©IGME. Madrid 2003. ISBN. 84-7840-470-8

CONSIDERACIONES HIDROGEOLÓGICAS SOBRE EL SECTOR COSTERO DEL ACUÍFERO DEL BAJO GUADALHORCE

Francisco Carrasco Cantos
Dr en Ciencias Geológicas. Profesor Titular, Dpto de Geología, Univ. de Málaga
fcarrasco@uma.es
Bartolomé Andreo Navarro
Dr en Ciencias Geológicas. Profesor Titular, Dpto de Geología, Univ. de Málaga
andreo@uma.es
Iñaki Vadillo Pérez
Ldo en Ciencias Geológicas. Profesor Asociado, Dpto de Geología, Univ. de Málaga
vadillo@uma.es

RESUMEN

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos en las investigaciones hidrogeológicas realizadas en el acuífero del Bajo Guadalhorce en la provincia de Málaga en el que existen numerosas captaciones de agua para abastecimiento urbano, industrial y agrícola. Con el tiempo el uso del suelo ha ido evolucionando en detrimento de la agricultura y un mayor desarrollo de las actividades urbanas e industriales lo que ha dado lugar a la correspondiente variación de los volúmenes y usos del agua. Las lineas isopiezas muestran la descarga del acuífero al río y al mar y la existencia de cotas negativas en los lugares de bombeo más intensivo. Los registros de conductividad eléctrica realizados ponen de manifiesto la existencia de intrusión marina a lo largo de un eje paralelo al río, así como los cambios hidroquímicos ocurridos con motivo de una importante recarga en el acuífero.

Palabras clave: acuífero detrítico; costero; hidrodinámica; hidroquímica; registros de salinidad: provincia de Málaga.

ABSTRACT

A hydrogeological research of the coastal aquifer of "Bajo Guadalhorce" in the Province of Malaga, an aquifer with a great number of urban, industrial and agriculture water supplies points, has been carried out. The land use of the area has suffered an evolution from the agriculture use to a development of urban and industrial activities, what has caused a variation in the use of water and in the pumped volume. The water table shows an aquifer discharge to the river and to the sea, and the presence of negative elevations in the hydraulic head, coinciding with places in which the aquifer is most intensive pumped. A sea-intrusion process along a parallel axis to the river has been verified by electrical conductivity logs, as well as hydrochemical changes coinciding with an important recharge period.

Key words: detritic aquifer; coastal; hydrodinamic; hydrochemistry; salinity logs; Malaga province.

INTRODUCCIÓN

El acuífero del Bajo Guadalhorce se encuentra al Oeste de la ciudad de Málaga, en un área, la Costa del Sol, de gran demanda de agua. Durante los años 1995 y 1996 el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA) realizó un detallado reconocimiento hidrogeológico del sector costero del acuífero, entre el paraje denominado Puente del Rey hasta el Mar Mediterráneo. El estudio se realizó por encargo de la Empresa Municipal de Aguas de Málaga (EMASA), se efectuó con el fin de emplazar la captación de agua subterránea para una planta desaladora con objeto de satisfacer la demanda urbana en periodos de extrema sequía como el que tuvo lugar en esta región durante los años 1994 y 1995 (GHUMA-EMASA, 1998).

El presente trabajo pretende dar a conocer los resultados obtenidos en la investigación hidrogeológica efectuada, en particular la distribución de la salinidad de las aguas subterráneas del sector costero del acuífero así como las respuesta hidrodinámica e hidroquímica del acuífero a un importante episodio de recarga que tuvo lugar desde finales de 1995 a mediados de 1996 y que acabó con la prolongada sequía.

La zona de estudio (figura1) se encuentra situada en la cuenca sedimentaria de Málaga, depresión postorogénica terciaria costera de la Cordillera Bética. Los únicos materiales del substrato de la cuenca aparecen en las estribaciones orientales de Sierra Mijas, donde afloran mármoles alpujárrides de edad Triásica. El relleno de la cuenca está formado por una sucesión de sedimentos neógeno-cuaternarios (Sanz de Galdeano y López Garrido, 1991), de los que se han considerado los materiales más altos de la secuencia, depositados a partir del Plioceno inferior.

El Plioceno inferior está constituido por margas con algunas intercalaciones arenosas principalmente hacia su techo. El espesor total es superior a 500 m y las

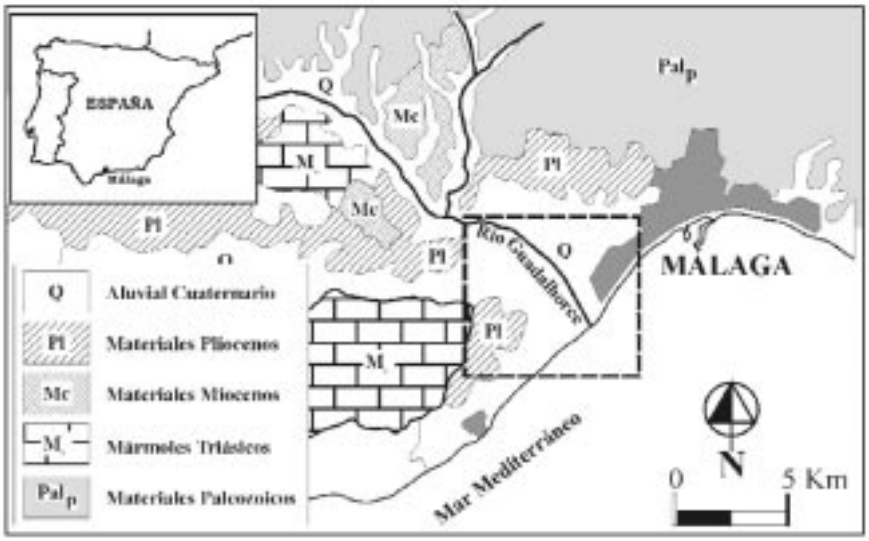

Figura 1. Mapa geológico del sector costero del Bajo Guadalhorce.

intercalaciones arenosas tienen una potencia, generalmente, inferior a 20 m, aunque puede ser de hasta 40 m.

En el borde oriental de la Sierra de Mijas, hay un afloramiento de brechas y conglomerados cuaternarios, constituidos por cantos de los mármoles que afloran en dicha Sierra. Estos materiales se han depositado en abanicos aluviales que fosilizan el contacto entre los mármoles y las margas pliocenas. También existen varios afloramientos de travertinos, discordantes sobre las margas del Plioceno, relacionados con la descarga de los manantiales del borde de la Sierra de Mijas.

En la parte central de la cuenca aflora una formación aluvial, constituida por cantos rodados, arenas, gravas y limos, depositada por el río Guadalhorce. En la actualidad, la extensión cartográfica de los materiales aluviales es mayor en la margen derecha que en la margen izquierda del río. En el sector costero entre Málaga y Torremolinos, afloran de forma muy discontinua, por lo urbanizado y antropizado de la zona, depósitos de playa constituidos por arenas, generalmente de grano medio a fino.

SINTESIS HIDROGEOLÓGICA

En el sector costero del Bajo Guadalhorce existen dos conjuntos de interés hidrogeológico: los tramos detríticos de la potente serie margoso-arcillosa del Plioceno y el aluvial cuaternario (IGME,1983; Linares *et al.*, 1988; ITGE,1996; Andreo *et al.*, 2002).

Los sedimentos pliocenos, mayoritariamente margosos, constituyen dos grandes afloramientos: al Norte y Este de Sierra Mijas, así como al Sur y Oeste de la ciudad de Málaga. Los niveles de interés acuífero para este estudio se encuentran en la parte superior de la formación margosa, se trata de intercalaciones arenosas que presentan una cierta continuidad según el eje del valle (una anchura del orden de 2 km, hasta la confluencia de los ríos Campanillas y Guadalhorce, y un espesor generalmente inferior a 20 m). En algunos puntos estos niveles pueden estar hidrogeológicamente conectadas con el acuífero cuaternario aluvial, especialmente en aquellos sectores en los que hay captaciones que atraviesan ambos acuíferos. No obstante, el acuífero plioceno debe considerarse como confinado (Linares *et al.,* 1995) o, al menos semiconfinado.

El acuífero aluvial está formado por los sedimentos depositados por el río Guadalhorce que se encuentran hidrogeológicamente conectados con los travertinos y abanicos aluviales existentes en el borde oriental de la Sierra de Mijas y con las arenas de playa del sector costero. La piezometría del acuífero aluvial muestra un flujo subterráneo hacia el mar y en general, la dinámica natural del acuífero es descargar agua hacia el río en los 5 km más próximos a su desembocadura. No obstante, durante los estiajes se han detectado depresiones piezométricas importantes en las proximidades de los puntos de bombeo, las cuales se recuperan con facilidad en épocas de recarga. En las áreas próximas al casco urbano de Málaga y al campo de golf, situadas hacia la desembocadura del Guadalhorce en su margen izquierda y derecha, respectivamente, la superficie pie-

zométrica también ha presentado cotas negativas, y en este caso abiertas al mar, lo que ha dado lugar a procesos de intrusión marina, más acentuados en la margen izquierda del río (IGME,1983; DPM, 1988).

A partir de datos de geofísica y de columnas litológicas de sondeos (IGME, 1983), así como de los sondeos efectuados con posterioridad, se han realizado diferentes cortes hidrogeológicos en el sector costero del acuífero del Bajo Guadalhorce que ponen de manifiesto la existencia de un acuífero aluvial cuaternario situado sobre un substrato de margas del Plioceno en las que se intercalan lentejones de arenas y gravas. Cabe destacar la existencia de un paleocauce del río Guadalhorce que presenta un mayor desarrollo hacia el suroeste del acuífero. La potencia máxima del acuífero aluvial es del orden de 50 m en dicho paleocauce y disminuye hasta un mínimo de 20 m en la margen izquierda del actual cauce del río, como también pusieron de manifiesto Linares *et al.*, (1995).

INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

En el sector costero del acuífero del Bajo Guadalhorce se han inventariado 152 puntos de agua, de los cuales 10 son piezómetros, 83 sondeos de explotación y 59 pozos de gran diámetro (figura 2). La mayoría de los puntos de agua se encuentran en la margen dere-

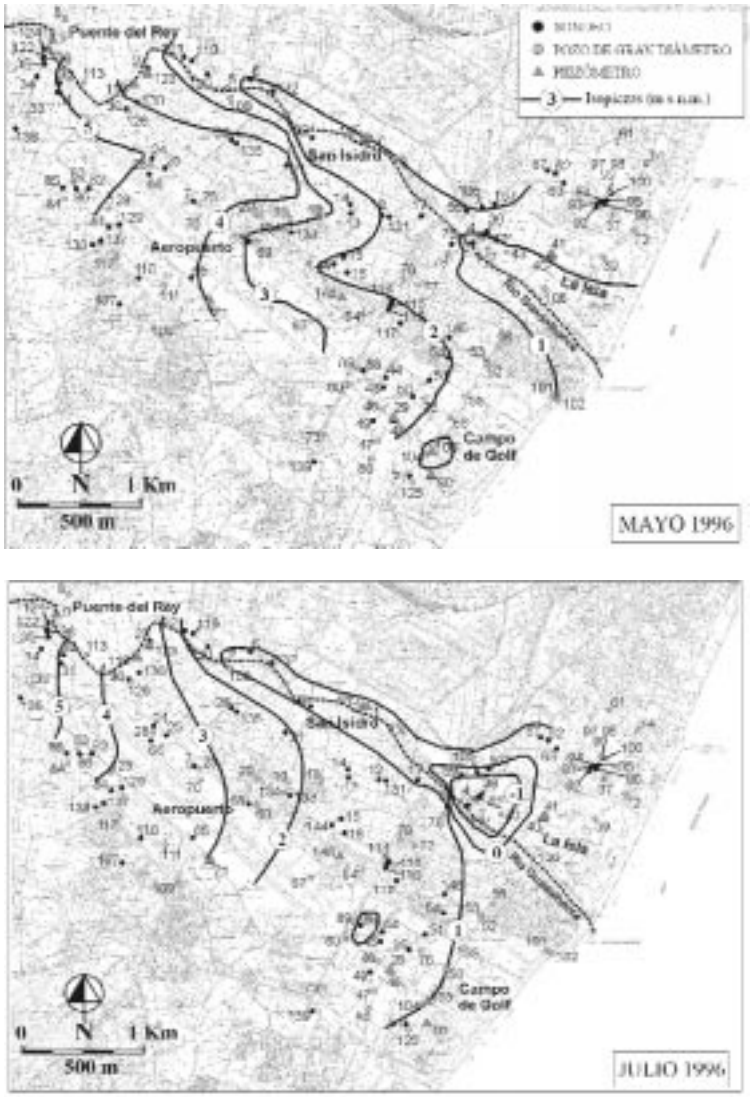

Figura 2. Mapa 1 y 2 de isopiezas del sector costero del Bajo Guadalhorce

cha del río, entre su cauce y el Aeropuerto, emplazados en el acuífero aluvial.

Los piezómetros o sondeos de investigación fueron perforados por Organismos Públicos (IGME, CHS), para conocer la geometría de los acuíferos y controlar las variaciones del nivel piezométrico y de la salinidad de las aguas. La profundidad de estos sondeos es, generalmente, inferior a los 100 m.

Los sondeos perforados para la explotación de las aguas subterráneas tienen también profundidades inferiores a 100 m, habitualmente menos de 50 m. Suelen captar el acuífero aluvial o, a lo sumo, algunas de las intercalaciones arenosas que hay en la parte alta de la sucesión de margas del Plioceno. Los datos disponibles indican que de ellos se pueden extraer caudales del orden de 40 l/s. Los sondeos son el tipo de captación más abundante en el área de estudio y suelen utilizarse para regadío de explotaciones agrícolas, para abastecimiento urbano o para uso industrial.

Los pozos de gran diámetro (menos de 3 metros) y escasa profundidad (menos de 20 m en todos los casos y, habitualmente menos de 10 m) se utilizan para abastecimiento de pequeñas fincas privadas, granjas, chalets y urbanizaciones. Suelen captar la parte más superficial del acuífero aluvial. Dentro del inventario no se incluyeron los pozos particulares de varios núcleos urbanos como Guadalmar y San Julián. Existen varios pozos de tipo Ranney en el sector de San Isidro (nºs 6 y 19) y cerca del Polígono Guadalhorce (nº 132), pertenecientes al Ayuntamiento de Málaga, sin uso cuando se efectuó el inventario, y otros propiedad de Interhorce (nº 113) y del Aeropuerto (nº 69).

VOLÚMENES DE AGUA EXTRAÍDOS Y USOS DEL AGUA

La determinación de los volúmenes de agua bombeados se realizó mediante encuestas a los propios usuarios y se hicieron estimaciones a partir del consumo de energía eléctrica y de las superficies de cultivo. Estos datos corresponden al periodo en el que se realizaron estas investigaciones (1995-1996), se tiene constancia de que con posterioridad han cesado los bombeos realizados por EMASA para abastecimiento a Málaga, debido a problemas de calidad del agua.

El volumen total de agua bombeada en el área de estudio ascendía a 6,4 hm^3/a. El agua procedía, fundamentalmente, del acuífero aluvial del Guadalhorce y una parte pequeña debía corresponder a las intercalaciones arenosas de la parte alta de la serie pliocena. Hay puntos en los que fue imposible conocer el volumen bombeado, por la cifra indicada debe considerarse como un valor mínimo.

De las 142 captaciones destinadas a la explotación de agua (pozos y sondeos), se utilizaban menos de 100. De éstas, la mitad se usaban para abastecimiento agrícola (50) y el resto para uso industrial y para abastecimiento urbano (20 y 12 respectivamente). A varias captaciones (11) se les asignó un uso desconocido.

El volumen de agua bombeado se utilizaba, principalmente, para abastecimiento urbano (4,2 hm^3/a), riego (1,2 hm^3/a) y abastecimiento industrial (1 hm^3/a). Las captaciones destinadas al abastecimiento urbano eran pocas pero en ellas se producía una explotación importante. Así en los sondeos de Puente del Rey (nºs 34, 35 y 36) se extraían 4 hm^3/a por parte de EMASA para el abastecimiento de la ciudad de Málaga.

El número de pozos y sondeos usados para regadío era bastante más elevado y, proporcionalmente, extraían menos agua, porque en la mayoría de los casos se trataba de fincas relativamente pequeñas. En la finca de la Isla (nºs 38 y 42) se extraían 250.000 m^3/a, para riego de cultivos, sobre todo, caña de azúcar.

Teniendo en cuenta la distribución zonal de las explotaciones cabe señalar que en la margen izquierda del río Guadalhorce no quedaban usuarios que explotaran volúmenes de agua importantes; únicamente existían algunos pozos de aprovechamiento muy limitado. En la margen derecha, desde la carretera N-340 hacia aguas arriba, se encontraban las mayores explotaciones: Aeropuerto (nºs 68 y 69), San Miguel (nºs 148 a 152), Coca-Cola (nºs 114 a 117) y algunos sondeos destinados a uso agrícola, además de la importante extracción de EMASA en Puente del Rey. Desde la citada carretera N-340 hasta el mar, la explotación era menor.

En lo que se refiere al uso del agua, el Bajo Guadalhorce ha constituido históricamente un área de cultivo "la vega" de Málaga y otros municipios colindantes. Sin embargo, en los últimos tiempos se han producido cambios importantes en el uso del suelo y, por ende, del agua que se extrae. Así, en zonas que históricamente se han utilizado con fines agrícolas, se han desarrollado polígonos industriales, se han realizado construcciones urbanas, grandes áreas comerciales, y un centro deportivo. También se ha realizado la obra del encauzamiento del río con la consiguiente ocupación y transformación de terrenos que antes se cultivaban, como los existentes en la finca de la Isla, explotación que ha dejado de existir debido a esta obra, en donde se producía como consecuencia de los bombeos una depresión piezométrica con cotas negativas que conllevaba la existencia de intrusión marina (Linares *et al.*, 1983). Además, en la desembocadura se ha declarado Paraje Natural el entorno de las lagunas existentes, lo que limita la actividad antrópica en su interior.

CONTROL DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO

Se efectuaron tres campañas de medida del nivel

piezométrico de mayo a octubre de 1996, en 62 puntos de agua previamente nivelados con una precisión de 5 mm. Esto ha permitido realizar los mapas de isopiezas (figura 2) que corresponden a una situación hidrogeológica de aguas altas, por las lluvias caídas desde noviembre de 1995 hasta mayo de 1996. Las citadas lluvias totalizaron 770 mm, cifra bastante superior a la lluvia media anual situada entorno a los 500 mm.

En el mapa correspondiente al mes de mayo, la superficie piezométrica se encontraba, en todo el acuífero, por encima del nivel del mar, alcanzando la cota 5 m s.n.m. en Puente del Rey (nº 35). Las isopiezas muestran una descarga subterránea 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. En algunos puntos como el campo de golf (nº 103) se detectaban conoides puntuales de la superficie piezométrica, motivados por explotaciones locales.

En el mes de julio el nivel piezométrico se encontraba a la cota 5 m s.n.m. en Puente del Rey, pero las isopiezas más bajas se habían adentrado más en el acuífero, hasta el punto de que la curva de 1 m s.n.m. alcanzaba el sector de San Isidro. Las isopiezas siguen mostrando flujo subterráneo hacia el cauce del río y hacia el mar. Sin embargo, en el entorno de la finca de la Isla (nºs 38, 42 y 43) aparecía un conoide piezométrico con cotas negativas, por los bombeos que se producían para riego. Conviene insistir en que este conoide no se debe producir en la actualidad porque el encauzamiento del río Guadalhorce ha originado la desaparición de esta finca.

En el mapa de isopiezas correspondiente al mes de octubre de 1996, la mayor parte de la superficie piezométrica seguía estando por encima del nivel del mar. Únicamente hay una cota negativa en la finca de la Isla, que ponía de manifiesto una reducción del tamaño del conoide piezométrico detectado en la campaña de julio, probablemente por la disminución de la explotación después de la época estival. Las curvas de cota baja se adentraban más en el acuífero, aumentando la extensión del mismo comprendida entre 0 y 1 m s.n.m.

En conjunto, de mayo a octubre, el nivel piezométrico descendió del orden de 1'5 m. Los descensos más pronunciados se registraron en la finca de la Isla, Aeropuerto y San Isidro, precisamente en puntos donde se producía la mayor explotación. Durante este periodo el acuífero del Bajo Guadalhorce estuvo descargando agua hacia el cauce del río y hacia el mar.

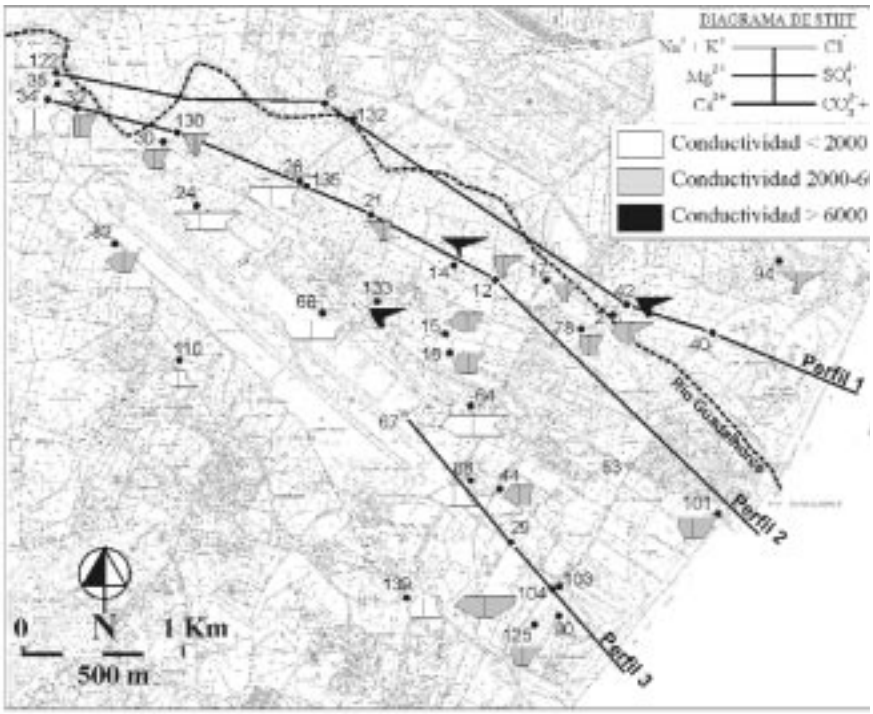

Figura 3. Diagramas de Stiff y situación de los perfiles de salinidad de la figura 4.

HIDROQUÍMICA

Se realizaron tres campañas de muestreo durante los meses de junio, julio y octubre de 1996. En total se recogieron 59 muestras, la mayor parte de ellas (29) en el mes de Julio, cuando se hizo una campaña general para la caracterización hidroquímica del acuífero. A las muestras se les determinó el pH, la conductividad eléctrica, la alcalinidad (TAC) y los componentes químicos mayoritarios (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, NO_3^{-} y SiO_2).

En los diagramas de Stiff (figure 3) se puede observar que en la mayor parte del área de estudio las aguas muestreadas son de facies mixtas. En las zonas próximas a costa, e incluso algunos puntos de la parte central del acuífero se detectaron facies cloruradas sódicas. En menor medida, existían facies bicarbonatadas cálcicas en las proximidades de la Sierra de Mijas

La conductividad eléctrica del agua, y por ende la mineralización, disminuía desde el borde costero (valores comprendidos entre 3.000 y 5.500 µS/cm, en los puntos 94, 101, 104 y 125) hacia el interior, particularmente hacia el sector del Aeropuerto-Churriana (menos de 1.000 µS/cm, sondeo nº 110). En la zona central del área de estudio, sector de San Isidro y finca de la Isla se detectaron valores elevados de conductividad eléctrica (hasta casi 8.000 µS/cm en los sondeo nº 133 y 42).

Los contenidos en cloruros, varían entre 70 mg/l en el sector de Churriana (sondeo nº 110) y más de 2.000 mg/l en la finca de la Isla (nº 42) donde precisamente se detectaron conoides piezométricos (con cotas negativas) a causa de los bombeos. Generalmente, las concentraciones en cloruros eran del orden de varios centenares de mg/l.

Por su parte, los contenidos en sulfatos estaban comprendidos entre menos de 10 mg/l (sondeo nº 94) y casi 1400 mg/l en el sondeo nº 104. La concentración en nitratos superaba los 50 mg/l en algunos sondeos de San Isidro y Aeropuerto (nºs, 68, 88, 110 y 133).

REGISTROS VERTICALES DE SALINIDAD

Se efectuaron registros de la conductividad eléctrica del agua en sondeos en una red de 30 puntos de control, para conocer la variación de la salinidad del agua en la vertical de cada sondeo y, por tanto, en los acuíferos y para conocer las modificaciones producidas por la recarga de finales de 1995.

Perfiles de salinidad

Se han realizado tres perfiles de salinidad perpendiculares a la costa con los datos obtenidos en la campaña de Junio de 1996 (figura 4). El perfil nº 1 incluye el acuífero aluvial (por encima de la cota 20 m b.n.m.) y el acuífero plioceno (entre las cotas 40 y 50 m b.n.m.), mientras que los otros dos perfiles sólo incluyen datos relativos al acuífero aluvial.

En el perfil nº 1, situado en la margen izquierda del río, las isolíneas están bastante verticalizadas. La isolínea de 2.000 µS/cm corta al nivel piezométrico a unos 1600 m de la costa. Desde esa zona hacia el mar la salinidad aumenta hasta valores próximos a 11.000 µS/cm a profundidades que deben corresponder con las capas arenosas del Plioceno. En sector de Puente del Rey las salinidades eran relativamente bajas, incluso a profundidades altas.

En el perfil nº 2 las isolíneas están más horizontales y la de valor 2.000 µS/cm está más alejada de la costa, a unos 2.200 m. Se alcanzan valores de 22.000 en la vertical del sondeo nº 12 situado a 1.800 m del mar. La interfase agua dulce-agua salada está más avanzada hacia el continente a lo largo de este perfil debido a que los bombeos son más importantes en esta margen del río y a la existencia de un paleocauce donde la permeabilidad debe ser más elevada, lo que origina que el agua salada penetre en el acuífero siguiendo esa dirección.

El perfil nº 3 situado en la margen derecha, más cercano al borde de la Sierra de Mijas, es el que presenta valores con menor conductividad, la isolínea de 2.000 µS/cm se encuentra a solo 500 m de la costa.

Modificaciones en la salinidad de las aguas del acuífero originadas por el periodo de recarga de finales del año1995-mediados del 1996

Los registros de salinidad en diferentes puntos, cercanos a la costa, antes y después de las lluvias que tuvieron lugar de Noviembre de 1995 a Mayo de 1996 (figura. 5) han permitido conocer las modificaciones en la salinidad del agua del sector costero relacionadas con la recarga producida.

En la margen izquierda (sondeo nº 95) el ascenso piezométrico correspondiente a la recarga fue de 1,70 m. Los dos registros de conductividad son muy similares, ambos presentaban una capa de agua superior de menor salinidad próxima a 3.000 µS/cm, hasta la cota 17 m b.n.m. y a partir de esa profundidad la salinidad era creciente. Como consecuencia de la recarga, la capa superior disminuyó ligeramente su salinidad.

En las proximidades del cauce (piezómetro nº 40, sector de la Isla), donde los bombeos eran mayores, el nivel piezométrico estaba en cotas negativas (1,97 m b.n.m) durante el periodo de sequía y se diferenciaban dos capas de agua de distinta salinidad con una amplia zona de mezcla de salinidad intermedia. La capa superior de menor salinidad, próxima a 4.000 µS/cm se encontraba hasta la cota 25 m b.n.m y la capa más salina se situaba por debajo de la cota 33 m b.n.m con

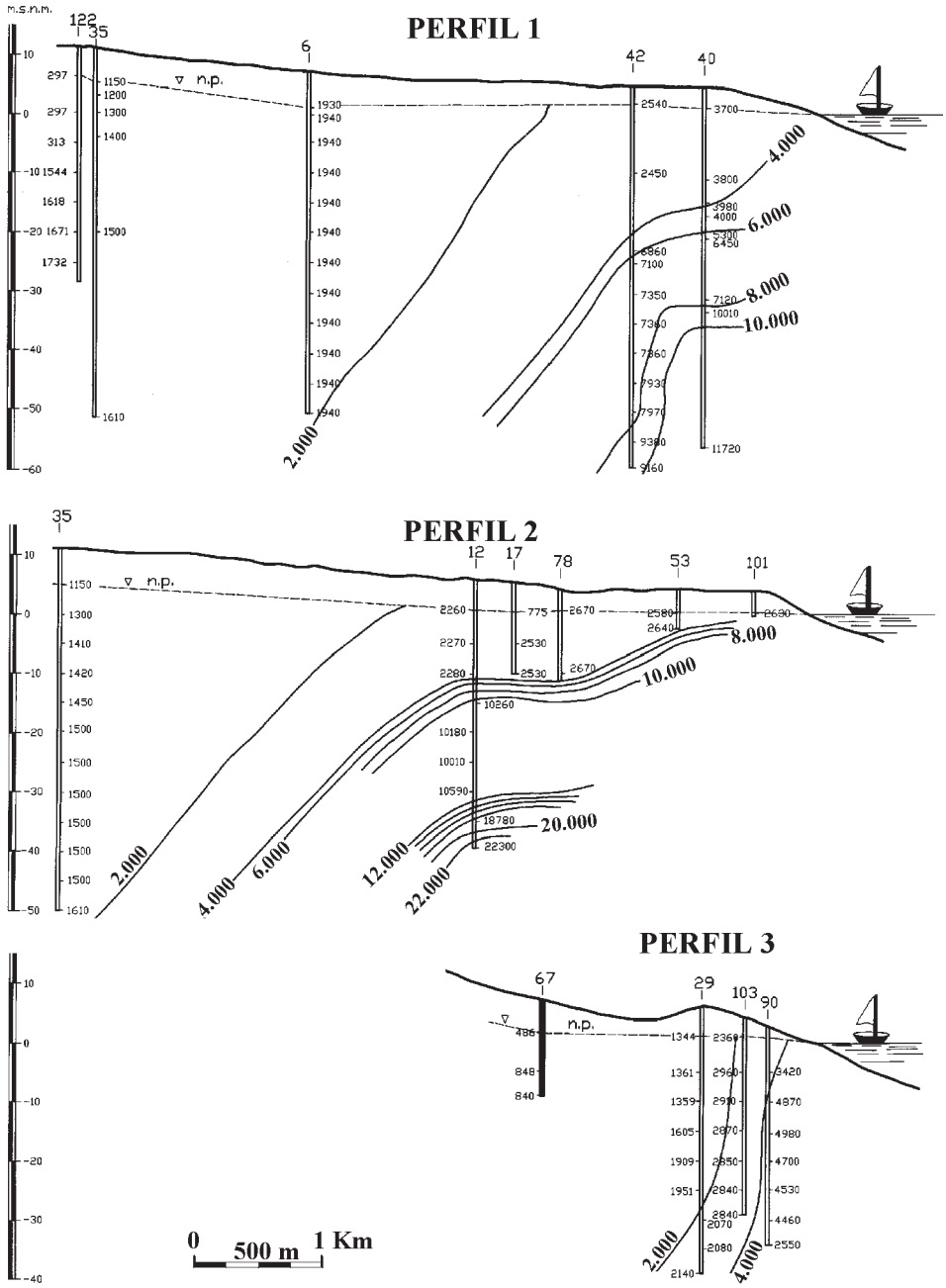

Figura 4. Perfiles de salinidad (campaña de Junio de 1996). Ver situación en la figura 3.

valores próximos a 14.500 µS/cm. La recarga originó un ascenso piezométrico de 4,1 m, alcanzando cotas positivas. En la capa superior se produjo un ligero aumento de salinidad, que fue mas patente en la zona de mezcla mientras que en la capa inferior tuvo lugar un descenso de la salinidad hasta valores próximos a 11.000 µS/cm.

En la margen derecha (piezómetro nº 29) también se podían distinguir dos capas de agua con diferente salinidad, en ambos casos mucho menor que en los pie-

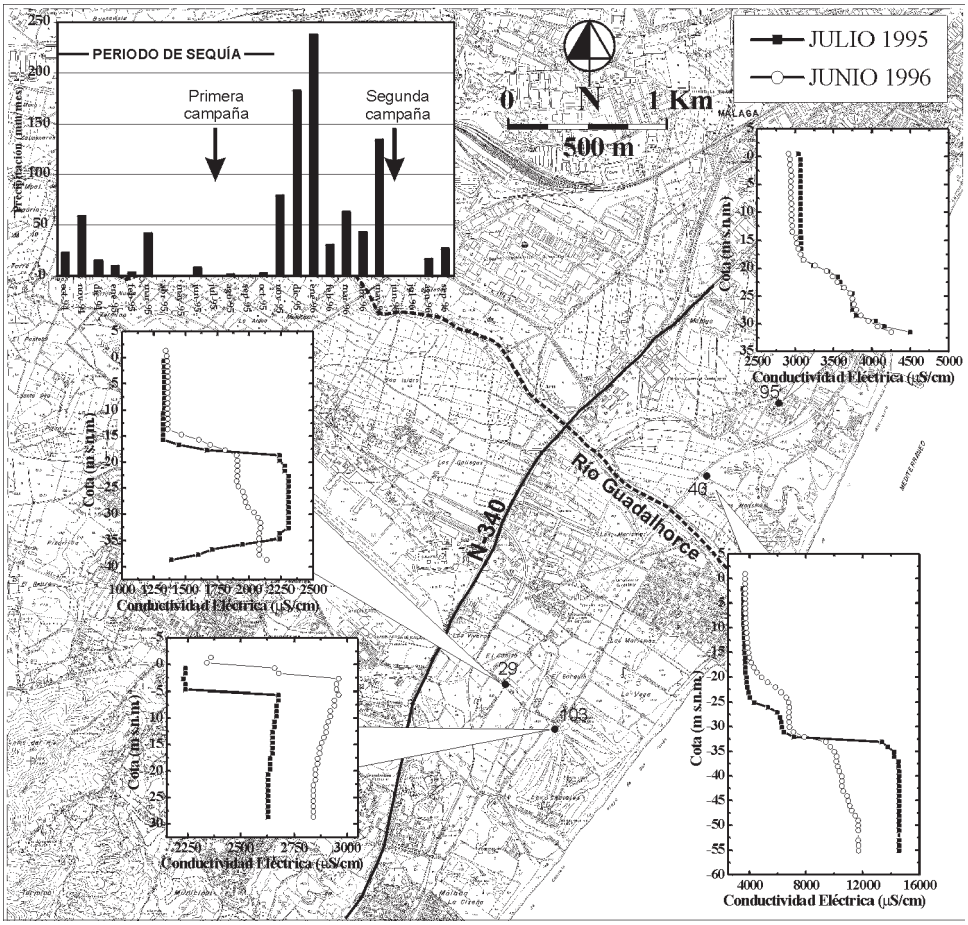

Figura 5. Registros verticales de salinidad con anterioridad y posterioridad al periodo de lluvias de finales de 1995-mediados de 1996. Arriba y a la izquierda se puede observar la evolución de las precipitaciones

zómetros anteriores. En estiaje el nivel piezométrico estaba a cotas negativas (1 m b.n.m.) y a pesar de ello la salinidad era relativamente baja; la capa superior que se extendía hasta la cota 16 m b.n.m. tenía una conductividad próxima a 1.300 µS/cm, mientras que en la capa inferior, situada entre las cotas 18 y 35 m b.n.m., la conductividad era de 2.300 µS/cm. Por debajo de ella, hasta el fondo del piezómetros (cota 38 m b.n.m.) la salinidad descendía hasta valores cercanos a los de la capa superior. Como consecuencia de la recarga el nivel piezométrico ascendió 3,5 m hasta cotas positivas, la capa superior subió 3 m su base y mantuvo prácticamente la misma salinidad y la capa inferior disminuyó su salinidad hasta valores próximos a 2.000 µS/cm. No se apreció la bajada de conductividad en el fondo del sondeo detectada con anterioridad.

También en la margen derecha, más cerca de la costa (piezómetro 103) el nivel piezométrico estaba también a cota negativa (0,4 m b.n.m.) en el periodo de sequía, la capa superior era de menor espesor y algo más salina (2.200 µS/cm) que en el piezómetro nº 29 y la capa profunda, registrada hasta la cota 28 m b.n.m. tenía una conductividad próxima a 2.700 µS/cm. Por lo tanto, se sigue constatando la menor salinidad de este sector del acuífero. La recarga originó una subida del nivel piezométrico de 1,90 m, alcanzando cotas positivas y a pesar de ello hubo un incremento en la conductividad del agua de ambas capas alcanzando la capa inferior valores cercanos a 2.900 µS/cm.

Por lo tanto en todos los piezómetros controlados se registró un ascenso piezométrico como consecuencia de la recarga pero la respuesta hidroquímica no fue

igual en todos ellos. En la margen izquierda solo se produjo un ligero descenso de la salinidad de la capa superior. En las proximidades del cauce, en zona de mayores bombeos, en la capa superior se produjo un aumento de salinidad, que fue más patente en la zona de mezcla, y en la capa inferior tuvo lugar un descenso de la salinidad. En la margen derecha, donde la salinidad de las dos capas era mucho menor solo se produjo un descenso de salinidad en la capa inferior, pero en el sector costero se originó un incremento en la conductividad del agua de ambas capas.

CONCLUSIONES

En el sector costero del Bajo Guadalhorce existen dos conjuntos de interés hidrogeológico: los tramos detríticos de la potente serie margoso-arcillosa del Plioceno y el aluvial cuaternario. Las intercalaciones arenosas de la parte alta de la serie pliocena, presentan una cierta continuidad según el eje del valle con un espesor generalmente inferior a 20 m y pueden estar hidrogeológicamente conectadas con el acuífero cuaternario aluvial en algunos puntos.

El acuífero aluvial está formado por los depósitos originados por la actividad del río Guadalhorce durante el Cuaternario. Se trata de un acuífero libre, cuyo funcionamiento hidrodinámico está en estrecha relación con el río. La mayor potencia del acuífero aluvial es del orden de 50 m coincidiendo con un paleocauce existente en la actual margen derecha el río que está relleno por sedimentos de mayor tamaño de grano y mayor permeabilidad. En el periodo estudiado existía una descarga subterránea del acuífero hacia el río y hacia el mar, que constituyen las áreas de descarga natural del sistema. En algunos puntos aparecían conoides puntuales de la superficie piezométrica, con cotas negativas, originadas por los bombeos.

El volumen de agua bombeado se utilizaba, principalmente, para abastecimiento urbano, riego y abastecimiento industrial. Las captaciones destinadas al abastecimiento urbano e industrial eran pocas pero en ellas se producía una explotación importante. El número de pozos y sondeos usados para regadío era bastante más elevado y, proporcionalmente, extraían menos agua.

Gran parte de los terrenos utilizados históricamente para agricultura en el Bajo Guadalhorce se están ocupando por polígonos industriales, aeropuerto, urbanizaciones, campo de golf, instalaciones deportivas y por el acondicionamiento del cauce del río Guadalhorce. Además algunos de los sondeos que se utilizaban para abastecimiento urbano en los que se producían los mayores bombeos han tenido que dejar de usarse debido a problemas relacionados con la calidad del agua. Todo ello, junto con el cierre de algunas industrias ha modificado el uso del agua en este sector lo que obliga a un replanteo de su balance hidrogeológico en investigaciones futuras.

En general, la hidrogeoquímica del acuífero del Bajo Guadalhorce está caracterizada por la mineralización de las aguas de infiltración a su paso por los materiales aluviales, por la influencia de las aguas de regadío procedentes del embalse del Guadalhorce, por las aguas de retorno de los riegos y por los aportes laterales, principalmente del acuífero carbonatado de la Sierra de Mijas. Todo ello origina una salinidad variable según los sectores y procesos predominantes, que se ve incrementada zonalmente con procesos de intrusión marina en los lugares cercanos a la costa con bombeos intensivos.

Los perfiles de salinidad ponen de manifiesto la existencia de una intrusión marina a lo largo de un eje paralelo al río, por su margen derecha, a través de los niveles arenosos del Plioceno y del paleocauce aluvial donde la permeabilidad debe ser más elevada, motivada por los bombeos que son más importantes en esta margen del río.

Los registros verticales de conductividad eléctrica realizados antes y después de un importante episodio de recarga indican la existencia de dos capas de agua de diferente salinidad, aunque con diferente espesor y conductividad. En todos los piezómetros controlados se registró un ascenso piezométrico pero la respuesta hidroquímica no fue similar, incluso en alguno de ellos se produjo un aumento de la salinidad. Todo ello nos pone de manifiesto la heterogeneidad del acuífero del Bajo Guadalhorce y nos lleva a la consideración de que un incremento en el nivel piezométrico como consecuencia de una recarga no siempre lleva aparejado un proceso de dilución de las aguas pues a veces se puede producir un aumento de salinidad debido a la removilización del agua almacenada en el acuífero. Esta removilización ha dado lugar a la llegada de aguas más salinas a algunos niveles debido al retroceso que pueden sufrir masas de aguas de mayor salinidad que avanzaron tierra adentro en periodos de sequía.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. 395-411.

DPM, 1988. *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga*. Diputación Provincial, Málaga, 151 p.

GHUMA-EMASA, 1998. *Estudio hidrogeológico del Bajo Guadalhorce para la captación de agua salobre para la planta desaladora de Málaga.* Informe técnico, 87 pp, 6 Anejos.

IGME, 1983. *Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España (Sector occidental).* Informe técnico nº 5, Sistema Acuífero nº 37 (Detrítico de Málaga).

ITGE, 1996. *Investigación hidrogeológica para apoyo a la gestión hidrológica en el Bajo Guadalhorce (Cuenca del Sur de España, Málaga).* Informe Técnico, 5 tomos.

Linares Girela, L.; López-Geta, J.A., Rivera, A. 1983. *Degradación de la calidad del agua del acuífero aluvial del Bajo Guadalhorce (Málaga).* III Simposio de Hidrogeología, 8, 355-364.

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, Almuñecar (Granada), 287-315.

Linares Girela, L.; López Arechavala G.; López Geta J.A. y Rubio Campos J.C. 1995. *Definición geométrica de acuíferos pliocuaternarios del valle Bajo del Guadalhorce (Málaga).* VI Simposio de Hidrogeología, Sevilla, 19, 435-447.

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.