuífero (Fig. 47). A partir del año 1996, momento en el que comenzó un periodo más húmedo y se inició un trasvase de agua superficial desde el río Guadalfeo, la situación ha mejorado y, aunque sigue existiendo algo de conoide, los niveles quedan por encima de la cota 0 m (PULIDO-LEBOEUF, 2000).

Los recursos se estiman en 3,5 hm³/año, procedentes de la infiltración de la escorrentía de la cuenca vertiente. Los bombeos son del orden de 3 hm³/año, mientras que el resto, 0,5 hm³/año, se drena subterráneamente al mar (ITGE-JA, 1998).

Se observa una gradación en las características hidroquímicas de las aguas del acuífero, desde bicarbonatada cálcica en la parte alta a clorurada sódica en el sector próximo al borde costero, indicando una clara influencia del agua marina en el acuífero. La elevada actividad agrícola del sector queda reflejada en los altos contenidos en nitratos encontrados en la vega de Castell de Ferro (PULIDO-LEBOEUF, 2000).

La mayor parte de los bombeos para riego y abastecimiento humano se concentran en el sector del acuífero detrítico, siendo escasos los sondeos en los materiales carbonatados. Las extracciones causan un descenso del nivel freático hasta llegar un momento en el que se invierten los gradientes hidráulicos, perdurando esta situación durante la mayor parte del año y con la consecuente aparición de la intrusión marina. La sobreexplotación, al menos estacional, es patente, ya que la calidad del agua subterránea se ha ido deteriorando progresivamente hasta llegar a una situación extrema en mayo de 1986, en la que a una distancia de unos 1.000 m de la costa y a una profundidad de 10-15 m, la composición del agua subterránea era muy similar a la del agua de mar (BENAVENTE et al., 1988).

Esta grave situación comenzó a remitir a partir de 1996, como así lo ponen de manifiesto los datos registrados en los sondeos realizados por el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería (PULIDO-BOSCH, et al., 1999). Estos sondeos, situados a unos 400 m de la línea de costa, después de atravesar unos 3-4 m de materiales detríticos, cortan los mármoles del manto de Murtas hasta 60-65 m de profundidad. En ellos se detecta el paso de agua dulce a agua salada a unos 53 m, lo cual indica una situación de lavado y no de intrusión.

- *Acuífero de Carchuna*

Está constituido por gravas y arenas de antiguos depósitos de playa, cuyo espesor no suele superar los 20 m. Se encuentra rodeado por materiales metapelíticos alpujárrides de los mantos de Adra y Murtas, excepto en el sector oriental donde se encuentra en contacto con mármoles dolomíticos y calizos de carácter permeable.



Panorámica del acuífero detrítico de Castell de Ferro y de su cuenca vertiente.

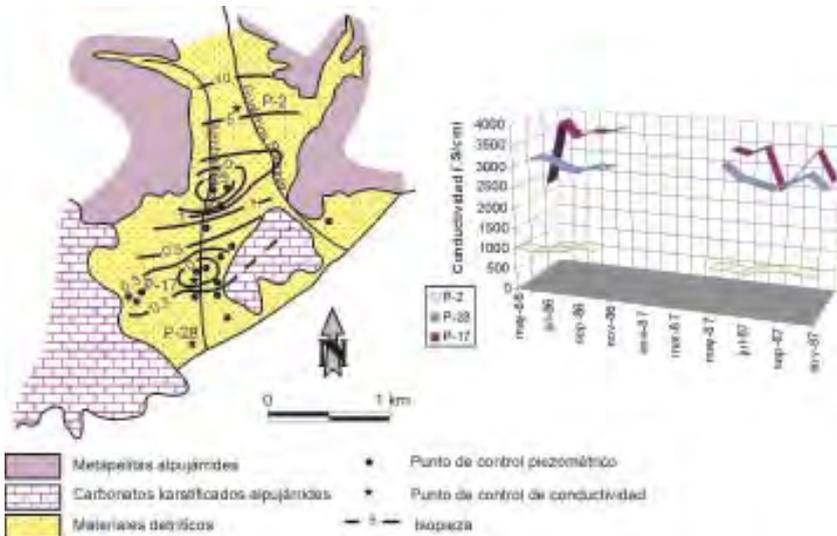


Figura 47. Plano de isopiezas del acuífero de Castell de Ferro para abril de 1988 y evolución de la conductividad eléctrica en tres puntos del mismo.

La recarga está en torno a 2,5 hm³/año, procedente de la infiltración de la escorrentía superficial generada en la cuenca vertiente y, en menor proporción, de la precipitación caída sobre el afloramiento permeable. Los bombeos son escasos, por lo que la mayoría de los recursos drenan subterráneamente al mar.

Las aguas son cloruradas sódicas y de salinidad relativamente alta, debido al escaso grado de lavado natural de los sedimentos que constituyen el acuífero.

El trayecto discurre por la CN-340, aproximadamente entre el túnel del Cabo de Sacratif y la localidad de Castell de Ferro.

Itinerario propuesto: PARADA 1 ACANTILADOS KÁRSTICOS (Fig. 48)

- ❖ **Parada 1.** Acantilados kársticos a 2 km de Calahonda en dirección a Castell de Ferro,
- ❖ **Parada 2.** Panorámica del acuífero de Castell de Ferro a la derecha de la carretera en una pequeña explanada y zona de descanso.

Desde este lugar podemos ver unos afloramientos carbonatados alpujárrides en contacto directo con el mar. Todo el sector litoral comprendido entre las localidades citadas está caracterizado por la existencia de bellos acantilados y calas, instaurados, fundamentalmente, sobre materiales carbonatados.

Sin embargo, los afloramientos kársticos, de alta permeabilidad, son de pequeña entidad, y están desconectados por tramos de filitas y esquistos, siendo la extensión total de ellos de unos 14 km², y sus recursos muy moderados. La explotación es pequeña y, en épocas húmedas, se produce descarga de agua dulce al mar (RUBIO CAMPOS et al., 2004).



Vista parcial del tramo costero carbonatado localizado entre las poblaciones de Calahonda (al fondo, junto a la llanura acuífera de Carchuna) y Castell de Ferro. Detalle de la situación de la parada 1 (foto cortesía de Carlos Sanz de Galdeano)

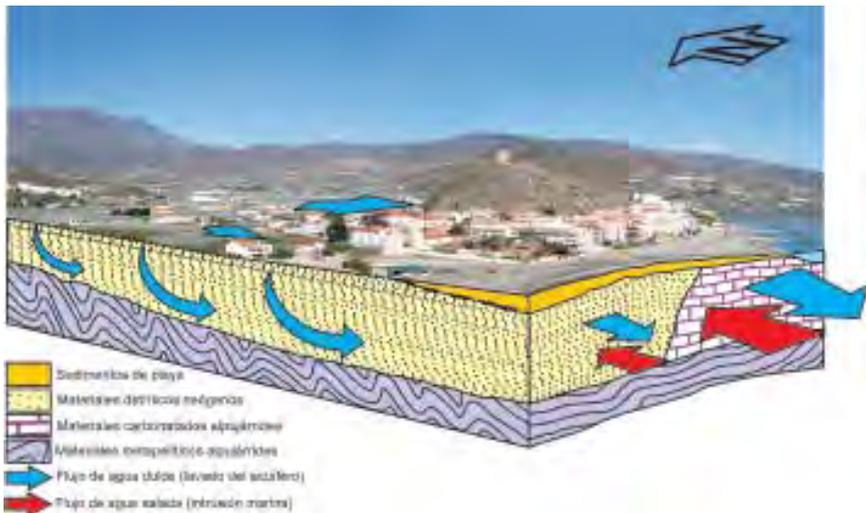


Figura 48. Esquema del funcionamiento del proceso intrusión-lavado en el acuífero de Castell de Ferro.

PARADA 2. PANORÁMICA DEL ACUÍFERO DE CASTELL DE FERRO

La parada la realizamos antes de llegar al pueblo de Castell de Ferro, para observar una panorámica de la costa, desde donde se dominan los afloramientos carbonatados del Cerro del Castillo y el Cerro de El Aguila, y los materiales detríticos, totalmente cubiertos por invernaderos. Para acceder a la parada, nos saldremos de la CN-340 por nuestra derecha, justo en una curva muy pronunciada en la que se da vista al núcleo, y que accede a un área de descanso dotada de unas mesas de piedra.

CALVACHE (1991), y CALVACHE y PULIDO-BOSCH (1994) hacen una reconstrucción del proceso de intrusión-lavado del acuífero a partir de la simulación matemática efectuada en la zona. En primer lugar, establecen que la intrusión marina ocurre dos veces al año en este acuífero, en primavera y final de verano, coincidiendo con los momentos de máximo bombeo para satisfacer las necesidades hídricas provenientes de la agricultura. Entre estos dos períodos de intrusión, existe un lavado del acuífero por flujo de agua dulce en dirección al mar.

Durante el momento álgido de la intrusión marina, entra mayor volumen de agua salada a través de los materiales carbonatados que constituyen el Cerro del Castillo, al igual que ocurre durante la fase de lavado del acuífero en momentos de máxima recarga, donde el flujo de agua dulce sale mayoritariamente a través de este pequeño macizo karstificado (Fig. 48). La ruta preferencial de circulación del agua subterránea, tanto en un sentido como en el otro, es a través del material más transmisivo (el afloramiento carbonatado del Castillo).

Este patrón de flujo durante el proceso de intrusión y lavado del acuífero puede explicar el alto contenido salino del agua subterránea en el sector central del acuífero detrítico de Castell de Ferro. Así, aunque el proceso de intrusión no implica un volumen importante de agua salada, el flujo de agua dulce a través de los materiales detríticos situados entre los dos afloramientos calizos no es suficiente para lavar el residuo salino que queda en el acuífero tras el proceso de intrusión, ya que se produce de forma mayoritaria a través de la zona más transmisiva.



Panorámica del acuífero de Carchuna tomada desde las proximidades del faro de Sacratif. (foto de Antonio Castillo Martín)



Localización de los sondeos de investigación junto al afloramiento carbonatado del Cerro del Castillo de Castell de Ferro (foto de Antonio Castillo Martín)

CAPÍTULO 10 ACUÍFEROS DE ALBUÑOOL

A.CASTILLO¹ y L.SÁNCHEZ-DÍAZ²

¹CSIC y Universidad de Granada; ²Universidad de Granada



Figura 49. Mapa de situación del itinerario previsto. En la foto superior, rambla y delta de Albuñol. En la inferior, rambla y parte de la cuenca esquistosa

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

En las inmediaciones de Albuñol (Granada) se localiza un pequeño afloramiento acuífero carbonatado (20 km²), que alimenta a materiales aluviales y deltáicos de la rambla de Albuñol (3 km²), la cual desemboca al mar Mediterráneo junto al núcleo de La Rábida. El área es atravesada de este a oeste por la CN-340 y de norte a sur por la A-345 (Fig. 49).

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Los materiales carbonatados de Albuñol afloran por erosión de su cubierta esquistosa (todos ellos pertenecientes al Complejo Alpujárride), mostrando sólo una ínfima parte de una unidad que se extiende lateralmente, aflorando hacia el oeste en la Sierra de Lújar, y al este en Turón-Peñarrodada y en la Sierra de Gádor. La sierra de Lújar se descarga en parte hacia el acuífero carbonatado de Albuñol, razón por la cual los recursos de este último exceden a los que les corresponderían por infiltración de la precipitación sobre el afloramiento. El flujo profundo, necesario para que se produzca dicha conexión, influye a las aguas un cierto termalismo (de 25 a 27 °C).

La descarga natural del acuífero carbonatado alimenta a materiales detríticos aluviales y deltáicos formados por la rambla de Albuñol; una parte del flujo discurre oculto bajo los sedimentos hasta el mar, haciendo difícil la cuantificación del balance hídrico. En el momento actual, el acuífero es excedentario, y no existen indicios de intrusión marina, aunque esta situación puede cambiar debido al progresivo aumento de la demanda agrícola de la zona (invernaderos).

Aunque no se trate de un aspecto estrictamente hidrogeológico, es obligado comentar para esta cuenca su fuerte carácter erosivo. La cuenca de Albuñol (120 km²) está mayoritariamente integrada por materiales esquistosos impermeables, sobre los que se cultivan almendros y vides en laderas muy empinadas; la alta erosionabilidad de los esquistos, unida a la roturación en pendiente de los cultivos citados, y a la fuerte irregularidad pluviométrica del clima mediterráneo, son los principales factores responsables de la elevadísima tasa erosiva existente, que se manifiesta en profundas cárcavas abiertas en el terreno y en las magníficas dimensiones de las ramblas existentes en el área. El día 18 de octubre de 1973 acaeció una tormenta en el sureste peninsular que provocó una de las riadas más catastróficas que se conocen en el área, la cual causó cerca de 800 muertos.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

El acuífero de Albuñol, propiamente dicho, corresponde a materiales carbonatados (Complejo Alpujárride), que afloran en ventana tectónica en

las proximidades de la localidad de Albuñol. Los materiales carbonatados son visibles al haber sido desmantelada por erosión su cobertera esquistosa, sobre todo por la acción de las ramblas de Aldáyar y Albuñol; presentan una potencia visible de 500 m y una extensión de 20 km² (Fig. 50). En el sector existen también materiales aluviales (de la rambla de Albuñol) que recubren parcialmente a los anteriores, y que son alimentados por descargas visibles y ocultas desde los materiales carbonatados; el flujo subterráneo discurre a través de los sedimentos cuaternarios hasta alcanzar el delta y el mar Mediterráneo, a unos 5 km de distancia.

El afloramiento carbonatado de Albuñol, como se comentó anteriormente, posee unas descargas superiores a las que le corresponderían por infiltración del agua de precipitación caída sobre su superficie; una parte de esa descarga procede de su conexión hídrica en profundidad con la Sierra de Lújar; estos flujos profundos explicarían el termalismo de las aguas, con temperaturas comprendidas entre 25 y 27 °C, la elevada salinidad (2 g/l) y la facies sulfatada cálcica (a partir de la disolución de yeso contenido en la formación carbonatada). Las salidas visibles presentan en conjunto un caudal relativamente constante, si bien la regulación del acuífero por sondeos ha modificado la descarga natural, y, consecuentemente, el régimen de flujo en los materiales detríticos. En régimen no influenciado (sin sondeos de explotación), las salidas visibles eran del orden de 90 a 150 l/s; los dos manantiales principales del área eran el manantial del Rfo (con un caudal medio de 60 a 90 l/s) y la mina de Aldáyar (con un caudal de 30 a 60 l/s; ALMECIJA et al., 1986).

Los materiales aluviales cuaternarios se extienden a lo largo de la rambla de Albuñol, hasta alcanzar su desembocadura en las proximidades de la localidad de La Rábita; en ese sector, la extensión y profundidad de los sedimentos es mayor, al haberse desarrollado un modesto delta; este tiene continuidad hacia el este, hasta conectar con la desembocadura de la rambla de Huarea, en las proximidades de la pedanía del Pozuelo. Los sedimentos están constituidos por gravas, arenas y limos; su superficie es de sólo 3 km² y la potencia de los mismos suele estar comprendida entre 20 y 50 m.

El nivel piezométrico oscila entre 30 m de cota en la ventana tectónica de Albuñol, hasta los 2 - 3 m en las inmediaciones de La Rábita. Los recursos medios del acuífero pueden cifrarse en 9 hm³/año, en su práctica totalidad procedentes del drenaje subterráneo del acuífero carbonatado. Las salidas por bombeo se estiman en 4 hm³/año, por lo que el resto, 5 hm³/año, debe fluir de forma oculta hacia el mar (ITGE-JA, 1998)

La calidad de las aguas está condicionada por el peculiar carácter físico-químico de la descarga carbonatada, igual que ocurre en otros sectores litorales, y, especialmente, en el vecino acuífero del delta del Adra (en ese caso, a partir de las descargas de la Fuente de Marbella). Como se ha comentado, se trata de aguas termales, con una mineralización de 2 g/l y facies sulfatada cálcico-magnésica (ITGE-JA, 1998)

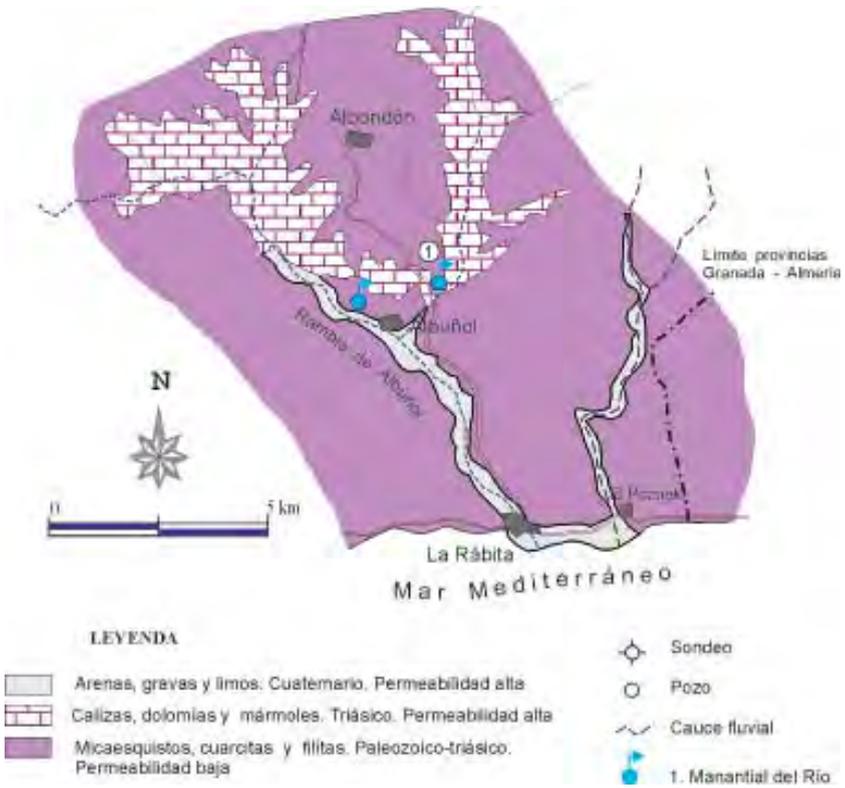


Figura 50.- Esquema hidrogeológico de los acuíferos de Albuñol (modificado de ITGE-JA, 1998)



Panorámica actual de la rambla y delta de Albuñol desde la parada 1; al fondo, a la izquierda, pequeño delta de la rambla de Huarea

Itinerario propuesto: (Fig. 49)

- ❖ **Parada 1.** *Panorámica de la rambla y delta de Albuñol*
- ❖ **Parada 2.** *Afloramiento carbonatado de Albuñol y manantiales termales*

PARADA 1. PANORÁMICA DE LA RAMBLA Y DELTA DE ALBUÑOL

Para llegar a ella es necesario tomar la salida de La Rabita, desde la CN-340, para tomar después la carretera que sube al cerro del cementerio desde la margen derecha de la rambla de Albuñol.

Desde el privilegiado mirador de esta parada se observa la rambla, el delta y la tipología esquistosa de la cuenca. El delta, prácticamente cubierto por invernaderos, es muy dinámico, en respuesta a los abundantes acarreos que suministra la rambla y a una activa acción erosiva litoral. Bajo el relleno aluvial, discurren los excedentes de las descargas de cabecera del acuífero carbonatado de Albuñol; en el momento actual, se supone que esta descarga es del orden de 5 hm³/año; no existen indicios de procesos de intrusión marina, si bien, esta situación puede cambiar en un futuro, ante el incremento de las demandas para satisfacer nuevos cultivos de invernaderos. El sector más vulnerable a la salinización es el oriental, hacia el núcleo del Pozuelo, en la desembocadura de la rambla de Huarea (cuyo pequeño delta se puede observar en distintas fotos), por donde, previsiblemente, se detectarán los primeros síntomas de intrusión.

Lo más reseñable de esta parada es el carácter fuertemente torrencial y erosivo de la cuenca, y, en general, de todo el sureste español. Ello se debe a la ocurrencia en la región de fenómenos atmosféricos tipo "gota fría", de altas intensidades de precipitación, junto a la existencia de condicionantes adicionales de riesgo erosivo; entre los que cabría destacar la deforestación, impermeabilidad del terreno, alta pendiente y el roturado de extensas laderas de esquistos fácilmente erosionables. En los últimos años, la proliferación de invernaderos, que cortan el flujo natural de las aguas, especialmente en salidas de barrancos, se ha convertido en un efecto de riesgo añadido.

La noche del 18 de octubre de 1973 cayó un aguacero de 600 mm, que provocó una punta de avenida en la desembocadura de la rambla de Albuñol estimada en 2.500 m³/s (ROMERO CORDON et al., 1989); se calcula que la tercera parte de ese caudal estaba compuesto por materiales sólidos (lodo y rocas); ello ocasionó una de las mayores catástrofes naturales conocidas de todo el sureste español. Se produjeron cerca de 800 muertos, de ellos 46 en esta cuenca; aparte de ello, los daños materiales fueron muy cuantiosos; se contabilizaron cerca de 100 casas destruidas, 250 has de tierras de cultivo devastadas, calles, caminos y carreteras (C-333 y CN-340) destruidas, etc. La avenida, de 50 m de anchura por 7 m de altura en el tramo final, dio lugar a un nuevo delta que se introdujo en el mar más de 200 m.

Tras aquella catástrofe se planificaron una serie de actuaciones de defensa frente a futuras avenidas; con el tiempo, la única materializada fue el encauzamiento y defensa de ciertos tramos de la rambla. La deforestación y roturación de cultivos en pendiente dentro de la cuenca siguen siendo factores estructurales de máximo riesgo sobre los que apenas se ha actuado; por el contrario, la proliferación de invernaderos en estos últimos años, aumentará los efectos destructivos de una nueva riada, al impermeabilizar, en el estricto sentido de la palabra, el terreno e impedir o dificultar la escorrentía natural en muchas zonas.



Estado en que quedó la CN-340 a su paso por el delta de Albuñol. Al fondo se observa el hotel mostrado en la foto siguiente (foto cortesía de Angel García Peramos)



Daños sufridos por uno de los hoteles que había en el delta de Albuñol; otro desapareció con unas 25 personas (foto cortesía de Angel García Peramos)



*Resto del puente de la CN-340 sobre la rambla de Huarea
(fotos cortesía de Angel García Peramos)*



*Calles de La Rábida afectadas por la riada. Paradójicamente, la pensión de la imagen se llamaba "las Olas"
(fotos cortesía de Angel García Peramos).*



*Curiosa imagen, que muestra a las claras la energía y altura alcanzadas por los arrastres en la rambla de Albuñol
(foto cortesía de Angel García Peramos)*



*Delta de la Rábita después del 19 de octubre de 1973; la riada produjo un avance del mismo de 200 m sobre la línea de costa (también se observa el hotel, mostrado en otras imágenes de mayor detalle)
(foto de Paisajes Españoles, publicada en Gaceta Ilustrada).*

*PARADA 2. AFLORAMIENTO CARBONATADO DE ALBUÑOL
Y MANANTIALES TERMALES*

Desde la parada anterior, se continúa por la carretera A-345 en dirección a Albuñol; en el km 26,1 a la salida de dicha localidad, en dirección a Albondón, y junto a un pequeño puente, se encuentra esta parada, correspondiente a uno de los principales manantiales termales de descarga del afloramiento carbonatado de Albuñol, el manantial del Río (Fig. 51). Este surge en el contacto entre filitas y esquistos (impermeables) y materiales acuíferos carbonatados (todos ellos perteneciente al Complejo Alpujarríde). El origen termal de sus aguas (30°C) está ligado con flujos subterráneos, que alcanzan cierta profundidad, procedentes de la Sierra de Lújar.

En la figura 51 se representa un corte hidrogeológico esquemático de este manantial, similar al de la galería de Aldáyar, próxima al lugar, en la rambla del mismo nombre.

La parada puede ser completada desde una posición superior de la carretera, donde además de ver el contacto de los materiales esquistosos con los carbonatados, hay una buena panorámica del núcleo de Albuñol, encajado entre las ramblas de Aldáyar y Albuñol.



Figura 51. Tipología de los manantiales de origen termal de la rambla de Albuñol. Manantial del Río (a partir de DIPUTACIÓN DE GRANADA-ITGE, 1990)

CAPÍTULO 11 ACUÍFERO DE ADRA

A.CASTILLO¹, J.BENAVENTE² y L. SÁNCHEZ-DÍAZ²
¹CSIC y Universidad de Granada; ²Universidad de Granada



Figura 52. Mapa de situación del itinerario previsto. En la foto superior, panorámica del acuífero, con las alfuberas. En la foto inferior, manantial de las Fuentes de Marbella.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El acuífero de Adra corresponde a la llanura litoral del delta del mismo nombre y sectores adyacentes, la cual ocupa una extensión de 22 km². Está situado al suroeste de la provincia de Almería, muy cerca del límite con la de Granada. El acceso a este sector se puede hacer por la CN-340, tanto por el trazado antiguo como por la autovía que la sustituye, la cual discurre algo más alejada del borde costero- y por la C-331 (Fig. 52).

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Este acuífero presenta varias peculiaridades dignas de mención. La primera de ellas es la propia historia geológica del delta, sometido a diferentes intervenciones antrópicas, responsables de modificaciones en el equilibrio erosión-sedimentación en la franja litoral y de la génesis y desaparición de zonas húmedas. A este respecto, en el momento actual existen en el extremo oriental del acuífero dos albuferas relativamente recientes, denominadas Honda y Nueva. Este espacio, conocido como "Albuferas de Adra", está catalogado como Reserva Natural (1989) e incluido en la lista mundial de humedales protegidos del Convenio de Ramsar (1994). La superficie protegida es de 60 ha. Corresponde al contorno perimetral de las dos albuferas existentes y a una pequeña orla perilagunar ocupada por vegetación palustre.

En la actualidad, el acuífero es excedentario y no presenta indicios de intrusión marina. Las aguas del río Adra, reguladas por el embalse de Benínar, son la principal fuente de alimentación del acuífero, si bien esta obra ha modificado su régimen natural, disminuyendo la ciclicidad y cota de los niveles piezométricos. La problemática entra de lleno en el ámbito de la regulación conjunta de las aguas superficiales y subterráneas, y tiene su equivalente en otros sistemas litorales, entre los que se puede destacar el acuífero del río Vélez, afectado por el funcionamiento de la presa de La Viñuela, y el acuífero de Motril-Salobreña por la próxima regulación del río Guadalfeo a través del embalse de Rules.

Las aguas del acuífero presentan una salinidad comprendida entre 1,5 y 4 g/l y son de tipo predominantemente sulfatado, salvo en su sector oriental donde son cloruradas. En parte, se utilizan para el abastecimiento urbano y, sobre todo, para el regadío, en algún caso fuera del área, como ocurre con el canal de San Fernando, que irriga parte del sector occidental del Campo de Dalías. Una de las captaciones más interesantes que aportan agua a dicho canal es un pozo con 16 drenes horizontales (nº 1 de la figura 53), del que se extrae un caudal de 130 l/s.

El funcionamiento hidrogeológico de las Fuentes de Marbella, con un caudal medio de unos 500 l/s, es otro de los puntos de interés hidrogeoló-

gico del entorno, siendo sobresalientes tanto por su caudal, como por su localización, en una provincia tan árida como la de Almería; estas descargas constituyen el principal aporte del río aguas abajo del embalse de Benínar, del que también reciben aportaciones por filtraciones desde su vaso. La calidad de las aguas de esta descarga tiene influencia decisiva en la del propio río, así como en la del acuífero de Adra.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

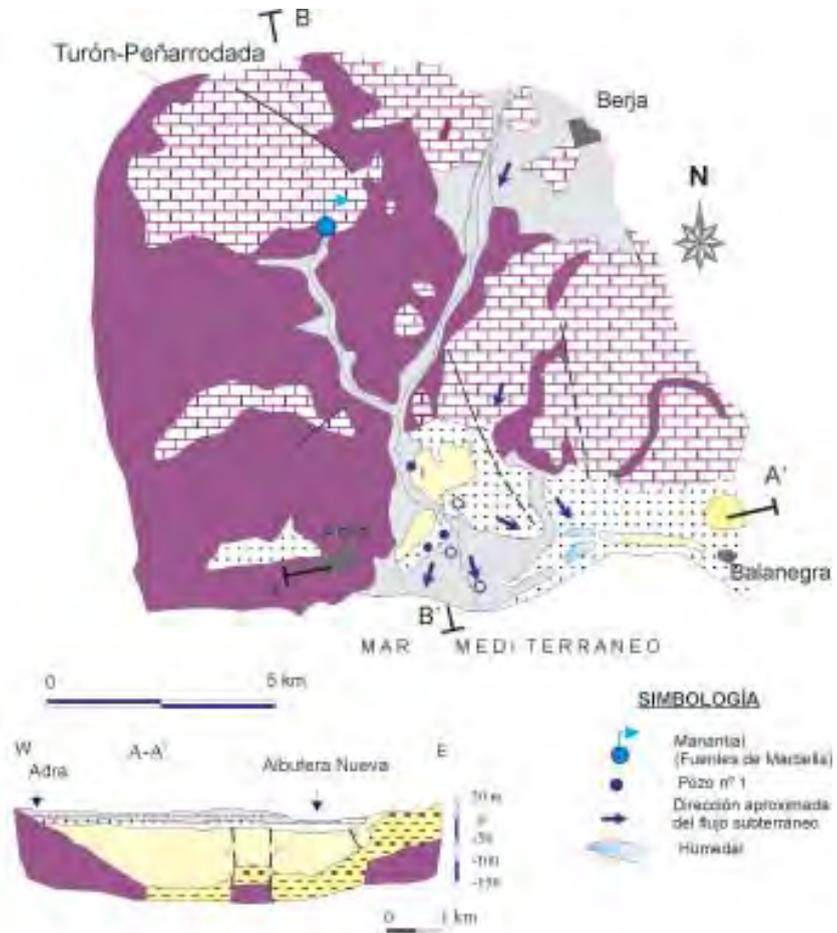
El acuífero de Adra está compuesto por materiales neógenos y cuaternarios de naturaleza detrítica, mientras que sus bordes y substrato corresponden a esquistos de muy baja permeabilidad (Complejo Alpujárride) (Fig. 53). El espesor medio de los materiales acuíferos es de 100 m, casi todos ellos saturados y su extensión de 22 km² (PULIDO-BOSCH, 1988; ITGEJA, 1998).

Los materiales neógenos (del Mioceno y Plioceno) están constituidos por conglomerados, areniscas, margas y calcarenitas con una permeabilidad de conjunto moderada. Afloran en el entorno de las Albuferas, al norte de la antigua CN-340. Los materiales cuaternarios, localizados al sur de la vía citada, están constituidos por sedimentos aluviales (gravas, arenas y limos) de alta permeabilidad, así como por otros de génesis lagunar (limos arcillosos) de baja permeabilidad; estos últimos constituyen el substrato de las citadas albuferas, si bien tienen continuidad por otros sectores del delta.

Todo el conjunto detrítico constituye un único acuífero libre, aunque debido a la existencia de tramos de baja permeabilidad (margas pliocenas y limos arcillosos cuaternarios), en algunos sectores hay confinamiento hidráulico, circunstancia muy habitual en acuíferos deltáicos; así pues, las características hidráulicas y de calidad son diferentes según los sectores y tramos considerados.

Las oscilaciones piezométricas son prácticamente inapreciables en el borde costero. En el entorno de las albuferas son del orden del metro. Por el contrario, tales oscilaciones pueden llegar a la decena de metros en los sectores de cabecera del delta, donde el nivel se sitúa sobre los 25 m de cota. En régimen natural, los niveles altos se alcanzaban en primavera, coincidiendo con el deshielo del río Adra (con una cuenca vertiente de 750 km² y cota máxima de 2.800 m, correspondiente a parte del sector oriental de Sierra Nevada) y los mínimos a finales de verano.

Desde el año 1982, en que comenzó la regulación del río Adra mediante la presa de Benínar, el régimen piezométrico del acuífero se ha modificado, en respuesta a la modulación de las aportaciones fluviales; en general, la ciclicidad es menos acusada, al tiempo que han descendido los niveles piezométricos. Los mapas de isopiezas indican que el flujo subterráneo se



LEYENDA:

- Arenas, gravas, limos (Aluvial) Cuaternario. Permeabilidad alta.
- Gravas, arenas, limos arcillosos, conglomerados, travertinos. Cuaternario-Pliocuaternario. Permeabilidad variable.
- Conglomerados, arenas, calcarenitas, limos Plioceno. Permeabilidad media-alta.
- Calizas arrecifales, calcarenitas, conglomerados arcillosos. Permeabilidad media-alta.

MATERIALES ALPUJARRIDES:

- Mármoles, dolomitas, calizas y calcoesquistos. Trias. Permeabilidad alta.
- Micaesquistos, cuarcitas y filitas. Paleozóico - Trias. Permeabilidad baja.

Figura 53. Esquema y corte hidrogeológico del delta del río Adra (a partir de ITGE-JA, 1998)

produce hacia el mar, aunque también hay un ligero flujo hacia el extremo oriental, donde se localizan las albuferas. La permeabilidad es mayor bajo los diferentes cauces que ha tenido el río en el delta (paleocauces). La mayor concentración de captaciones se localiza en los alrededores de El Puente del Río, a unos 2 km de la línea de costa, donde han sido habituales caudales de bombeo unitarios del orden de 40 l/s (PULIDO-BOSCH, 1988).

La recarga media del acuífero se estima en 25 hm³/año. Procede, mayoritariamente, de la infiltración a partir del río Adra (20 hm³/año). Menor entidad tiene la alimentación a través del retorno de regadíos, la precipitación directa y las aportaciones subterráneas desde los bordes, que totalizan entre 4 y 6 hm³/año. La descarga se produce, principalmente, a partir de captaciones (16 hm³/año) y subterráneamente hacia el mar (6-7 hm³/año) (ITGE - JA, 1998).

La calidad de las aguas del acuífero está directamente influenciada por la de las del río Adra, que representan, como se ha comentado, su principal fuente de alimentación. Estas poseen una salinidad comprendida entre 1,5 y 2,5 g/l y son de tipo sulfatado, en concordancia con la calidad de las aguas de las Fuentes de Marbella, que deben la presencia de sulfatos a la existencia de yeso en el acuífero que drenan. Este carácter sulfatado también se encuentra en buena parte de los sectores occidental y central del acuífero del delta.

En el entorno de las albuferas la salinidad de las aguas subterráneas adquiere valores más altos, de 3 a 4 g/l, con facies cloruradas. Ello seguramente obedece a la mezcla con aguas salinas congénitas de los materiales que conforman esa parte del acuífero. En el agua de las albuferas se han medido valores de salinidad comprendidos entre 5 y 7 g/l, con facies también cloruradas; el incremento de salinidad respecto al agua del acuífero está relacionado con la concentración ejercida por la evaporación (BENAVENTE, 2002, y BENAVENTE et al, 2003).

Itinerario propuesto: (Fig. 52)

- ❖ ***Parada 1. Panorámica del acuífero y de las Albuferas de Adra***
- ❖ ***Parada 2. Fuentes de Marbella***

En la zona podemos considerar tres tramos desde el punto de vista fisiográfico: a) un tramo inferior, de cota menor a los 20 m, que incluye los deltas actual y antiguo, de relieves llanos, donde se encuentran las albuferas (parada 1); b) un tramo medio, de forma triangular en planta, que se extiende desde la CN-340 hasta la confluencia de los ríos Grande y Chico,

con relieves de suave pendiente hacia el mar; y c) un tramo superior, fuera ya del acuífero detrítico, que corresponde a los relieves preorogénicos del borde norte del acuífero. En este último tramo coexisten materiales esquistosos de baja permeabilidad con otros carbonatados considerados acuíferos. Precisamente en el drenaje de uno de estos sistemas carbonatados (Turón-Peñarrodada) se localizan unos manantiales dignos de mención, las Fuentes de Marbella, antes citadas, que constituirán el objetivo de la parada 2.

PARADA 1. PANORÁMICA DEL ACUÍFERO Y DE LAS ALBUFERAS DE ADRA



Panorámica de las albuferas de Adra

Se accede a esta parada por la antigua CN-340 (Fig. 52), tras tomar un desvío asfaltado a la altura del km 395 y ascender a una pequeña colina. Desde el lugar podemos disfrutar de una panorámica del delta del río Adra, y, en un plano más próximo, de las albuferas de Adra (Honda y Nueva). La segunda de ellas es relativamente reciente, pues se formó en la década de los treinta del pasado siglo. De la existencia de la albufera Honda hay constancia en documentos de mediados del siglo XVIII (MARTÍNEZ VIDAL y CASTRO, 1990).

Tras la deforestación de la mayor parte de la cuenca del río Adra, a principios del siglo XIX, como consecuencia de las necesidades de madera para la pujante minería de la región, las crecidas se hicieron cada vez más catastróficas, provocando, además, el encharcamiento de áreas deprimidas próximas a la costa (albufera Ancha). Para evitar daños mayores, se decidió desviar el trazado natural del río. El cauce rectificado, que es el actualmente existente, data de 1879. Al mismo tiempo, los agricultores drenaban y rellenaban las zonas húmedas existentes. La desembocadura

del río produjo un nuevo delta, mientras que el antiguo era desmantelado por el oleaje. Los sedimentos erosionados se depositaron más al este en forma de barras arenosas litorales, con las que se relaciona la génesis de las albuferas (Fig. 54).



Figura 54.. Esquema de las principales modificaciones fluviales y litorales recientes ocurridas en el delta del río Adra. 1. Cauce hasta 1855; 2. Cauce en 1871; 3. Cauce a partir de 1879; A. Albufera Ancha (desecada en la actualidad); 4. Línea de costas en 1871; 5. Idem en 1928, en cuya proximidad existía la albufera; 6. Idem en 1974; 7. Idem en la actualidad; B, D y E albuferas Honda, Nueva y última generada, respectivamente (PULIDO-BOSCH, 1988)

El área catalogada como Reserva Natural es de 60 ha, si bien las zonas de aguas libres son de unas 27 ha para la albufera Nueva (la más cercana al mar) y de 7 ha para la albufera Honda (que tiene una profundidad máxima de unos 4 m).

La albufera Honda recibe actualmente la mayor parte de sus aportaciones de acequias y ramblas, y posee un carácter perdedor neto respecto al acuífero que la rodea. Es probable que antes de la regulación del río Adra, con niveles piezométricos más elevados, la recarga subterránea pudiera ser más significativa que en la actualidad. Una fracción importante de su descarga subterránea debe fluir hacia la albufera Nueva, desde la cual, en ciertos periodos, puede producirse descarga al mar. La principal descarga en ambas corresponde a la evaporación (BENAVENTE et al, 2003 y RODRIGUEZ-RODRIGUEZ et al, 2004).

El agua de las albuferas tiene salinidades del orden de 5 a 7 g/l, y facies cloruradas sódicas, lo que obedece, según se ha apuntado, a la concentración evaporativa de aguas de salinidad algo inferior y facies cloruradas.

Estos humedales son hábitats frágiles que sirven de sustento a una vegetación típica (tarajes, carrizos, masiegas, eneas, etc.), cuya cobertura y alimento ampara a una fauna especial, en parte catalogada como en peligro de extinción y rara a escala mundial, como es el caso del pez fartet y la malvasía cabeciblanca. Habitan el lugar también la ranita meridional, el galápagos leproso, el pejerrey y más de un centenar de especies diferentes de aves.

La existencia de invernaderos, con aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas en dosis seguramente altas, constituye un riesgo para el espacio protegido, que tiene unas tasas de eutrofización importantes.

PARADA 2. FUENTES DE MARBELLA

Los manantiales de las Fuentes de Marbella (Fig. 55A) se encuentran a unos 13 km al norte de la localidad de Adra por la carretera A-337 (dirección Berja), y a 165 m de altitud. Aparecen en la inmediata proximidad del cauce del río Adra. En general, se trata de una surgencia difusa, aunque pueden reconocerse algunos puntos más importantes de descarga; también existen en este enclave perforaciones de investigación que han resultado surgentes, lo que atestigua componentes verticales de flujo en relación con esta zona de descarga. Las aguas del manantial afluyen inmediatamente al río Adra e incrementan su caudal, aspecto que era particularmente patente en los periodos de estiaje antes de que la presa de Benínar comenzase a funcionar. Las aguas discurren bajo un puente metálico sobre el río Adra, en el que se puede leer un cartel indicador, y existe una estación de aforos (Fig. 52).

Estos manantiales constituyen la principal descarga del acuífero carbonatado de Turón-Peñarrodada (Complejo Alpujárride). Este acuífero se recargaba mayoritariamente a partir del río Adra, aunque tras la puesta en funcionamiento del embalse de Benínar se produce también alimentación a partir de filtraciones en dicho embalse (GARCÍA-LÓPEZ et al., 1996). Presentan un caudal medio de unos 500 l/s, aunque algunos años llega a superar con creces esta cifra (FERNÁNDEZ DEL RÍO et al., 1996) (Fig. 55D). En la figura 55C se representa un corte esquemático de este manantial, que surge en el contacto con esquistos de baja permeabilidad, que hacen de cierre impermeable (BENAVENTE y CASTILLO, 1989).

La calidad química de las aguas es relativamente peculiar para tratarse del drenaje de un acuífero carbonatado, aunque explicable por el hecho de que en el acuífero existen yesos intercalados. Además de carácter termal, registran salinidades del orden de 1,5 g/l y facies mixta cloro-sulfatada cálcica. Tales rasgos son bastante similares a los de otras surgencias representativas de acuíferos carbonatados alpujárrides próximos, como es el caso de los de Albuñol y Sierra de Lújar.

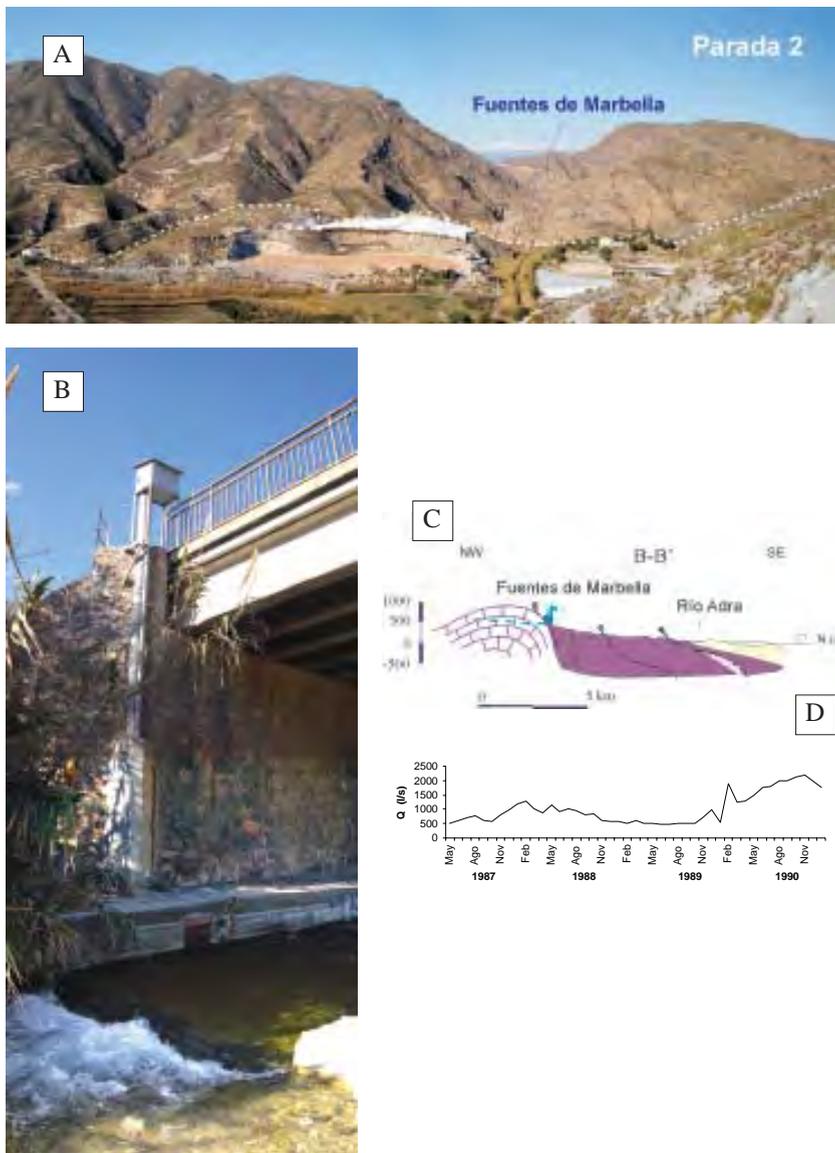


Figura 55. (A) Entorno del manantial de las Fuentos de Marbella; el trazado de puntos delimita el contacto de los materiales carbonatados triásicos, al fondo, y los micasquistos paleozoicos en primer término; (B) estación de aforos en el río Adra, aguas abajo del área de surgencia; (C) corte hidrogeológico esquemático de los manantiales de las Fuentos de Marbella (en figura 53; modificado de ITGE-JA, 1998) y (D) hidrograma de las Fuentos de Marbella (FERNÁNDEZ DEL RÍO et al.,1996)

El elevado caudal de las Fuentes de Marbella en relación con las aportaciones medias superficiales en ese punto, es la causa de que la calidad química del río Adra aguas abajo esté condicionada estrechamente por las de las aguas subterráneas recibidas. A su vez, como ya ha sido citado, es la calidad química de las aguas del río lo que condiciona el quimismo de gran parte del acuífero detrítico costero. Por otra parte, en sus aguas habita un curioso pez, el fartet, declarado en peligro de extinción.

CAPÍTULO 12 ACUÍFEROS DEL CAMPO DE DALÍAS

A. VALLEJOS, L. MOLINA y A. PULIDO-BOSCH
Universidad de Almería



Figura 56. Imagen de satélite del Campo de Dalías (tomada de la página web: nasa.gov/multimedia) y mapa de situación del itinerario previsto

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Campo de Dalías es una vasta llanura litoral ubicada en el extremo suroriental de Andalucía, y al oeste de la bahía de Almería. El límite septentrional está constituido por las estribaciones de la Sierra de Gádor y está delimitado al oeste por la localidad de Balanegra y al este por la de Aguadulce; al sur se encuentra el mar Mediterráneo (Fig. 56). Ocupa una superficie cercana a 330 km², con forma de semielipse y con una longitud de línea de costa de unos 50 km. Es atravesado de este a oeste por la CN-340 y se tiene acceso al mismo a través de diversas carreteras secundarias que desembocan en numerosas localidades, algunas de ellas de gran importancia en cuanto a número de habitantes.

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

El interés hidrogeológico de este acuífero es elevado, ya que en él se enmarca una gran actividad agrícola. Todas las magnitudes económicas se encuentran en mayor o menor medida influenciadas por la dinámica impuesta en torno a la agricultura intensiva moderna (agricultura bajo plástico), caracterizada por el uso de técnicas que permiten alcanzar unos rendimientos más elevados en la producción, así como un uso más eficiente del agua destinada para riego. Se estima que este tipo de actividad económica supera ampliamente los 600 millones de euros. En el Campo de Dalías existen unas 20.000 ha de superficie cultivada, con un consumo cercano a 134 hm³/año de agua, de los cuales un 97% procede de los sondeos situados sobre el propio Campo y el 3 % restante de las aguas del embalse de Beninar. Además, la población ha pasado de 8.000 habitantes en 1950 (NAVARRETE, 1992), a más de 120.000 en la actualidad; el turismo ocupa también un lugar relevante en la economía del sector, con más de 150.000 personas en el periodo de más afluencia. Por otro lado, en la actualidad, la ciudad de Almería (180.000 habitantes) se abastece de una serie de sondeos perforados en el Campo de Dalías.

Desde el año hidrológico 1974/75, las extracciones en el Campo de Dalías se han duplicado, lo que ha tenido claras repercusiones sobre la cantidad y calidad natural de las aguas subterráneas. La mediocre calidad del agua conlleva el abandono de un gran número de captaciones y la disminución de los bombeos en las formaciones acuíferas más superficiales, así como el progresivo aumento de los sondeos que captan la formación carbonatada. La principal alimentación a las unidades acuíferas del Campo de Dalías procede de la Sierra de Gádor. Los estudios realizados en los últimos años ponen de manifiesto la grave situación en que se encuentran los acuíferos: intrusión marina, descenso de niveles piezométricos, deterioro de la calidad, contaminación, etc.



Panorámica aérea de parte del Campo de Dalías y de la bahía de Almería, con Sierra de Gádor, y Sierra Alhamilla al fondo (foto cortesía de Carlos Sanz de Galdeano)



Detalle del Campo de Dalías, cubierto de invernaderos ("mar de plástico"), con el área lagunar de Salinas de Cerrillos al fondo (parada 4), y con Almerimar en el borde derecho de la foto (foto cortesía de Carlos Sanz de Galdeano)

La detección de la sobreexplotación de los acuíferos motivó que se regulara la expansión de los cultivos bajo plástico. De esta manera, según el R.D. 2618/86 de 24 de diciembre, se declararon provisionalmente sobreexplotados los acuíferos del Campo de Dalías. Hay que señalar que dicha normativa no ha frenado la expansión de la zona regable, que ha aumentado de 13.703 ha en 1991 a 18.600 en 1997 (COROMINAS, 1997). Actualmente se estima que se riegan unas 20.000 ha.

Esta situación deficitaria de los acuíferos es especialmente significativa en el Campo de Dalías, ya que dicho déficit lo estimaban la Confederación Hidrográfica del Sur y el MOPTMA, en 115 hm³/año, y los recursos hídricos disponibles en 100 hm³/año, alcanzando las demandas valores de hasta 215 hm³/año. En nuestra opinión, estas cifras son algo elevadas, siendo más realista la cifra de 40-60 hm³/año, para el caudal sobreexplotado, aunque en un régimen de alimentación muy variable de unos años a otros.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

Los materiales aflorantes en el Campo de Dalías se dividen en dos grandes grupos: preorogénicos y postorogénicos. Dentro de los primeros, afloran dos conjuntos de unidades alpujárrides, correspondientes a los mantos de Gádor y de Felix (Fig. 57). Las unidades del manto de Gádor están constituidas por filitas en la base, con intercalaciones de cuarcitas, a las que se asigna edad Permo-werfeniense. La transición de este conjunto inferior hacia el tramo calizo-dolomítico superior se suele hacer mediante un tramo de calcoesquistos y calizas margosas. La parte superior de la serie es dolomítica con predominio de calizas hacia el techo. La potencia aproximada de todo el conjunto es de unos 1.000 m. Su edad es Trías medio-superior. En las unidades del manto de Felix, al igual que en las del manto de Gádor, existe un tramo basal metapelítico y otro superior carbonático. El tramo carbonático presenta mucha menor potencia que su equivalente de Gádor, normalmente menos de 100 m. Su edad es también Trías medio-superior.

Dentro de los materiales postorogénicos no se conocen en el área depósitos cuya edad esté comprendida entre el Trías superior y el Mioceno. Los materiales postorogénicos del Mioceno superior afloran de manera discontinua a lo largo del borde de la Sierra de Gádor, tanto sobre calizas y dolomías como sobre filitas; sólo aparecen en las proximidades del pueblo de Vícar, sobre conglomerados o rocas volcánicas. La serie Tortoniense-Andaluciense está constituida por dolomicritas o biomicritas con contenido variable en elementos detríticos (cantos de cuarzo, rocas metamórficas y muchos restos de organismos). En los sondeos de investigación hidrogeológica realizados en el Campo de Dalías, a una profundidad de 550 a 900



Figura 57. Situación y esquema geológico del Campo de Dalías. P1: metapelitas de Gador; T1: carbonatos de Gador; P2: metapelitas de Felix; T2: carbonatos de Felix; Rv: conglomerados y rocas volcánicas; M: calcarenitas miocenas; P11: margas pliocenas; P12: calcarenitas pliocenas; Q: sedimentos cuaternarios.



Acueductos "por rematar" y de los Poyos (a la derecha), dentro del canal de Carcauz, en la vertiente sur de la Sierra de Gádor (fotos cortesía de Wenceslao Martín Rosales). Se trata de una extraordinaria obra de ingeniería hidráulica romana, que captaba el agua de un manantial de la parte alta de la cuenca de Carcauz, para llevarla al pago de Casablanca, en el límite del Campo de Dalías.

m, y debajo del Plioceno, se encuentran margas, yesos y conglomerados que contienen una microfauna del Andaluciense-Tortoniense. La potencia del conjunto miocénico puede ser superior a 100 m.

Los materiales pliocenos representan el Plioceno inferior y medio, sin que existan evidencias sobre el superior. Por datos de sondeos, se conoce la existencia de un conglomerado basal, sobre el que se depositó una formación margosa marina, que puede superar los 700 m. Hacia el techo, aparecen elementos detríticos finos hasta dominar totalmente; se trata de calcarenitas que culminan la formación y llegan a sobrepasar los 100 m de potencia; constituyen un relieve aflorante en la mitad meridional del Campo. Al pie de Sierra de Gádor se desarrollan grandes conos de deyección cuaternarios que están constituidos por cantos angulosos, muy heterométricos, localmente encostrados y que alcanzan más de 150 m de espesor. En todo el borde litoral existen varios episodios de conglomerados marinos con cantos rodados (dolomías, micasquistos y cuarzo) envueltos en una matriz arenosa y con un cemento endurecido. Además de los sedimentos cuaternarios citados, existen otros como limos rosas o rojos, muy finos, arcillosos con poca fracción detrítica, que se localizan en los escarpes y en su mayor parte rellenando las depresiones topográficas, tanto de carácter kárstico como de origen tectónico. Son arcillas de las áreas distales de los conos de deyección. También existen otros sedimentos cuyo desarrollo es escaso: depósitos limosos y fangosos relacionados con las salinas, dunas más o menos estabilizadas y sedimentos de playa que bordean el litoral actual.

De todos los materiales descritos, tienen comportamiento acuífero los carbonatos de las unidades de Gádor y Felix. Es frecuente encontrar tramos de calcoesquistos intercalados en la potente serie carbonatada, lo que confiere gran heterogeneidad y compartimentación al sistema. Ello explica la existencia de surgencias a distintas cotas, como la galería de La Molina, utilizada para el abastecimiento a Felix y situada a 1.100 m s.n.m., con un caudal nunca inferior a 5 l/s. En cuanto a las metapelitas y calcoesquistos alpujárrides, presentan un carácter fundamentalmente acuícludo, si bien este comportamiento puede cambiar a acuitardo cuando adquieren un espesor no muy grande y contienen niveles cuarcíticos fracturados.

Las calcarenitas y calizas bioclásticas y pararecificales del Mioceno, así como las calcarenitas pliocenas, se consideran como acuíferos, con porosidad intergranular, fisuración y afectadas por procesos de karstificación, lo que contribuye a incrementar de forma notable su permeabilidad. En relación con estos depósitos, se encuentran los conglomerados de cantos de rocas volcánicas y las propias rocas volcánicas; en general, y de acuerdo con los datos de sondeos que atraviesan dichos materiales, se comportan como acuífero pobre. Los sedimentos que conforman los grandes abanicos

aluviales -frecuentemente encostrados-, también presentan comportamiento acuífero, altamente permeables y con porosidad intergranular. La heterometría de los cantos y su variación en el espacio se traduce en una variación espacial de los parámetros hidráulicos.

Los tramos margosos con yesos y conglomerados de edad miocena tendrían un comportamiento acuitardo, que lateralmente pasa a acuífero a medida que domina la fracción detrítica (calcarenitas). Las margas azules pliocenas constituyen el acuicludo por excelencia en el Campo de Dalías, aunque hacia los bordes pueden permitir el flujo vertical, pasando a ser nivel semiconfinante.

Los materiales correspondientes a los episodios marinos cuaternarios, debido a su escaso desarrollo, no tienen gran interés hidrogeológico; su comportamiento es variable entre acuífero pobre y acuitardo, dependiendo de la proporción de elementos finos. Dentro del grupo de depósitos continentales, merecen mención los limos rojos, cuyos afloramientos cubren áreas de notable extensión, que se comportan como acuitardo. Los depósitos limosos, en relación con las salinas, tendrían un comportamiento variable entre acuitardo y acuicludo, mientras que las dunas y los depósitos de playas se comportan como acuífero, aunque no adquieren un desarrollo considerable.

El mayor número de puntos acuíferos corresponde a pozos, sondeos y pozos-sondeo, aunque existe una treintena de manantiales, así como gran número de galerías. Destacan por su caudal el manantial de Celín, con 125 l/s de caudal medio, Alcaudique, con 60-100 l/s, la galería de Fuente Nueva (Dalías) con 35 l/s y la galería La Molina (Felix) con 6 l/s.

El 15% de los manantiales alcanzan caudales comprendidos entre 1 y 5 l/s, siendo el 71 % los que no llegan a 1 l/s. Existe un gran número de galerías, generalmente de 1 m de altura, 1 m de ancho y una longitud que oscila entre 10 y 100 m, llegando a alcanzar 800 m la galería de Fuente Nueva. El agua drenada procede de las dolomías y calizas, tanto de la unidad de Felix como de la unidad de Gádor, con conductividades inferiores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el mayor número de los casos. El agua se emplea en su mayor parte para riego y uso doméstico, y en menor medida para abastecimiento urbano (manantial de Celín, La Molina ...).

Tras realizar un exhaustivo análisis de toda la información disponible, tanto geológica -columnas de sondeos, cartografías del área, series levantadas por diversos autores, etc.-, como hidrogeológica -isopiezas, fluctuaciones piezométricas, parámetros hidráulicos, etc.- el grupo de investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería ha diferenciado tres unidades hidrogeológicas, que coinciden sensiblemente con las establecidas por el IGME, si bien emplea nombres locales para su denominación, por entender que son más fácilmente retenidos (PULIDO BOSCH et al., 1989). Dichas unidades son (Fig 58):



Uno de lo manantiales más apreciados por la gente en la vertiente sur de la Sierra de Gádor, el manantial del Tartell.

La unidad de Balerma-las Marinas, que ocupa la mayor parte del área, desde Balerma hasta las Marinas, y está formada por calcarenitas pliocenas; su muro impermeable corresponde a margas de igual edad que las anteriores.

La unidad de Balanegra está situada en el extremo occidental y alrededores de la localidad del mismo nombre, e integrada por materiales carbonatados alpujárrides, aunque localmente incluye terrenos miocenos y pliocenos.

La unidad de Aguadulce; es sin duda la de mayor complejidad interna, y se localiza en el extremo oriental del Campo; está integrada por materiales calizo-dolomíticos de los mantos de Gádor y Felix, calcarenitas y rocas volcánicas miocenas, calcarenitas con episodios de margas arenosas del plioceno, y materiales cuaternarios. Esta diversidad litológica provoca cambios notables en la permeabilidad vertical, debido a la existencia de niveles muy poco permeables intercalados en las distintas formaciones acuíferas, originando un verdadero acuífero multicapa.

En la figura 59 se muestra un corte esquemático hidrogeológico, con dirección aproximada N-S (ver Fig. 58), que permite hacernos una idea de la disposición relativa de las tres unidades.

A continuación describimos con más detalle estas unidades hidrogeológicas.

- *Unidad de Balerma-las Marinas*

Esta unidad es la que ocupa mayor extensión en todo el Campo, con unos 225 km² de afloramiento. Sobre esta unidad acuífera se sitúa la mayor parte de la actividad agrícola. El material permeable está esencialmente integrado por calcarenitas pliocenas, aunque existen depósitos cuaternarios. El espesor de los materiales pliocenos puede alcanzar 120 m. El sustrato impermeable del acuífero está integrado por margas pliocenas, cuyo espesor puede superar los 700 m. Dado que existe un paso gradual desde las calcarenitas a las margas, con margas arenosas de transición entre ambas, el salto de permeabilidad es igualmente progresivo.

En lo concerniente a los límites del acuífero y a su naturaleza, todo el borde meridional está constituido por el mar y, por tanto, se trataría de un límite a potencial constante. En realidad, el borde meridional del acuífero se encuentra a una cierta distancia del litoral y está constituido por margas arenosas, siendo, por tanto, un límite semipermeable. El límite nororiental coincide sensiblemente con una fractura a lo largo de la cual, y a ambos lados, se observan saltos piezométricos; dado que el potencial es mayor en el acuífero que en el sector noreste, se trata de un borde permeable, de descarga. Los bordes restantes se han hecho coincidir con la laminación de las margas grises, aunque su trazado es coincidente con fracturas; se trata, por tanto, de un borde en donde las calcarenitas pliocenas se ponen en contacto con los materiales permeables infrayacentes -calcarenitas mioceanas y/o dolomías y calizas alpujárrides-; en las condiciones hidrodinámicas actuales, este borde es permeable, de descarga. En régimen natural muy posiblemente sucedía lo contrario, es decir habría una alimentación a partir de la Sierra de Gádor, con flujo en sentido norte-sur.

En lo relativo a los parámetros hidráulicos (IGME, 1977 y 1982), los valores de transmisividad varían entre 120 y 1800 m²/día. En la mayor parte del acuífero, la superficie piezométrica se encuentra a más de 5 m s.n.m. Los valores más elevados se registran al oeste de Matagorda, con cotas superiores a 40 m, en las proximidades de El Ejido (30 m) y entre las Norias y Mojonera, con un umbral de más de 20 m s.n.m. Si tenemos en cuenta la piezometría de las otras dos unidades, teóricamente puede existir una alimentación que podemos llamar por "desbordamiento en cascada", a través de todo el borde con la unidad de Aguadulce, y por el extremo septentrional hacia la unidad de Balanegra. Este aspecto debe tener su reflejo en el quimismo de las aguas.

Los sectores que registran descenso del nivel están en relación con extracciones cercanas; por el contrario, las subidas continuadas están en relación con el abandono de los bombeos en esas áreas. Además, en ciertos casos se pueden invocar otros procesos; concretamente en las proximidades de El Ejido y La Mojonera se piensa que las subidas están en relación

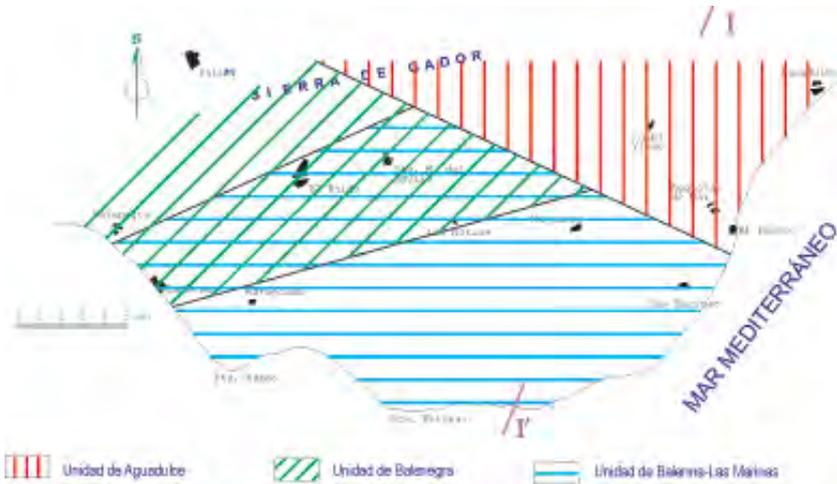


Figura 58. Situación y límites de las unidades hidrogeológicas del Campo de Dalías.

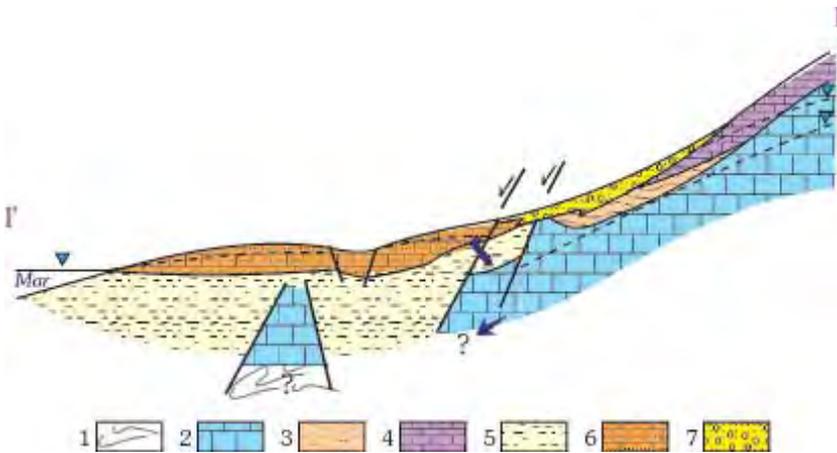


Figura 59. Corte hidrogeológico. 1: basamento metapelítico, 2: carbonatos de Gádor, 3: metapelitas de Felix, 4: carbonatos de Felix, 5: margas pliocenas, 6: calcarenitas pliocenas, 7: abanicos aluviales.

con las pérdidas en la red de abastecimiento urbano. Otro proceso que tiene su influencia en todo este acuífero, aunque de manera más acusada en determinados sectores, es la contribución del agua que se infiltra desde el regadío, cuando su procedencia es de otro acuífero, lo cual sucede en amplias áreas.

En los trabajos del ITGE se muestran datos piezométricos hasta 1995. Este organismo pone de manifiesto que esta unidad ha visto aumentar su recarga por retorno de regadíos y por recarga con aguas residuales urbanas; no obstante, en el gráfico representativo de la evolución piezométrica colocan dos piezómetros, uno de los cuales muestra una subida continuada hasta 1995 pasando de 16 a 25 m, mientras que el otro muestra un descenso continuado desde 21 a cerca de 10 m, en idéntico período.

Son muy numerosos los intentos que ha habido de ajustar un balance en esta unidad acuífera, obteniéndose 20-25 hm³/año como valor medio de las entradas, procedentes de la infiltración directa de la lluvia caída sobre la unidad, infiltración de la escorrentía generada por lluvias caídas en el entorno, retorno de regadíos realizados con aguas procedentes de fuera de la unidad, a lo que se puede añadir, como un concepto aparte, la alimentación por las fugas en las redes de riego y por las aguas residuales urbanas -previamente depuradas, en algunos casos-. Existe una serie de criterios que apuntan a que esta unidad tiene un balance positivo, de manera que las entradas serían superiores a las salidas; además de lo ya expuesto, relativo a la tendencia mayoritaria creciente de la evolución de los niveles piezométricos, se tiene la aparición de unos humedales en los huecos de antiguas canteras que extraían arcillas para soporte de invernaderos, en las cercanías de las Norias - La Mojonera.

Las salidas mayoritarias siguen siendo los bombeos netos (pasan de 18 a 9 hm³/año entre 1981 y 1993; ITGE-JA, 1998), a pesar de la calidad mediocre del recurso. Le siguen las salidas laterales ocultas y/o visibles. Las primeras tendrían lugar a lo largo del borde con la unidad de Aguadulce y por el sector de los Alacranes (borde Balanegra - El Ejido).

- *Unidad de Balanegra*

Ocupa la mitad occidental, estando también en parte bajo el acuífero de Balerna-Las Marinas, separado de él por las margas pliocenas que actúan de techo confinante. El material acuífero de esta unidad corresponde a las dolomías de Gádor esencialmente, aunque las calcarenitas miocenas también pueden participar en el almacenamiento. El substrato impermeable se considera integrado por las metapelitas basales del manto de Gádor.

Aunque el esquema geométrico expuesto es válido de manera general, la realidad es que la geometría detallada es mucho más compleja e incluso parcialmente desconocida. En efecto, desde fuera del sistema se prolonga

una franja de filitas con cuarcitas que se introduce en los límites aquí estudiados y que viene a complicar considerablemente la sencilla disposición esquematizada más arriba. Esta franja metapelítica separa dos tramos carbonáticos, a su vez afectados por fallas que llegan a individualizar pequeños conjuntos. El elemento más considerable es el denominado "Escama de Balsa Nueva".

Esta unidad ocupa unos 195 km² de los que algo menos de la mitad se encuentran confinados bajo las margas pliocenas. Los límites septentrional y occidental, de naturaleza impermeable, están constituidos por las metapelitas basales del manto; el límite meridional debe ser el mar, aunque sólo a través de la escama de Balsa Nueva. El límite SE corresponde con el borde externo del horst de Guardias Viejas y cabe pensar que sea de intercambio hídrico nulo, al contactar los materiales carbonáticos del acuífero con las metapelitas de la base del horst. Por último, el borde NE está parcialmente jalonado por filitas y por una zona de falla; a lo largo de esta última se puede establecer conexión hidráulica con la unidad acuífera de Aguadulce. Las medidas piezométricas a ambos lados de la falla no parecen apoyar esta conexión, aunque desde el punto de vista hidrogeoquímico no se aprecian diferencias entre uno y otro labio (VALLEJOS, 2001).

En lo relativo a los parámetros hidráulicos del sistema (IGME, 1977 y 1982), se han obtenido valores de transmisividad comprendidos entre 15.000 y 21.600 m²/día. El coeficiente de almacenamiento en las calcarenitas, en condiciones de acuífero libre, estaría comprendido entre 15 y 20 %.

La existencia de valores del nivel piezométrico por debajo del nivel del mar en este acuífero es un hecho ya constatado por los organismos que han estudiado el área. En el estiaje de 1978, el IGME detecta por primera vez valores locales por debajo del nivel del mar; en octubre de 1979 son tres los pequeños sectores con valores negativos, mientras que en 1981 prácticamente los valores bajo el nivel del mar ocupan la casi totalidad del acuífero, con cotas puntuales de - 2 m. En la síntesis realizada por THAUVIN (1986) se muestra que todo el acuífero, en su sector no confinado, registra un descenso medio entre septiembre de 1973 y el mismo mes de 1981 del orden de 0,75 m/año, aunque en un amplio área del mismo ha superado 1 m/año.

Los trabajos del IGME (1982) estiman una infiltración media de la lluvia comprendida entre 9 y 11 hm³/año. La unidad de Balerna-las Marinas alimenta "por desbordamiento" a ésta en unos 4 - 5,5 hm³/año. El citado organismo estima en 0,45 hm³/año el valor medio del retorno de los regadíos realizados con el canal de San Fernando y con la galería de Fuente Nueva. Las entradas medias anuales quedan, pues, comprendidas entre 13,5 y 17 hm³/año. Los bombeos en esta unidad han ido creciendo de manera continuada desde 27 hasta 66 hm³/año entre 1980 y 1995 (ITGEJA, 1998).

En la unidad de Balanegra hay una gradación desde facies bicarbonatadas cálcico-magnésicas hasta cloruradas, en las zonas más cercanas al mar, donde se alcanzan los máximos contenidos en cloruros y sulfatos.

- *Unidad de Aguadulce*

Esta unidad hidrogeológica es la de mayor complejidad tectónica y la de geometría peor conocida. En cortes verticales se suceden varias formaciones acuíferas separadas por otras tantas formaciones de baja permeabilidad, dando lugar a un auténtico multicapa; sin embargo, lateralmente se pueden acuñar algunas de las formaciones de manera más o menos brusca; en medio de todo ello, se tienen las rocas volcánicas de geometría escasamente conocida.

Los materiales del manto de Felix adquieren un amplio desarrollo en esta unidad, los cuales reposan sobre los materiales de Gádor; el tramo carbonático de Felix está separado de éste por un tramo basal de filitas, por lo que en esos casos se presentan dos niveles acuíferos individualizados; existen calcarenitas miocenas en relación con los tramos carbonatados de ambos mantos, en conexión hidráulica; estas calcarenitas pueden estar a veces también sobre las filitas de Felix, allí donde el tramo carbonático no existe. Sobre ambos tramos carbonáticos, con o sin calcarenitas, se pueden situar las margas pliocenas, sobre las que reposan las calcarenitas pliocenas y otros sedimentos detríticos más modernos; en este caso se tendría un primer acuífero libre, un acuífero intermedio y un acuífero inferior; lateralmente, donde no está presente el manto de Felix, existiría sólo el superficial y el profundo, aunque ambos pueden estar en contacto hacia el borde septentrional donde las margas pliocenas se acuñan.

Los valores de transmisividad obtenidos en las dolomías de Gádor han sido de 14.000 y 17.000 m²/día (IGME, 1982). Los valores medios son del mismo orden de magnitud que los obtenidos para el acuífero de Balanegra. En las rocas volcánicas, el valor de la transmisividad calculado es mucho más bajo (unos 340 m²/día). En un sondeo esencialmente excavado en terrenos cuaternarios y arenas pliocenas, se obtuvo el valor más bajo de todos (215 m²/día). En una prueba se pudo calcular el coeficiente de almacenamiento de los materiales cuaternarios, resultando ser del 3,5 %.

La evolución "histórica" de los niveles piezométricos se puede seguir merced a la existencia de una red de control seleccionada por el IGME; se han llegado a controlar hasta cuarenta y cuatro puntos acuíferos. Se puede observar la existencia de una tendencia general al descenso continuado, más amortiguado en el área de Roquetas por su mayor proximidad al mar. Las fluctuaciones máximas -interanuales e hiperanuales- se miden en el área de El Águila (entre - 13 y + 5 m), seguido del área del Viso, con medidas bajo el nivel del mar a partir del año 1977. De todo lo expuesto, parece claro que esta unidad hidrogeológica está sometida a sobreexplotación, lo cual trae consigo el descenso más o menos continuo de los niveles, con el consiguiente riesgo de intrusión marina.



Unidad de Aguadulce.



Panorámica del Campo de Dalías desde la parada 1

La gran complejidad geométrica de esta unidad no favorece la realización sencilla de un balance; por otro lado, la conexión hidráulica que existe con el mar parece que ha favorecido los procesos de intrusión marina. De acuerdo con los datos del citado organismo, la infiltración de la lluvia caída en el área alcanza 11 hm³/año como valor medio; la alimentación procedente de Balerma-las Marinas sería de 0,4-1,3 hm³/año, mientras que el retorno de regadíos sería de 1-2 hm³/año. Las salidas medias anuales, también según los datos del IGME (1982), se aproximan a los 45 hm³. Hay que tener en cuenta que desde entonces se han desmontado muchas captaciones por haberse salinizado, se han perforado varios sondeos para abastecer a Almería, y para captar el acuífero "profundo" de Gádor, cuyas aguas tienen excelente calidad, por el momento. En 1980 se bombeaban 48 hm³/año, mientras que en 1995 la explotación fue de 57 (ITGE-JA, 1998), con notables reducciones en los sondeos menos profundos.

La salinidad aumenta desde el pie de Sierra de Gádor hacia el mar, con el cual existe conexión. La salinidad es máxima en la parte central, donde se produce la mayor explotación, y se alcanzan los máximos contenidos en cloruros y sulfatos.

Itinerario propuesto: (Fig. 56)

- ❖ **Parada 1.** Panorámica del Campo de Dalías desde la Sierra de Gádor
- ❖ **Parada 2.** Recorrido por el sector entre La Mojonera y las Norias
- ❖ **Parada 3.** La Cañada de las Norias
- ❖ **Parada 4.** Humedales de las Salinas de Cerrillos
- ❖ **Parada 5.** Baños de Guardías Viejas

PARADA 1. PANORÁMICA DEL CAMPO DE DALÍAS DESDE LA SIERRA DE GÁDOR

Aunque el recorrido general del litoral se hace desde Málaga hacia Almería, en este caso, el itinerario propuesto se realiza desde Almería en dirección a Adra. Al llegar al Campo desde Almería por la A-7 en dirección a Málaga, tomaremos la salida hacia la localidad de Vícar y nos incorporaremos a la ALP-109; a unos 2 km encontraremos una pequeña explanada donde vemos el Campo en toda su extensión y podemos contemplar la localización de las distintas unidades hidrogeológicas que ya hemos tratado en la síntesis hidrogeológica.

Así mismo, tendremos la oportunidad de ver "in situ" los afloramientos de los conglomerados calcáreos con cantos volcánicos del Mioceno.

En los abanicos aluviales originados por los sucesivos aportes de los barrancos, bajo condiciones de intensa torrencialidad, destaca la gran proliferación de invernaderos en la actualidad.

Se observa también la presencia de vertederos incontrolados de residuos sólidos urbanos y/o agrícolas, tales como residuos vegetales, abonos, pesticidas y un volumen muy elevado de plásticos que constituyen la fuente más importante de contaminación del Campo.

PARADA 2. RECORRIDO POR EL SECTOR ENTRE LA MOJONERA Y LAS NORIAS

Tras la primera parada, tomamos la antigua CN-340 en dirección a La Puebla de Vúcar. La salida a la AL-9024 por la Avda. del Prado corresponde al sector comprendido entre La Mojonera y las Norias, más conocido como Sector III. Este sector está caracterizado por la existencia de una amplia batería de sondeos, siendo el más productivo y el que más caudal ha extraído a lo largo de la historia de los regadíos del Campo de Dalfas. La intrusión marina en la unidad de Aguadulce es mucho más visible desde el punto de vista hidrogeoquímico y se manifiesta tanto en el avance de la interfase a lo largo del borde litoral, como en la aparición de conos salinos; tal es el caso del Sector III, en el que se ha puesto de manifiesto el progresivo aumento del proceso de salinización, a partir de los resultados de los muestreos diarios y otros tipos de controles (prospección geofísica eléctrica...). Estas aguas son desfavorables para regadío, salvo si se mezclan convenientemente con otras aguas menos concentradas.

A partir de los datos de las columnas de los sondeos, se ha elaborado el corte de la figura 60, en donde puede observarse la gran complejidad existente. Conviene tener en cuenta que la fiabilidad de los datos litológicos no es total, ya que no hubo seguimiento geológico en la mayoría de los sondeos.



Sondeo en el Sector III.

Tras el abandono de numerosos pozos de este sector, debido a la mala calidad de sus aguas, se han realizado numerosos sondeos que, tras cortar los terrenos pliocenos y/o eventuales tramos de filitas de Felix, han captado las dolomías oscuras de Gádor; las aguas que saturan estos materiales son, por el momento, de una excelente calidad, con valores de conductividad normalmente inferiores a $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (MOLINA, 1997). Esta iniciativa ha abierto nuevas expectativas, aunque es necesario advertir sobre el elevado riesgo de intrusión que existe, especialmente si el ritmo de explotación se mantiene como durante los últimos años.

PARADA 3. LA CAÑADA DE LAS NORIAS

Continuando nuestro recorrido desde el Sector III, podemos llegar a La Mojonera. Desde allí tomaremos la carretera A-358 hacia las Norias. A las afueras del pueblo puede divisarse el humedal conocido como La Cañada de las Norias.

Este humedal se encuentra sobre el acuífero de Balerna-las Marinas, el cual está esencialmente integrado por calcarenitas pliocenas; hacia el muro existen arenas y arenas margosas, como facies de transición hacia una potente formación margosa, también pliocena. Las calcarenitas pliocenas se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos cuaternarios, tanto de origen continental como de origen marino. Los cambios progresivos de facies en la vertical producen una evolución de la permeabilidad que hace que el material acuicludo pase a acuitardo y paulatinamente a acuífero. El acuífero limita en su borde meridional, a una cierta distancia, con el mar y está constituido por margas arenosas, siendo un límite semipermeable. Los restantes bordes son coincidentes con fracturas, tratándose de bordes permeables de descarga.

Esta unidad es la que soporta una mayor extracción de las que integran el Campo. Las aguas registran valores de conductividad que llegan a superar localmente los $8.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (cerca de las Norias), predominando la facies clorurada sódica. No cabe pensar en procesos de intrusión, al no darse inversión del gradiente continente-mar, ni existir continuidad hidráulica entre las calcarenitas y el mar. La existencia de depósitos de playa a cotas variables dentro del Campo, unido a manifestaciones tectónicas recientes y a las peculiaridades litológicas del acuífero, pueden explicar las anomalías hidrogeoquímicas detectadas.

En estos sectores es habitual el cultivo en enarenado, así como el empleo de material arcilloso como suelo de invernaderos nuevos. Por esta razón, se observan gran número de canteras que se abren para obtener materiales a 5 y 6 m de profundidad, los cuales darán lugar a un

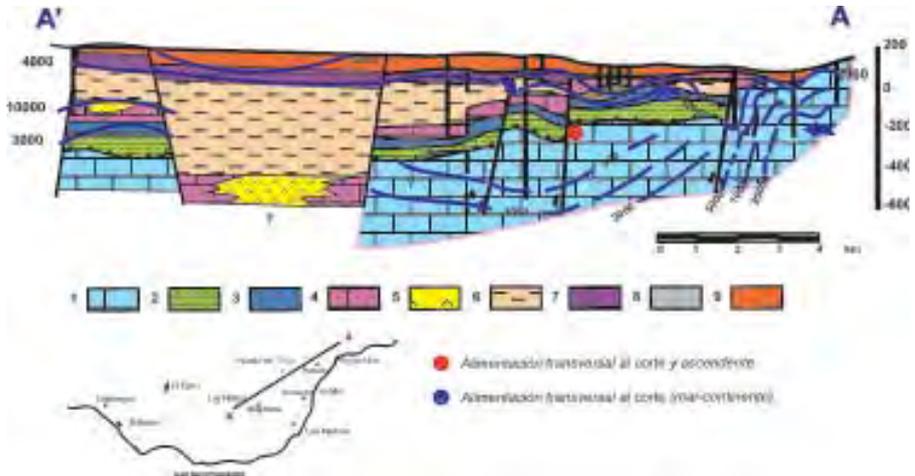


Figura 60. Corte geológico a lo largo del Sector III. Se incluyen isolíneas de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Leyenda.- 1: carbonatos de Gádor; 2: metapelitas de Felix; 3: carbonatos de Felix; 4: calcarenitas miocenas; 5: materiales evaporíticos; 6: margas del Plioceno; 7: calcarenitas del Plioceno; 8 y 9: sedimentos cuaternarios.



La Cañada de las Norias (parada 3)

suelo de 40 cm de espesor, que funciona perfectamente bien con las técnicas actuales de fertirrigación. Sin embargo, el impacto ocasionado por tales extracciones no es despreciable. Dada la escasa permeabilidad de los materiales que constituyen el fondo de estos huecos, el agua de lluvia llega a acumularse en ellos durante varios meses, si el año es lluvioso, dando lugar, así, a estos humedales aprovechados por la ornitofauna. Además, hay que señalar que el abandono de gran número de sondeos ha provocado la subida del nivel freático en el acuífero sobre el que se asientan.

Las actividades agrícolas generan gran cantidad de residuos y los agricultores han utilizado estas zonas de interés ecológico para el depósito de los mismos. Quiere esto decir que en el fondo de los humedales puede existir gran cantidad de envases de pesticidas, además de todo tipo de residuos agrícolas y/o relacionados con los invernaderos (plásticos, alambres, material de construcción, etc).

PARADA 4. HUMEDALES DE LAS SALINAS DE CERRILLOS

Para llegar a las Salinas de Cerrillos, tomaremos la salida de la A-7 hacia la carretera A-389 (dirección Almerimar). A unos 7 km se encuentra el enclave turístico Almerimar, junto al mar. Desde allí tomamos dirección San Agustín por la carretera AL-701 para acceder al paraje Punta Entinas-Sabinar, que ocupa una estrecha franja litoral de unos 12 km de longitud y 1,5 km de ancho y que se extiende desde la urbanización de Almerimar hasta las Marinas (Fig. 56).

Los materiales geológicos aflorantes en su entorno corresponden con una potente serie margosa recubierta por depósitos regresivos, margas arenosas, arenas y calcarenitas. Los depósitos cuaternarios marinos constan de cuatro niveles marinos de litología semejante. Se extienden en una banda paralela a la costa a 10-20 m sobre el nivel del mar y condicionan en su mayor parte la morfología actual de la zona. En la zona costera existen otros depósitos cuaternarios, de naturaleza limosa, ligados a la dinámica litoral reciente: salinas, lagunas y marismas. Estos materiales ocupan las zonas bajas donde se asientan las salinas, que están separadas del mar por playas de acumulación y dunas, algunas relativamente estabilizadas.

Se distinguen tres grandes sectores de acuerdo con la toponimia local (Fig. 61): antiguas Salinas de Cerrillos, que corresponden con el conocido como Charcón del Flamenco (en la zona más próxima a Almerimar); las salinas viejas, que corresponden al Charcón del Hornillo (más próximo a las Marinas) y las salinas nuevas, que corresponden básicamente a los estanques de precipitación situadas entre los dos anteriores.



Figura 61. Esquema de las salinas de Cerrillos

Mediante el uso de una metodología hidrogeoquímica, se han identificado los procesos que condicionan la diversidad de aguas existentes en las Salinas de Cerrillos. La salinidad de las aguas está relacionada con las diferentes sales presentes en el substrato de cada una de las charcas y la diferente área de recarga; mayoritariamente de origen marino, excepto en el Charcón del Hornillo, donde se detecta la influencia de la descarga subterránea desde el acuífero de Balerna-las Marinas mediante la circulación preferencial a través de fracturas que afectan al acuífero en el sector meridional del Charcón del Hornillo. Las charcas desarrolladas a partir de las extracciones de áridos presentan una situación más compleja. Su menor salinidad se relaciona con las calcarenitas pliocenas que se han utilizado en el relleno de las extracciones de arenas y la recarga directa a partir de la lluvia. También debe jugar un papel importante la alimentación, en profundidad, desde los materiales acuíferos, dada la similitud química entre las aguas de estas charcas y las aguas subterráneas (SÁNCHEZ MARTOS et al., 2000).

Desde el punto de vista ecológico, es de destacar la diversidad de fauna presente en estos humedales, sobre todo de aves migratorias (flamencos, palmípedas, etc).



Humedal de los Cerrillos (parada 4)



Afloramientos carbonatados en el entorno de Guardias Viejas (parada 5)

PARADA 5. BAÑOS DE GUARDIAS VIEJAS

Podemos llegar a esta parada desde Almerimar por la carretera local AL9006 hasta Matagorda, donde nos incorporamos a la AL-104. A unos 3 km se encuentra Guardias Viejas. El manantial de los Baños de Guardias Viejas se encuentra relacionado con un anticlinal fracturado de dirección N45-50, que afecta a los materiales calizo-dolomíticos de Gádor.

En 1859 el doctor Rodríguez Carreño analizó las características fisico-químicas de sus aguas (RODRÍGUEZ CARREÑO, 1859). Así describe la situación del manantial: "se baja a él por una ancha y cómoda escalera de 36 peldaños. Las aguas no tienen corriente sensible ni total salida, operación que se hace a beneficio de una bomba de presión. La balsa que está contenida en el fondo de un socavón de 30 pies de profundidad, es de grosera ejecución y presenta la figura de un medio ovoide de 15 pies de longitud y 7 de ancho con una grieta en su extremo angular, cuyas dimensiones solo permiten bañarse a la vez a doce o catorce personas".

En 1859 la temperatura del manantial era de 18 °R, equivalente a unos 23 °C, aunque se tiene constancia de que la temperatura oscilaba entre 17 y 27 °R (21 y 34 °C respectivamente). Las aguas fueron catalogadas como sulfurosas salinas tibias y termales.

En la actualidad, los valores medidos de temperatura para el manantial varían entre 26 y 32 °C. Las relaciones de sulfatos con los iones calcio más magnesio de las aguas del manantial, en relación a los puntos acuíferos cercanos, parecen indicar que el origen del mismo se encontraría en las calizas y dolomías de la unidad de Gádor, enriquecidas en sulfatos por su contacto con las margas arenosas pliocenas, aunque es visible una cierta influencia de aguas más superficiales afectadas por procesos antrópicos (MOLINA et al., 2005).

En el año 1928 fueron reconocidas por la administración estatal como aguas "minero-medicinales". Actualmente hay un proyecto en marcha para la realización de un balneario de aguas termales en primera línea de playa. Las aguas son captadas mediante un pozo con acceso a partir de un plano inclinado.



Panorámica del Campo de Dalías desde la Loma del Viento; en primer plano las tuberías de gran diámetro de conducción para el riego de las fincas de "Tierras de Almería", y, al fondo, relieves de la Sierra de Gádor (foto de José Miguel Alonso Blanco)



Sondeo a rotación inversa para captación de aguas, de 850 m de profundidad, en el paraje de Santa María del Águila, en el Campo de Dalías (foto de José Miguel Alonso Blanco)

CAPÍTULO 13 ACUÍFEROS DE ANDARAX

F. SÁNCHEZ-MARTOS, A. PULIDO-BOSCH, J. GISBERT y S. JORRETO
Universidad de Almería



Figura 62. Mapa de situación del itinerario previsto. En la foto superior, acuífero detrítico de Andarax desde los Millares, con el río encajado en materiales pliocuaternarios del área de La Calderona; en la foto inferior, noria en el delta del río Andarax

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del río Andarax se extiende a lo largo de 2.200 km² e incluye casi en su totalidad tres comarcas naturales interiores de Almería: Nacimiento, Campo de Tabernas y Alto Andarax, y una abierta al mar, la del Bajo Andarax, donde se localiza el itinerario propuesto (Fig. 62).

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Históricamente, el abastecimiento agrícola y urbano del Bajo Andarax ha dependido de las aguas subterráneas, dado los reducidos e irregulares caudales que aporta el río Andarax. Desde el punto de vista hidrogeológico, los dos principales problemas que afectan al área están relacionados con la irregularidad en la distribución de los recursos hídricos y con la calidad del agua, que presenta elevados contenidos salinos y altas concentraciones en boro. El deterioro de la calidad del agua subterránea es más significativo en el delta, aunque los procesos de salinización afectan a la práctica totalidad del acuífero detrítico, especialmente aguas abajo de la confluencia de la rambla de Tabernas con el río Andarax.

En los últimos años, se han desarrollado importantes actuaciones que modifican la explotación de los recursos hídricos y tienen un notable interés hidrogeológico. La reutilización de las aguas residuales de la ciudad de Almería, tras realizar una depuración terciaria mediante una planta de ozonización, permite una mejor gestión del recurso, disminuyendo las extracciones subterráneas en el área costera. La planta desaladora de agua de mar en el delta, donde la captación se realiza mediante sondeos, hace necesario un control detallado de la situación de la interfase agua dulce-agua de mar en el área de extracción.

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

El Bajo Andarax está limitado lateralmente por las Sierras de Gádor y Alhamilla, con el mar Mediterráneo como extremo meridional. Desde el punto de vista geológico, los materiales aflorantes se agrupan en dos grandes conjuntos: preorogénicos y postorogénicos. Dentro de los primeros, los materiales alpujárrides constituyen las sierras de Gádor y Alhamilla, y poseen un tramo metapelítico sobre el que descansa una serie carbonatada, que posiblemente supere los 1.000 m de espesor (Fig. 63).

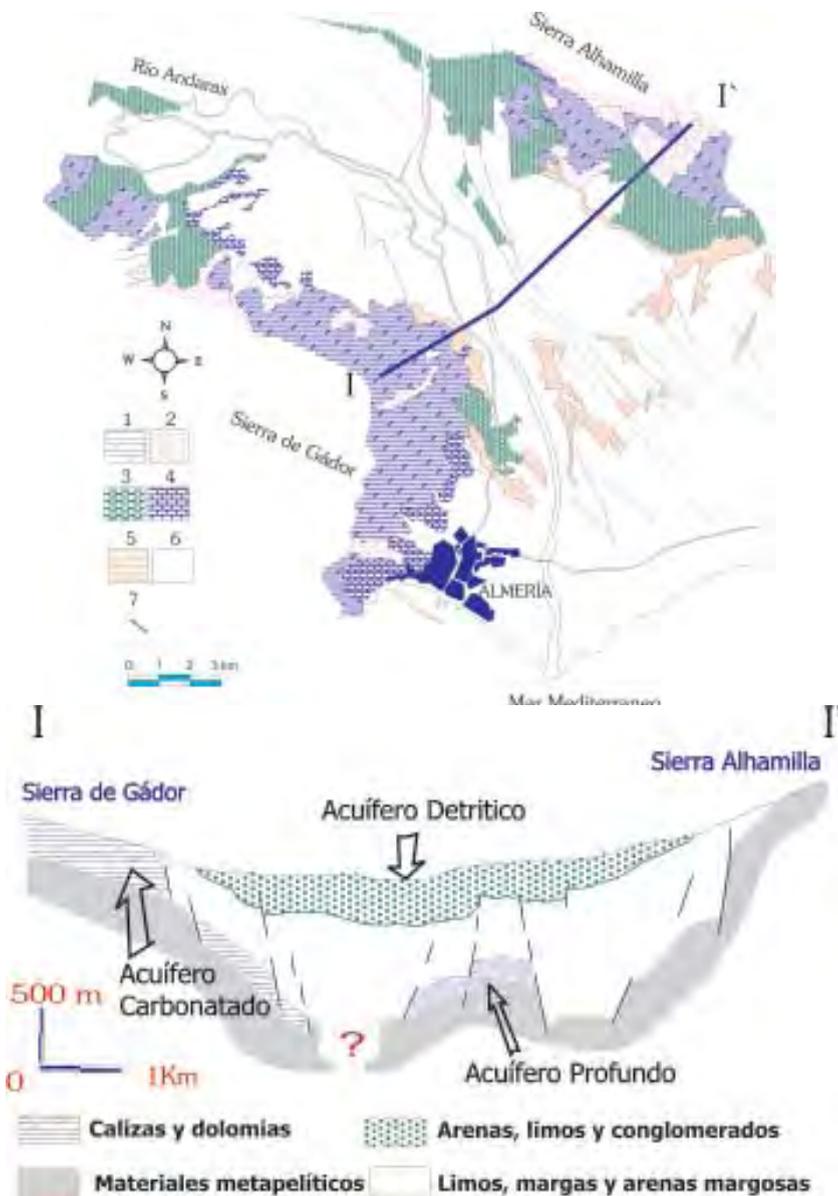


Figura 63. Esquema geológico del Bajo Andarax. 1: calizas y dolomias; 2: filitas y calcoesquistos; 3: margas; 4: calizas y calcarenitas; 5: arenas, limos y arcillas; 6: conglomerados, arenas y limos; 7: principales fracturas y I-I': sección transversal al valle, donde se representa la situación de los tres acuíferos diferenciados

Los materiales postorogénicos corresponden a depósitos neógenos, los cuales presentan notables diferencias de espesor y litología, como consecuencia de la morfología irregular de la cuenca y de la intensa actividad tectónica del área. La serie miocena incluye margas con intercalaciones arenosas, algunos niveles de yeso, calcarenitas y calizas arrecifales en el borde de la Sierra de Gádor, en contacto con las unidades alpujárrides. En los depósitos pliocenos se distingue una formación margoso-arenosa, que se extiende mayoritariamente al sur de Viator, y una formación fluvio-deltáica, arenoso-limosa con algunos niveles conglomeráticos, depositada sobre el conjunto Mioceno, y que afloran en el área de Gádor. Los materiales cuaternarios ocupan una amplia extensión especialmente en las cotas bajas. Los depósitos pleistocenos están formados por una serie de terrazas marinas superpuestas y solapadas, generalmente cubiertos por glacis y abanicos aluviales. Junto a estos depósitos, los materiales holocenos conforman conos de deyección, glacis y depósitos aluviales.

Con esta estratigrafía y tectónica tan compleja, se han diferenciado tres unidades hidrogeológicas, correspondientes a lo que hemos denominado: acuífero detrítico, acuífero carbonatado de la Sierra de Gádor y acuífero profundo (PULIDO BOSCH et al., 1992; SANCHEZ MARTOS, 2001) (Fig. 63).

El acuífero detrítico se extiende a lo largo de todo el sector central del valle. Su espesor oscila entre 200 m, que alcanzan los materiales plio-cuaternarios en el área de Santa Fe, y los 20-40 m que poseen los depósitos cuaternarios en el delta. La superficie piezométrica oscila entre 180 m s.n.m. en el área de Santa Fe y cotas ligeramente negativas en la zona costera. La composición química de las aguas es muy diversa y su facies tiene una gradación entre sulfatada cálcica y/o magnésica, cloro-sulfatada sódico-magnésica y clorurada sódica. Las primeras corresponden al sector Gádor-Santa Fe, donde la conductividad es inferior a 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los otros dos grupos aparecen mayoritariamente en el entorno Rioja-rambla de Tabernas (4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en el sector del delta, donde superan los 8.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (SANCHEZ MARTOS et al., 1996).

El acuífero carbonatado de Sierra de Gádor corresponde a los materiales calizo dolomíticos que afloran en el borde oriental de la sierra. Es un acuífero libre, aunque localmente puede estar confinado por intercalaciones impermeables que son tan frecuentes en las unidades alpujárrides, e indican la existencia de considerables cambios en el espesor. Las intercalaciones esquistosas y su compartimentación en bloques determinan su compleja geometría. Su mineralización es la más baja del área y los valores de conductividad oscilan entre 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Su facies es mixta, bicarbonatada-sulfatada, con predominio de la magnésica sobre la cálcica. En la proximidad de Alhama de Almería existen sondeos con agua termal (40 °C), facies bicarbonatada cálcica y contenidos salinos relativamente bajos (700 mg/l). En el sector costero se detecta influencia marina en relación con aumentos puntuales de extracciones en la proximidad de la ciudad de Almería.

El acuífero profundo ha sido detectado únicamente en el centro del valle; su espesor oscila entre 80 y 120 m y no existen datos que clarifiquen su relación con el resto del sistema. La estructura en horst y los niveles piezométricos en descenso hacen pensar en un área con recarga limitada. Las aguas de este acuífero presentan una importante anomalía termal (36 °C), salinidad elevada (3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y facies sulfatada-clorurada sódica. Es significativo su alto contenido en boro, entre 2 y 8.5 mg/l.

Las irregularidades de las precipitaciones condiciona la gran variabilidad interanual del caudal en el río Andarax, cuyos valores medios oscilan entre 15 - 19 $\text{hm}^3/\text{año}$ (CARRASCO y MARTÍN, 1988); en el periodo 1982-1992 oscilaron entre 2,6 y 43,3 $\text{hm}^3/\text{año}$ (SANCHEZ MARTOS et al., 1993).

La alimentación más significativa del acuífero detrítico corresponde a la infiltración de las aguas superficiales del río Andarax, valor estimado entre 14-19 $\text{hm}^3/\text{año}$. Este caudal en años secos es muy reducido y no supera 5 $\text{hm}^3/\text{año}$; en años húmedos, los valores llegan a superar los 40 hm^3 (1989-90) La infiltración directa de la precipitación sobre el sistema se estima entre 2 y 3 $\text{hm}^3/\text{año}$. Por tanto, los recursos propios sumados a las aportaciones se calculan en 17-23 $\text{hm}^3/\text{año}$. Las salidas del sistema se producen mediante bombeos, con valores del orden de 16-17 $\text{hm}^3/\text{año}$, aunque con gran variabilidad interanual. Las pérdidas subterráneas al mar se estiman aproximadamente en 1-2 $\text{hm}^3/\text{año}$. En un año normal, los consumos estarían por debajo de los recursos, pero en años secos, los recursos totales probablemente no superan los 7-10 $\text{hm}^3/\text{año}$, con lo que se pone en claro desequilibrio el sistema. A lo largo del acuífero carbonatado, el caudal de bombeo medio se estima en 5-6 $\text{hm}^3/\text{año}$ (CARRASCO y MARTÍN 1988, ITGE-JA., 1998). Estos estudios estiman los recursos subterráneos en 4-5 $\text{hm}^3/\text{año}$, lo que implica una clara sobreexplotación del acuífero carbonatado.

Itinerario propuesto: (Fig. 62)

- ❖ **Parada 1.** *Visión general del acuífero detrítico en la fábrica de Briseis*
- ❖ **Parada 2.** *Mirador de los Millares*
- ❖ **Parada 3.** *Baños de Sierra Alhamilla*
- ❖ **Parada 4.** *Reutilización de aguas residuales de la ciudad de Almería*
- ❖ **Parada 5.** *Desaladora de agua de mar de la ciudad de Almería*

El recorrido se inicia con dos panorámicas generales del área, de las que se obtiene una visión general del paisaje y de los aspectos geológicos e hidrogeológicos más significativos del valle. El recorrido continúa con tres



El valle del río Andarax desde las estribaciones orientales de Sierra de Gádor, con la población de Rioja al fondo. En primer lugar se observa un afloramiento de margas miocenas y en el centro cultivos situados alrededor del cauce del río, cerca de Pechina



Borde oriental de la Sierra de Gádor visto desde Alhama. Los materiales carbonatados aparecen nevados; junto a ellos se dispone la plataforma de travertinos de Alhama de Almería

paradas más específicas: una en los Baños de Sierra Alhamilla, que muestra una de las singularidades hidrogeológicas más significativas del Bajo Andarax; las dos restantes tienen un enfoque más aplicado, puesto que se centran en unas actuaciones relacionadas directamente con la gestión de los recursos hídricos, concretamente la reutilización de aguas residuales y la desalación de agua de mar.

PARADA 1. VISIÓN GENERAL DEL ACUÍFERO DETRÍTICO EN LA FÁBRICA DE BRISEIS

Esta parada se realiza frente a la fábrica de "Briseis", en una elevación desde donde se tiene una visión general del acuífero detrítico en su tramo medio, con la Sierra de los Filabres en el horizonte. Muy característico es el cerro de El Alfaro, con un relieve en cuesta típico formado por niveles de areniscas presentes en las margas miocenas, las cuales constituyen la base impermeable del acuífero. Estos materiales se observan junto a la carretera A-92, siguiendo unos 300 en dirección norte, disponiéndose sobre ellos los depósitos arenoso-limosos de edad plioceno.

PARADA 2. MIRADOR DE LOS MILLARES

Esta parada está situada en el extremo norte del yacimiento arqueológico de los Millares (2700-1800 a.c), que constituye el poblado neolítico más importante del SE de la península. Su situación permite observar el área de La Calderona, donde se encuentran las captaciones con los mayores rendimientos del acuífero detrítico, como consecuencia de su litología, conglomerados y arenas, y de la alimentación directa a partir del río Andarax. En la foto de portada se observa el cauce del río totalmente encajado entre los depósitos fluviodeltaicos y la disposición de las explotaciones de cítricos en el valle. Estas explotaciones agrícolas aprovechan directamente el caudal del río mediante boqueras y las aguas subterráneas mediante galerías, pozos y sondeos. Dada la calidad del agua y los buenos rendimientos, esta zona constituye el área de captación de agua para abastecimiento a la mancomunidad de Bajo Andarax.

En dirección hacia Sierra de Gádor se observan los materiales calizodolomíticos alpujárrides, que constituyen el acuífero carbonatado y que en esta zona está limitado por una serie de fracturas de gran salto, por lo que las captaciones deben ubicarse próximas al borde de la sierra. En Alhama existían unos manantiales termales, que originaron una extensa plataforma travertínica. Estos manantiales actualmente han desaparecido y las únicas manifestaciones termales corresponden a algunos sondeos cuyas aguas alcanzan una temperatura de 40 °C.



Acuífero detrítico en el área de Gádor, donde empiezan a instalarse invernaderos

PARADA 3.- BAÑOS DE SIERRA ALHAMILLA

Los Baños de Sierra Alhamilla constituyen la manifestación termal más significativa del Bajo Andarax. Su caudal es bajo, unos 8 l/s, pero la temperatura de surgencia del manantial es de 58 °C y su facies bicarbonatada-clorurada sódica. La surgencia principal está muy localizada, pero existen algunos pequeños manantiales y sondeos cercanos que muestran cierta anomalía termal. Esta zona está localizada en la confluencia de varios sistemas de fracturación de importancia regional, en una situación donde se producen numerosas manifestaciones termales a lo largo de las Cordilleras Béticas, en el contacto de los materiales alpujárrides con los nevadofilábrides. La surgencia corresponde a una pequeña galería situada detrás del balneario y drena mármoles pertenecientes a varias unidades nevadofilábrides que están fuertemente desplazados por importantes accidentes verticales y subhorizontales.



Curiosa imagen nevada del borde oriental de Sierra Alhamilla, donde están situados los Baños

PARADA 4. REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE ALMERÍA

Los problemas de disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficientes, unido a la posibilidad de utilizar 12 hm³/año de aguas residuales de la ciudad de Almería, con tratamiento secundario que eran vertidas al mar, llevaron a la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía a ejecutar un proyecto para reutilizarlas (ALONSO, 1993). Las instalaciones son gestionadas actualmente por la Comunidad de Regantes de las Cuatro Vegas a través de una red de conducciones de unos 90 km y cubren una superficie de riego de 2.500 ha de cultivos hortícolas.

El sistema de tratamiento está basado en un proceso de depuración terciaria mediante ozono producido a partir de aire ambiente, lo que significa la incorporación de un tratamiento de desinfección a la depuración convencional. Las aguas residuales, una vez que han recibido tratamiento secundario en la EDAR de Almería (Fig. 64), se almacenan en un depósito de 10.000 m³ de capacidad, situado a cota 5, junto a la EDAR de Costacabana, en la que se dispone de un centro de elevación y una estación de filtrado. Las aguas filtradas se elevan a la cota 116, donde se encuentra la estación de ozonización -que permite tratar un caudal de 500 l/s- y un depósito impermeabilizado con polietileno de alta densidad y cubierto con malla de sombreado para evitar la evaporación y proliferación de algas, con una capacidad de 125.000 m³. Desde este depósito se suministrará el agua de riego a sectores del delta del Andarax y de los Llanos de La Cañada - El Alquíán, con presión suficiente (2,5 atm) para riego a la demanda o goteo en cada parcela.

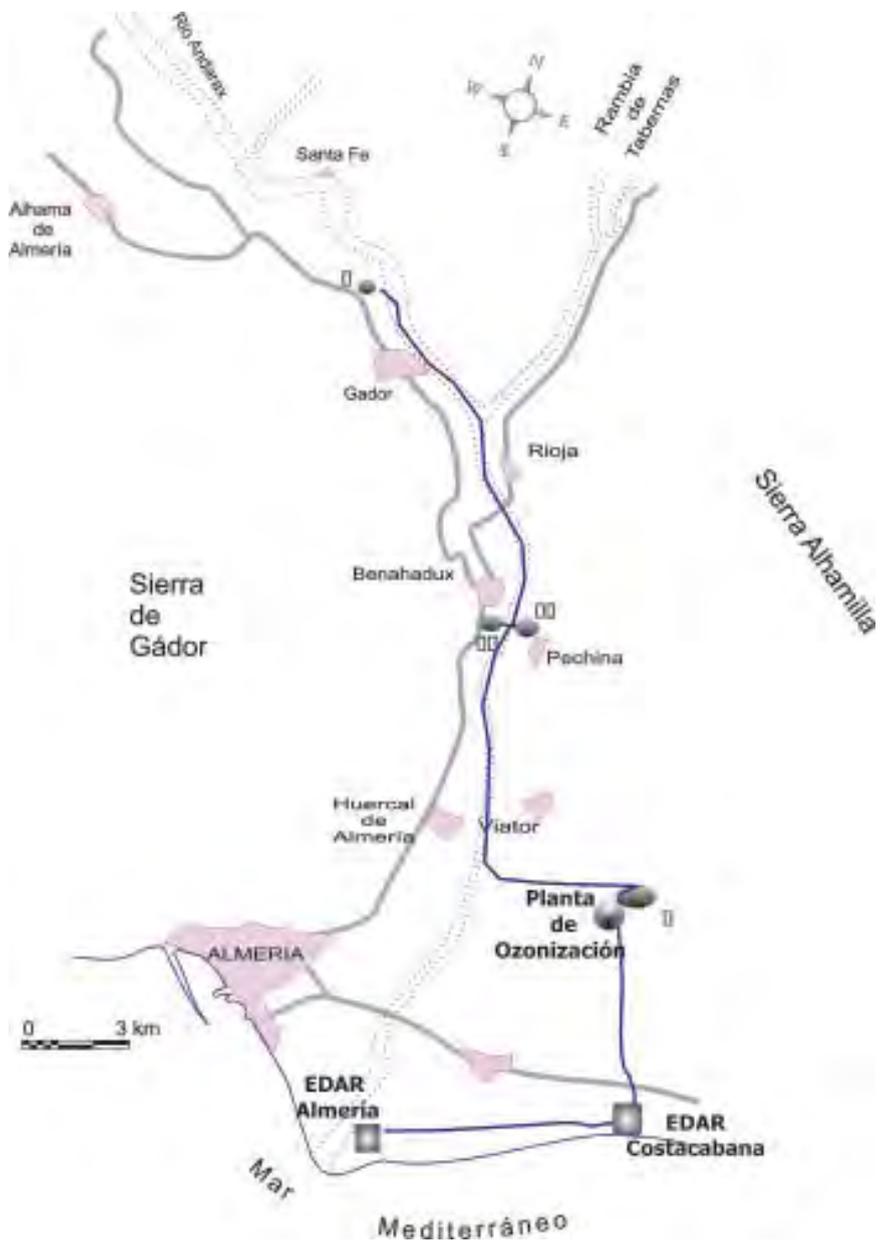


Figura 64. Croquis de situación de la red de reutilización de aguas residuales de la ciudad de Almería. Se indica la situación de las EDAR, la planta de ozonización y de los principales depósitos

*PARADA 5. DESALADORA DE AGUA DE MAR
DE LA CIUDAD DE ALMERÍA*

En la desembocadura del río Andarax se ha construido una planta desaladora de agua de mar para garantizar el abastecimiento a la ciudad de Almería. El suministro de la desaladora se realiza mediante bombeo del agua de mar y para ello se han realizado diecinueve sondeos situados a una distancia comprendida entre 30 y 150 m de la línea de costa, con el objetivo de extraer un caudal continuo de 1.300 l/s (Fig. 65). En el delta, los materiales acuíferos corresponden a formaciones deltáicas, de influencia marina y en continuidad lateral con materiales aluviales del río. Dado que en el acuífero existen múltiples usuarios, se ha establecido una red de observación del contacto agua dulce- salada que permita conocer cual será la respuesta del sistema a una extracción tan elevada (PULIDO BOSCH et al., 2002). Este sistema de control consta de tres enjambres de piezómetros situados a 200, 500 y 1.000 metros respectivamente del mar. Cada enjambre posee cuatro piezómetros: uno ranurado en todos sus tramos permeables, y otros tres con un solo tramo ranurado, de 1 ó 2 metros de longitud, situado a diferente profundidad, con el objeto de que sean representativos de la franja de agua dulce, de la zona de agua salada y de la zona de mezcla. La profundidad de los distintos piezómetros depende de la posición de las franjas de agua dulce y salada en cada grupo de control, tal y como se ha observado en los registros verticales de conductividad y temperatura realizados.

Esto hace posible un seguimiento en tiempo real de la evolución de la zona de mezcla en el entorno inmediato de la desaladora, como consecuencia de la explotación continuada. Los resultados obtenidos, derivados del bombeo simultáneo de 6 sondeos, indican que esta explotación se sitúa en la franja de agua salada (SANCHEZ MARTOS et al., 2003).



Figura 65. Desaladora de agua de mar de Almería y situación de los sondeos de captación (S-1 - S-19) y de los tres grupos de piezómetros (P-I, P-II y P-III) de control y seguimiento del contacto agua dulce-agua salada. Las flechas indican el sentido del flujo subterráneo; en la foto, testificación en un piezómetro realizado en el entorno de la desaladora

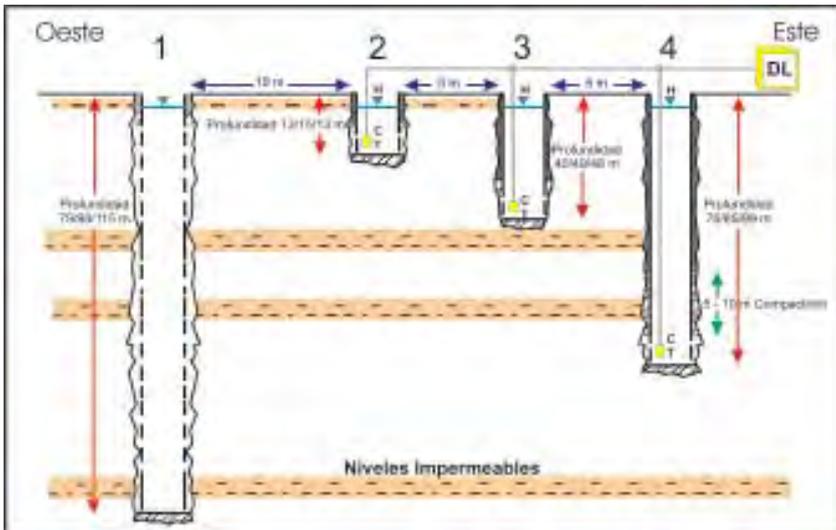


Figura 66. Esquema de diseño y características generales de los enjambres de piezómetros

CAPÍTULO 14
 ACUÍFERO DEL CAMPO DE NÍJAR
 Y AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CABO DE GATA

J. GISBERT¹, F. SÁNCHEZ- MARTOS¹, J.M. ALONSO² y S. JORRETO¹
¹Universidad de Almería; ²Geólogo consultor



Figura 67. Vista general del acuífero del Campo de Níjar desde La Serrata, con Sierra Alhamilla al fondo, y mapa de situación de las paradas a realizar en el recorrido

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Campo de Níjar se sitúa en el extremo suroriental de la provincia de Almería, y se extiende sobre una superficie de unos 157 km²; hacia el norte está limitado por las sierras de Alhamilla y Cabrera, y al sur por el Parque Natural del Cabo de Gata y el mar Mediterráneo. Una suave alineación de rocas de diverso origen -La Serrata de Níjar- divide longitudinalmente el Campo. Más hacia la costa se encuentran los materiales volcánicos de la Sierra de Gata, que constituyen, junto con el entorno marítimo-terrestre, el Parque Natural del Cabo de Gata-Níjar.

El área se sitúa dentro de los términos municipales de Almería, Níjar, Carboneras y Lucainena de las Torres y está atravesada de noreste a suroeste por la CN-340, y por multitud de carreteras locales (Fig. 67).

INTERÉS HIDROGEOLÓGICO Y SITUACIÓN ACTUAL

El sistema acuífero Níjar-Carboneras se caracteriza por recibir la tasa de precipitación más baja de la península. A su vez, presenta gran importancia socioeconómica, ya que las aguas subterráneas suponen el soporte exclusivo de la actividad agrícola intensiva de esta zona del levante almeriense y del abastecimiento urbano del municipio de Níjar.

Los dos principales acuíferos de la comarca están constituidos por formaciones detríticas pliocenas que rellenan las dos depresiones más extensas: el Campo de Níjar y el conjunto Fernán Pérez-Cabo de Gata (Fig. 68). La situación de sobreexplotación que sufre el primero de ellos desde los años 60 fue reconocida legalmente ya en abril de 1973, y por sucesivas normativas desde entonces.

La cota de nivel piezométrico en la zona central del Campo ha descendido unos 30 m en los últimos 50 años, si bien presenta una notable disminución del ritmo de descenso desde finales de la década de los 80, debido al abandono de regadíos, a la introducción de cultivos con menores necesidades hídricas, de nuevas técnicas de riego y a mejoras en la red de distribución, con el consiguiente descenso en la cuantía de los bombeos, que se mantiene aproximadamente constante desde los años 80.

A pesar del abandono de regadíos (forzado por el agotamiento total o parcial de los acuíferos captados y/o por la aparición de problemas debidos a la calidad del agua bombeada) y de la disminución alcanzada en las dotaciones de riego en parcela y origen, existe aún una sobreexplotación muy importante, que seguirá imponiendo una degradación de los acuíferos, potenciando aún más el elevado déficit hídrico de la comarca. La gran desproporción entre la demanda actual (54 hm³/año), los recursos disponibles y el prolongado período de sobreexplotación, especialmente en el acuífero del Campo de Níjar, que concentra la

mayoría de los recursos, obliga a considerar el tiempo como factor determinante en la aplicación de medidas correctoras, de tal modo que cuanto más se demore la liberación de estos acuíferos de su situación de explotación intensiva y deterioro progresivo de su calidad, tanto más difícil será la corrección del problema. A la anterior problemática es preciso añadir la presencia de otros impactos sobre estos acuíferos, tales como el vertido de salmueras procedentes de desaladoras privadas sobre los propios acuíferos, incremento de los contenidos en nitratos, aumento desproporcionado de la superficie de regadío, así como la puesta en marcha de nuevas fuentes externas de agua, como son las desaladoras de agua de mar (Carboneras y Rambla Morales).

Por otro lado, las aguas subterráneas en la cercana Sierra de Gata poseen un carácter anecdótico debido al escaso poder acuífero que tienen los materiales volcánicos miocenos. No obstante, las aguas subterráneas han jugado y juegan un papel decisivo a escala local, ya que han propiciado históricamente los distintos asentamientos y cortijadas que se distribuyen sobre toda la zona serrana y sus alrededores. De este modo, conviven las captaciones tradicionales con sondeos mecánicos más profundos. Las primeras se sitúan principalmente sobre los materiales detríticos plio-cuaternarios que rellenan las pequeñas cuencas entre los materiales volcánicos; solían ser "norias" o pozos de gran diámetro y escasa profundidad contruidos a mano, y hoy en día en desuso. Los sondeos, por el contrario, son más recientes -a partir de la mitad del siglo pasado-, y captan aguas de materiales volcánicos fracturados y con una cierta capacidad de almacenar y transmitir agua. Se usan tanto para regadío como para abastecimiento urbano a muchas pedanías de Níjar, como las Negras, Rodalquilar, etc.

Por último, es preciso mencionar por su carácter extraordinario y singular la presencia de pequeños manantiales que drenan de manera puntual los materiales volcánicos o las calizas y calcarenitas miocenas que reposan sobre ellos en el sector central y septentrional de la Sierra de Gata (Fig. 68). A pesar de su escaso caudal, originan paisajes y ecosistemas de gran belleza e interés en una zona de escasa precipitación y vegetación. Entre ellos destacamos el caso del manantial del Barranco de las Negras o el de la Cala de San Pedro (parada 6).

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

- *Acuífero del Campo de Níjar*

Se extiende por la fosa tectónica existente entre Sierra Alhamilla y la Serrata de Níjar, con una superficie aproximada de 157 km². Está formado fundamentalmente por calcarenitas, arenas y conglomerados pliocenos, en su mayor parte cubiertos por depósitos plio-cuaternarios con zonas de carácter semipermeable. El acuífero incluye además una serie de enclaves de calizas arrecifales y otros

materiales permeables de edad miocena, y de dolomías alpujárrides, especialmente en la vertiente SE de Sierra Alhamilla, en conexión hidráulica con los depósitos pliocenos del centro de la fosa. El substrato impermeable lo constituyen margas miocenas yesíferas y, ocasionalmente, vulcanitas neógenas o filitas permotriásicas alpujárrides.

El acuífero está compuesto por una o varias capas separadas por tramos areno-limosos o limo-margosos pliocenos de escasa permeabilidad. Su espesor total varía entre 0 y 160 m, con un valor medio saturado en torno a los 30-35 m y una profundidad máxima del muro de 180 m. El conjunto presenta valores de transmisividad entre 5 y 80 m²/h y una porosidad eficaz entre el 15 y el 20 % (FRANQUEZA et al., 1996).

La alimentación del acuífero (11-14 hm³/año) se debe a la infiltración directa, infiltración de escorrentías superficiales procedentes de áreas limítrofes, principalmente de la parte sureste de Sierra Alhamilla, y por flujos subterráneos desde distintos sectores adyacentes, así como al retorno de regadíos y usos urbanos. Las salidas se producen por flujo subterráneo en la zona del Barranquete y por bombeos, que se han estimado en unos 16 hm³/año, que representan un notable grado de sobreexplotación.

Las aguas tienen mayoritariamente facies cloruradas sódicas, variando a cloruradas-bicarbonatadas en los sectores septentrionales, alimentados por los acuíferos carbonatados del borde de Sierra Alhamilla. El contenido en cloruros varía entre 50 y 1.500 mg/l, aumentando su proporción hacia el borde suroccidental, en el límite con La Serrata y hacia la zona del Barranquete. Las salinidades oscilan entre 1 y 3 g/l.

- *Acuífero de Fernán Pérez y Hornillo-Cabo de Gata*

Este conjunto agrupa una serie de depresiones muy irregulares situadas entre la Serrata de Níjar y la Sierra de Gata, con una superficie conjunta aproximada de 110 km². Las depresiones se asientan sobre substratos volcánicos o vulcano-sedimentarios y se encuentran rellenas por depósitos neógenos marinos y cuaternarios. Los materiales acuíferos están constituidos principalmente por calcarenitas bioclásticas mesinienses y por conglomerados, arenas y calcarenitas pliocenas, que pueden alcanzar más de 170 m de espesor, aunque son muy irregulares y discontinuos (Fig. 68).

Los materiales presentan similares características hidráulicas a los del Campo de Níjar. Se distinguen dos sectores, uno septentrional en las inmediaciones de Fernán Pérez, y otro meridional, entre El Hornillo y la zona litoral de Cabo de Gata. El drenaje natural de la zona de Fernán Pérez se produce de forma subterránea hacia el acuífero del Campo de Níjar, mientras que en el sector meridional se realiza hacia el mar y la laguna costera existente en la desembocadura de Rambla Morales.

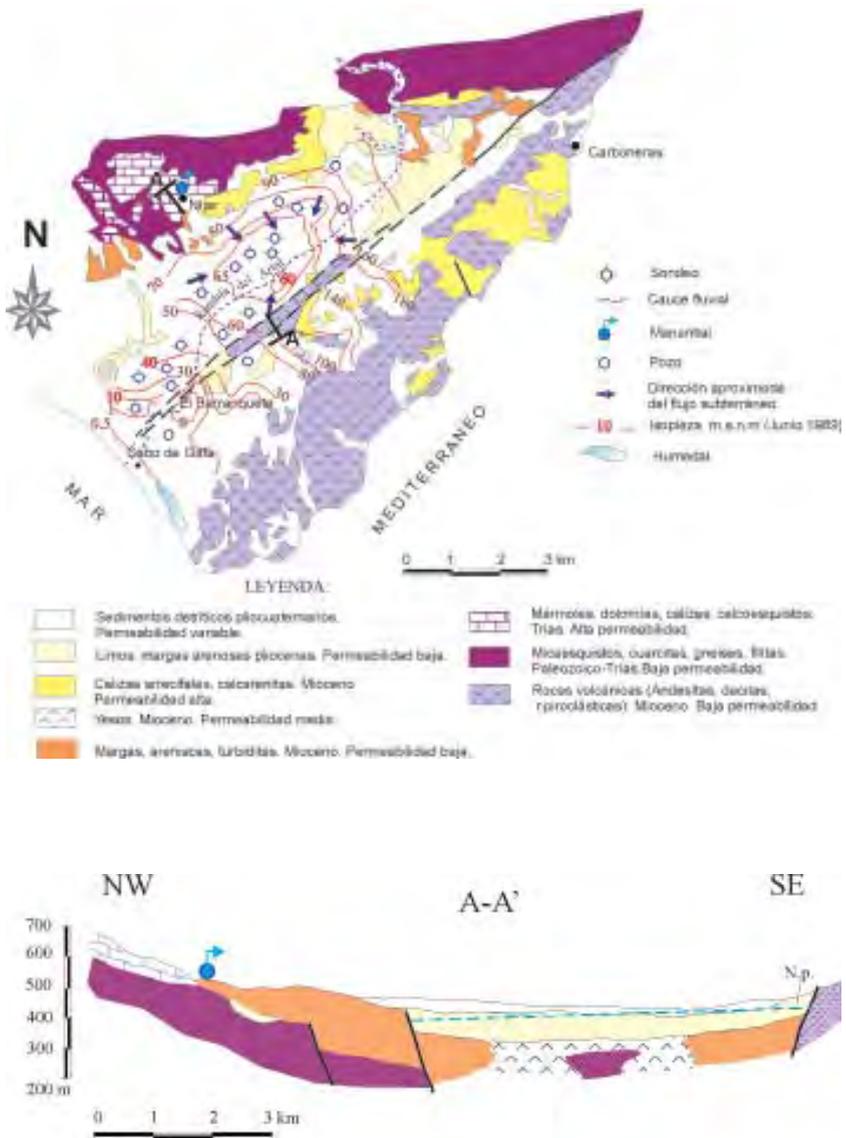


Figura 68. Esquema hidrogeológico de la comarca de Níjar-Carboneras y corte hidrogeológico (A-A') (modificado de ITGE-JA., 1998)

Sus recursos medios renovables se estiman en 5-6 hm³/año (ITGE, 1989). Los descensos piezométricos se acentúan en las zonas más explotadas, localizadas en Barranquete y El Hornillo, especialmente en la primera, en la que las entradas laterales desde el acuífero del Campo de Níjar han disminuido con el tiempo. En este sector, la piezometría muestra un conoide endorréico con cotas inferiores al nivel del mar desde el año 1989 (Fig. 68).

A los problemas de sobreexplotación se unen los de calidad, mediocre en general, con empeoramientos locales cuando se movilizan aguas ligadas a los materiales volcánicos del substrato. Las aguas presentan elevadas mineralizaciones, oscilando el contenido salino entre 1,5 y 7,5 g/l, muy variable según las zonas, en general aumentando en el sentido del flujo, hacia la costa. Las facies son cloruradas sódicas, con un contenido en cloruros de hasta 3 g/l en la zona costera.

- *Las aguas subterráneas en la Sierra de Gata*

La principal característica a resaltar es la falta de estudios y sistematización de la hidrogeología de esta zona, debido al escaso interés que tiene en cuanto a los recursos disponibles. Habría que distinguir entre las aguas subterráneas relacionadas con los materiales volcánicos y las relacionadas con los "parches" detríticos pliocuaternarios de tipo aluvio-coluvial que existen en las depresiones entre los primeros.

En general, las vulcanitas son materiales impermeables, pero la alteración y fracturación tan acusada que presentan en algunos sectores determinados provocan que se comporten como un acuífero pobre, muy localizado y de geometría irregular. A pesar de su escasa importancia cuantitativa, algunos sondeos poseen eficiencias y caudales específicos muy notables. El agua proviene de la infiltración de la precipitación, escasa en esta zona (250 mm de media anual). Las aguas suelen tener contenidos salinos relativamente altos (1-2 g/l) y son normalmente cloruradas sódicas.

Los materiales detríticos son aluviales y coluviales que se presentan en los valles de los cauces y ramblas que surcan la Sierra. El volumen de estos acuíferos de forma irregular es pequeño y su funcionamiento muy estacional, nunca llegando a tener espesores saturados mayores de 5-10 m. La recarga de los mismos se produce por infiltración de la precipitación y por aportes subterráneos de los materiales volcánicos del substrato. La calidad es algo mejor que en el caso anterior, pero está influenciada en muchos casos por la pobre calidad de las aguas del substrato volcánico.

Itinerario propuesto: (Fig. 67)

- ❖ **Parada 1.** Pozo antiguo, en la desembocadura de la rambla de las Amoladeras
- ❖ **Parada 2.** Aljibe tradicional en la Sierra de Gata (La Boca de los Frailes)
- ❖ **Parada 3.** Pozo artesanal y noria del siglo XVIII en la barriada del Pozo de los Frailes (Sierra de Gata)
- ❖ **Parada 4.** Panorámica de Rambla Morales y necrópolis Neolítica en las cercanías de El Barranquete (acuífero Hornillo-Cabo de Gata)
- ❖ **Parada 5.** Panorámica del acuífero del Campo de Níjar desde La Serrata

Otras paradas:

- ❖ **Parada 6.** Manantial de La Cala de San Pedro
- ❖ **Parada 7.** Manantial de Huebro

PARADA 1. POZO ANTIGUO, EN LA DESEMBOCADURA DE LA RAMBLA DE LAS AMOLADERAS

Se encuentra en la desembocadura de la rambla de las Amoladeras (dentro de los límites del Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar), y se accede a través de la carretera que une Retamar con el pueblo de Cabo de Gata; a mitad de camino se toma un cruce hacia la ermita de Torre García.

El interés de este pozo se encuentra en su antigüedad y en sus características constructivas, ya que es una captación somera tradicional del aluvial de la rambla, pero está recrecido en el exterior, con objeto de que las posibles avenidas de la rambla y/o las dunas no lo tapasen. En la actualidad no se utiliza y ha sido empleado como abrevadero del ganado fundamentalmente.

PARADA 2. ALJIBE TRADICIONAL EN LA SIERRA DE GATA (LA BOCA DE LOS FRAILES)

Dentro de la Sierra de Gata, y hasta mediado del siglo pasado, los aprovechamientos de agua fundamentales eran bien de agua subterránea (a través de pozos y norias), bien de agua superficial a través de aljibes, como el de la parada en cuestión (ver foto). Existe una gran cantidad de los mismos, distribuidos por toda la zona de Gata-Carboneras, de distintos tamaños y formas, y utilizados tanto para uso ganadero, como para abastecer a los pequeños núcleos urbanos y cortijos. Destacamos, por su forma característica de semiesfera, el de La Boca de los Frailes, justo al borde de la carretera de esta barriada, que se encuentra de camino al Pozo de los Frailes (Fig. 67),



Pozo recrecido en la desembocadura de la rambla de las Amoladeras, dentro del Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar (parada 1)



Aljibe tradicional de agua en la Sierra de Gata (La Boca de los Frailes) (parada 2)



Antiguo aljibe de la Cañada Real, en el paraje del cortijo Bermejo, al norte de Campohermoso

*PARADA 3. POZO ARTESANAL Y NORIA DEL SIGLO XVIII
EN LA BARRIADA DEL POZO DE LOS FRAILES
(SIERRA DE GATA)*

El Pozo de los Frailes es un pedanía de Níjar que se encuentra en la carretera que une Ruescas con San José, a tan sólo unos pocos kilómetros de este último pueblo de playa (Fig. 67). La presencia de un pozo y una noria del siglo XVIII dan nombre al asentamiento. La noria es una sencilla máquina compuesta por dos grandes ruedas engranadas que, por medio de una caballería, elevan el agua de un pozo mediante vasijas de barro (ver foto). Su caudal de extracción es de 1 l/s.

La historia de la población siempre ha estado ligada a la existencia del pozo. Surgió como núcleo estable al final del siglo XVIII al completarse el sistema defensivo que aseguraba el control de la costa frente a los piratas genoveses, turcos e ingleses. Si antes sirvió básicamente de abrevadero para el ganado trashumante, a partir de esta época el pozo va a posibilitar el desarrollo agrícola impulsado por los frailes del convento de Santo Domingo de Almería, que alcanzó su apogeo a comienzos del siglo XX, momento en el que un particular levanta la noria a sus expensas, a cambio del uso de los sobrantes del agua para regar sus tierras. Funcionó hasta 1983, fecha en la que se abandonó, siendo recuperada por la Consejería de Cultura y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en aquella época.

*PARADA 4. PANORÁMICA DE RAMBLA MORALES Y NECRÓPOLIS
NEOLÍTICA EN LAS CERCANÍAS DEL BARRANQUETE
(ACUÍFERO HORNILLO-CABO DE GATA)*

A este lugar se accede por la carretera que une Barranquete con la N-340; una vez pasada la población de Barranquete y tras atravesar el cauce de Rambla Morales, a un par de kilómetros existe una parada a la derecha de la carretera desde donde se puede observar una panorámica de Rambla Morales, unos cientos de metros aguas abajo de donde comienza (unión del la rambla del Hacho y del Artal).

En esta parada se observa una panorámica de la cabecera del acuífero de Hornillo-Cabo de Gata y de la Rambla Morales. En este acuífero, además de las entradas por infiltración de agua de precipitación y de las escorrentías de los relieves marginales, en régimen natural de funcionamiento del sistema tenía lugar una importante entrada lateral desde el acuífero del Campo de Níjar por la zona de Barranquete, la cual ha disminuido con el tiempo por efecto de la sobreexplotación de aquél. Otras entradas subterráneas de menor entidad se producen de forma difusa desde los materiales volcánicos del substrato, de baja permeabilidad.



Pozo artesanal y noria del siglo XVIII en la barriada del Pozo de los Frailes (Sierra de Gata; parada 3).



Panorámica de Rambla Morales y necrópolis Neolítica en las cercanías del Barranquete, desde la parada 4 (acuífero Hornillo-Cabo de Gata)

La particularidad de esta parada es, además de la panorámica, observar la evolución de los distintos métodos e historia del agua en esta zona (ver foto). Por un lado encontramos un asentamiento Neolítico y su necrópolis, justo en un sector donde tenían por entonces agua de escorrentía todo el año y regaban los incipientes sistemas de bancales. Por otro lado, la presencia de una red de acequias que traían el agua en el siglo pasado desde el Campo de Níjar a los regadíos de la zona de Rambla Morales. Asimismo, encontramos un sondeo mecánico que data del 1972, realizado con motivo de las explotaciones para el regadío de los cultivos de parral.

PARADA 5. PANORÁMICA DEL ACUÍFERO DEL CAMPO DE NÍJAR DESDE LA SERRATA

Dentro del Campo de Níjar vamos a recorrer un sector entre las localidades de Campohermoso, Puebloblanco y San Isidro donde se centran los principales bombeos de explotación, que se llevan a cabo a través de más de 100 captaciones, algunas de las cuales veremos a lo largo del recorrido. Para acceder a este sector, nos desviaremos de la CN-340 en dirección a Campohermoso y San Isidro, y justo en el cruce a Pueblo Blanco realizaremos esta parada. En la foto se muestra una panorámica desde una zona alta de La Serrata, justo en la balsa de regulación construida por la empresa Acuamed (antigua Acusur). A la misma se accede por un carril desde Pueblo Blanco.

El interés se centra en observar un sector sobreexplotado, donde las isopiezas marcaban en un principio un acentuado sentido del flujo como drenaje natural hacia la zona de El Barranquete, coincidente con la rambla del Artal, a través de los conglomerados pliocenos, pero debido al creciente bombeo durante estos últimos años se ha invertido este flujo, formándose un conoide de depresión bastante significativo (Fig. 68; ITGE, 1989 e ITGE-JA, 1998).

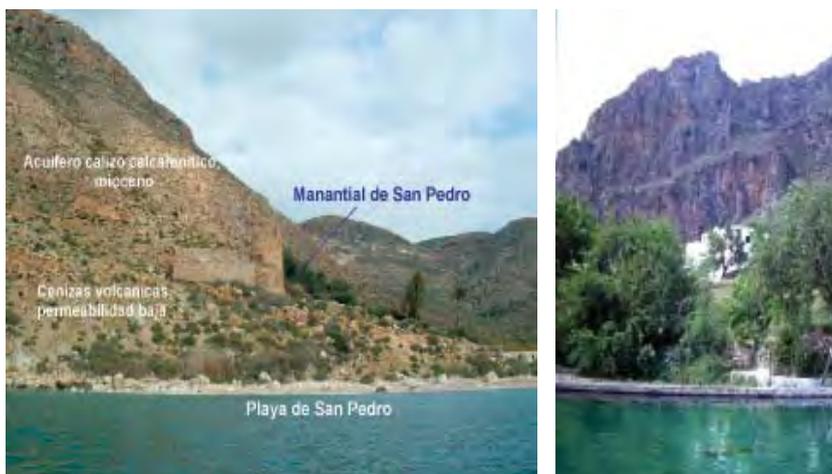
Históricamente, el drenaje en régimen natural se producía a través del eje longitudinal del Campo hacia el suroeste (ver foto panorámica), hasta Barranquete, donde tiene lugar la descarga subterránea hacia el acuífero del Hornillo-Cabo de Gata, y que en la antigüedad afloraba superficialmente durante las épocas de recarga. A partir de los años 50, en que se inició la transformación en regadío del Campo por el Instituto Nacional de Colonización, los descensos piezométricos, generalizados en prácticamente toda su extensión, modificaron el régimen de funcionamiento natural hasta una situación de concurrencia de flujos hacia la zona central, de mayor bombeo, y a la formación de un umbral piezométrico en la zona meridional (rambla del Cambronal). Como consecuencia, se ha reducido muy notablemente el volumen drenado hacia la zona de Barranquete. Del mismo modo,



Panorámica del acuífero del Campo de Níjar desde La Serrata (parada 5)



Bahía y playa de los Genoveses (Cabo de Gata), entre materiales volcánicos



Manantial de la Cala de San Pedro en Cabo de Gata (parada 6) y balsa de regulación del manantial de Huebro, cerca de Níjar (parada 7)

la calidad del agua se ha ido deteriorando por la movilización de horizontes con mayor salinidad, que han producido mezclas en el agua de bombeo y en el propio acuífero a través de sondeos.

En la actualidad existe un plan de aprovechamiento de agua desalada para riego, una de cuyas infraestructuras es una balsa de regulación situada en la parte sur de La Serrata, cuyas dimensiones se aprecian en la foto.

OTRAS PARADAS

PARADA 6. MANANTIAL DE LA CALA DE SAN PEDRO

A la Cala de San Pedro se accede desde la población de las Negras (Fig. 67), a través de un camino carretero peatonal y tras una hora andando. El rasgo hidrogeológico más característico es su manantial, que creó un pequeño asentamiento (hoy abandonado) de población dedicada a la agricultura, pastoreo y la pesca. El manantial drena unas calizas arrecifales y calcarenitas de edad miocena de extensión limitada y situadas sobre materiales volcánicos impermeables, que constituyen los relieves en mesa del cerro Ricardillo y su entorno.

Hoy día, centro de turismo "naturista", la Cala de San Pedro constituye un entorno de gran belleza y singularidad dentro del Cabo de Gata, guardando asimismo piezas de interés histórico, como el castillo-fortaleza árabe del siglo XV, actualmente en ruinas.

PARADA 7. MANANTIAL DE HUEBRO

Población situada por encima de Níjar y en el sector más elevado de Sierra Alhamilla, se accede por una carretera sinuosa pero asfaltada que parte del pueblo de Níjar. Posee un manantial que drena los carbonatos alpujárrides de Sierra Alhamilla (Figs. 67 y 68). Dicho manantial es perenne y se caracteriza por un quimismo con altas concentraciones en elementos pesados como el plomo y mercurio.

De modo adicional, esta surgencia propició la existencia de gran número de molinos de agua, distribuidos a lo largo del valle, desde Huebro hasta Níjar. Actualmente sin uso, existe una ruta para visitar sus restos con información explicativa.



Pozo artesanal con capilla, en la cortijada La Pared Alta, al norte de la Serrata de Níjar; al fondo el cerro de las Víboras



Aljibe antiguo en el Cabo de Gata; al fondo las salinas

GLOSARIO TERMINOLÓGICO

Acuícludo: Formación geológica capaz de almacenar, pero no de transmitir agua (equivale a material impermeable). Por ejemplo, la arcilla

Acuífero: Formación geológica capaz de almacenar y transmitir con facilidad el agua (equivale a material permeable). En el litoral mediterráneo andaluz, las formaciones detríticas aluviales y de playa, y las carbonatadas

Acuífero confinado: Acuífero limitado en su parte superior por una capa de permeabilidad muy baja, a través de la cual el flujo ascendente es prácticamente despreciable

Acuífero de cabecera (en este libro): Generalmente, se alude con este término a los acuíferos carbonatados situados en la parte alta de las diferentes cuencas, cuya descarga visible u oculta alimenta a los acuíferos detríticos costeros, por lo que cualquier actuación sobre ellos incide sobre los detríticos

Acuífero excedentario: Acuífero que presenta descargas naturales y en el que los recursos son sensiblemente superiores a las extracciones por bombeo

Acuífero libre: Acuífero que no presenta nivel confinante superior, por lo que la superficie piezométrica se halla en equilibrio con la presión atmosférica

Acuífero multicapa: Acuífero que presenta diferentes niveles saturados en la vertical, separados por otros tantos tramos impermeables.

Acuífero sobreexplotado: Acuífero que no presenta descargas naturales y en el que los recursos son inferiores a las extracciones por bombeo, por lo que hay consumo continuado de reservas

Acuitardo: Formación geológica capaz de almacenar y transmitir lentamente el agua. Por ejemplo, limos finos, margocalizas o conglomerados con matriz arcillosa

Aforo: Medida del caudal (de un río, manantial, pozo, etc). Se suele expresar en l/s ó m³/s

Alimentación (de un acuífero): Aportes de agua externos, de cualquier origen, que recibe un acuífero. Se suele expresar en hm³/a

Alpujárrides (materiales, complejo...): Alude a un conjunto tectónico de edad permotriásica y litologías variadas, perteneciente a la zona interna de las Cordilleras Béticas. En el litoral mediterráneo andaluz, los acuíferos carbonatados pertenecen a este conjunto

Aluviales: Materiales detríticos, no consolidados, de génesis fluvial y recientes. Por su alta permeabilidad, presentan gran interés hidrogeológico

Aportación: Término similar al de alimentación

Azud: Construcción hidráulica, cuyo objeto es represar agua de un río o cauce para facilitar la derivación de acequias para regadío y otros usos

Balance hídrico: Estimación de las partidas de alimentación y descarga de un acuífero, y cuantificación del desajuste entre ambas. Las cantidades de expresan en hm³/a

Carbonatados (afloramientos, materiales, acuíferos...): Se refiere a la naturaleza litológica de las rocas, constituidas esencialmente por minerales del grupo de los carbonatos. Entre las rocas sedimentarias pertenecientes a este grupo destacan las calizas y dolomías. Los mármoles son rocas carbonatadas que han sufrido metamorfismo. Por su alta permeabilidad, presentan gran interés hidrogeológico

Careos: Aplicación del agua sobre la superficie del terreno, con la finalidad principal de lavar el suelo o recargar acuíferos

Coefficiente de almacenamiento: En los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento equivale en la práctica a la porosidad eficaz (ver).

Conductividad eléctrica: Parámetro físico del agua, que mide la facilidad o dificultad de la misma para transmitir la corriente eléctrica. Es indicativo del contenido salino total de un agua, con el que mantiene una relación directa. Se mide en $\mu\text{S}/\text{cm}$

Cono o conoide de depresión: Forma típica que adopta la superficie piezométrica alrededor de una captación sometida a extracción (bombeo), de modo que los descensos provocados son mas pronunciados cuanto menor es la distancia a la citada captación

Cuenca hidrográfica: Territorio vertiente a un mismo cauce o conjunto de cauces. La Cuenca Hidrográfica del Sur de España, equivalente en su nueva denominación a la Cuenca Mediterránea Andaluza, aglutina a todo el territorio que vierte sus aguas al Mediterráneo andaluz

Descarga (de un acuífero): Salidas de agua, de cualquier tipo, de un acuífero; las más usuales se producen por bombeos, surgencias y de forma oculta hacia otros acuíferos limítrofes o el mar. Se suele expresar en hm^3/a

Detríticos (afloramientos, materiales, acuíferos...): Se refiere a la naturaleza de las rocas, constituidas por sedimentos de diversa naturaleza que, según el tamaño de grano, pueden ser arcillas, limos, arenas y gravas. Por su alta permeabilidad (excepto las arcillas y limos finos), presentan interés hidrogeológico

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

Embalse subterráneo: Masa de agua contenida en una formación geológica permeable; equivale a acuífero saturado

Escorrentía: Partida de la precipitación que discurre de forma superficial sobre el terreno

Espeleotema: Forma de origen kárstico, originada por disolución y/o precipitación de carbonato cálcico, aunque también pueden producirse sobre otros minerales (por ejemplo, el sulfato cálcico)

ETAP: Estación de Tratamiento de Aguas Potables

Evapotranspiración: Partida del agua de precipitación que es devuelta en forma de vapor desde la superficie del terreno a la atmósfera. Incluye la evaporación directa y la transpiración de plantas y animales

Evapotranspiración real: Es la que se produce bajo unas condiciones dadas de clima y de contenido de humedad del suelo, de modo que la demanda atmosférica no puede ser satisfecha si el suelo no dispone del agua suficiente

Extrusión marina: Proceso inverso al de intrusión, correspondiente a un retroceso hacia la línea de costa de la interfase salina

Facies (en hidroquímica): Tipología hidroquímica del agua, en atención al anión y catión dominantes

Galería: Túnel excavado en un acuífero, con la finalidad de captar aguas subterráneas por gravedad

Gradiente hidráulico: Variación con la distancia de la altura del nivel piezométrico de un acuífero en la dirección de máxima pendiente. Equivale a la pendiente de la superficie piezométrica. Se expresa en %

Hidrogeología: Ciencia, o rama de la geología, que estudia las aguas subterráneas

Hidrograma: Gráfica que representa la variación con el tiempo del caudal de un manantial (o de un río), o del nivel piezométrico en un pozo o sondeo

Infiltración: Partida de la precipitación que desciende por gravedad bajo la superficie del terreno

Interfase: En acuíferos costeros, es la superficie de separación de una masa de agua dulce y otra salada o salobre, de mayor densidad

Intrusión marina: Penetración tierra adentro de la interfase (agua dulce-salada) en los acuíferos costeros, generalmente por el bombeo de aguas subterráneas

Isopieza: Línea que une todos los puntos de la superficie saturada de un acuífero que tienen la misma cota

Kárstico: Proceso de fracturación y posterior disolución de rocas carbonatadas o evaporíticas. También, característica de un paisaje o formación geológica en relación con la disolución de dichos tipos de rocas

Litoestratigrafía: Ciencia, o rama de la geología, que estudia la distribución de las formaciones geológicas en el espacio y en el tiempo

Maláguides (materiales, complejo...): Conjunto tectónico de edad Trías-Mioceno y litologías variadas, perteneciente a la zona interna de las Cordilleras Béticas. Es el complejo superior y la permeabilidad de sus materiales suele ser baja

Manto de corrimiento: Deslizamiento o cabalgamiento de unas formaciones geológicas sobre otras, con un salto o desplazamiento en la horizontal de varios kilómetros.

Mapa piezométrico: Representación cartográfica de la superficie piezométrica de un acuífero, a través de sus líneas isopiezas

Metapelitas: Tipo de rocas, de origen detrítico, que han sufrido un fuerte metamorfismo. Por ejemplo, los esquistos. Suelen presentar baja permeabilidad

Nevado-filábrides (materiales, complejo...): Conjunto tectónico de edad paleozoica y litologías variadas, perteneciente a la zona interna de las Cordilleras Béticas. Es el conjunto inferior, y la permeabilidad de sus materiales es baja

Nivel piezométrico: Cota o nivel del agua en cualquier punto de la superficie de un sistema acuífero

Ósmosis: Difusión de un líquido a través de una membrana semipermeable que separa dos disoluciones de dicho líquido a concentraciones distintas

Paleocauce: Antiguo cauce relleno por sedimentos más modernos que aquellos en que está excavado

Permeabilidad: Parámetro hidrogeológico que da idea de la facultad de un material para permitir el paso del agua (u otro fluido) a través de sus poros. Se suele expresar en m/s ó m/día

Piezómetro: Pozo o sondeo utilizado para medir la cota del agua en un punto dado de un acuífero

Porosidad (porosidad total): Relación entre el volumen de huecos, interconectados o no, contenidos en una roca o sedimento y el volumen total de roca o sedimento. Se expresa en %

Porosidad eficaz: Relación entre el volumen de agua gravífica (agua que una roca o sedimento puede liberar por efecto exclusivamente de la gravedad) y el volumen total de roca o sedimento. Se expresa en %

Recarga (en hidrogeología): Generalmente se refiere a la partida de la alimentación, correspondiente al agua de precipitación infiltrada sobre la superficie de un acuífero. En ciertos contextos, puede tener un sentido más amplio, coincidente con el de alimentación. Se expresa en $\text{hm}^3/\text{año}$

Recarga artificial: Técnica consistente en alimentar un acuífero, bien a través de la inyección de agua en profundidad, o de la infiltración de aguas desde la superficie

Recursos (en hidrogeología): Término equivalente a alimentación. Se expresan en hm^3/a

Regulación (de manantiales): Explotación por bombeo que provoca el agotamiento o la disminución de caudal, por lo menos temporal, de uno o varios manantiales, con objeto de adecuar su funcionamiento a las exigencias y distribución en el tiempo de la demanda, de modo que se consigue un mayor aprovechamiento de los recursos

Reservas (en hidrogeología): Volumen de agua almacenada en un embalse subterráneo por debajo del nivel de sus aliviaderos naturales (manantiales). Se expresan en hm^3

Retorno de riegos: Agua que llega a la zona saturada de un acuífero, procedente de la infiltración de parte del agua aplicada al regadío

Río ganador: Río que recibe aportes de aguas subterráneas al cauce (se conoce también como río efluente)

Río perdedor: Río en el que una parte de su caudal se infiltra a través del cauce (se conoce también como río influente)

Salinidad (de un agua): Contenido total en sales disueltas; se suele expresar en mg/l . De forma indirecta se mide también por la conductividad, expresada en $\mu\text{S/cm}$

Sobreexplotación (de un acuífero): Se dice cuando de forma generalizada, en el espacio y/o en el tiempo, se explota un volumen de agua superior a los recursos medios del acuífero, lo que provoca la utilización de las reservas, y un descenso continuado de niveles

Sondeo surgente: Sondeo en el que el agua mana libremente por la boca, debido a que esta se halla a mayor presión que la atmosférica, al haberse captado un nivel acuífero confinado

Substrato (de un acuífero): Formación geológica infrayacente de carácter impermeable

Superficie piezométrica: Superficie definida por todos los puntos en los que la presión del agua de un acuífero libre o confinado es igual a la presión atmosférica

Transmisividad: Parámetro hidrogeológico que da idea de la facultad de un acuífero para transmitir el agua. De forma más precisa, puede definirse como el caudal de agua que atraviesa una franja de acuífero, orientada perpendicularmente al flujo, de anchura unidad y bajo un gradiente hidráulico unitario. Se suele expresar en $m^2/día$

Travertino: Roca carbonatada muy porosa, con abundantes restos vegetales. Se origina a partir de la precipitación del carbonato cálcico que portan las aguas de surgencia

Uso conjunto (aguas superficiales-subterráneas): Gestión de recursos que contempla el aprovechamiento racional de aguas superficiales y subterráneas, de acuerdo con las características globales de la cuenca y la distribución de la demanda

Ventana tectónica: Lugar o proceso en el que por erosión, queda al descubierto una unidad tectónica inferior, completamente rodeada por unidades superiores

Zona saturada: Zona de un acuífero en la que los poros están ocupados en su totalidad por agua

AGRADECIMIENTOS

Han sido muchas las instituciones y personas que han hecho posible este trabajo. D. Juan López Martos, ex director del Instituto del Agua de la Junta de Andalucía, fue el primero en proponer esta edición, después de conocer de la realización del trabajo en el Simposio sobre el Agua en Andalucía celebrado en Almería en el año 2000. D. José María Fernández Palacios, jefe de investigación del citado Instituto del Agua fue quién impulsó definitivamente el convenio que facilitó su edición. A la Agencia Andaluza del Agua, por haber patrocinado la edición. A D. Rafael Peinado, Director de la Editorial de la Universidad de Granada, responsable de la edición final del libro en la colección de Tierras del Sur.

El trabajo hubiera sido una mera recopilación, sin la desinteresada aportación personal de nuestros compañeros de las universidades de Málaga, Granada y Almería que figuran como autores (al principio del libro), de los diferentes acuíferos considerados; a todos ellos nuestro más sincero agradecimiento. Otros compañeros aportaron fotografías y documentación variada que ENRIQUECIERON el trabajo; entre ellos cabe citar a Wenceslao Martín Rosales, Agustín Martín Algarra, Carlos Sanz de Galdeano, Estrella Romero, Enrique y Laureano Garrido.

En la Costa del Sol Occidental tuvimos el apoyo de Acosol, S.A. y en su representación de D. Miguel Esteban, jefe de explotación de la desaladora de Marbella; D. Eduardo Lupiani, D. Alvaro Islán y D^a Ana Ortuño, de la empresa Aquaguest, S.A. facilitaron valiosa información del acuífero de Marbella; a D. Paulino Jiménez, de la empresa de aguas de Estepona. Y a D. Eugenio Matías, amigo y técnico de Aguas y Servicios S.A. de Almuñécar.

ANEXO

INFORMACIÓN SOBRE DISTINTAS LOCALIDADES DE POSIBLE
ALOJAMIENTO Y VISITA DURANTE LA REALIZACIÓN DEL
ITINERARIO HIDROGEOLÓGICO

ESTEPONA

Página Web: www.estepona.es

Oficina de información y turismo: Paseo marítimo Pedro Manrique s/n

Tfno: 95-2800913

Visitas:

Conserva un interesante casco urbano antiguo, donde destaca la plaza de las Flores, el Castillo de San Luis (s.XVI) , la Torre del Reloj (s.XV) y la Iglesia de los Remedios (s.XVIII)

MARBELLA

Página Web: www.marbella.es

Oficina de información y turismo: Tfno: 95-2771442

Visitas:

Se conservan ruinas romanas y ruinas de Castillo árabe; en el casco antiguo son típicas sus casas blancas calles estrechas; museo de los Bonsáis; museo del grabado español contemporáneo; Iglesia de La Encarnación; la Casa del Corregidor y en general, por ser zona turística destacan grandes complejos hoteleros, urbanizaciones de lujo y casas de espectacular arquitectura.

MÁLAGA

Página Web: www.ayto-malaga.es

Oficina de información y turismo: Pje. de Chinitas, 4

Tfno: 95-2213445

Visitas:

Málaga conserva importantes monumentos, tales como el Castillo de Gibralfaro (s.XIV) de origen fenicio; la Alcazaba de origen árabe (s.XI); teatro romano (s. I a.c); Iglesia del Sagrario (s.XV); la Catedral (s.XVI-XVIII); museo de Bellas Artes; museo de arte y tradiciones populares; Cueva del Tesoro en el rincón de la Victoria; parque ornitológico y botánico de El Retiro y la fundación Picasso instalada en la casa del artista.

NERJA

Página Web: www.nerja.org

Oficina de información y turismo: Puerta del Mar, 4

Tfno: 95-2521531

Visitas:

Como ya hemos propuesto, la Cueva de Nerja de gran belleza no se puede dejar de visitar; el mirador del Balcón de Europa; el casco antiguo, callejuelas y barrio de pescadores, y acueducto del Puente del Águila.

ALMUÑÉCAR

Página Web: www.almuñecar.info

Oficina de información y turismo: Avda. de Europa s/n (Palacete La Najarra).

Tfno: 958-631125

Visitas:

El casco antiguo conserva rasgos árabes; en la parte alta del pueblo se encuentra el Castillo de origen romano, aunque en esencia es una obra musulmana; jardín botánico del Majuelo y salazones fenicios; acueductos romanos con portadas de medio punto y parque ornitológico Loro Sexi.

MOTRIL

Página Web: www.motril.es

Oficina de información y turismo: Avda. de Salobreña, 5 (Edif. La Palma)

Tfno: 958-823591

Visitas:

El casco antiguo conserva rasgos musulmanes; Plaza de España; Santuario de Nuestra Señora de la Cabeza; palacio de la madre de Boabdil, último rey moro de Granada; parque de los pueblos de América, donde encontramos gran variedad de plantas exóticas y el puerto del Varadero que es uno de los más activos de Andalucía..

CASTELL DE FERRO

Página Web: www.dipgr.es/aytos

Visitas:

Paseo marítimo y torre árabe

ALMERÍA

Página Web: www.aytoalmeria.es

Oficina de información y turismo: Parque Nicolás Salmerón s/n.

Tfno: 950-274355

Visitas:

La Alcazaba (s.VIII) de origen árabe; la Iglesia de San Pedro (s. XVI); el Santuario de Santo Domingo (s.XVIII); el Mercado Central (s.XIX); La Muralla de Hairan y la Hoya.

SAN JOSÉ

Página Web: www.dipalme.org

Visitas:

Pueblo típico marinero con puerto pesquero; playas y calas en rocas volcánicas; Parque Natural de Cabo de Gata.

Otras páginas Web de interés:

www.juntadeandalucia.es

www.andalucia.org (Consejería de Turismo y Deporte)

www.juntadeandalucia.es/medioambiente/espacios_naturales

www.ayuntamientoadra.com

www.parquenatural.com (Parque Natural de Cabo de Gata)

www.cuevadenerja.es

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

- ALFARO, P.; ANDREU, J.M.; GONZÁLEZ, J.; GONZÁLEZ, M.; LÓPEZ, F.J. y LÓPEZ, J.A. (1999): *Itinerario geológico de la Cordillera Bética*. 160 págs.
- COPT (2003): *Mapa oficial de carreteras de Andalucía. Series provinciales a escala 1: 200.000*; mapas de Málaga, Granada y Almería. Ed. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía
- FONTBOTÉ, J.M. y VERA TORRES, J.A. (1983). *La Cordillera Bética. Introducción*. En: *Geología de España*, Libro jubilar J.M. Rios. IGME, tomo II, Págs. 205-218.
- INE (Instituto Nacional de Estadística) (2004): Página web: www/ine.es
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.
- VERA TORRES, J.A. (2004): *Geología de España*. IGME- SGE. Ed: Vera Torres, JA.

ITINERARIO POR LOS ACUÍFEROS DEL LITORAL MEDITERRÁNEO ANDALUZ

CAPÍTULO 1. ACUÍFEROS DE MARBELLA - ESTEPONA

- ANDREO NAVARRO, B. (1997): *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas*. Tesis Doctoral. Univ. de Málaga. 489 págs.
- DIPUTACIÓN DE MÁLAGA (1988): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Ed. Diputación de Málaga. 151 págs.
- JÁEN PERAL, M.; ISLÁN GARCIA, A.; LUPIANI MORENO, E. y RIERA MOLINA, S. (2003): *Explotación sostenible de un acuífero aluvial muy vulnerable a la contaminación marina (Marbella)*. Simposio Internacional, TIAC' 03. Alicante (España)
- JÁEN PERAL, M.; PARELLADA BEZARES, C.; LUPIANI MORENO, E; ISLÁN GARCIA, A. y RIERA MOLINA, S. (2003): *Recarga artificial en el acuífero costero de Marbella*. Simposio Internacional, TIAC' 03. Alicante (España)

- LINARES GIRELA, L. (1997): *Situación actual y perspectivas de los acuíferos de la provincia de Málaga*. Tierra y Tecnología, 16 y 17: págs. 29-37.
- LINARES GIRELA, L y TRENADO NAVARRO, L. (1988): *Acuíferos costeros de Marbella-Estepona (Málaga)*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental. Págs. 337-347
- MANCOMUNIDAD DE MUNICIPIOS DE LA COSTA DEL SOL OCCIDENTAL y ACOSOL, S.A. (2004): *Informe de gestión anual 2003-2004*. 175 págs

CAPÍTULO 2. ACUÍFEROS DE SIERRA BLANCA Y SIERRA DE MIJAS

- ANDREO, B. (1997): *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España)*. SPUMA-CHS, Málaga, 489 págs.
- ANDREO, B. y CARRASCO, F. (1999): *Application of the geochemistry and the radioactivity in the hydrogeological investigation of carbonate aquifers (Sierras Blanca and Mijas, southern Spain)*. Applied Geochemistry, 14: págs.283-299
- ANDREO, B.; CARRASCO, F.; CATALÁN, F.; DURÁN, J.J.; FERNÁNDEZ DEL RÍO, G.; LINARES, L., LÓPEZ ARECHAVALA, G.; LÓPEZ-GETA, J.A.; MAYORGA, R.; TRENADO, L. y VADILLO, I. (2002): *Características hidrogeológicas de las Sierras Blanca y Mijas y del Bajo Guadalhorce*. Libro Homenaje a Manuel del Valle, págs. 395-416.
- ANDREO, B.; CARRASCO, F.; DURÁN, J.J.; FERNÁNDEZ DEL RÍO, G.; LINARES, L.; LÓPEZ-GETA, J.A.; MAYORGA, R. y VADILLO, I. (2000): *Hydrogeological investigations for groundwater exploitation in the Sierras Blanca and Mijas (Málaga, southern Spain)*. Hydrogéologie, 3: págs .69-83.
- ANDREO, B.; CARRASCO, F. y SANZ DE GALDEANO, C. (1997): *Types of carbonate aquifers according to the fracturation and the karstification in a southern Spanish area*. Environmental Geology, 30(3/4): págs 163-173.
- ANDREO, B.; VÍAS, J.M.; PERLES, M.J.; CARRASCO, F.;VADILLO, I. y JIMÉNEZ, P. (2003): *Ensayo metodológico para la protección de aguas subterráneas en acuíferos carbonatados. Aplicación al sistema de Torremolinos*. Jornadas sobre Presente y Futuro del Agua Subterránea en España y la Directiva Marco Europea, Zaragoza.
- DEL VALLE, M.; LINARES, L. y TRENADO, L. (1983): *Piezometría y régimen de descarga del acuífero carbonatado de Sierra Blanca-Sierra de Mijas (Málaga)*. II Simposio de Hidrogeología, Madrid, 8: págs 465-474.
- LINARES, L. y TRENADO, L. (1981): *Características hidrogeológicas generales del macizo carbonatado de Sierra Blanca-Sierra de Mijas*. I Simposio sobre el Agua en Andalucía, Granada, 2: págs 699-705.
- VADILLO, I.; ANDREO, B. y CARRASCO, F. (2005): *Groundwater contamination by landfill leachates in a karstic aquifer*. Water, Air, and Soil Pollution 162: págs 143-169.

CAPÍTULO 3. ACUÍFERO DE FUENGIROLA

- DIPUTACIÓN DE MÁLAGA (1988): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Ed. Diputación de Málaga. 151 págs.
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.
- LINARES GIRELA, L. (1997): *Situación actual y perspectivas de los acuíferos de la provincia de Málaga*. Tierra y Tecnología, 16 y 17: págs 29-37.
- LÓPEZ GETA, J.A.; PARRA Y ALFARO, J.L. y RIVERA MARTÍNEZ, A. (1988): *Acuífero costero de Fuengirola (Málaga)*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental: págs 317-335.

CAPÍTULO 4. ACUÍFERO DEL BAJO GUADALHORCE

- ANDREO, B.; CARRASCO, F.; CATALÁN, F.; DURÁN, J.J.; FERNÁNDEZ, G.; LINARES, L.; LÓPEZ, G.; LÓPEZ, J.A.; MAYORGA, R.; TRENADO, L. y VADILLO, I. (2002): *Características hidrogeológicas de las Sierras Blanca y Mijas, y del Bajo Guadalhorce*. Libro homenaje a Manuel del Valle. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces. Págs 395-411.
- CARRASCO, F.; ANDREO, B. y VADILLO, I. (2003): *Consideraciones hidrogeológicas sobre el sector costero del acuífero del Bajo Guadalhorce*. Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos, Alicante, págs 67-76.
- DIPUTACIÓN DE MÁLAGA (1988): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Ed. Diputación de Málaga. 151 págs.
- LINARES GIRELA, L.; LÓPEZ ARECHAVALA G.; LÓPEZ GETA J.A. y RUBIO CAMPOS J.C. (1995): *Definición geométrica de acuíferos plio-cuaternarios del valle Bajo del Guadalhorce (Málaga)*. VI Simposio de Hidrogeología, Sevilla, 19, págs 435-447.
- LINARES GIRELA, L.; LÓPEZ GETA, J.A. y PARRA J.L. (1988): *Acuífero detrítico del Bajo Guadalhorce*. TIAC'88, Tecnología de la intrusión en acuíferos costeros, Almuñécar (Granada), págs 287-315.
- PERLES ROSELLÓ, M.J.; CABELLO MERCADO, C.; LÓPEZ CARMONA, J.A.; VALLEJO RODRÍGUEZ y VÍAS MARTÍNEZ, J.M. (1999): *El problema inundación/ocupación en el Bajo Guadalhorce. Efectos de la ocupación en un área inundable*. Revista de la Diputación Provincial de Málaga. Jábega 81.
- SANZ DE GALDEANO, C. y LÓPEZ GARRIDO, A.C. (1991): *Tectonic evolution of the Málaga Basin (Betic Cordillera). Regional implications*. Geodinamica Acta, 5 (3), 173-186.

CAPÍTULO 5. ACUÍFERO DE VÉLEZ - MÁLAGA

- CHSE (1987): *Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa*. Proyecto 12/87. Dirección General de Obras Hidráulicas (Inédito)
- CHSE (1997): *Seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad*. Comisaría de Aguas del Sur de España. Ministerio de Medio Ambiente (Inédito).
- GARCÍA ARÓSTEGUI, J.L. (1998): *Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)*. Tesis Doctoral (inédita). Universidad de Granada. 377 págs.
- IGME (1988): *Estudio de las posibilidades de lucha contra la intrusión marina mediante la utilización de barreras artificiales en el acuífero de Vélez*. IGME (inédito).

CAPÍTULO 6. ACUÍFERO DE LAS ALBERQUILLAS (NERJA)

- ANDREO, B. y CARRASCO, F. (1993a): *Estudio hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja*. In: Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3. Geología de la Cueva de Nerja (F. Carrasco Ed.), págs. 163-187.
- ANDREO, B. y CARRASCO, F. (1993b): *Estudio geoquímico de las aguas de infiltración de la Cueva de Nerja*. In: Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3. Geología de la Cueva de Nerja (F. Carrasco Ed.), págs. 299-328.
- ANDREO, B.; CARRASCO, F. y SANZ DE GALDEANO, C. (1993): *Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja*. En: Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3. Geología de la Cueva de Nerja (F. Carrasco, Ed.), págs. 25-50
- ANDREO, B.; LIÑÁN, C; CARRASCO, F. y VADILLO, I. (2002): *Funcionamiento hidrodinámico del epikarst de la Cueva de Nerja (Málaga)*. Geogaceta, 31. Págs.7-10
- CARRASCO, F. (1999): *Acantilados de Maro y Cerro Gordo*. En *Patrimonio Geológico de Andalucía*, J.J. Durán y R. Nucho (Eds). Enresa, págs. 279-281.
- CARRASCO, F.; ANDREO, B.; DURÁN, J.J.; VADILLO, I. y LIÑÁN, C. (1998a): *La Cueva de Nerja como elemento geológico del patrimonio natural andaluz*. In: IV Reunión Nacional de Patrimonio Geológico (J.J. Durán and M. Vallejo, eds), págs. 51-55.
- CARRASCO, F.; ANDREO, B.; DURÁN, J.J., LIÑÁN, C y VADILLO, I. (1998b): *Consideraciones sobre el karst de Nerja*, (J.J. Duran y J. López-Martínez, Eds). *Karst en Andalucía*, págs. 173-181.
- CARRASCO, F.; ANDREO, B.; LIÑÁN, C. y VADILLO, I. (1996): *Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja (provincia de Málaga)*. En *Recursos hídricos de regiones kársticas*, págs. 249-263.
- CASTILLO, A y CARMONA, J. (2000): *Reconocimiento hidrogeológico de la Sierra de la Almijara meridional (Málaga)*. Geotemas I (2), págs. 63-68.

- CHS-IGME, (2004): *Redefinición de la Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca Sur*.
- DIPUTACIÓN DE MÁLAGA (1988): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Ed. Diputación de Málaga. 151 págs.
- DURÁN, J.J. (1996): *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: Contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental*. Tesis doctoral. Univ. Complutense. 409 págs.
- DURÁN, J.J.; CUENCA RODRÍGUEZ, J. y LÓPEZ MARTÍNEZ J. (1996): *Un ejemplo de sistematización e inventario del Patrimonio Geológico. El Patrimonio kárstico de la provincia de Málaga (Cordillera Bética)*. *Geogaceta*, 19. págs. 224-227.
- ESPEJO, J.M.; FERNÁNDEZ, M.C. y LINARES, L. (1988): *Inventario de surgencias de aguas de origen continental en el litoral mediterráneo del Sur de España, mediante utilización de sensores térmicos aeroportados con apoyo de técnicas oceanográficas e hidrogeológicas*. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeras. Almuñécar, págs. 191-228.
- GUERRA, A. y SERRANO, F. (1993): *Análisis estratigráfico de los materiales neógeno-cuaternarios de la región de Nerja*. In: Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3. Geología de la Cueva de Nerja (F. Carrasco Ed.), págs. 55-90.
- IGME (1980): *Mapa geológico a escala 1:50.000*, Hojas nº 1054 (Vélez-Málaga) y nº 1055 (Motril).
- IGME (1983): *Sistema Acuífero nº 41, calizas y dolomías triásicas de la Sierra Almijara-Sierra de Lújar*: Informe técnico nº 10.
- LIÑAN, C.; ANDREO, B. y CARRASCO, F. (2000): *Caracterización hidrodinámica e hidroquímica del manantial de Maro (Sierra Almijara, provincia de Málaga)*. *Geogaceta*, 27. págs. 95-98.
- SANZ DE GALDEANO, C. (1986): *Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra Almijara (Zone Alpujarride, Cordillères Bétiques)*. *Estudios Geológicos*, 42. págs. 281-289.
- SGOP (1991): *Estudio hidrogeológico de las sierras Tejeda, Almijara y Guájares (Málaga y Granada)*. Servicio Geológico de Obras Públicas.

CAPÍTULO 7. ACUÍFERO DE ALMUÑÉCAR

- AVIDAD, J. y GARCÍA-DUEÑAS, V. (1981): *Hoja geológica 19-44 (Motril) y memoria explicativa del Mapa Nacional de España 1:50.000*. Publs. IGME. 36 págs.
- BENAVENTE, J. (1985): *Las aguas subterráneas en la Costa del Sol de Granada*. Coed. Univ. Granada-Diput. Prov. Granada. 336 págs.
- BENAVENTE, J.; HIDALGO, M.C.; EL MABROUKI, K. y CARRASCO, F. (2004): *Flood recharge in a small Mediterranean alluvial coastal aquifer and its influence on seasonal seawater intrusion (rio Verde, Granada, Spain)*. Poster presentado al 18th Sea Water Intrusion Meeting (Cartagena, España).

- CALVACHE, M.L. (1991): *Simulación matemática del contacto agua dulce- agua salada en algunos acuíferos de la Costa del Sol*. Tesis Doctoral. Univ. de Granada. 317 págs.
- CARRASCO, F.; VADILLO, I.; ANDREO, B.; BENAVENTE, J. y SANTOS-OLMO, A. (2000): *Estudio de la intrusión marina en el acuífero costero del río Verde de Almuñécar mediante registros de conductividad eléctrica del agua en piezómetros*. En: *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología* (M. Olmo y J.A. López-Geta, eds.). ITGE. Págs. 333-340. Madrid.
- DIPUTACIÓN DE GRANADA - ITGE (1990): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada*. Coed. Diputación – ITGE. 107 págs.
- FERNÁNDEZ-RUBIO, R.; BENAVENTE, J. y CHALONS, C. (1988): *Hidrogeología de los acuíferos del Sector Occidental de la Costa de Granada*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental. Págs. 239-265.
- GARCÍA-GARCÍA, J. L., OLLERO, E. y BENAVENTE, J. (1981): *Aplicación de un modelo matemático para comprobar las características hidráulicas de un acuífero aluvial (las Angosturas, Jete, Granada)*. Simposio Agua en Andalucía, v. II: págs. 675-688. Granada.
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.

CAPÍTULO 8. ACUÍFERO DE MOTRIL - SALOBREÑA

- BENAVENTE, J. (1985): *Las aguas subterráneas en la Costa del Sol de Granada*. Coed. Universidad de Granada - Diputación Provincial de Granada. 336 pp.
- BENAVENTE, J. y CALVACHE, A. (1981): *Los manantiales de Lobres (Granada) y su entorno hidrogeológico*. I Simp. Agua en Andalucía, v. II: 599-614. Granada.
- CALVACHE, A. (1981): *Estudio hidrogeoquímico del acuífero Motril-Salobreña (Granada)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada. 125 p.
- CALVACHE, M.L.; RUBIO, J.C.; LÓPEZ-CHICANO, M.; GONZÁLEZ-RAMÓN, A.; IBÁÑEZ, S.; MARTÍN-ROSALES, W.; SOLER, R.; DÍAZ-LOSADA, E. y PEINADO, T. (2003): *Estado actual del acuífero costero de Motril-Salobreña previo a la puesta en funcionamiento de la presa de Rules*. In: *Tecnología de la Intrusión del Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países mediterráneos*. TIAC'03. IGME. I: 77-85.
- CASTANY, G. (1975): *Prospección y explotación de las aguas subterráneas*. 738 págs.
- CASTILLO PÉREZ, E. (1975): *Hidrogeología de la Vega de Motril-Salobreña y sus bordes*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada. 175 p.
- CHSE (1999): *Presa de Rules en el río Guadalfeo, Vélez de Benaudalla (Granada)*.

- DIPUTACIÓN DE GRANADA - ITGE (1990): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada*. Coed. Diputación – ITGE. 107 págs.
- IBÁÑEZ, S. (2005): *Comparación de la aplicación de distintos modelos matemáticos sobre acuíferos costeros detríticos*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 304 págs.
- ITGE. (1991): *Investigación hidrogeológica para apoyo a la gestión hidrológica en la cuenca del río Guadalfeo (Granada)*. Serie: Manuales de utilización de acuíferos.
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.
- PULIDO-BOSCH, A. y RUBIO CAMPOS, J.C. (1988): *Los acuíferos costeros de Motril-Salobreña y Carchuna*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental. Págs.209-238.
- SOTO, J.M. (1998): *Aportaciones al conocimiento del acuífero detrítico de Motril-Salobreña (Granada)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.

CAPÍTULO 9. ACUÍFEROS DE CASTELL DE FERRO Y CARCHUNA

- BENAVENTE, J.; FERNÁNDEZ RUBIO, R. y ALMÉCIJA RUIZ, C. (1988): *Hidrogeología de los acuíferos del Sector Oriental de la Costa de Granada*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental.
- CALVACHE, M.L. (1991): *Simulación matemática del contacto agua dulce-agua salada en algunos acuíferos de la Costa del Sol*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 317 págs.
- CALVACHE, M.L. y PULIDO BOSCH, A. (1994): *Modeling de effects of salt-water intrusion dynamics for a coastal karstified block connected to a detrital aquifer*. *Ground Water*, 32(5): 767-777.
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.
- PULIDO BOSCH, A.;PULIDO LABOEUF, P.; VALLEJOS, A.; CALVACHE, M.L.; GISBERT, J.; ANDREU, J.M.; SÁNCHEZ MARTOS, F. y MOLINA, L. (1999): *Sondeos de investigación en un acuífero kárstico costero (Castell de Ferro, Granada)*. *Geogaceta*, 25.
- PULIDO LABOEUF, P. (2000): *Contribución al conocimiento de acuíferos costeros complejos. Caso de Castell de Ferro*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada. 151 págs.
- RUBIO CAMPOS, J.C. y GONZALEZ RAMÓN, A. (2004): *Calahonda (Granada, Spain), in The main coastal karstic aquifers of southern Europe*. Ed. J.M. Calaforra. *Cost Action 621*. Pág.18.

CAPÍTULO 10. ACUÍFEROS DE ALBUÑOL

- BENAVENTE, J.; FERNÁNDEZ RUBIO, R. y ALMÉCIJA RUIZ, C. (1988): *Hidrogeología de los acuíferos del sector oriental de la Costa de Granada*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental.
- DIPUTACIÓN DE GRANADA - ITGE (1990): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada*. Coed. Diputación – ITGE. 107 págs.
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.
- ROMERO CORDÓN, E.; DURÁN VALSERO, J.J.; FERNÁNDEZ, J. y RUIZ LÓPEZ, J.L.(1989): *Reconstrucción e interpretación sedimentaria de la avenida de Octubre de 1973 en la Rambla de Albuñol (Granada)*. XII congreso español de sedimentología, 1989.

CAPÍTULO 11. ACUÍFERO DE ADRA

- ALDAYA, F. (1983): *Mapa Geológico de España y memoria explicativa de la Hoja 1057, (21-44) Adra*. Escala 1:50.000. IGME.
- BENAVENTE, J. y CASTILLO MARTÍN, A. (1989): *Estudio hidrogeoquímico de la cuenca del río Adra*. Estudios Geológicos, 45: 81-90.
- PULIDO-BOSCH, A. (1988): *Síntesis hidrogeológica del delta del río Adra (Almería)*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental. Págs.145-169.

CAPÍTULO 12. ACUÍFEROS DEL CAMPO DE DALÍAS

- COROMINAS, J. (1997): *Mejora de regadíos: actualización y futuro en el poniente almeriense; en actualización de temas sobre horticultura almeriense*, de Cuadrado y Fernández. Eds. FIAPA y Junta de Andalucía. Almería.
- IGME (1982): *Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería)*. 13 tomos. (Difusión restringida).
- IGME-IRYDA (1977): *Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Sur, Almería*. Memoria resumen. IGME Colección Informe, Madrid.
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.
- MOLINA, L. (1997): *Hidrogeoquímica e intrusión marina en el Campo de Dalías*. Tesis Doctoral Univ. Granada. 340 págs.
- MOLINA, L.; VALLEJOS, A.; PULIDO BOSCH, A.; DANIELE, L.; LÓPEZ-VERA, F. y GÓMEZ ARTOLA, C. (2005): *Caracterización hidroquímica del manantial Baños de Guardias Viejas y su relación con las unidades*

- acuíferas del Campo de Dalías (Almería)*. Foro Ibérico sobre Aguas Envasadas y Balnearios. Madrid (en prensa).
- NAVARRETE, F. (1992): *Contribución al conocimiento hidrogeoquímico del Campo de Dalías*. Tesis Doctoral Univ. Granada. 435 p.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1989): *Caracterización hidrogeoquímica del Campo de Dalías (Almería)*. Serv. Estudios IARA. 265 p. Granada.
- RODRÍGUEZ CARREÑO, M. (1859): *Topografía médica y estadística de la Villa de Dalías*. Almería. 73 págs.
- SÁNCHEZ MARTOS, F., MOLINA, L. y VALLEJOS, A. (2000): *Evolución hidrogeoquímica en las salinas de Cerrillos (Almería) y la relación entre aguas subterráneas y salmueras*. Geogaceta, 29: págs.119-122.
- THAUVIN, J.P. (1986) : *Etude hydrogéologique, modélisation et gestion des aquifères du Campo de Dalías (Province d'Almería, Espagne)*. Tesis Univ. Nice. 3 t., 525 págs.
- VALLEJOS, A. (2001): *Hidrogeoquímica de la recarga de los acuíferos del Campo de Dalías a partir de la Sierra de Gádor*. Ed. Servicio Publicaciones Universidad de Almería. 242 págs.

CAPÍTULO 13. ACUÍFEROS DE ANDARAX

- ALONSO, C. (1993): *Reutilización de aguas residuales urbanas, aplicación al riego. Ozonización*. Riegos y Drenajes XXI; (70).
- CARRASCO CANTOS, A. y MARTÍN ZÚÑIGA, G. (1988): *Hidrogeología de los acuíferos del Valle del Andarax (Almería)*. Simposio Internacional, TIAC' 88.Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental. II: págs.37-67
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998): *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.
- PULIDO BOSCH, A.; SÁNCHEZ MARTOS, F.; MARTÍNEZ VIDAL, J.L. y NAVARRETE F. (1992): *Groundwaters problems in a semiarid area (Low Andarax River, Almería, Spain)*. Environmental Geology and Water Sciences, 20/3: págs.195-204.
- PULIDO BOSCH A.; VALLEJOS IZQUIERDO, A. y PULIDO LEBOEUF, P. (eds.) (2002): *Los Acuíferos Costeros y las Desaladoras*. Club del Agua Subterránea. Almería, 339 págs.
- SÁNCHEZ MARTOS, F. (2001): *Las aguas subterráneas en el Bajo Andarax (Almería)*. Monografías Ciencia y Tecnología, nº 12, 278 págs. Universidad de Almería – IEA. Almería.
- SÁNCHEZ MARTOS, F; AGUILERA AGUILERA, P. y MARTÍNEZ VIDAL, J.L. (1993): *Consideraciones previas sobre la evolución de algunos parámetros físico-químicos en las aguas del río Andarax*. Bol. I.E.A. Ciencias nº 11/12: Págs. 7-25.

- SÁNCHEZ MARTOS, F.; PULIDO-BOSCH, A.; MOLINA, L.; VALLEJOS, A.; MARTÍN ROSALES, W. y NAVARRETE, F. (1996): *Recorrido hidrogeológico Bajo Andarax - Sierra de Gádor – Campo de Dalías*. IV SIAGA, Almería. II: págs. 475-489.
- SÁNCHEZ MARTOS, F.; PULIDO BOSCH, A. y NAVARRETE LÓPEZ-CÓZAR, F. (1996): *Identificación de procesos hidrogeoquímicos en los acuíferos del Bajo Andarax (Almería)*. IV SIAGA. Actas Vol. II: págs.179-190. Almería.
- SÁNCHEZ MARTOS, F.; PULIDO BOSCH, A.; VALLEJOS, A.; GISBERT, J. y PULIDO LEBOEUF, P. (2003): *Identificación de la interfase agua dulce – agua de mar en el delta del río Andarax (Almería)*. Tecnología de la Intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos. TIAC'03. Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 8. Tomo I.: págs. 95-102.

CAPÍTULO 14. ACUÍFEROS DEL CAMPO DE NÍJAR Y AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CABO DE GATA

- CARRASCO CANTOS, A. (1988): *Hidrogeología del Campo de Níjar y acuíferos «marginales» (Almería)*. Simposio Internacional TIAC'88. Vol. II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental.
- FRANQUEZA MONTES, P.A.; MOLINA MOLINA, A. y GONZÁLEZ ASENSIO, A. (1996): *Situación de los acuíferos de la comarca de Níjar-Carboneras (Almería)*. IV SIAGA Almería. Vol I: págs. 415-424.
- ITGE (1989). *Actualización de datos hidrogeológicos del Sistema acuífero Níjar-Carboneras (Almería)*. Servicio de Documentación del ITGE. 76 págs. Inédito.
- ITGE - JUNTA DE ANDALUCIA (1998). *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. 216 págs.

RELACIÓN DE FIGURAS

- Fig. 1 Croquis del itinerario general
- Fig. 2 Precipitaciones medias anuales de Andalucía para el periodo 1951–1992
- Fig. 3 Esquema de la disposición general de las grandes unidades estructurales de la Cordillera Bética
- Fig. 4 Esquema geológico del litoral de Andalucía
- Fig. 5 Corte tectónico esquemático de la Cordillera Bética subparalelo a la costa, desde Casares a Cabo de Gata
- Fig. 6 Serie estratigráfica sintetizada del Complejo Nevado – filábride
- Fig. 7 Serie estratigráfica sintetizada del Complejo Alpujárride
- Fig. 8 Serie estratigráfica sintetizada del Complejo Maláguide
- Fig. 9 Esquema de los principales acuíferos incluidos en el itinerario
- Fig. 10 Estado actual de la intrusión marina en los acuíferos estudiados en el itinerario
- Fig. 11 Mapa de situación del itinerario propuesto para los acuíferos de Marbella - Estepona
- Fig. 12 Esquema hidrogeológico de los acuíferos de Marbella – Estepona
- Fig. 13 Evolución interanual de la explotación y de la conductividad en el aluvial del río Verde, junto al régimen de lluvias
- Fig. 14 Proceso de desalación seguido en la planta de Marbella
- Fig. 15 Toma de agua en el arroyo de Camoján para recarga artificial del acuífero del Señorío (Marbella); manantial de Camoján en crecida y corte hidrogeológico esquemático del sector acuífero del Señorío (Marbella) y de la recarga artificial
- Fig. 16 Embalse de La Concepción y estado actual de la infraestructura de abastecimiento de la Costa del Sol Occidental
- Fig. 17 Mapa de situación del itinerario previsto para Sierra Blanca y Sierra de Mijas.

- Fig. 18 Mapa hidrogeológico de Sierra Blanca y Sierra de Mijas
- Fig. 19 Cortes hidrogeológicos de Sierra Blanca y Sierra de Mijas
- Fig. 20 Mapa y corte hidrogeológico de las peridotitas del Puerto de los Pescadores
- Fig. 21 Detalle y vista del entorno de los manantiales de Torremolinos y corte hidrogeológico en la parte oriental de la Sierra de Mijas
- Fig. 22 Mapa de situación del itinerario previsto en el acuífero de Fuengirola
- Fig. 23 Foto del aluvial del río Fuengirola donde se concentran los principales bombeos y esquema hidrogeológico del acuífero
- Fig. 24 Corte hidrogeológico y foto panorámica del mismo, en el área del Higuera y manantiales en peridotitas
- Fig. 25 Mapa de situación del itinerario previsto en el acuífero del Bajo Guadalhorce
- Fig. 26 Esquema hidrogeológico del acuífero del Bajo Guadalhorce
- Fig. 27 Mapas de isopiezas del sector costero del Bajo Guadalhorce en aguas altas (mayo 1996) y bajas (julio 1996)
- Fig. 28 Mapa de situación del itinerario previsto en el acuífero de Vélez- Málaga
- Fig. 29 Cuenca hidrográfica del río Vélez: principales elementos de observación hidrológica y regulación
- Fig. 30 Piezometría del acuífero de Vélez en julio de 1995 (sequía) y enero de 1997 (periodo húmedo) y corte hidrogeológico del delta, coincidente con el cauce del río: identificación de los acuíferos superior e inferior y ranurado de los piezómetros en cada nivel
- Fig. 31 Distribución espacial de los principales elementos hidroquímicos del acuífero de Vélez. Piezometría (en m) y salinidades. Situación correspondiente a julio de 1994
- Fig. 32 Mapa de situación del itinerario previsto en el acuífero de las Alberquillas (Nerja)
- Fig. 33 Esquema hidrogeológico del borde meridional de Sierra Almijara y cortes hidrogeológicos
- Fig. 34 Mapa y detalle de espeleotemas y concrecciones de la Cueva de Nerja
- Fig. 35 Mapa de situación del itinerario propuesto para el acuífero de Almuñécar
- Fig. 36 Esquema hidrogeológico del acuífero aluvial de los ríos Verde y Seco de Almuñécar e hidrograma de la galería de las Angosturas (1984-1998) y niveles en un piezómetro del río Verde (1984-2004)
- Fig. 37 Localización de los principales puntos de abastecimiento a la localidad de Almuñécar
- Fig. 38 Mapas de isopiezas del aluvial de Almuñécar

- Fig. 39 Panorámica del aluvial del río Verde desde la parada 1 e isovalores de conductividad eléctrica del agua en agosto de 1995 y febrero de 1996
- Fig. 40 Mapa de situación del itinerario previsto en el acuífero de Motril-Salobreña
- Fig. 41 Esquema hidrogeológico del acuífero de la Sierra de Lújar y sectores de su entorno
- Fig. 42 Esquema hidrogeológico del acuífero aluvial de Motril-Salobreña
- Fig. 43 Tipología de manantiales del aluvial del río Guadalfeo y de la Sierra de Lújar
- Fig. 44 Esquema-tipo de un pozo con drenaje radial, tipo «Ranney»
- Fig. 45 Esquema de situación y de los principales cauces que desembocan en el embalse de Rules
- Fig. 46 Mapa de situación del itinerario propuesto en el acuífero de Castell de Ferro
- Fig. 47 Plano de isopiezas del acuífero de Castell de Ferro para abril 1988 y evolución de la conductividad eléctrica en tres puntos del mismo
- Fig. 48 Esquema del funcionamiento del proceso intrusión-lavado en el acuífero de Castell de Ferro
- Fig. 49 Mapa de situación del itinerario previsto para el acuífero de Albuñol
- Fig. 50 Esquema hidrogeológico de los acuíferos de Albuñol
- Fig. 51 Tipología de los manantiales de origen termal de la rambla de Albuñol. Manantial del Río
- Fig. 52 Mapa de situación del itinerario previsto en el acuífero de Adra
- Fig. 53 Esquema y cortes hidrogeológicos del delta del río Adra
- Fig. 54 Esquema de las principales modificaciones fluviales y litorales recientes ocurridas en el delta del río Adra
- Fig. 55 Entorno del manantial de las Fuentes de Marbella; corte hidrogeológico esquemático de los manantiales de las Fuentes de Marbella e hidrograma
- Fig. 56 Mapa de situación del itinerario previsto en el acuífero del Campo de Dalías
- Fig. 57 Situación y esquema geológico del Campo de Dalías
- Fig. 58 Situación y límites de las unidades hidrogeológicas del Campo de Dalías
- Fig. 59 Corte hidrogeológico del acuífero del Campo de Dalías
- Fig. 60 Corte geológico a lo largo del Sector III
- Fig. 61 Esquema de las salinas de Cerrillos
- Fig. 62 Mapa de situación del itinerario previsto para el acuífero del Bajo Andarax

- Fig. 63 Esquema geológico del Bajo Andarax
- Fig. 64 Croquis de situación de la red de reutilización de aguas residuales de la ciudad de Almería
- Fig. 65 Desaladora de agua de mar de Almería y situación de los sondeos de captación (S-1 – S-19) y de los tres grupos de piezómetros (P-I, P-II y P-III) de control y seguimiento del contacto agua dulce-agua salada
- Fig. 66 Esquema de diseño y características generales de los enjambres de piezómetros *llllllllllllllllllllll*
- Fig. 67 Mapa de situación de las paradas a realizar en el recorrido al acuífero del Campo de Níjar y al Cabo de Gata
- Fig. 68 Esquema hidrogeológico de la comarca de Níjar-Carboneras y corte hidrogeológico

ÍNDICE

PRÓLOGO	7
INTRODUCCIÓN	9
<i>Organización y cuestiones previas</i>	11
<i>Marco físico</i>	12
<i>Síntesis geológica</i>	14
<i>Síntesis hidrogeológica</i>	20
ITINERARIOS POR LOS ACUÍFEROS DEL LITORAL MEDITERRÁNEO ANDALUZ	27
CAPÍTULO 1. ACUÍFEROS DE MARBELLA-ESTEPONA	29
<i>Parada 1. Sondeo de abastecimiento a Estepona</i>	33
<i>Parada 2. Desembocadura del río Verde</i>	33
<i>Parada 3. Planta desaladora de la Costa del Sol Occidental</i>	36
<i>Parada 4. Recarga artificial en el acuífero de Marbella</i>	38
<i>Parada 5. Embalse de La Concepción</i>	41
CAPÍTULO 2. ACUÍFEROS DE SIERRA BLANCA Y SIERRA DE MIJAS	43
<i>Parada 1. Paraje de Nagüeles</i>	50
<i>Parada 2. Manantial de Coín</i>	50
<i>Parada 3. Puerto de los Pescadores</i>	51
<i>Parada 4. Sondeos de Benalmádena</i>	52
<i>Parada 5. Manantiales de Torremolinos</i>	54

CAPÍTULO 3. ACUÍFERO DE FUENGIROLA	57
<i>Parada 1. Panorámica del acuífero desde la desembocadura del río Fuengirola y sondeos profundos en el casco urbano</i>	62
<i>Parada 2. Panorámica desde las inmediaciones de los manantiales del Higuerón</i>	65
CAPÍTULO 4. ACUÍFERO DEL BAJO GUADALHORCE	67
<i>Parada 1. Panorámica del acuífero del Bajo Guadalhorce</i>	73
<i>Parada 2. Desembocadura del río Guadalhorce</i>	73
CAPÍTULO 5. ACUÍFERO DE VÉLEZ-MÁLAGA	77
<i>Parada 1. Embalse de La Viñuela</i>	84
<i>Parada 2. Delta del río Vélez.....</i>	85
CAPÍTULO 6. ACUÍFERO DE LAS ALBERQUILLAS (NERJA)	87
<i>Parada 1. Cueva de Nerja.....</i>	94
<i>Parada 2. El Manantial de Maro.....</i>	98
<i>Parada 3. Cerro Gordo</i>	101
CAPÍTULO 7. ACUÍFERO DE ALMUÑÉCAR	103
<i>Parada 1. Panorámica del aluvial del río Verde.....</i>	107
<i>Parada 2. Galería de las Angosturas</i>	111
CAPÍTULO 8. ACUÍFERO DE MOTRIL-SALOBREÑA	115
<i>Parada 1. Panorámica de la Vega y manantiales del Gambullón y de La Raja</i>	121
<i>Parada 2. Pozo tipo "Ranney" y panorámica del área</i>	124
<i>Parada 3. Manantiales de Vélez de Benaudalla y afloramiento de travertinos</i>	124
<i>Parada 4. Embalse de Rules.....</i>	126
<i>Parada 5. Desembocadura del río Guadalfeo</i>	128
CAPÍTULO 9. ACUÍFEROS DE CASTELL DE FERRO Y CARCHUNA	129
<i>Parada 1. Acantilados kársticos</i>	133
<i>Parada 2. Panorámica del acuífero de Castell de Ferro</i>	135

CAPÍTULO 10. ACUÍFEROS DE ALBUÑOL	135
<i>Parada 1. Panorámica de la rambla y delta de Albuñol</i>	141
<i>Parada 2. Afloramiento carbonatado de Albuñol y manantiales termales</i>	145
CAPÍTULO 11. ACUÍFERO DE ADRA	147
<i>Parada 1. Panorámica del acuífero y de las Albuferas de Adra</i>	152
<i>Parada 2. Fuentes de Marbella</i>	154
CAPÍTULO 12. ACUÍFEROS DEL CAMPO DE DALÍAS	157
<i>Parada 1. Paraje de Campo de Dalías desde la Sierra de Gádor</i>	171
<i>Parada 2. Recorrido por el sector entre La Mojonera y las Norias</i>	172
<i>Parada 3. La Cañada de las Norias</i>	173
<i>Parada 4. Humedales de las Salinas de Cerrillos</i>	175
<i>Parada 5. Baños de Guardias Viejas</i>	178
CAPÍTULO 13. ACUÍFEROS DE ANDARAX	181
<i>Parada 1. Visión general del acuífero detrítico en la fábrica de Briseis</i>	187
<i>Parada 2. Mirador de los Millares</i>	187
<i>Parada 3. Baños de Sierra Alhamilla</i>	188
<i>Parada 4. Reutilización de aguas residuales de la ciudad de Almería</i>	189
<i>Parada 5. Desaladora de agua de mar de la ciudad de Almería</i>	191
CAPÍTULO 14. ACUÍFERO DEL CAMPO DE NÍJAR Y AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA SIERRA DE GATA	193
<i>Parada 1. Pozo antiguo, en la desembocadura de la rambla de las Amoladeras</i>	199
<i>Parada 2. Aljibe tradicional en la Sierra de Gata (La Boca de los Frailes)</i>	199
<i>Parada 3. Pozo artesanal y noria del siglo XVIII en la barriada del Pozo de los Frailes (Sierra de Gata)</i>	201
<i>Parada 4. Panorámica de Rambla Morales y necrópolis Neolítica en las cercanías de El Barranquete (acuífero Hornillo-Cabo de Gata)</i>	201

<i>Parada 5. Panorámica del acuífero del Campo de Níjar desde La Serrata</i>	<i>203</i>
<i>Parada 6. Manantial de La Cala de San Pedro</i>	<i>205</i>
<i>Parada 7. Manantial de Huebro</i>	<i>205</i>
AGRADECIMIENTOS	207
ANEXO	209
BIBLIOGRAFÍA	213
RELACIÓN DE FIGURAS	223
ÍNDICE	227