

CASTILLO, A.; ROBLES-ARENAS, V.; SÁNCHEZ-DÍAZ, L. y MARTÍN-ROSALES, W. (2010)
"Evolución hidrogeológica del acuífero de la Vega de Granada (Andalucía, España), como base de la gestión de los recursos hídricos subterráneos"
En: "Estudios hidrológicos, hidrogeológicos y ambientales, como base de la gestión de los recursos hídricos". Ed. Asociación Internacional de Hidrogeólogos- Grupo Argentino.

“EVOLUCIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE LA VEGA DE GRANADA (ANDALUCÍA, ESPAÑA), COMO BASE DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS”

Antonio Castillo¹; Virginia María Robles-Arenas²;
L. Sánchez-Díaz² y Wenceslao Martín-Rosales³

TRABAJO FINANCIADO POR:



Agencia Andaluza del Agua
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE,
Y MEDIO RURAL Y MARINO

DIRECCIÓN GENERAL
DEL AGUA

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL GUADALQUIVIR



UGR Universidad
de Granada



1. CSIC e Instituto del Agua de la Universidad de Granada (España).
2. Instituto del Agua de la Universidad de Granada (España).
3. Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada (España).

A LA VEGA DE GRANADA,
GENEROSO ALJIBE Y DESPENSA DE GRANADINOS Y FORASTEROS

Este trabajo fue realizado al amparo de diferentes convenios de colaboración suscritos por la Universidad de Granada con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Agencia Andaluza del Agua. La publicación se llevó a cabo merced a una aportación económica de la Agencia Española de Cooperación Internacional, en el marco de la acción B/027975/09, titulada "Seminario Hispano-Argentino sobre problemas emergentes en la gestión de las aguas subterráneas".

ÍNDICE

OBJETIVOS Y TRABAJOS REALIZADOS	1
ANTECEDENTES	6
I. INTRODUCCIÓN, LAS AGUAS DE LA VEGA DE GRANADA	9
I.1 Aguas de precipitación.....	9
I.2 Aguas superficiales	10
I.3 Aguas residuales urbanas.....	11
I.4 Aguas subterráneas: el acuífero de la Vega de Granada.....	13
I.5 Sistema hídrico conjunto de la Vega de Granada.....	15
II. EVOLUCIÓN DE NIVELES EN EL ACUÍFERO DE LA VEGA DE GRANADA	20
II.1 Series históricas de aforos del río Genil en la estación de Puente Castilla	20
II.2 Las series históricas de piezometría	22
II.2.1 Evoluciones temporales.....	22
II.2.2 Evoluciones espacio-temporales	27
II.2.3 Evoluciones de piezometría y bombeos en los sondeos de la Ronda Sur.....	35
II.3 Evoluciones de la piezometría en la red de control de la Universidad de Granada).....	42
II.3.1 Red de control de registro temporal	22
II.3.2 Red de control de registro continuo	27
II.4 Mapa piezométrico de 2008	44
II.5 Consideraciones finales sobre la evolución de niveles.....	45
III. EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	47
III.1 Caracterización hidroquímica. Parámetros indicadores: conductividad, cloruros y nitratos	47
III.2 Estado actual (2008) de la calidad (Universidad de Granada)	51
AGRADECIMIENTOS	82
INFORMACIÓN CONSULTADA	83
ANEXO FOTOGRÁFICO	83

OBJETIVOS Y TRABAJOS REALIZADOS

El presente estudio, de título "*Evolución hidrogeológica del acuífero de la Vega de Granada (Andalucía, España), como base de la gestión de los recursos hídricos subterráneos*", se realizó al amparo de varios convenios específicos suscritos entre la Universidad de Granada, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y Agencia Andaluza del Agua durante los años 2008-2010.

El objeto de estos trabajos fue hacer un análisis de la evolución histórica de la piezometría y calidad de las aguas subterráneas, así como comprobar el comportamiento del acuífero de la Vega de Granada frente a las intensas extracciones por bombeo a que se estaba viendo sometido, sobre todo a partir de la batería de sondeos de la Ronda Sur, para el abastecimiento al área metropolitana de la ciudad de Granada. A expensas de los resultados obtenidos, debían plantearse unas propuestas de actuación, a desarrollar en el futuro a través de planes específicos.

Trabajos realizados

Como primer paso, se llevó a cabo una recopilación y tratamiento de datos históricos de niveles piezométricos y de los caudales drenados aguas abajo del sistema acuífero (río Genil en Puente Castilla); igual labor recopilatoria se llevó a cabo con estudios hidrogeoquímicos preexistentes.

En el ámbito experimental de este estudio, se comprobó el comportamiento hidrodinámico a través de una red de control piezométrica, compuesta por siete puntos, con medidas periódicas (de junio de 2008 a febrero del 2009). Para conocer la distribución espacial de la piezometría se levantó el correspondiente mapa del acuífero (entre septiembre y octubre de 2008).

A partir de febrero de 2009 se pudo disponer, asimismo, de otros cuatro piezómetros, instalados con sensores de registro continuo (programados para medir cada hora) de nivel, conductividad y temperatura (CTD-Diver, fabricados por Eijkelp-Kamp-Van Essen), con datos actualizados para esta publicación hasta octubre de 2010.

También fue muy útil la información piezométrica recopilada de la empresa de abastecimiento a la ciudad de Granada (EMASAGRA) y de la red oficial de control de la Agencia Andaluza del Agua.

Por lo que respecta a la calidad de las aguas, se seleccionó una red de seis puntos de control, en la que con periodicidades semanales y mensuales (después) se determinaron conductividad, cloruros, nitratos y sulfatos (de junio de 2008 a febrero de 2009: 312 determinaciones, sobre 78 muestras de agua), aparte de la realización de varios análisis hidrogeoquímicos completos. También se participó, para la Consejería de Agricultura, en el muestreo de una extensa campaña hidroquímica espacial, realizada entre los meses de junio y octubre de 2008, de la que se tomaron aproximadamente 200 puntos de agua subterránea, para los que se determinaron 44 parámetros, algunos de cuyos resultados se exponen en esta publicación.

Resultados

Los resultados obtenidos aportan valiosa información sobre el comportamiento del acuífero frente a las extracciones actuales, especialmente en el sector de cabecera del acuífero, si bien son aún insuficientes para hacer una predicción a medio plazo, dado el diferente comportamiento observado según las condiciones de recarga-extracción reinantes en cada periodo hidrológico.

Así pues, los principales resultados, que se resumen a continuación, son fundamentalmente de índole descriptiva, pese a realizarse ciertas predicciones basadas, sobre todo, en las tendencias observadas en las evoluciones históricas recopiladas y observadas.

Los resultados de piezometría, tanto de evoluciones temporales, como de distribuciones espaciales, en campañas tipo flash, confirman una tendencia progresiva al moderado abatimiento generalizado de la superficie piezométrica. Los registros, tanto de niveles, como de caudales (río Genil en Puente Castilla), son claros al respecto, si bien se observan, como es lógico, ciclos interanuales de moderadas recuperaciones en años o periodos húmedos. El levantamiento de un nuevo mapa de piezometría en 2008 y su comparación con otros anteriores (1983, 1989, 1994 y 1997) permite corroborar igualmente un descenso de la superficie piezométrica, que es más acusado en el sector centro-oriental del acuífero, en el que se agranda ostensiblemente el conoide de depresión que ya fuera detectado por primera vez en 1983.

Por lo que respecta más concretamente al área de la Ronda Sur, donde se concentran buena parte de los bombeos estacionales para abastecimiento de población, y al periodo estudiado (de febrero de 2008 a octubre de 2010), cabe concluir que una extracción de más de 20 hm³ provocó un notable abatimiento residual (a fecha de febrero de 2009 de 4,4 m bajo la vertical de la citada batería), si bien a partir de ese momento las condiciones anómalamente húmedas del periodo, con una rápida recarga en ausencia de explotación, han provocado una igualmente sensible recuperación.

En relación con la calidad de las aguas, los controles periódicos realizados, apenas arrojan variaciones dignas de consideración. Cabe concluir al respecto, que la monitorización de parámetros de esa índole aporta poca información en el corto plazo. Sin embargo, si son apreciables tendencias a medio y largo plazo. Para ello han sido de gran valor los mapas de CE, cloruros y nitratos, considerados como parámetros testigo, realizados para este trabajo (muestreo junio-octubre 2008), así como su comparación con otros similares anteriores (de fechas 1983, 1984, 2003 y 2004).

En líneas generales, se aprecia un aumento de la salinidad general, que ha progradado hacia la zona de cabecera a través del sector central, el más transmisivo. Más significativo, y en idéntica línea, ha sido el comportamiento de los cloruros, por su carácter de ión conservativo y trazador del flujo subterráneo.

Por su trascendencia sanitaria en las aguas de consumo público, cabe resaltar el comportamiento ofrecido por los nitratos, que aumentan en casi todo el acuífero, no tanto por un incremento de los inputs de fertilizantes y materia orgánica, como por una menor tasa de recarga y mayor tiempo de renovación de las aguas del acuífero. Se aprecian, no obstante dos sectores con leves descensos de concentración, que coinciden con zonas con nivel piezométrico deprimido y con previsibles aportes de aguas más profundas y menos concentradas en nitratos.

En febrero de 2009 se empezaron a tomar datos (cada hora) de cuatro sensores de control en continuo de nivel, CE y temperatura del agua. Se ha comprobado su total operatividad y buen calibrado, para lo que ha sido fundamental la experiencia adquirida en su manejo en el acuífero del Campo de Dalías (provincia de Almería). Los datos volcados hasta el momento todavía son insuficientes para mostrar tendencias fiables. No obstante, cabe esperar datos valiosos y clarificadores sobre el funcionamiento del sector acuífero monitorizado. En concreto, el seguimiento horario de los ciclos de bombeo-reposo en los sondeos de la Ronda Sur será decisivo para establecer aspectos de interés, como son los parámetros hidráulicos (transmisividad, permeabilidad y coeficientes de almacenamiento), pérdidas de carga, o la cuantía de los aportes específicos renovable (por metro de descenso y por metro lineal de la batería de bombeo).

El estudio del comportamiento acuífero bajo la batería de sondeos de la Ronda Sur, ha constatado un significativo grado de afecciones cruzadas entre sondeos, lo que incrementa las pérdidas de carga, aumenta los riesgos de colapso y colmatación (que han dejado fuera de servicio ya a dos sondeos) y las cotas de elevación, con un sobre-coste energético significativo.

En base a ello, se ha estudiado la posibilidad de extender la batería hacia el SW, como la solución más favorable a corto-medio plazo, a fin de repartir en el espacio y en el tiempo las extracciones, disminuyendo los caudales unitarios y por metro lineal de batería de bombeo.

Principales propuestas de gestión

Para la óptima toma de decisiones sobre la gestión del acuífero estudiado, se considera imprescindible continuar el control periódico de las extracciones (especialmente en la Ronda Sur y otros sondeos de gran caudal), niveles piezométricos y caudales (río Genil en Puente Castilla). Para ello, deben seguir siendo operativos, al menos, los cuatro sensores de registro continuo ya instalados, cuyo número, dado su bajo coste relativo de adquisición y mantenimiento, debería incrementarse en el futuro, extendiéndose al resto del acuífero.

Se considera punto de observación clave el del sondeo nº 4 de la Ronda Sur, actualmente inoperativo, cuya recuperación como punto de bombeo es poco recomendable económica y técnicamente, dado la alta densidad de extracciones ya existente en el sector. Aparte de los sensores de nivel, CE y temperatura, podría utilizarse la instalación existente (caseta, acometida de luz, cerca perimetral, etc.) para la ubicación de una estación meteorológica, con control de parámetros para la estimación del ciclo del agua en el suelo. Los hipotéticos problemas de subsidencia y asentamientos diferenciales por desaturación, también podrían ser documentados con un registro continuo de nivelación topográfica.

Otro punto de observación clave lo constituye la estación de aforos de Puente Castilla en el río Genil. Sus datos en continuo dirán, en última instancia, si la gestión a que se está viendo sometida el acuífero es sostenible o no, en el contexto de la doctrina de la Directiva Marco del Agua (sostenibilidad económica, pero también ambiental). Para cumplir dicho cometido es muy conveniente modernizar la instalación allí existente, con la posibilidad incluso de envío de datos en tiempo real, ya que dicha estación cumple también los requisitos de punto de alerta frente a inundaciones aguas abajo.

Como se ha comentado, se debe prolongar la batería de sondeos de la Ronda Sur en un ramal de unos 800 m hacia el SW, con la perforación de al menos 3 sondeos más. Ello debe provocar un mejor reparto en el tiempo y en el espacio de las extracciones. El comportamiento del acuífero será el que dictamine finalmente la cuantía renovable de las extracciones en dicho sector, y, por tanto, si es necesario buscar nuevos emplazamientos más alejados para satisfacer el previsible aumento futuro de las demandas de abastecimiento urbano del área metropolitana de Granada.

Será necesario, a medio plazo, establecer mediante el estudio específico correspondiente, el régimen de caudales ecológicos a preservar en el río Genil aguas abajo de la Vega de Granada, en atención a lo estipulado en la Directiva Marco del Agua. Ese régimen de caudal mínimo se considera un elemento clave para cuantificar, recalibrar y repartir las extracciones máximas renovables en la Vega. Para ello, será necesario diseñar y ajustar el correspondiente modelo de gestión, que debe incluir tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas (modelo de uso conjunto), lo que es de especial importancia en la Vega de Granada, donde la interacción entre estos dos tipos de aguas es permanente.

Es necesario incrementar e incentivar las prácticas de recarga extensivas en la Vega de Granada, como siempre se hizo, con aguas sobrantes o de crecidas de los ríos Monachil y Dílar sobre todo, así como de las procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. Especialmente eficaz para compensar las extracciones de la Ronda Sur serían las actuaciones de recarga en la zona de cabecera del acuífero, retomando proyectos del Instituto del Agua y de la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad de Granada de construir balsas y canales a cielo abierto, integrándolas en el urbanismo del sector, como un gran parque acuático y de ocio para el área metropolitana de Granada.

Si no se favorecen esos procesos, al tiempo que se abandonan riegos tradicionales, especialmente de huerta y choperas, aumenta la superficie urbanizada, disminuyen las dotaciones de cultivos e impermeabilizan cauces y acequias, el acuífero verá muy mermada su recarga por el regadío y no tendrá capacidad en el futuro para soportar las cuantiosas extracciones que previsiblemente se la requerirán.

También se apuntó anteriormente, la necesidad de instalar puntos de nivelación topográfica de precisión para verificar, llegado el caso, posibles subsidencias en el sector central del conoide de depresión existente, que alcanza ya los 30 metros consolidados de desaturación.

ANTECEDENTES

Los trabajos sobre el acuífero de la Vega de Granada son numerosos, dado que se trata de uno de los más importantes de Andalucía (Castillo, 1995), tanto por su extensión, como por la cuantía de sus recursos renovables o el grado de explotación y calidad del uso del agua al que está sometido.

Los primeros estudios de reconocimiento hidrogeológico se remontan a la segunda mitad de la década de los años 60 del siglo pasado, en el marco del "Proyecto de investigación hidrogeológica de la cuenca del Guadalquivir" (FAO-IGME, 1968); en una segunda fase (1969-71) se continuaron los trabajos, abordando aspectos de mayor detalle, dentro del "Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas en el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir" (FAO-IGME, 1972). Estos trabajos pese a constituir investigaciones ya superadas, aportaron una información piezométrica y de calidad de las aguas muy útil hoy día, al constituir una referencia del estado del acuífero en condiciones semi-naturales, con las que comparar y contrastar las evoluciones actuales, y las previsibles futuras.

Desde entonces no han dejado de sucederse estudios y controles, por lo que hoy día se dispone de una serie de registro temporal de niveles bastante extensa, lo cual cobra creciente interés para documentar los cambios climáticos, ambientales, de uso y de explotación de las aguas de estas últimas décadas. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) dispone de buen número de informes, muchos de ellos de actualización de información periódica recogida de sus antiguas redes de control de calidad, piezometría y foronomía. Entre ellos, cabe destacar los documentos: IGME (1981), IGME-GEOMECANICA (1983), ITGE (1989) e IGME (2010).

A lo largo de los años también han ido cambiando los organismos encargados del control de niveles piezométricos y aforos de la Vega de Granada. Los datos más valiosos por su antigüedad proceden, como ya se ha comentado, de la "época de la FAO", de 1966 a 1972. De 1972 a 1983 el control correspondió en exclusiva al IGME. De 1983 a 1989, estos controles se simultanearon con los realizados para varias tesis doctorales y proyectos de investigación en la Universidad de Granada. Desde 1989 los controles pasan a depender casi en exclusiva del Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) y más tarde, de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). Por último, con la delegación de parte de las competencias del agua a las Comunidades Autónomas españolas, las labores de control fueron asumidas por la Agencia Andaluza del Agua (AAA), que ante la situación económica actual, ha retirado provisionalmente estos controles, actuación que esperamos sea reconsiderada, ante la importancia, muchas veces reiterada, que estos datos brindan como soporte a la correcta gestión del recurso.

Algunos de los mapas piezométricos más representativos disponibles hasta la realización de este trabajo eran los de: noviembre de 1967 (Trac, 1968), mayo de 1976 (IGME, 1981), septiembre de 1983, octubre de 1989, marzo de 1994 y julio de 1997 (los cuatro últimos de Castillo, en diversas publicaciones). Es de resaltar la antigüedad del último mapa piezométrico disponible, de hace más de 10 años, razón por la cual este proyecto incluyó la realización de uno nuevo, llevado a cabo en el verano-otoño de 2008.

Pese a tratarse de un acuífero relativamente bien estudiado, para el que apenas hay discrepancias en las líneas generales de funcionamiento, si hay diferencias sustanciales en la cuantificación de sus recursos renovables, según autores y procedencias. De este modo, IGME/GEOMECANICA

(1983) cifra estos recursos en 232 hm³/año, Jerez (1983) en 155 hm³/año, Castillo (1986) en 184 hm³/año, ITGE (1989) en 232 hm³/año, y Castillo y Sánchez (2004) en 160 hm³/año, entre otras estimaciones. En parte, esas diferencias son debidas a la deficiente información disponible sobre la cuantía del retorno de riegos e infiltración de aguas superficiales; también han influido los diferentes periodos climatológicos considerados, a lo que hay que sumar la ocurrencia de alteraciones del régimen hídrico, como la construcción de embalses, canalización de acequias, cambio de usos del territorio etc.

En lo que se refiere a la calidad de las aguas, la Universidad de Granada viene acometiendo desde el año 1982 diferentes estudios hidroquímicos del acuífero de la Vega de Granada. En la Tesis Doctoral de Castillo (1986) se aborda un estudio completo de la hidroquímica y contaminación de las aguas de este acuífero (con datos de 1982 a 1984). Un estudio posterior sobre la composición y contaminación de las aguas subterráneas es realizado por Castillo (1994). En Castillo y Sánchez (2004) se vuelve a abordar, en este caso para la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, un estudio hidroquímico bastante exhaustivo del acuífero, así como de las aguas superficiales y residuales. Por último, la Asociación "Agua Limpia", con la colaboración de la Universidad de Granada, vuelve a realizar campañas y analíticas de las aguas de la Vega de Granada (Castillo y otros, 2009).

Los estudios sobre los fertilizantes y nitratos han acaparado siempre gran interés, debido al carácter indeseable de estos en las aguas de consumo humano, y a su continuo incremento en la Vega de Granada. Los primeros datos analíticos de cierta entidad provienen de los años 1980-82; en 1982-84 se hace una analítica intensa (Castillo, 1986); Castillo y Fernández-Rubio (1985) y Castillo y otros (1995) hacen una cuantificación del nitrógeno aportado por fertilizantes a la Vega de Granada; Castillo y otros (1997, 2004 y 2009), con datos más recientes, exponen la evolución seguida por los contenidos en nitratos hasta esos momentos.

Los estudios de otros parámetros de especial interés sanitario y medio ambiental, como plaguicidas, metales pesados o microorganismos patógenos son muy poco numerosos. Los plaguicidas fueron estudiados por primera vez por Acuña (1981); años después, se abordó un barrido analítico de las aguas subterráneas en la tesis doctoral de Colina (1996); en Castillo y Sánchez (2004) se vuelven a analizar. Algo parecido ocurre con los metales pesados, estudiados por primera vez de forma muy somera por Castillo (1986), mientras que Campos (1996) realizó en su tesis doctoral una investigación mucho más completa sobre su contenido en suelos (y algunas aguas) de la Vega de Granada. Igualmente, Castillo y Sánchez (2004), o "Agua Limpia" (en 2008) incluyen algunas determinaciones en muestras de agua de la vega.

La microbiología de las aguas de la Vega de Granada siempre tuvo interés epidemiológico. García-Villanova (1985) realizó su tesis doctoral sobre la microbiología de verduras, hortalizas y aguas de riego de la Vega de Granada. En el proyecto realizado por Castillo y otros (1990) se hace un gran barrido microbiológico de las aguas superficiales de la cuenca del Alto Genil, incluyendo toda el área de influencia de la Vega de Granada; en la tesina de Gómez (1994) se exponen los principales resultados microbiológicos obtenidos en el anterior estudio; Ramos Cormenzana y otros (1994) y Castillo y otros (1994) investigan la transmisión y tiempos de supervivencia en el acuífero de algunos de los grupos de patógenos y de bacterias indicadoras de contaminación más característicos de las aguas residuales urbanas. Castillo y Ramos Cormenzana (2002) disertan, con nuevos

datos analíticos, sobre la contaminación microbiológica del acuífero de la Vega de Granada. Por fin, Castillo y Sánchez (2004) vuelven a hacer determinaciones microbiológicas en diferentes tipos de aguas de la Vega.

I. INTRODUCCIÓN, LAS AGUAS DE LA VEGA DE GRANADA

La Vega de Granada se sitúa a los pies de la ciudad del mismo nombre, dentro de la Comunidad Autónoma de Andalucía, al sur de la Península Ibérica, en España (Fig. 1 y foto 1 en anexo).

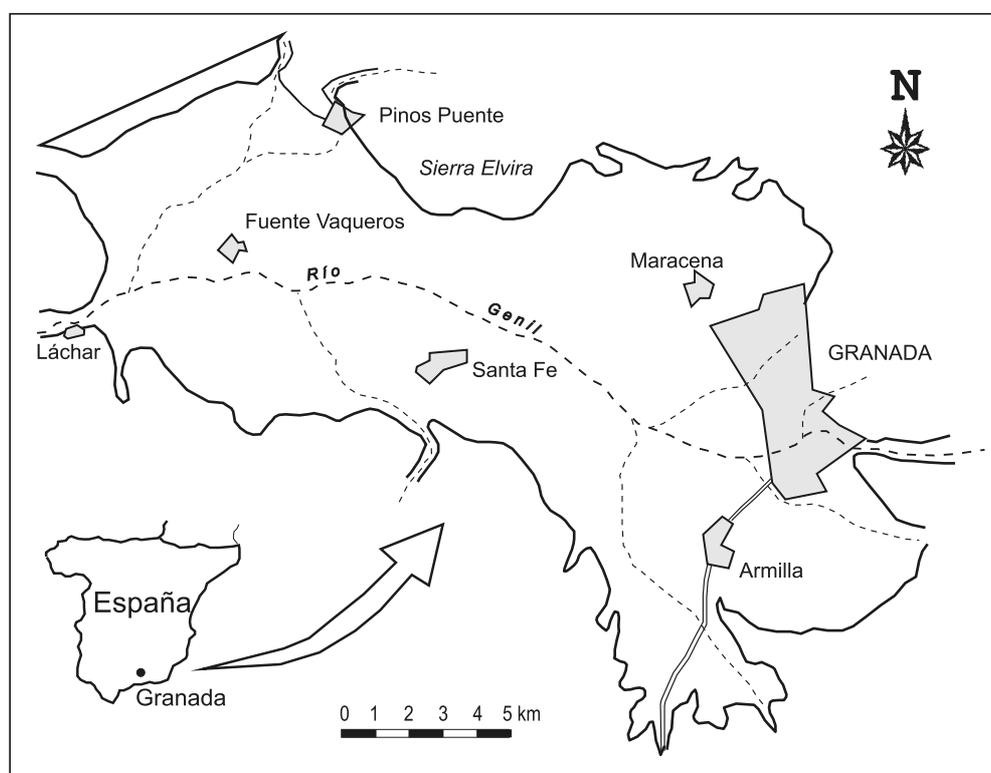


Figura 1. Mapa de localización de la Vega de Granada (Granada, Andalucía, España).

Se trata de una depresión intramontañosa de 200 km² de extensión, rellena por materiales detríticos, la mayor parte aluviales, que constituye un excelente acuífero, el cual recibe unas importantes aportaciones hídricas, merced a su gran cuenca vertiente. El sistema hídrico se considera cerrado en la estación de aforos de Puente Castilla, en el río Genil, donde se recogen escorrentías superficiales y subterráneas de una cuenca vertiente de 2.944 km²; Fig. 2 y foto 2 en anexo).

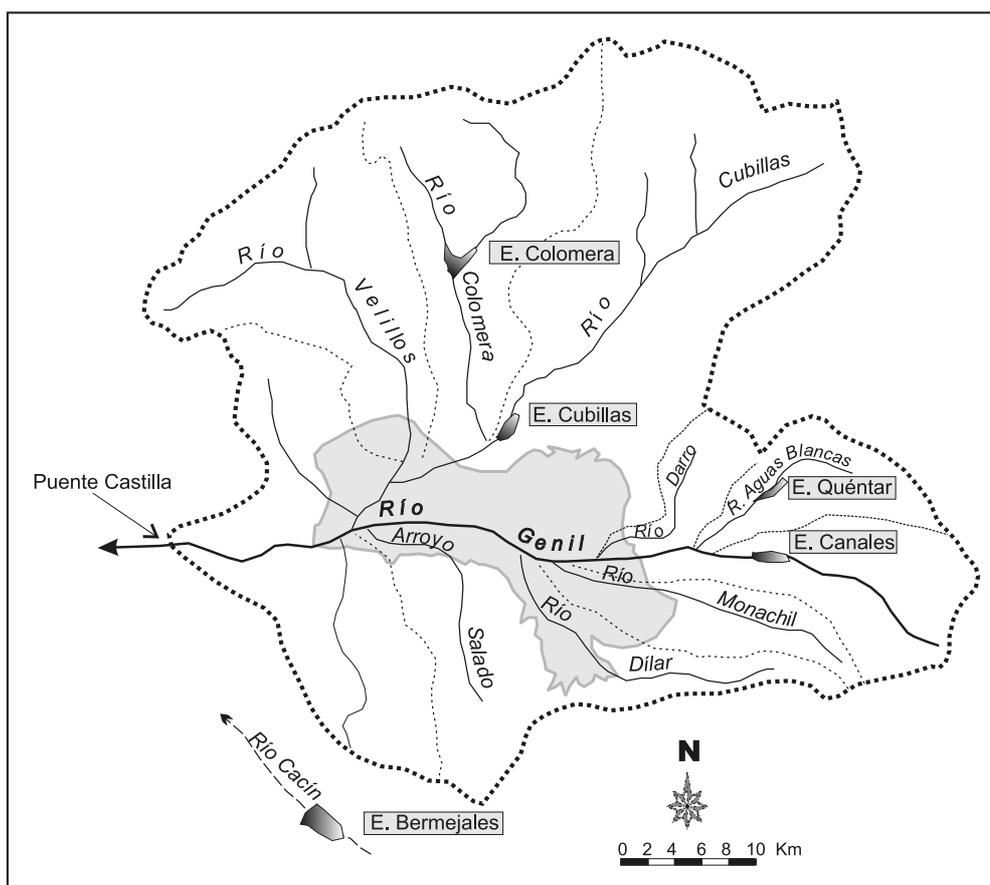


Figura 2. Red hidrográfica principal de la cuenca del Alto Genil, y situación de la Vega de Granada dentro de la misma.

I.1. Aguas de precipitación

La pluviometría de la cuenca hidrográfica oscila entre los 1.200 mm de las cumbres de Sierra Nevada (donde se localizan las máximas alturas de la Península Ibérica) y los 400 mm de las zonas interiores más deprimidas.

Por lo que respecta más directamente con la Vega de Granada, se dispone de datos de varias estaciones termo-pluviométricas de distintas instituciones. La serie de una de ellas (Cartuja) cuenta con más de 100 años de registro, si bien se expone la serie también desde el año hidrológico 1969/70, con el fin de hacerla coincidir con las de otras estaciones próximas, así como con las series de piezometría y caudales expuestas en este trabajo. Los datos de este periodo arrojan una precipitación media anual de 410 mm.

En la gráfica de la figura 3 se exponen los datos de precipitación de cuatro estaciones, en las que se pueden reconocer ciclos de eventos pluviométricos de entorno al lustro, incluidos en otros mayores de un periodo próximo a 15 años. En la gráfica de la figura 3b se ha representado la serie pluviométrica total, donde se reconoce una tendencia hacia una disminución de la precipitación

media desde unos 500 mm a comienzos del siglo XX hasta cerca de 420 mm un siglo después, lo que equivaldría a una disminución de ésta del orden del 16 % para el periodo temporal considerado (1901 a 2005).

En la página Web de la Agencia Estatal de Meteorología (www.aemet.es) se publican los "valores normales" de precipitación para dos estaciones ubicadas en la Vega de Granada, no considerados en las gráficas anteriores, que arrojan unos valores de precipitación media anual de 357 mm en la estación del "Aeropuerto" (periodo 1972-2000) y de 361 mm para la estación de la "Base Aérea de Armilla" (periodo 1971-2000).

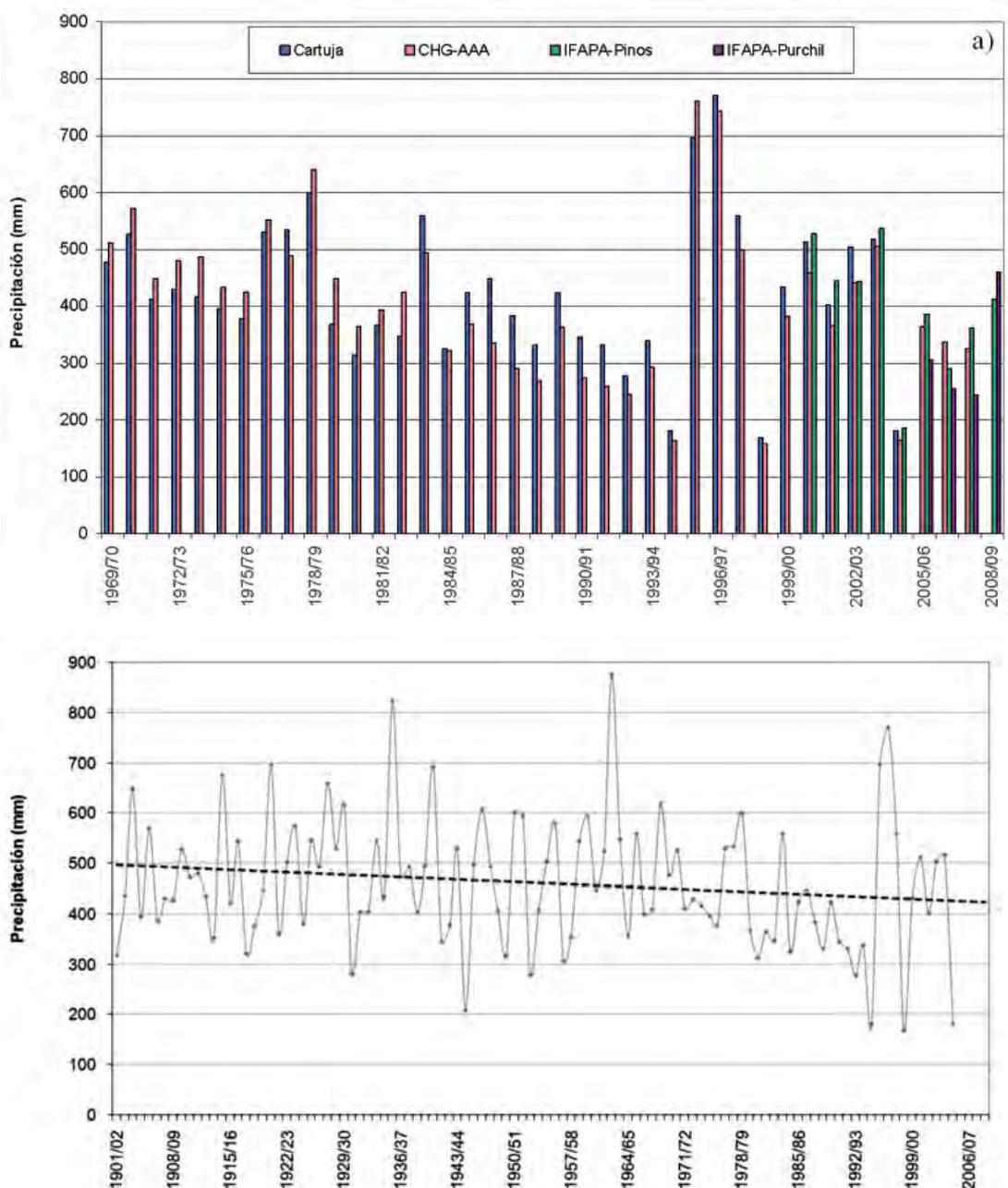


Figura 3. a) Datos disponibles de la precipitación anual en cuatro pluviómetros ubicados en el entorno de la Vega de Granada; b) Evolución de la precipitación anual en el pluviómetro con la serie temporal mas extensa (Cartuja; 1901/02- 2004/05).

I.2. Aguas superficiales

Como se ha mencionado, el sistema hídrico de la Vega de Granada (cuenca del Alto Genil) posee una superficie próxima a 2.950 km², área integrada, desde el punto de vista hidrográfico, en la subcuenca del Alto Genil, perteneciente a su vez a la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir. Por su parte, la Vega de Granada ocupa la parte más deprimida y central de dicho sector, donde se concentra la mayor parte del flujo y consumo de agua, con la finalidad de abastecer al regadío de 12.000 has y a una población (área metropolitana de Granada) del orden de 550.000 habitantes.

La Vega de Granada está recorrida longitudinalmente por el río Genil (foto 6 en anexo), el cual recibe, dentro de ella, las aportaciones de numerosos afluentes; entre ellos destacan por su margen derecha los ríos Aguas Blancas, Darro, y Cubillas (este último, junto a sus tributarios los ríos Colomera y Velillos), mientras que por la margen izquierda recibe las confluencias de los ríos Monachil y Dílar. Algunos de estos ríos se encuentran regulados por embalses de superficie, como son los de Canales (río Genil), Quéntar (río Aguas Blancas), Cubillas (río Cubillas) y Colomera (río Colomera).

Para la estimación de las aportaciones superficiales se han utilizado la totalidad de las series de aforos disponibles entre los años 1970-2002, procedentes de la CHG. En el cuadro 1 se exponen las aportaciones totales finalmente estimadas para las cuencas completas de los diferentes cauces, tras aplicación de caudales específicos de escorrentía característicos a las porciones de cuenca no aforadas, cuando ese fue el caso.

Hasta hace relativamente poco tiempo, las aguas de superficie vertientes a la Vega de Granada carecían apenas de regulación, si exceptuamos los embalses de Cubillas y Quéntar, y la eficiente acción ejercida indirectamente por la continua e intensa derivación por acequias del agua de los ríos, cuya consecuencia final era una importante recarga del acuífero de la Vega de Granada (fotos 4 y 5 en anexos). El embalse de Cubillas fue el primero en construirse (1956), al que siguió el de Quéntar (1973), sobre el río Aguas Blancas. En la segunda mitad de la década de los 80 entraron en funcionamiento dos nuevos embalses: el de Colomera, sobre el río del mismo nombre, y el de Canales, sobre el río Genil; este último tiene, por su localización y cuantía de sus aportaciones reguladas, gran trascendencia en la dinámica hidrológica del sistema hídrico conjunto de la Vega de Granada. Por lo que respecta a la gestión de los recursos superficiales, habría que mencionar también la derivación para el riego de la Vega de Granada de unos 30 hm³/año procedentes del embalse de los Bermejales (externo a la cuenca) y las obras de conducción de las aguas del embalse de Colomera para el regadío de la citada Vega de Granada.

SUBCUENCA	S (km ²)	A (hm ³ /a)	Q.e (l/s.km ²)
Genil	173	64	11,7
A. Blancas	102	21	6,5
Monachil	95	36	12,0
Dílar	128	34	8,4
Colomera	245	30	3,9
Velillos	357	44	3,9
Cubillas	639	60*	3,0
Cubillas	150	0	0
Vega Granada	1.055	68	2,0
TOTAL	2.944	357	3,6

Cuadro 1. Aportaciones superficiales (periodo 1970-02) para las subcuencas vertientes al sistema hídrico de la Vega de Granada.* aportación total, incluidos 28 hm³ del manantial de Deifontes. Al total de aportaciones (357 hm³/año) habría que sumar 34 hm³ de aportes propios subterráneos del acuífero de la Vega de Granada, para obtener los recursos totales del sistema (391 hm³/año).

Por lo que respecta a las características hidrológicas de los diferentes embalses existentes, en el cuadro 2 se exponen sus capacidades, aportaciones y aportaciones reguladas.

EMBALSES	(1)	(2)	(3)	(4)
Embalse de Canales	71	64	72	=
Embalse de Colomera	42	30	25	=
Embalse de Quéntar	14	21	19	+
Embalse de Cubillas	19	52	46	+
Embalse de Velillos +	64	33	35	=
Embalse de Bermejales				31*

Cuadro 2. Algunas características de los embalses del sistema hídrico de la Vega de Granada. (1) capacidad, en hm³; (2) recursos medios, en hm³/año; (3) capacidad de regulación media, en hm³/año; (4) tipo de embalse (+ excedente/= deficitario o en equilibrio). * recursos transportados por el canal de Cacán, desde el embalse de los Bermejales.

I.3. Aguas residuales urbanas

Las aguas residuales urbanas vertidas en la Vega de Granada no suponen recurso nuevo, ya que su partida ha sido contabilizada anteriormente como aguas superficiales (o subterráneas), según la fuente de suministro de los correspondientes abastecimientos (mayoritariamente a partir de aguas superficiales para el caso del área metropolitana de Granada). En el momento actual la generación media de aguas residuales urbanas en la Vega de Granada se estima en 60 hm³/año, de los que se

calcula que sólo la mitad recibe algún tratamiento de depuración. En la figura 4 se muestra un mapa con las principales acequias de evacuación de aguas residuales urbanas de la Vega de Granada.

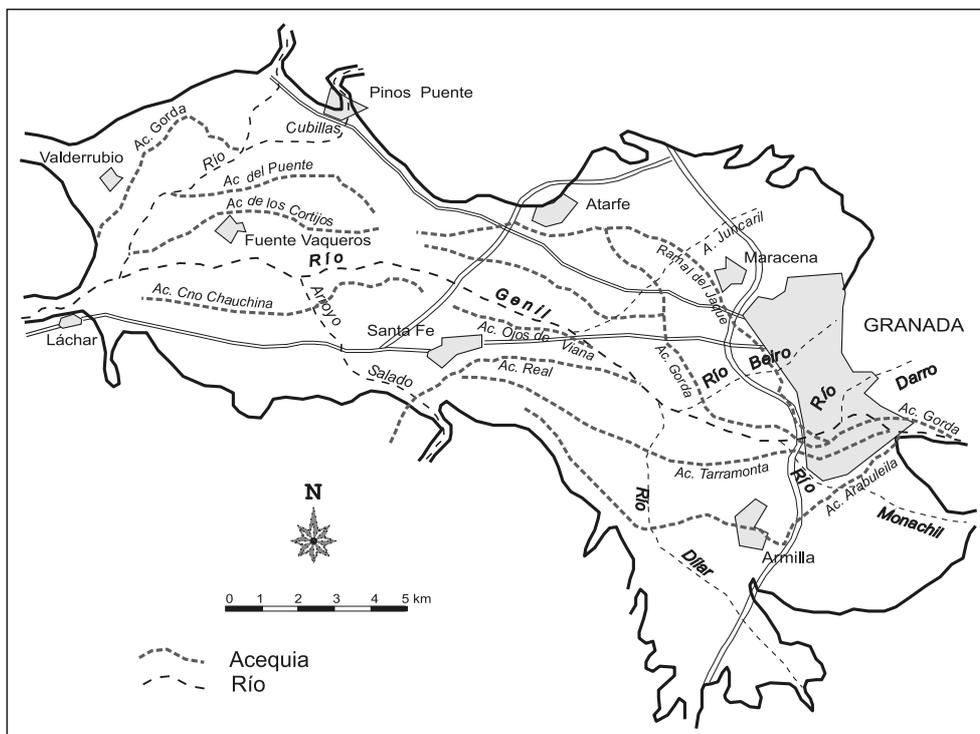


Figura 4. Mapa de la red principal de acequias de aguas residuales urbanas de la Vega de Granada.

I.4. Aguas subterráneas: el acuífero de la Vega de Granada

El acuífero de la Vega de Granada juega un papel clave en el sistema hídrico conjunto del Alto Genil por su gran poder de regulación y de disposición de aguas con un elevado grado de garantía, con las que cubrir los abastecimientos de regadío y a la población, en eventuales periodos de déficit estivales causados por años climatológicamente adversos.

El acuífero detrítico de la Vega de Granada se localiza en el interior de la depresión intramontañosa de Granada, en el ámbito geológico de las Cordilleras Béticas (Fig. 1 y 5). Desde el punto de vista hidrográfico, forma parte de la subcuenca del Alto Genil, dentro de la Demarcación del Guadalquivir de la Agencia Andaluza del Agua (Fig. 2). El área corresponde a una vasta planicie que se extiende a ambos márgenes del río Genil, entre las poblaciones de Genes de la Vega, al Este, y de Láchar, al Oeste. El material acuífero corresponde, en su mayoría, al depósito aluvial del río Genil y de sus afluentes, los ríos Dílar, Monachil, Darro, Cubillas y Velillos.

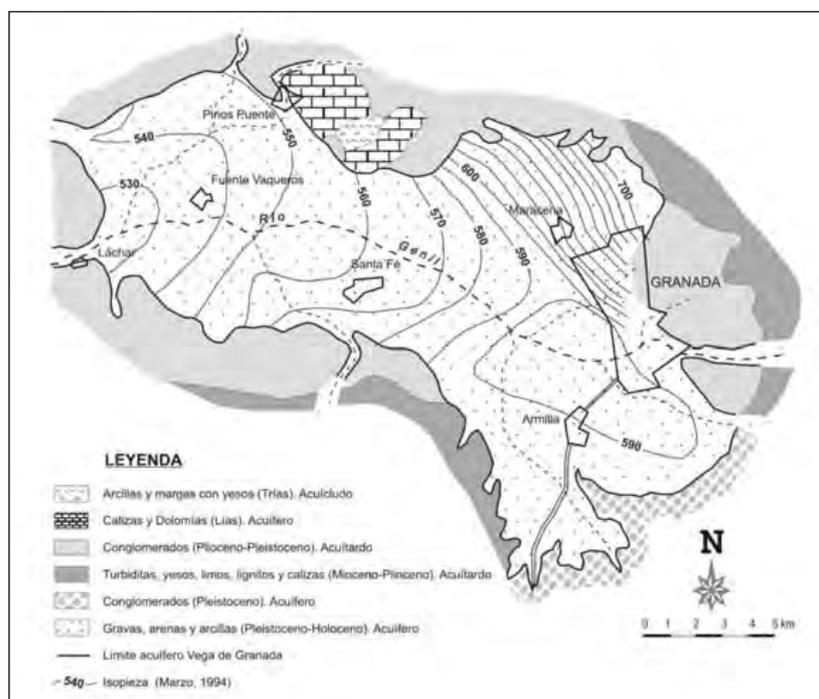


Figura 5. Mapa hidrogeológico del acuífero de la Vega de Granada.

Se trata de uno de los acuíferos más importantes de Andalucía (FAO-IGME, 1972; IGME, 1981, Castillo, 1986a y 1995, e ITGE, 1989), al disponer actualmente de unos recursos del orden de 160 hm³/año (el 75 % de ellos procedentes, directa o indirectamente, de la infiltración de recursos superficiales) y de unas reservas teóricamente drenables de 1.000 hm³. Sus aguas se utilizan mayoritariamente para el regadío, con una explotación neta actual, muy difícil de evaluar, estimada en 50 hm³/año y, en menor medida, para el abastecimiento urbano, el cual se realiza mayoritariamente a partir de recursos superficiales procedentes de Sierra Nevada; no obstante, tras la última gran sequía (1992-95), el acuífero se acondicionó como reservorio de emergencia; en la actualidad es utilizado de forma más rutinaria, como una valiosa fuente alternativa y adicional de suministro en periodos de déficit estival.

Las dimensiones aproximadas del acuífero son de 22 km de longitud (en sentido Este-Oeste) por unos 8 km de anchura promedio, con espesores saturados superiores a 250 m en el sector central. Los límites laterales están constituidos, mayoritariamente, por afloramientos de materiales neógeno-cuaternarios poco permeables del relleno postorogénico de la Depresión de Granada, con la excepción de materiales carbonatados subbéticos del horst tectónico de Sierra Elvira, situados en el borde centro-septentrional, los cuales poseen alta permeabilidad y mantienen una descarga subterránea moderada hacia el acuífero (Fig. 5). El basamento del acuífero lo constituyen materiales neógenos del relleno de la Depresión de Granada.

En el detalle, la estratigrafía del relleno de la Vega de Granada es relativamente compleja, dado el ambiente fluvial en que se generó, caracterizada por continuos cambios de espesores y de facies laterales y verticales, lo que tiene evidentes connotaciones hidrogeológicas.

Los parámetros hidráulicos han sido muy poco estudiados a nivel general. La mayor parte de la información procede de la época FAO. La transmisividad media es del orden de 4.000 a 6.000 m²/día, con valores extremos comprendidos entre 40.000 m²/día (sector centro-oriental) y la decena de m²/día en los bordes del acuífero y en el sector nororiental.

El balance concerniente al sistema acuífero de la Vega de Granada incluye la totalidad de las aportaciones infiltradas (a partir de las precipitaciones y del retorno de aguas de superficie) y las cedidas subterráneamente desde los sistemas limítrofes; por lo que respecta a las salidas, se han considerado las consumidas por evapotranspiración (bombes netos) y los excedentes incorporados otra vez a la red hidrográfica a través de las surgencias naturales del acuífero. En este punto, se llama la atención sobre la duplicación de recursos que esta cuantificación conlleva, ya que las aportaciones superficiales infiltradas ya fueron computadas (como entradas de aguas superficiales) en el balance del sistema conjunto.

La infiltración de las escorrentías de superficie constituye la principal fuente de alimentación del acuífero de la Vega de Granada. Al estar sujeta, no sólo a las oscilaciones climatológicas (precipitaciones y temperaturas), sino también a su regulación previa, esta partida de alimentación es muy variable en el tiempo, no siendo tampoco fácil la estimación de su media interanual, especialmente en las cambiantes condiciones de regulación y gestión del sistema hídrico. Por esta razón, fundamentalmente, los balances realizados sobre este acuífero han aportado cuantificaciones diferentes. En el cuadro 3 se exponen algunas de las estimaciones de recursos obtenidas en trabajos anteriores.

Cuadro 3. Algunas estimaciones de recursos renovables del acuífero de la Vega de Granada. De izquierda a derecha, IGME/GEOMECAICA (1983), Jerez (1983); Castillo (1986); ITGE (1989); Castillo (1994); Castillo y Sánchez (2004). Valores en hm³/año.

RECURSOS	232	155	184	232	187	160
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

La fracción infiltrada a partir de aguas de superficie se estima en 126 hm³/año. La intensa derivación e irrigación de esta vasta vega, así como la aplicación de riegos por inundación, riegos de invierno y "careos" de las parcelas explican el alto volumen de recursos superficiales infiltrados.

Otra partida de alimentación corresponde a la precipitación infiltrada sobre su superficie, lo que realmente podrían considerarse como aportaciones propias; la cuantía de esta asignación se cifra en 24 hm³/año. Una última partida de alimentación sería la procedente de aportaciones laterales ocultas desde los materiales acuífero-acuitardo colindantes, que se estima en, al menos, 10 hm³/año. La relativamente rápida recuperación de niveles en el sector de cabecera, constatada en este trabajo para el conoide de la Ronda Sur, parece dar a entender la existencia de flujos ocultos adicionales, no cuantificados hasta ahora, a través del borde entre las poblaciones de Monachil y Dílar.

Así pues, con todas las deficiencias de información y precauciones expuestas, las entradas me-

días al acuífero de la Vega de Granada se calculan actualmente en 160 hm³/año. A buen seguro, en un futuro, este balance sufrirá notables modificaciones, en correlación con los rápidos cambios de todo tipo (cultivos, regadío, urbanísticos, de gestión del agua, etc.) a que se está viendo sometida el área en cuestión.

Por lo que respecta a la descarga del sistema, la mayor parte de los recursos hídricos del acuífero rebosan actualmente por sus aliviaderos naturales (surgencias de Fuente Vaqueros y a los cauces de los ríos Genil y Cubillas). La descarga por surgencias se localiza en un área de unos 6 km², situada, en condiciones normales en la actualidad, entre las cotas 545 y 525. Muy evidente es el resurgimiento del río Genil aguas abajo de Fuente Vaqueros hasta su confluencia con el río Cubillas (foto 6 en anexos). Más difícil de observar es la descarga a las acequias de riego situadas al Oeste de Fuente Vaqueros, en el pago de los Fogariles, que son drenadas a través de la acequia de las Boquillas, en el río Cubillas, poco antes de su confluencia del Genil. La última cuantificación de esta partida de las salidas fue de 110 hm³/año (Adarve y Castillo, 1999).

El resto de la descarga del acuífero se produciría a través de explotación neta (evapotranspiración) de las aguas captadas para su uso, fundamentalmente, a partir de su extracción desde sondeos y pozos. La cuantificación de la explotación por bombeo es muy compleja, debido al escaso y difícil control que se tiene sobre las extracciones. Existen más de un millar de captaciones, entre pozos y sondeos, muchas de ellas ubicadas dentro de propiedades cercadas e, incluso, de naves y casas.

Sus aguas se utilizan mayoritariamente para el regadío, con una explotación neta actual estimada en 50 hm³/año y, en menor medida, para el abastecimiento urbano, que ha visto incrementadas sus extracciones hasta unos 20 hm³/año en los últimos años de sequía (2008 entre otros). Tras la sequía de 1992-95, con mínimas reservas acumuladas en los embalses de abastecimiento (Canales y Quéntar), se acometieron obras de emergencia, con la realización de los primeros sondeos de la Ronda Sur (foto 3 en anexos), para el abastecimiento de Granada capital y municipios conectados del área metropolitana, actuaciones que se han incrementado recientemente con cuatro sondeos más. Es muy probable que esa batería se aumente en el futuro, ya que la empresa de abastecimiento a Granada capital (EMASAGRA) ha extendido sus servicios a municipios vecinos.

Como es habitual, las extracciones del acuífero han ido aumentando con los años. El primer intento de cuantificación de esta partida lo realizó la FAO (FAO-IGME, 1972) a final de la década de los 60, estimando las extracciones de 10 a 15 hm³/año. Jerez (1983) cifró estas extracciones para el año 1980-81 en 20 hm³. En el modelo matemático realizado por GEOMECAICA, para el IGME, en 1983, se estimaron las extracciones netas en unos 32 hm³/año. El ITGE, en 1989, calculó los recursos subterráneos brutos explotados en 54 hm³/año. Castillo (1994) cifraba los consumos netos en unos 57 hm³/año. En estos últimos años es posible que la explotación se haya desacelerado e incluso disminuido, al haberse incrementado las aportaciones superficiales con la entrada en funcionamiento del trasvase del Colomera-Cubillas, al tiempo que las rentabilidades y superficies de regadío pierden continuamente peso en el área; en estos momentos, estimamos que la explotación neta del acuífero es de 50 hm³/año.

En el cuadro 4 se exponen las cifras comentadas para el balance del acuífero de la Vega de Granada; complementariamente, en la figura 6 se presenta un esquema del mismo balance.

ENTRADAS

Infiltración aguas superficiales	126 hm ³ /a
Infiltración lluvia útil	24 "
Aportaciones subterráneas	10 "
Total recursos	160 hm³/año

SALIDAS

Excedentes (emergencias)	110 hm ³ /a
Consumos netos	50 "
Total recursos	160 hm³/año

Cuadro 4. Desglose del balance hídrico del acuífero de la Vega de Granada (aguas subterráneas).

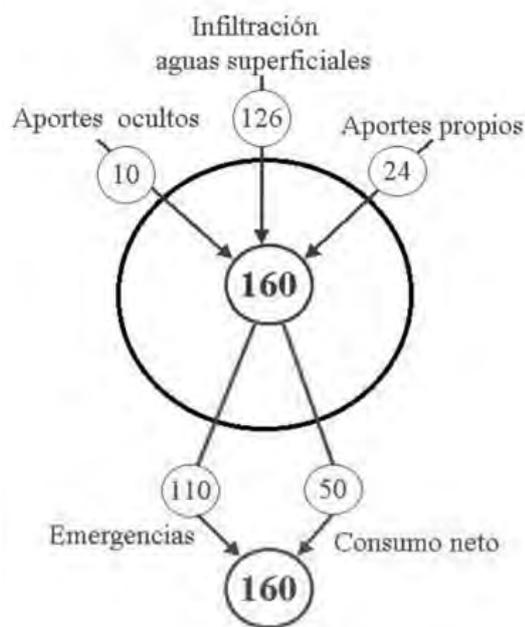


Figura 6. Balance hídrico del acuífero de la Vega de Granada (aguas subterráneas; Castillo y Sánchez 2004).

I.5. Sistema hídrico conjunto de la Vega de Granada

En este apartado se expone el balance hídrico del sistema de la Vega de Granada, considerando tanto las aportaciones superficiales como las subterráneas, y todo ello en base a la serie tipo 1970-2002 completada para todas las subcuencas del área estudiada. Este balance es ligeramente inferior a otros obtenidos con anterioridad, posiblemente por haber utilizado preferiblemente las aportaciones aforadas a los embalses, frente a las más elevadas ofrecidas por sus correspondientes estaciones fluviales. Como puede observarse, el sistema es excedentario en su conjunto, con una explotación neta de 159 hm³/a y unas descargas medias anuales de 232 hm³/a. Los recursos excedentes son regulados aguas abajo por el embalse de Iznájar, cuya capacidad de regulación supera a los recursos medios anuales (embalse deficitario). En el cuadro 5 y figura 7 se exponen las cifras del balance, obtenido para el período 1970-02.

Cuadro 5. Balance hídrico, aguas superficiales-subterráneas, del sistema de la Vega de Granada.

ENTRADAS	
Aportaciones superficiales	327 hm ³ /a
Aportaciones subterráneas	64 "
Total recursos del sistema	391 hm³/año
<hr/>	
SALIDAS	
Excedentes del sistema	232 hm ³ /a
Consumos netos	159 "
Total recursos del sistema	391 hm³/año

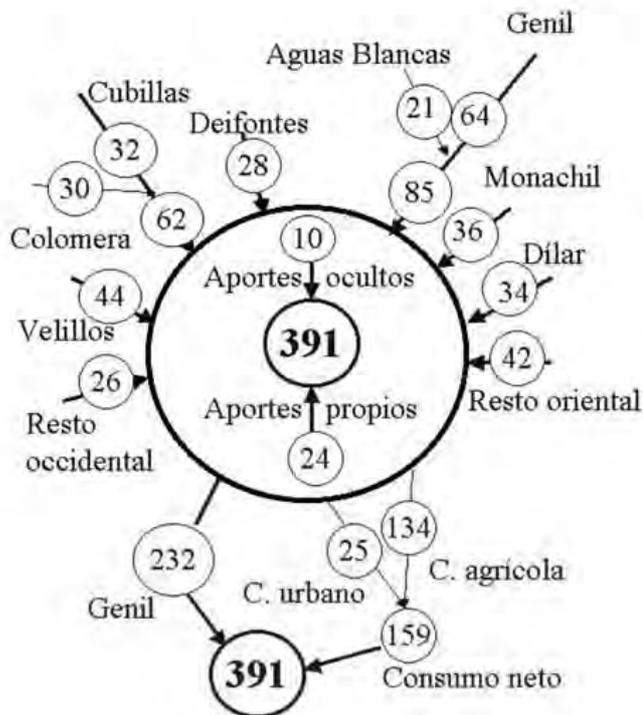


Figura 7. Balance hídrico del sistema hídrico conjunto (aguas superficiales-subterráneas) de la Vega de Granada (datos de aportación para el periodo 1970-2002, excepto para Genil en Puente Castilla, 1971-1995) (Castillo y Sánchez 2004).

II. EVOLUCIÓN DE NIVELES EN EL ACUÍFERO DE LA VEGA DE GRANADA

Para mostrar la evolución temporal del nivel piezométrico en el acuífero se han representado gráficamente los datos disponibles de varios puntos de la red de control piezométrico, seleccionados por su localización y mayor serie temporal. Asimismo se ha representado la evolución de caudales (en gran parte de origen subterráneo) medidos en la estación de aforos del río Genil en Puente Castilla, aguas abajo del acuífero de la Vega de Granada.

II.1. Series históricas de aforos del río Genil en la estación de Puente Castilla

El análisis de la descarga del río Genil, en la estación de aforos de Puente Castilla (nº 80 de la CHG), aguas abajo del acuífero de la Vega de Granada, es trascendental para conocer el régimen y evolución de los caudales drenados por el citado acuífero (foto 2 en anexos). En concreto, se ha podido trabajar con los caudales medios diarios medidos por limnógrafo desde el 01-10-1970 hasta el 27-10-2009 (con algunas lagunas de información), datos cedidos por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Lamentablemente, no ha podido ser incluido en el análisis el último año hidrológico (2009/10), al no haber sido procesados aún los datos correspondientes. Del mismo modo, se ha trabajado con la serie de aforos manuales mensuales realizados entre octubre de 1970 y enero de 2009.

A partir de toda la información disponible (aforos mensuales y diarios) se han elaborado los hidrogramas que se muestran en la figura 8 (Castillo y Robles-Arenas, 2008). De la serie de cauda-

les diarios se ha obtenido una aportación total para el periodo 1970/71-2008/09 de 200 hm³/año. La evolución obtenida permite observar diferentes ciclos a escala interanual, con rangos de aproximadamente 5 a 6 años de duración, que como era de esperar coinciden con los ciclos reconocidos en los valores de precipitación media anual. Las aportaciones medias extremas por ciclos oscilan entre 268 y 79 hm³/año. Los valores más bajos de caudal se registraron entre 1980 y 1982 y entre 1988 y 1995, coincidiendo con sendos periodos de sequía y con operaciones de regulación del embalse de Canales, situado aguas arriba (capacidad de embalse de 71 hm³).

Después de una serie de tendencia decreciente de caudales entre 1970 y 1995, la ocurrencia de años de pluviometría superior a la media, entre 1996 y 2003 (con dos años muy húmedos 1995/96 y 1996/97), tuvo una influencia directa sobre el repunte de las aportaciones.

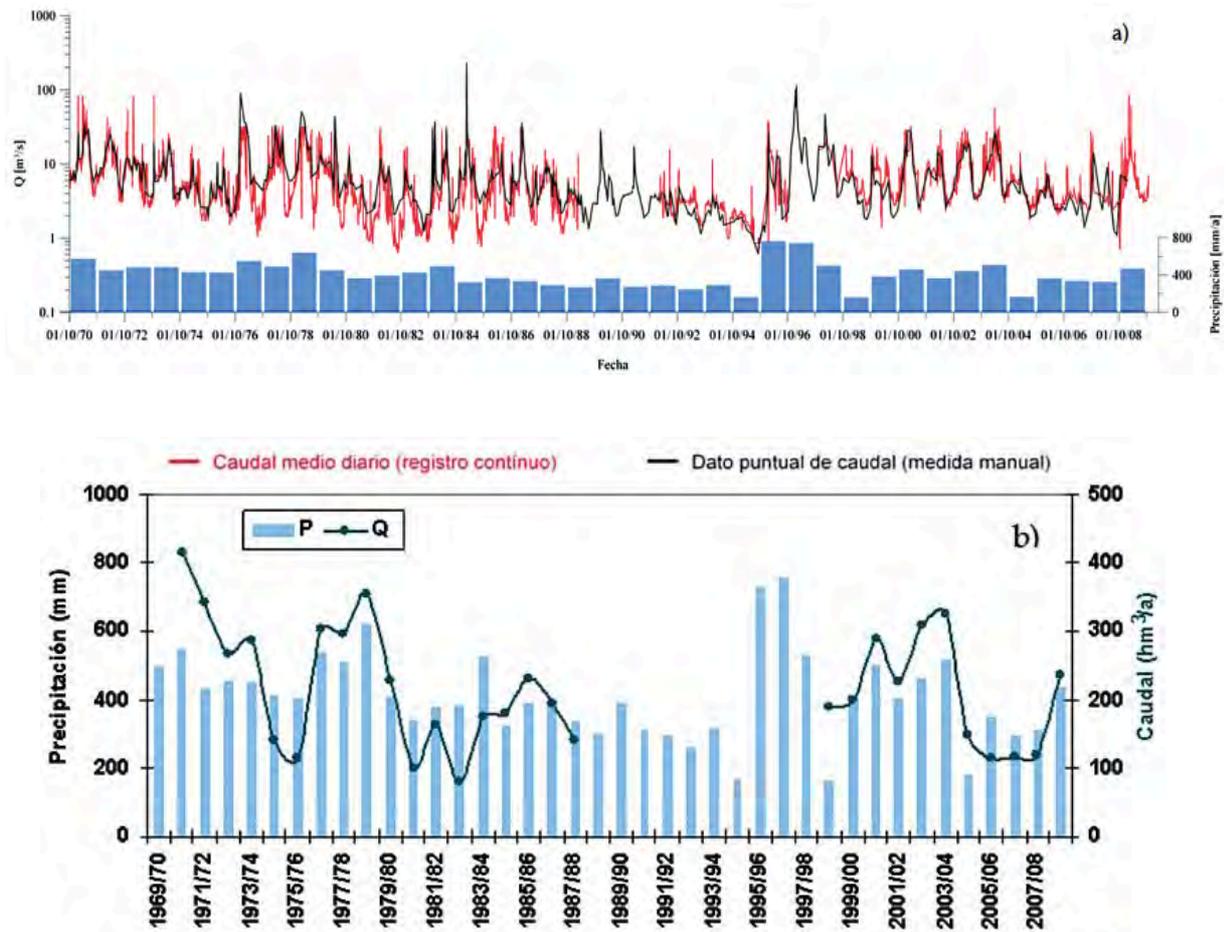


Figura 8. Caudal de la estación de aforos de Puente Castilla, junto a la precipitación registrada en Granada (Agencia Andaluza del Agua); a) caudal diario (registro continuo) y caudal medido mensual (aforos manuales); b) caudal anual

Los máximos de caudal se registran en los meses de enero a mayo, con puntas en marzo, mientras que a partir de mayo y hasta agosto se evidencia un agotamiento, con mínimo caudal en agosto, a partir del cual nuevamente la recuperación vuelve a ser apreciable (especialmente en octubre), posiblemente por la llegada de las primeras descargas procedentes de retornos de riego estivales, antes de la época de precipitaciones, unido al cese de los bombeos de riego.

Teniendo en cuenta los caudales de agosto-septiembre, procedentes en su totalidad de descargas naturales del acuífero de la Vega de Granada, y trasladada esa aportación base al resto de meses del año, la descarga subterránea drenada sería, como mínimo, de 80 hm³/año, el 40% de la aportación total aforada en el periodo estudiado, que fue, como se ha comentado, de 200 hm³/año.

Adarve y Castillo (1999) obtuvieron para la serie 1970-96 un valor de descarga subterránea media de 110 hm³/año, y unas cifras de coeficiente de agotamiento de $4,6 \times 10^{-3}$ días⁻¹, indicativo de la gran regulación que ejerce el acuífero sobre el caudal del río. De ahí la relación tan estrecha (y rápida) existente entre los bombeos (extracciones en general) y los caudales drenados por el río Genil, que podrían llegar a ser prácticamente nulos en estiaje en caso de una hipotética sobreexplotación futura del acuífero.

II.2. Series históricas de piezometría

II.2.1. Evoluciones temporales

Para conocer la evolución temporal del nivel piezométrico en el acuífero de la Vega se han representado gráficamente los datos disponibles, procedentes de diversas redes de control, inicialmente medidas por el IGME y más tarde por la CHG y la Agencia Andaluza del Agua. De todos los piezómetros históricos, se han seleccionado tres que poseen una serie temporal de datos muy extensa y que al mismo tiempo se sitúan próximos a la línea de flujo principal del acuífero (Fig. 9).

En la figura 9 se ha representado (después de un complejo y arduo) trabajo de recopilación y tratamiento de datos) la evolución piezométrica de 40 años de registro en los tres piezómetros citados (Castillo, 2005, y Castillo y otros, 2008). En general, se puede comprobar que los descensos son moderados en la mitad occidental, hasta la transversal de la población de Santa Fe (zona de descarga), donde además presentan una mayor modulación (piezómetro C). Más intensos son los descensos del nivel piezométrico del sector de alimentación del acuífero, en el tercio oriental del mismo (piezómetros A y B).

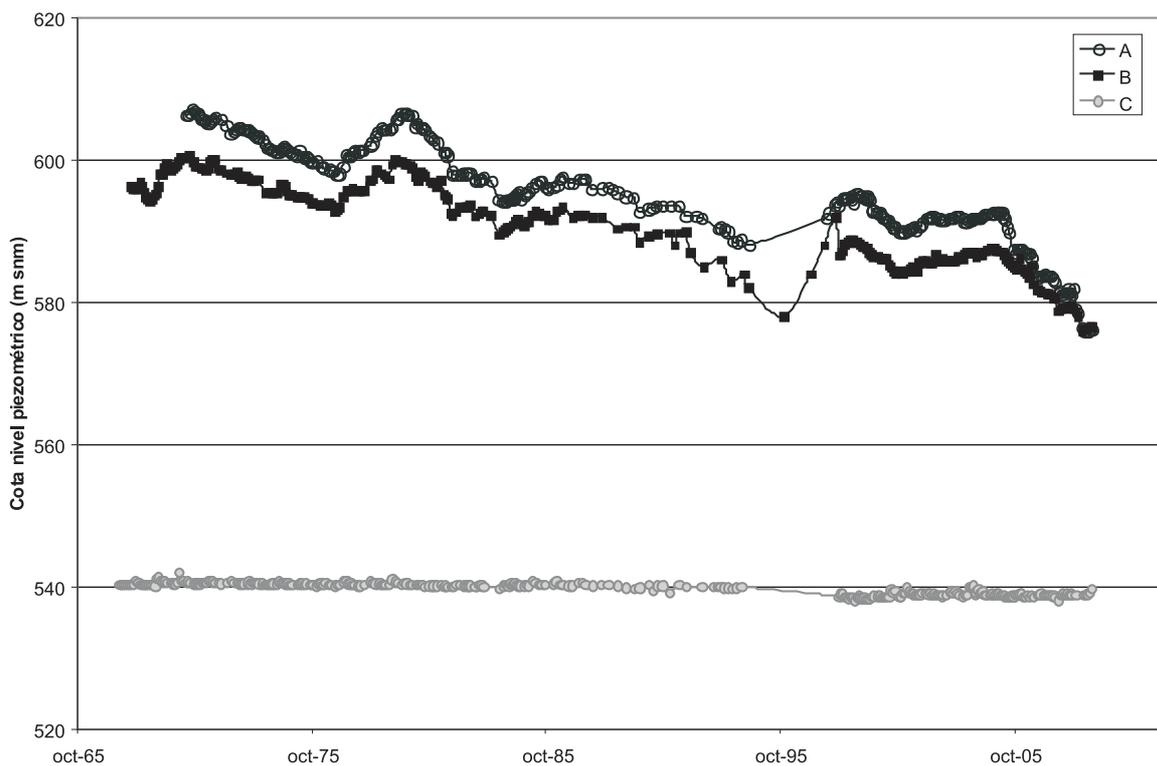
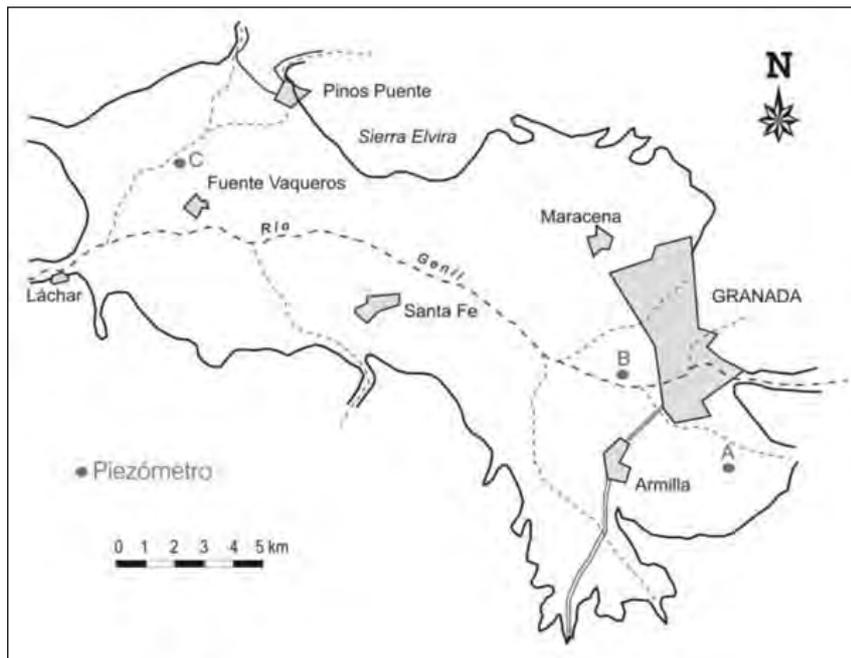


Figura 9. Evolución del nivel en tres piezómetros representativos (A, B y C, ver localización aproximada en mapa superior) de la red de control histórica (1968-2008). La serie de datos A pertenece realmente a los de dos piezómetros próximos, restituidos con la serie más larga.

En todos los casos analizados, el comportamiento, a escala intranual, es bastante regular. En general, las menores profundidades de nivel piezométrico (aguas altas) corresponden, mayoritariamente, a los meses de marzo-mayo, y las mayores profundidades a los de julio-septiembre. Estas variaciones cíclicas intranuales responden, bastante bien, a los periodos de explotación y recarga, todos ellos de distinta intensidad y duración, según las condiciones meteorológicas del año en cuestión.

En la figura 10 se ha representado los datos de nivel de los piezómetros mencionados, junto con la descarga del río Genil, lo que permite constatar cierto paralelismo, que evidencia la relación existente entre las variaciones de nivel piezométrico y las del caudal del río Genil (registradas en la estación de aforos de Puente Castilla). En cualquier caso, se comprueba que el acuífero presenta sensibles recuperaciones de nivel en años húmedos, lo que evidencia la excelente conexión y transmisividad de los flujos superficiales infiltrados, y el buen comportamiento regulador del mismo.

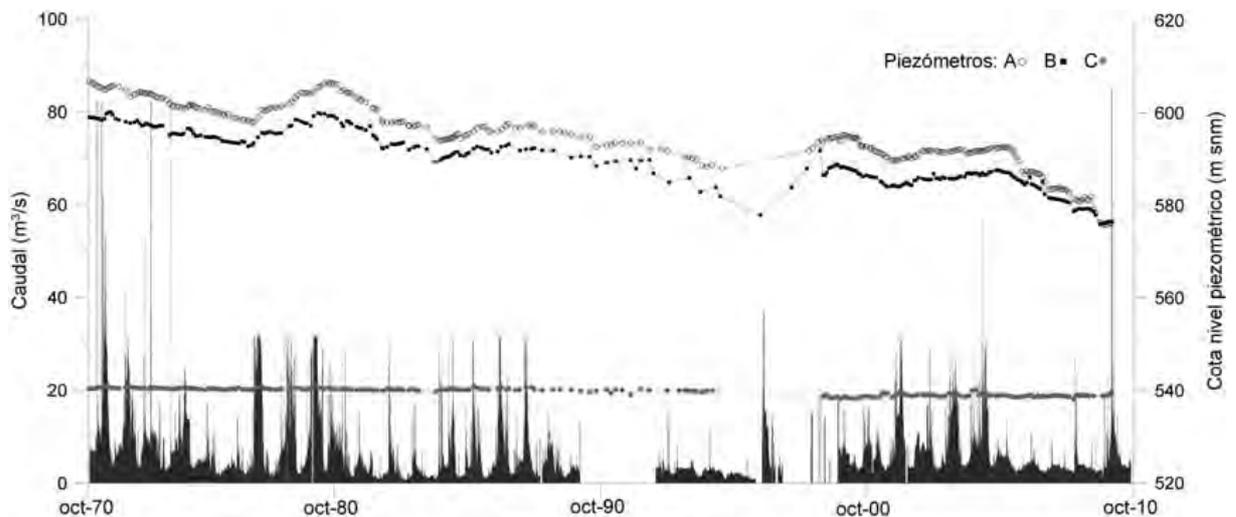
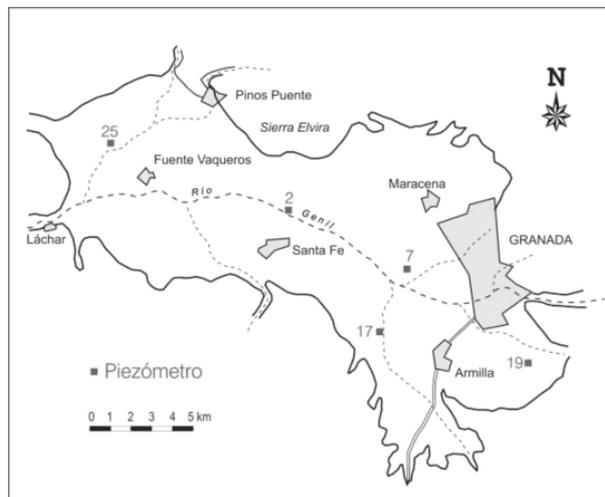
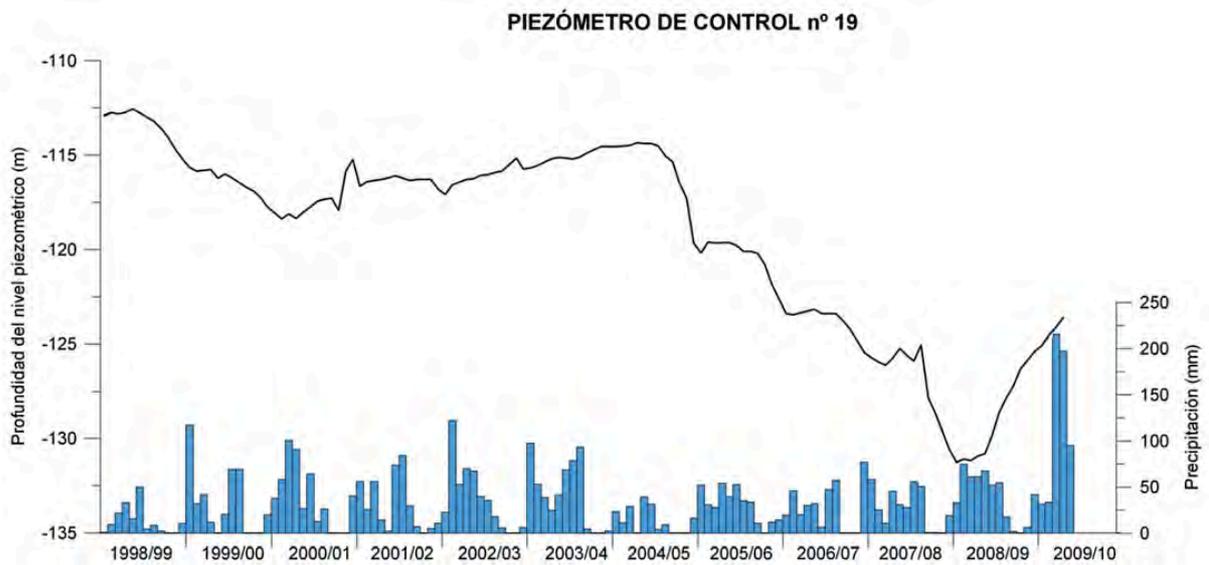
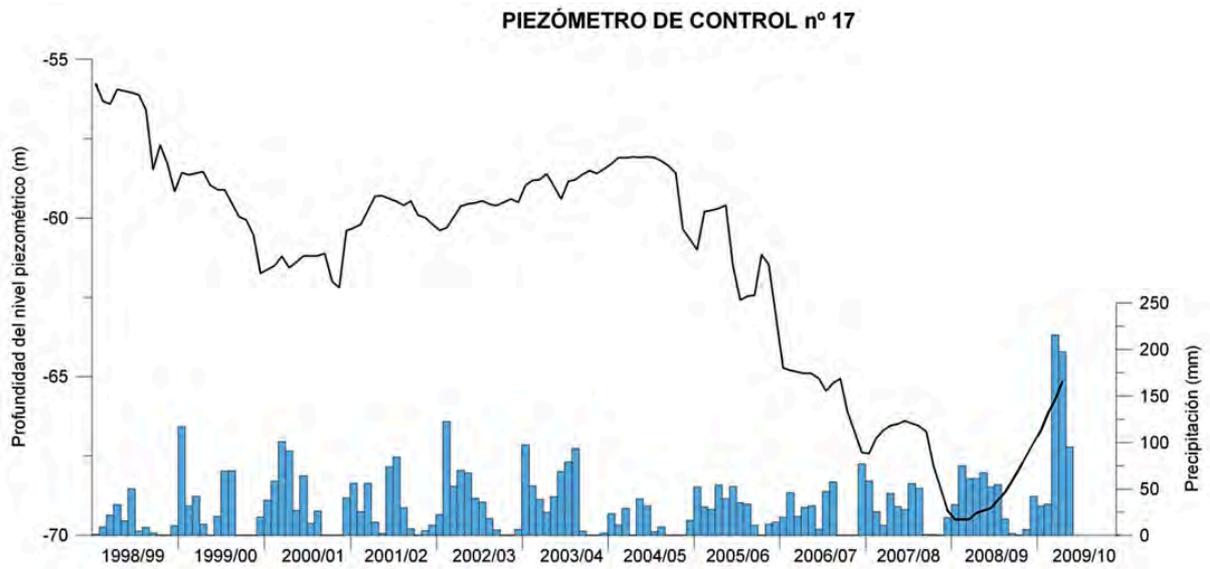


Figura 10. Evolución del nivel en tres piezómetros (A, B y C, ver localización aproximada en la figura 9) y del caudal del río Genil en la estación de aforos de Puente Castilla, para el periodo 1970-2008 (hay períodos sin datos).







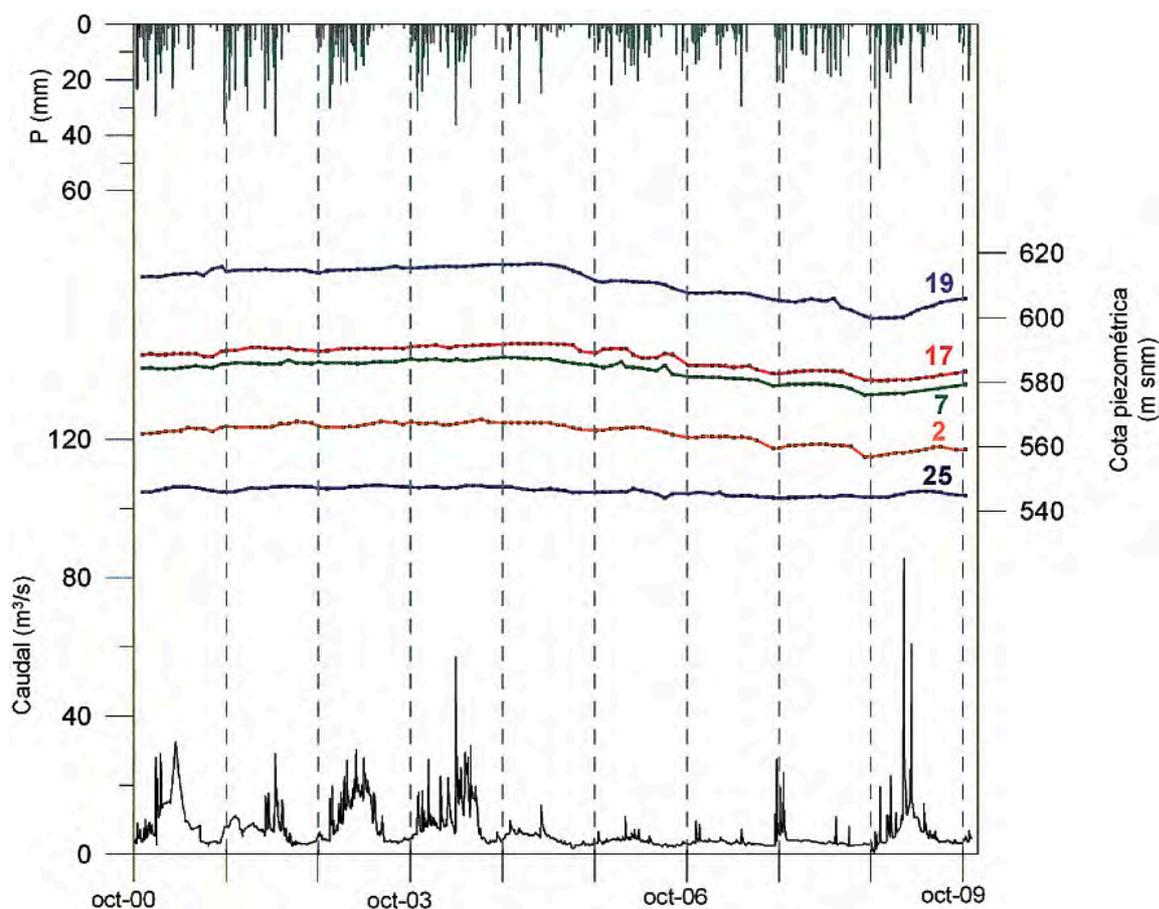


Figura 11 (páginas anteriores). Evolución del nivel en cinco piezómetros representativos (2, 7, 17, 19 y 25, ver localización en mapa superior) de la red de control histórica (desde octubre de 1998 hasta enero de 2010), junto con la precipitación mensual del mismo período.

Los gráficos de nivel mensual de varios piezómetros (localización en Fig. 11) muestran que a partir de los años hidrológicos 2003/04 y 2004/05 se produce un generalizado aumento de la profundidad del nivel, hasta el año 2008-09, en el que se observa una tendencia ascendente relacionada con un incremento en las precipitaciones, que en el año 2009-10 fueron del orden de 700 mm, cuando la media anual es de 420 mm.

Los descensos acumulados desde el año 1998/99 oscilan entre 16 m (zona oriental) y 3 m (zona occidental), mientras que los últimos ascensos son de casi 6 m en el sector de cabecera y de 0,70 m en las proximidades de la zona de descarga. Al abatimiento del nivel piezométrico acumulado se le suman los descensos provocados por los intensos bombeos realizados entre febrero y septiembre de 2008 desde los sondeos de la Ronda Sur para el abastecimiento de la ciudad de Granada y área metropolitana.

En la figura 12 se muestra una gráfica que relaciona los ascensos de nivel con la distancia a la zona de descarga del acuífero, obteniéndose una relación lineal del año 2008/09 de 0,2 m/km, con un ajuste del 78 %; si eliminamos los dos puntos que están afectados por bombeos próximos, la tasa de ascenso es de 0,23 con un 99 % de ajuste.

Considerando una superficie del acuífero de 200 km² y una porosidad eficaz media del 5 %, se obtiene que el volumen de agua almacenado en función de estos datos de ascenso de nivel piezométrico se aproximó a 30 hm³ para el año hidrológico 2008/09.

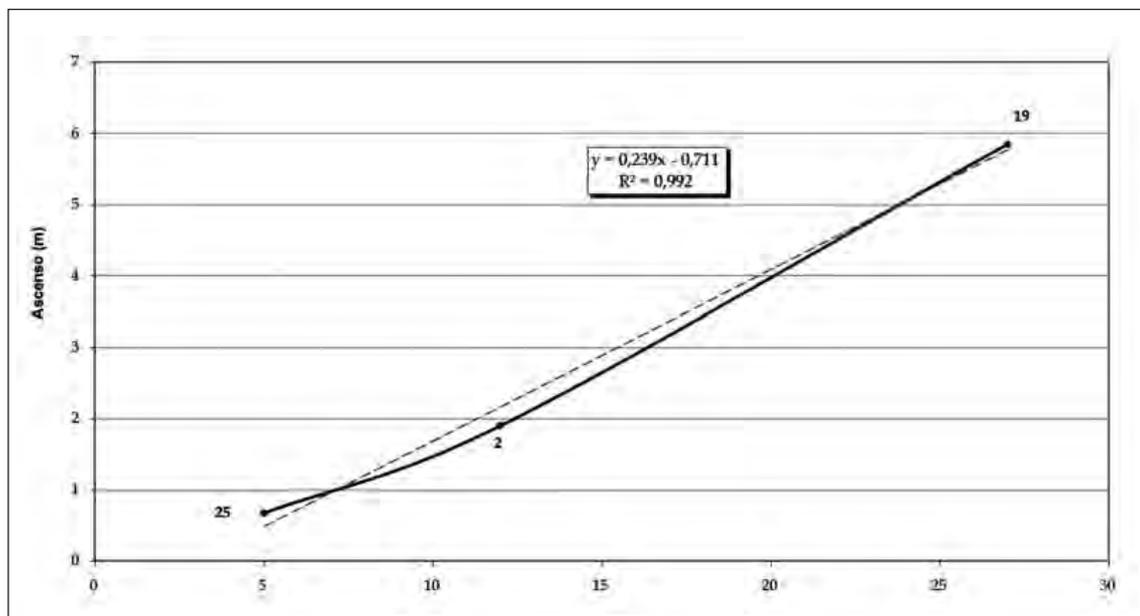
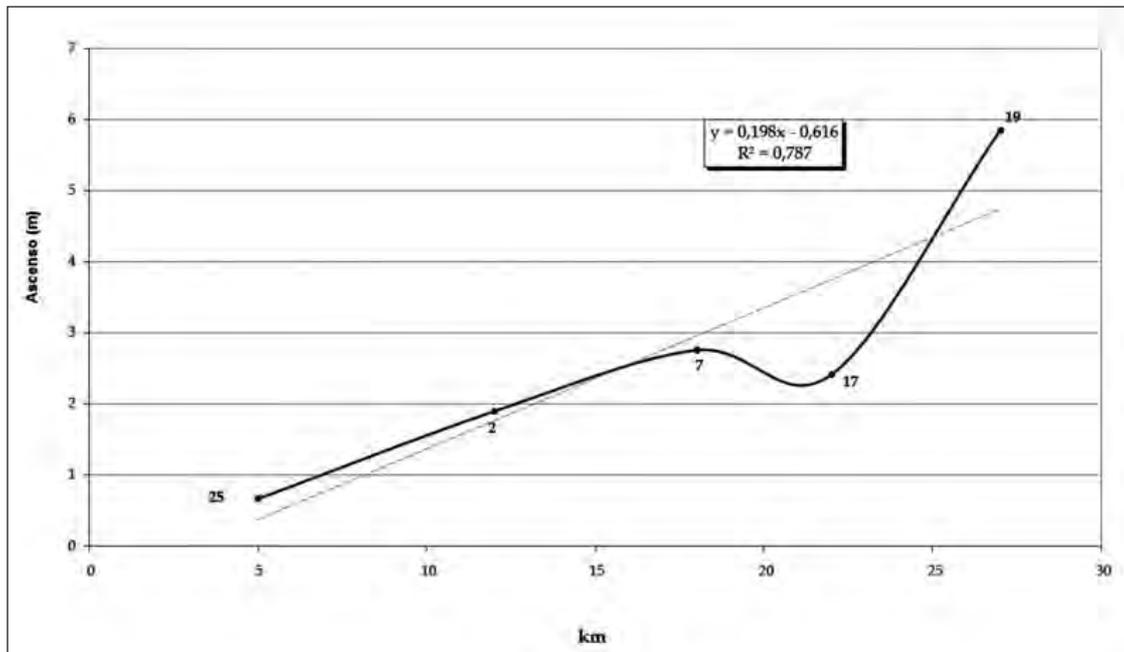


Figura 12. Ascensos constatados para el año hidrológico 2008/09 en piezómetros de la CHG (localización en Fig. 11), en función de su distancia a la zona de descarga del acuífero, siguiendo la línea de flujo principal.

II.2.2. Evoluciones espacio-temporales

En la figura 13 se han reproducido, a la misma escala, seis mapas piezométricos históricos y representativos del acuífero de la Vega de Granada, realizados para los años 1967, 1976, 1983, 1989, 1994 y 1997 (Castillo, 2005, y Castillo y otros, 2008). La morfología de la superficie piezométrica del primer mapa realizado para noviembre de 1967, describe muy bien el funcionamiento hidrogeológico natural del acuífero (y de sus bordes), con escasas extracciones, mostrando las pautas que se repetirán, con las lógicas alteraciones por recarga y explotación, en los posteriores mapas piezométricos.

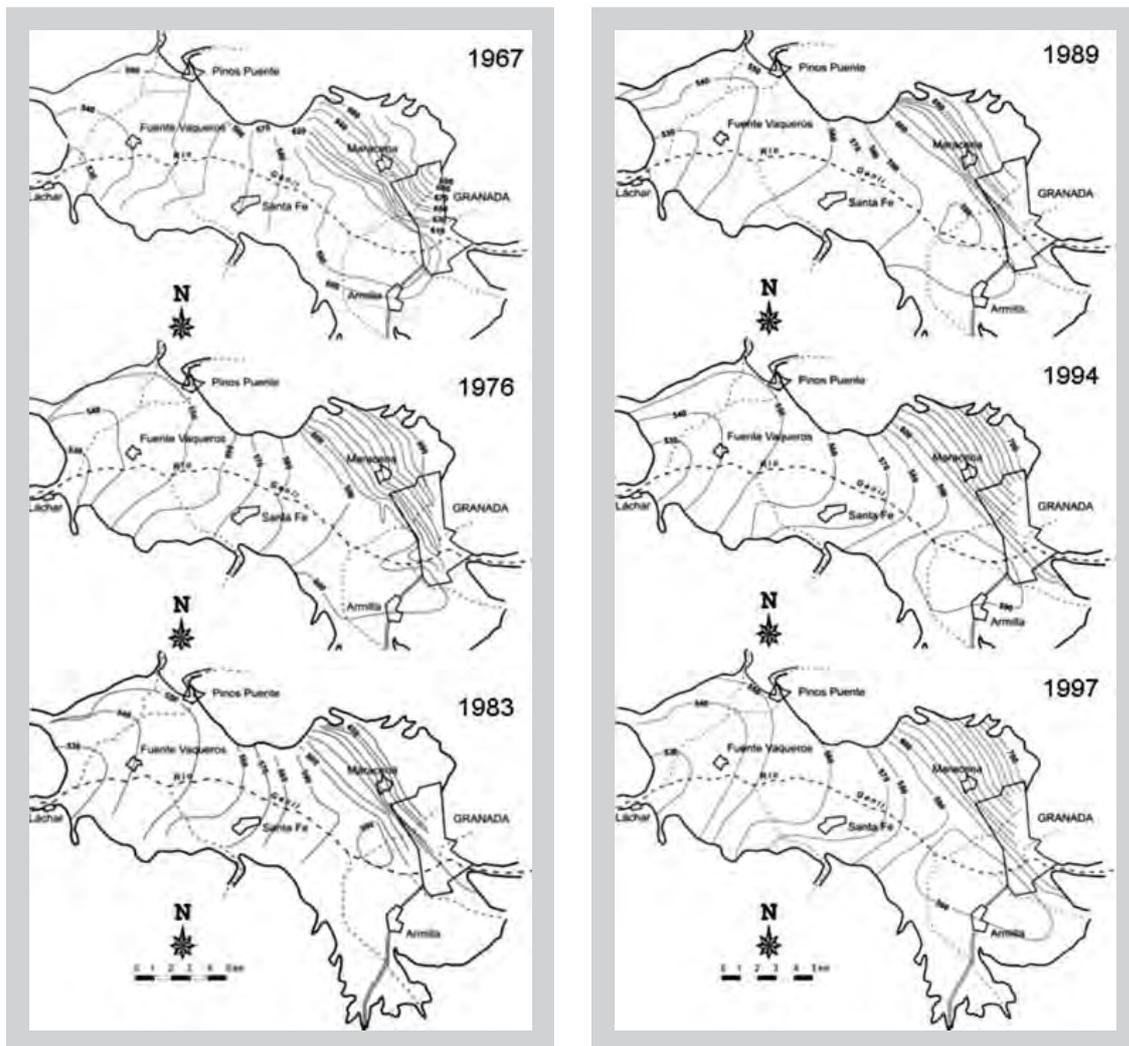


Figura 13. Mapas piezométricos históricos del acuífero de la Vega de Granada.

Como puede observarse, la morfología de la superficie piezométrica es relativamente similar en todos los mapas, si bien se detecta un retroceso paralelo con los años en el trazado de las isolíneas. Ello refleja un progresivo descenso de niveles, en correlación, como se ha comentado, con el paulatino incremento de las extracciones por bombeo, así como también con una disminución de aportaciones desde las aguas superficiales. En el mapa de 1983 (septiembre) se detecta por primera vez un

conoide de depresión aguas arriba del Puente de los Vados, en un sector donde se concentran (por sus excelentes condiciones hidráulicas) varios sondeos de gran caudal, conoide que ya se mantiene y agranda sensiblemente en mapas posteriores, en los que toma forma alargada de dirección NW-SE. Mayores y más actualizadas precisiones se darán al exponer el mapa realizado para este trabajo, con datos del verano-otoño de 2008.

En cualquier caso, la superficie piezométrica y topográfica están relativamente próximas en la mitad occidental del acuífero, entre las poblaciones de Santa Fe y Láchar, mientras que en la mitad oriental el terreno se sitúa, por su mayor pendiente, a una cota bastante superior.

II.2.3. Evoluciones de la piezometría y los bombeos en los sondeos de la Ronda Sur

La batería de sondeos de la "Ronda Sur"

Como ya se ha comentado, el área metropolitana de Granada se viene abasteciendo, en periodos de necesidad, y desde el año 1995, de una batería de sondeos que captan al acuífero de la Vega de Granada en su zona de cabecera. Esta batería de sondeos se conoce como de la Ronda Sur, y actualmente (noviembre de 2010) cuenta con 15 perforaciones, de las cuales 13 son potencialmente operativas. En la figura 14 se muestra la distribución espacial de todas ellas (foto 3 en anexos).

Una primera actuación se llevó a cabo en plena sequía en el año 1995, cuando se perforaron 10 sondeos en el "Pago del Zute", término municipal de Granada, 8 de ellos a la derecha del río Monachil y los dos restantes a la izquierda. Los sondeos se realizaron a rotación con circulación inversa, a un diámetro de 660 mm, con un emboquillado de tubería de 700 mm y cementado el anular. La tubería definitiva fue de 450 mm de diámetro y de 6 mm de espesor, con filtro de puentecillo y empaque de gravas en la zona saturada.



Figura 14. Localización de los sondeos de la batería de abastecimiento urbano de la Ronda Sur (noviembre de 2010).

Una segunda fase de perforaciones fue llevada a cabo en 2007 (GAEMO S.L., 2007), en la que se ejecutaron cinco sondeos adicionales, próximos a los de 1995; dos de ellos a la derecha del río Monachil y 3 a la izquierda. Se eligió el mismo método de perforación que en 1995, rotación por circulación inversa con lodo bentonítico, con diámetro de perforación de 660 m. La entubación definitiva fue de 450 mm de diámetro, y se aumentó el diámetro de la pared a 8 mm de espesor hasta los 99 m, y a 10 mm hasta el final, con filtro de puentecillo y tapón de fondo con tapa soldada. El empaque de gravas de la zona saturada fue igualmente de grava silíceas.

Los sondeos 3 y 4, realizados en 1995, se encuentran fuera de servicio, y habiendo sido sustituidos por los números 3a y 11.

Evoluciones de la piezometría y los bombeos

En estos sondeos, la empresa EMASAGRA viene llevando a cabo diferentes controles, tanto de niveles como de volúmenes bombeados. Con la información piezométrica facilitada, se ha estudiado la evolución mensual en la mayor parte de los sondeos desde enero de 2006 hasta octubre 2010. A partir de los datos de nivel se ha elaborado la gráfica que se muestra en la figura 11.

Los datos de los periodos en los que se realizaban bombeos se han considerado semi-estáticos, ya que el nivel no llega a recuperarse completamente entre bombeos cuando éstos son diarios.

En la figura 15 se muestra la evolución de la profundidad del nivel piezométrico en cada uno de los sondeos de la Ronda Sur de los que se ha tenido información, junto con los volúmenes extraídos mensualmente en cada uno de ellos, para el periodo comprendido entre octubre de 2007 y octubre de 2010. Se refleja un importante intervalo sin extracciones, debido a que las demandas eran satisfechas por recursos hídricos superficiales, de mejor calidad y menor coste de puesta en servicio.

De los datos analizados se observa que, aún manteniéndose el volumen de explotación o incluso disminuyéndolo, la tendencia del nivel piezométrico es al descenso hasta septiembre de 2008, con la excepción del sondeo 2, en el que el nivel mínimo se alcanza en noviembre de 2008. Ello indica que, transcurrido el periodo inicial de ajuste hidrodinámico, la tasa de extracción ha sido superior a los aportes del acuífero.

Para conocer con mayor detalle la evolución del nivel piezométrico en la batería de sondeos de la Ronda Sur durante el periodo octubre de 2007-enero 2009, se han representado los datos procedentes del registro en continuo que lleva a cabo EMASAGRA para los sondeos, 1, 5 y 10 (localizados aproximadamente en ambos extremos y centro de la batería (situación en Fig. 14). Dada la ingente masa de información acumulada por esos registros, cuyo software no permitía una extracción adecuada, se solicitó a EMASAGRA los datos máximos y mínimos de nivel de cada miércoles del periodo citado, considerados a todos los efectos como representativos de la serie completa. En la figura 16 se exponen diferentes gráficos realizados con dichos valores. En ellos se observa que para el sondeo 1 no es tan clara la recuperación a partir de septiembre de 2008, como ya apuntaban los datos de nivel semi-estático de la figura 15, si bien los datos de profundidad máxima experimentan un ascenso a partir del dato del día 29/10/2008. En el caso del sondeo 5, la figura 16 corrobora el ascenso del nivel piezométrico a partir del 24/09/2008 para la profundidad máxima y del 01/10/2008 para la mínima.

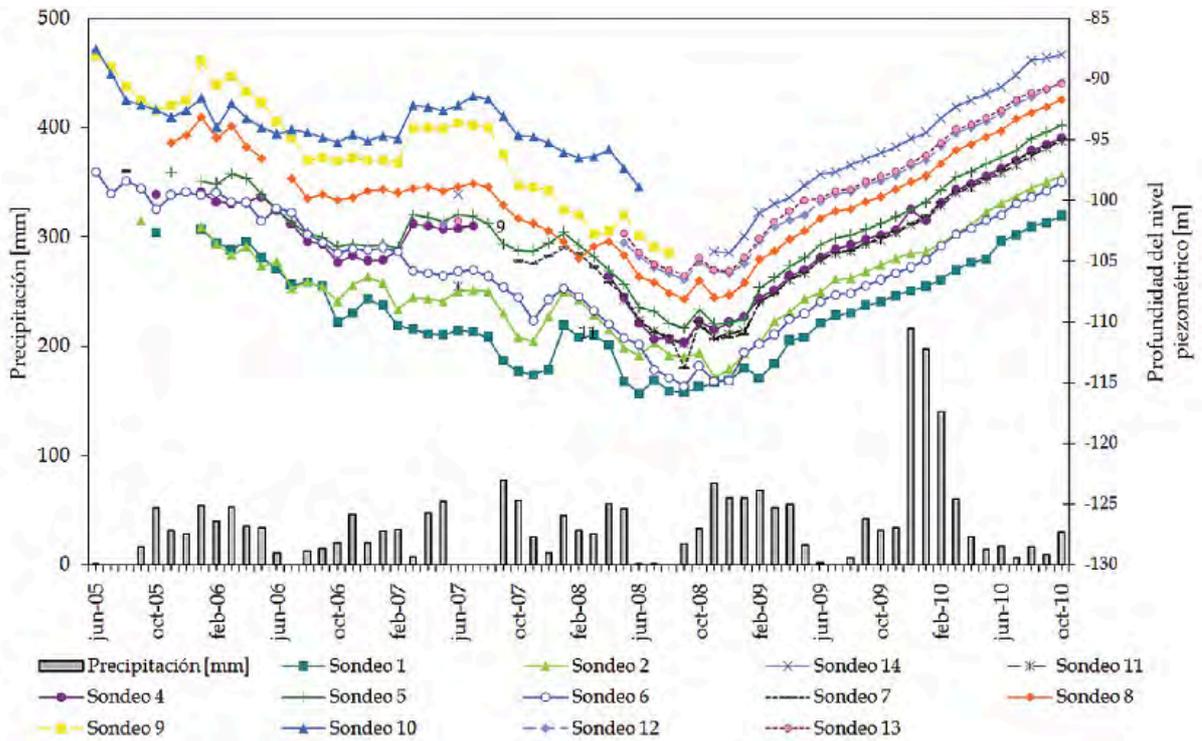
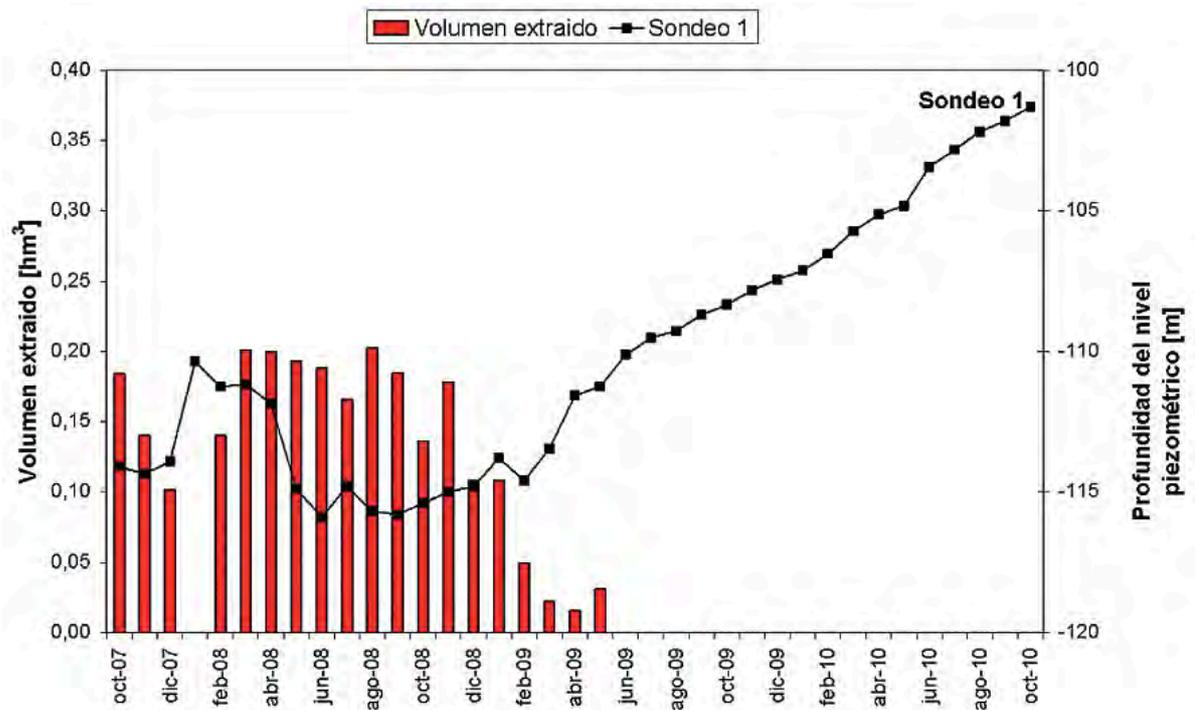
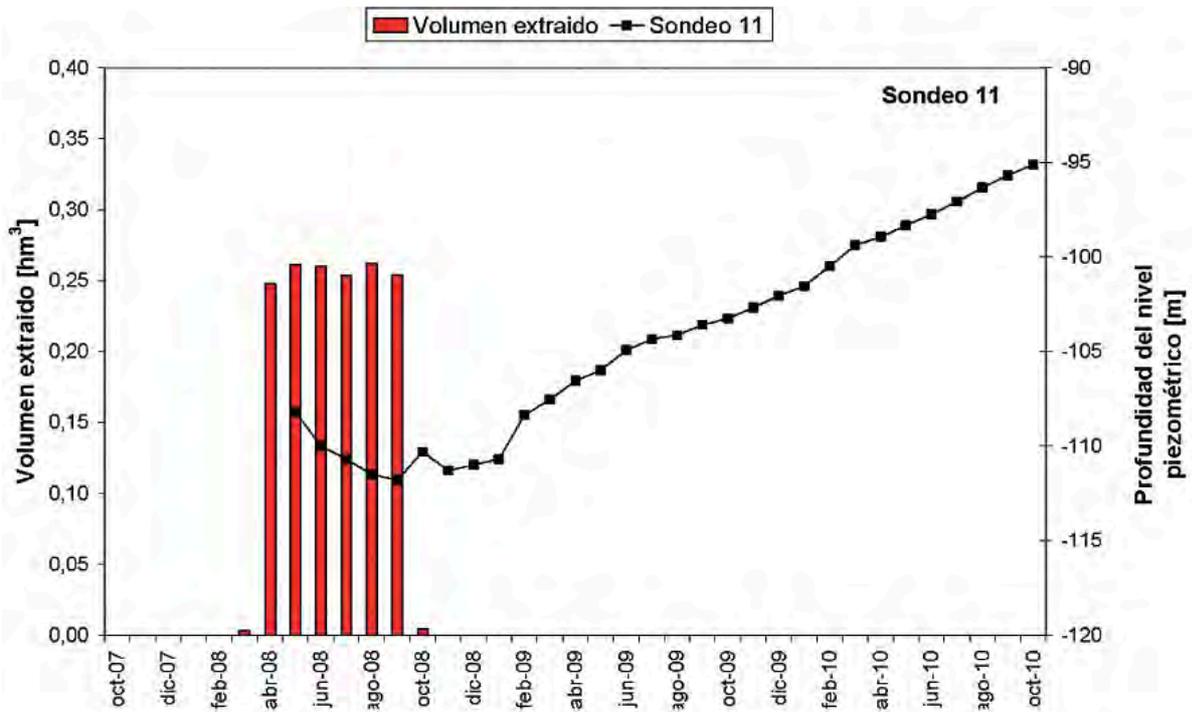
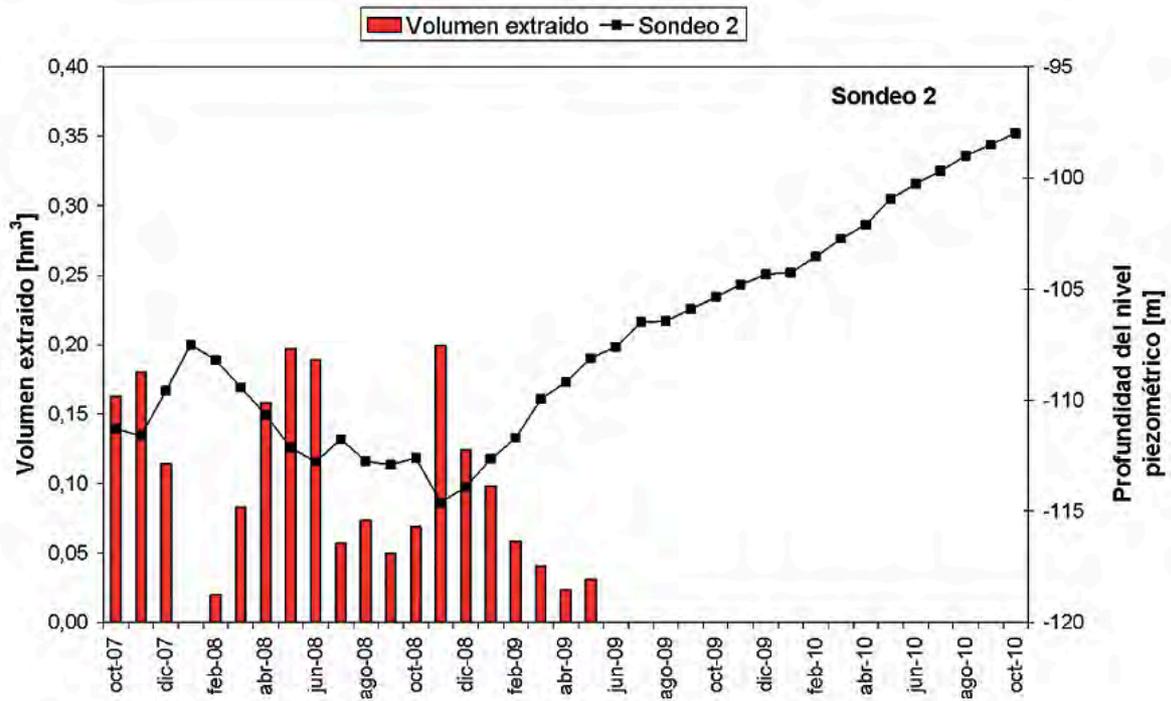
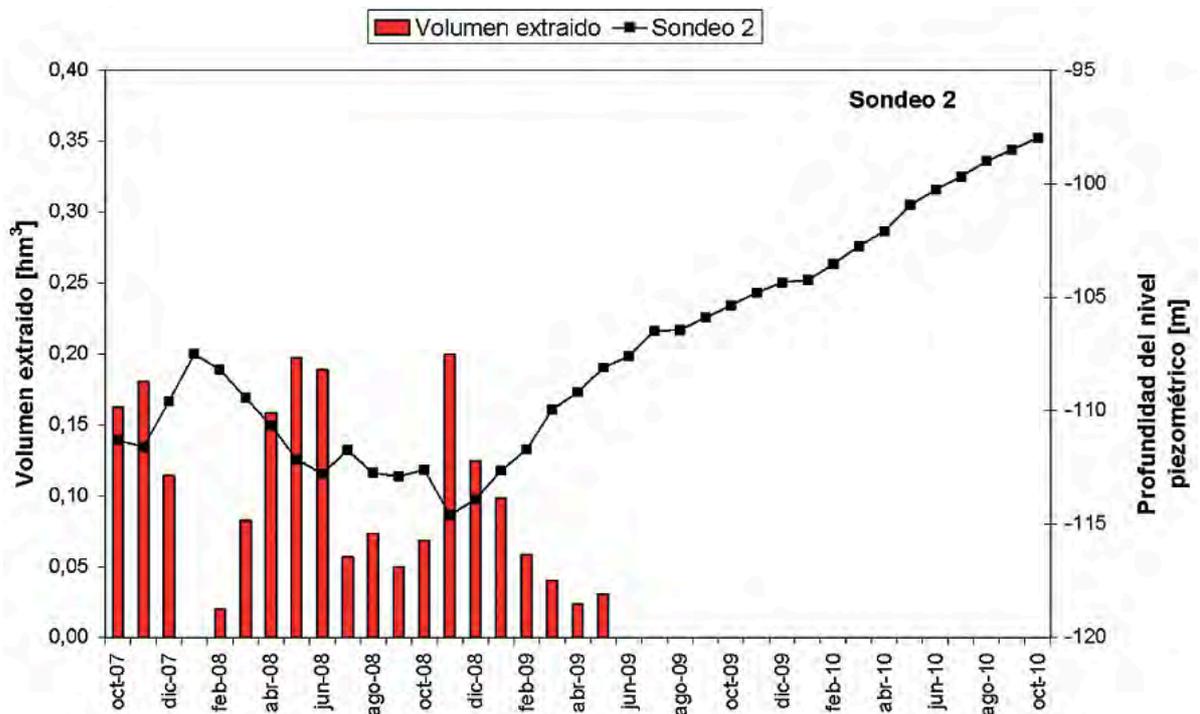
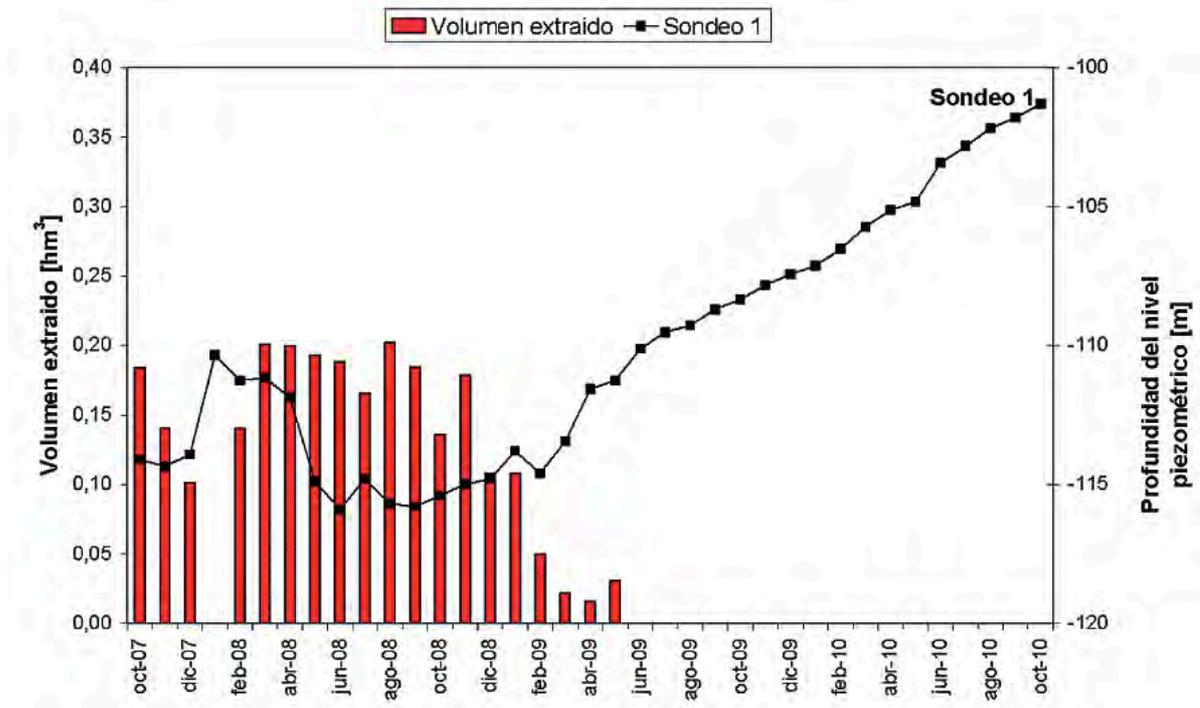
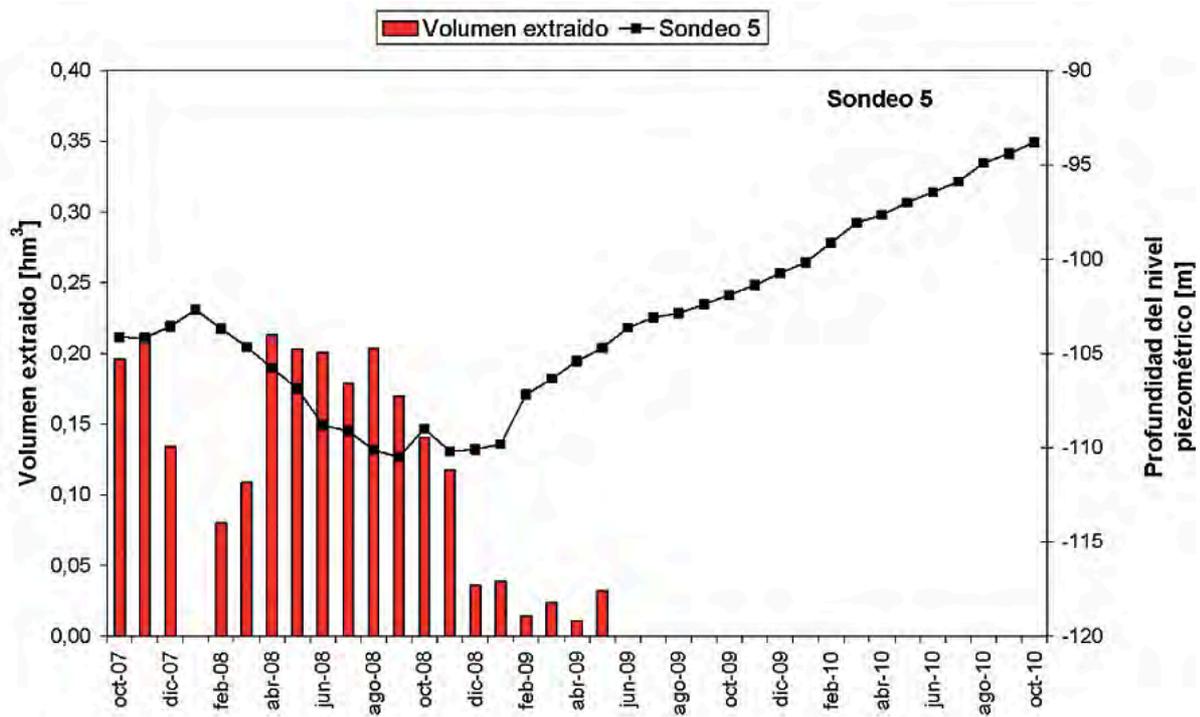
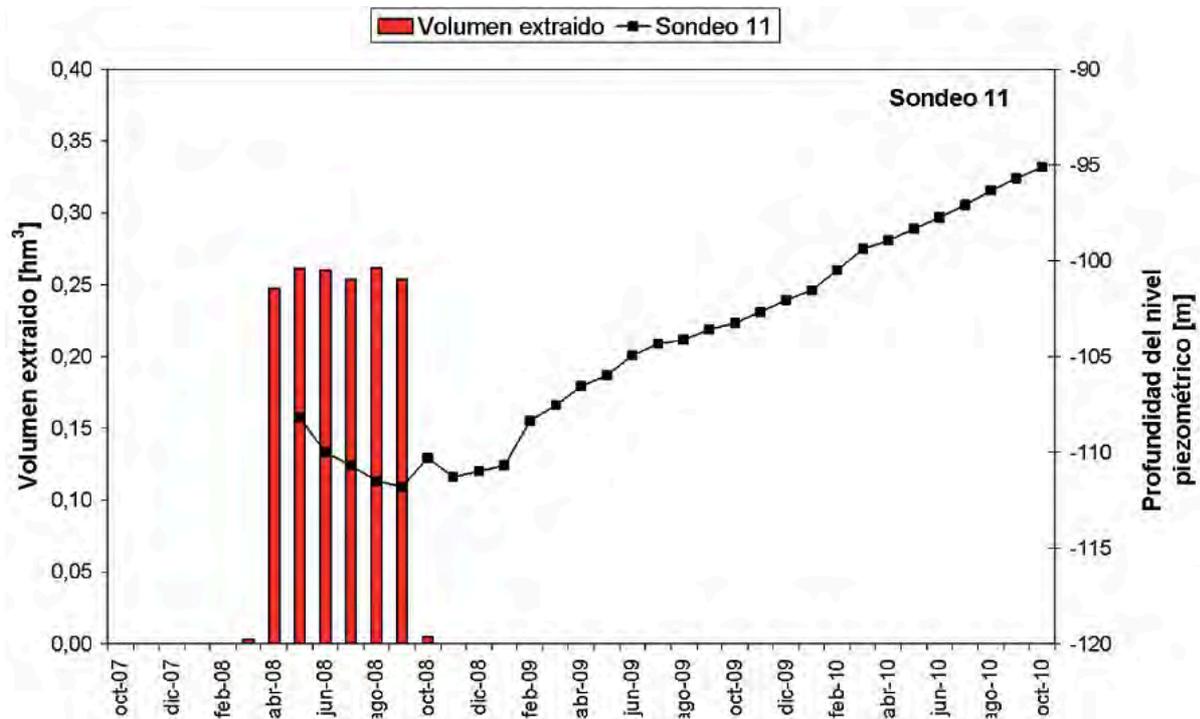


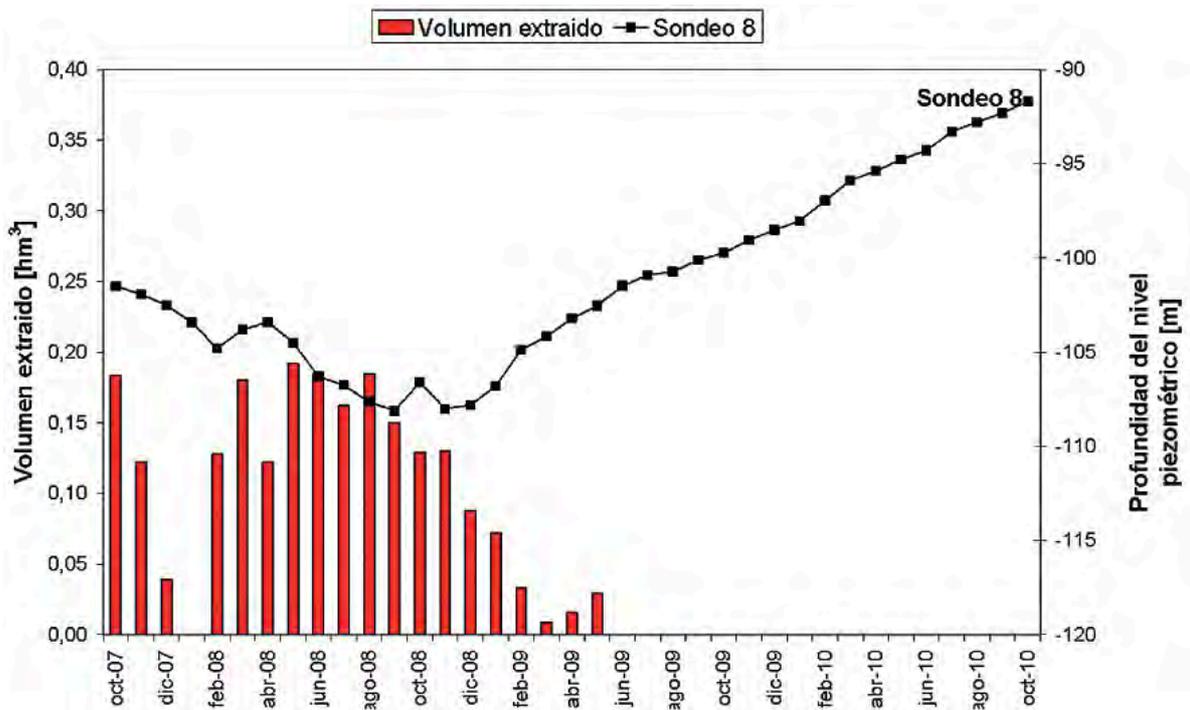
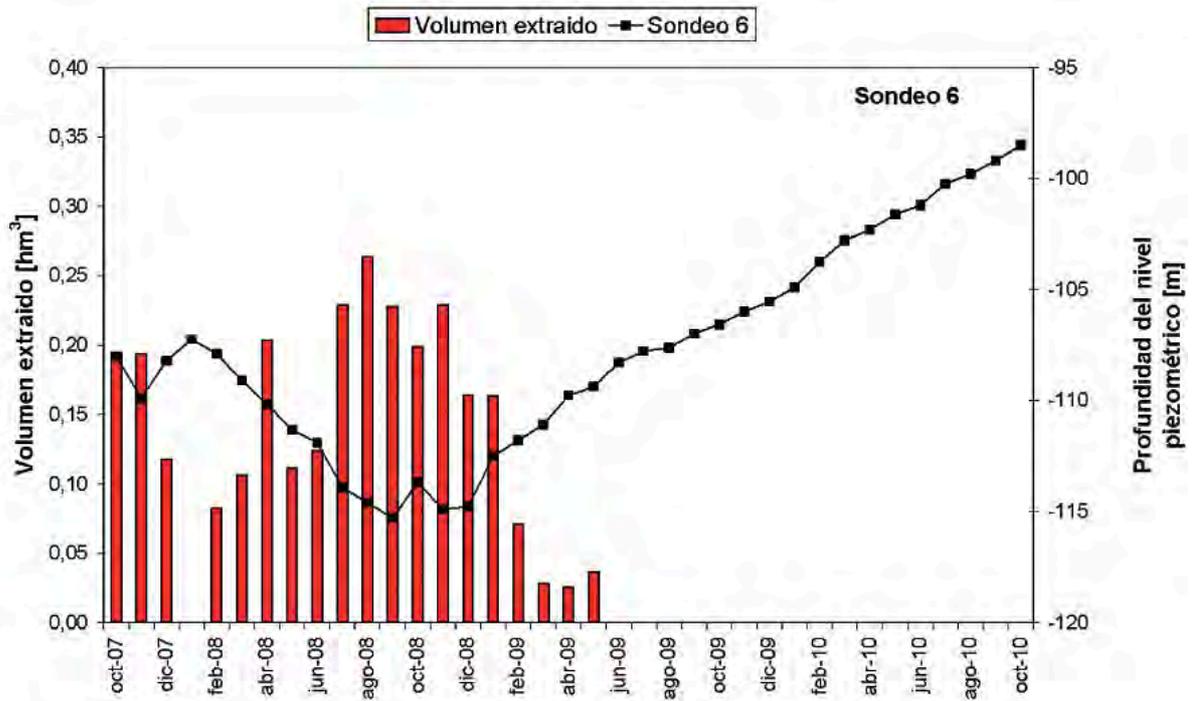
Figura 15. Evolución de niveles semi-estáticos mensuales (medidos para un solo día del mes y al menos tres horas después de cesar el bombeo) en los sondeos de la Ronda Sur (localización en Fig. 14), junto a la de la precipitación (a partir de los datos facilitados por EMASAGRA, y CHG para la precipitación).

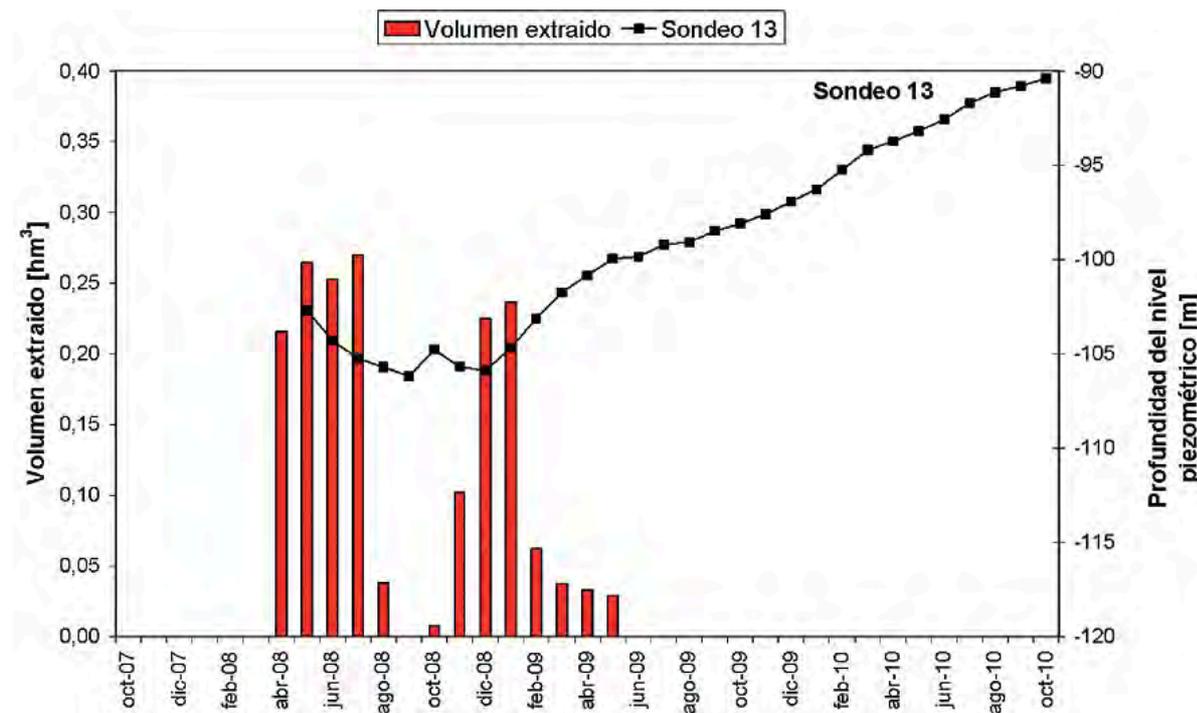
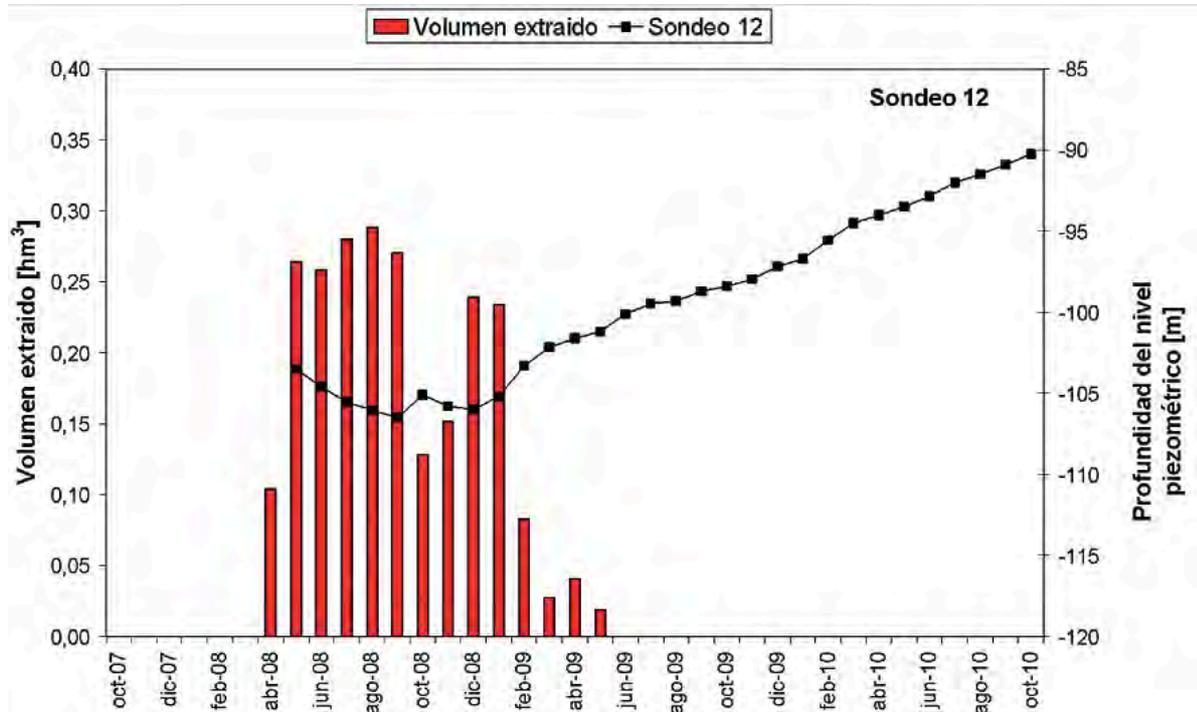












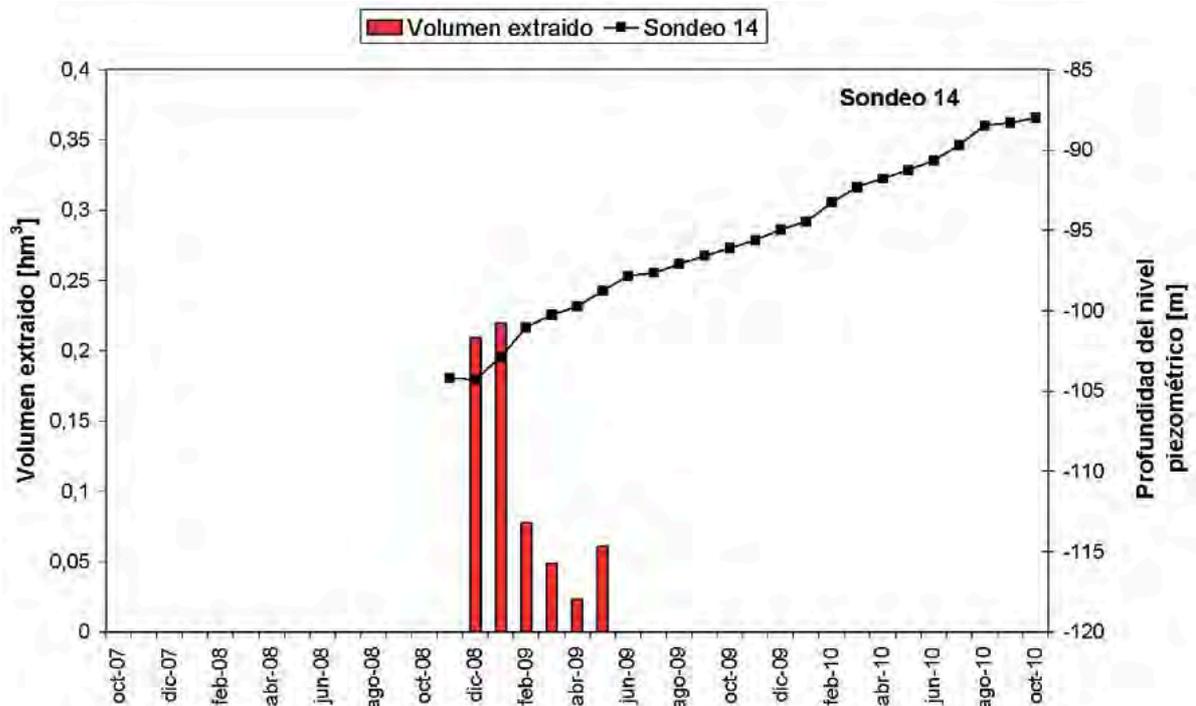
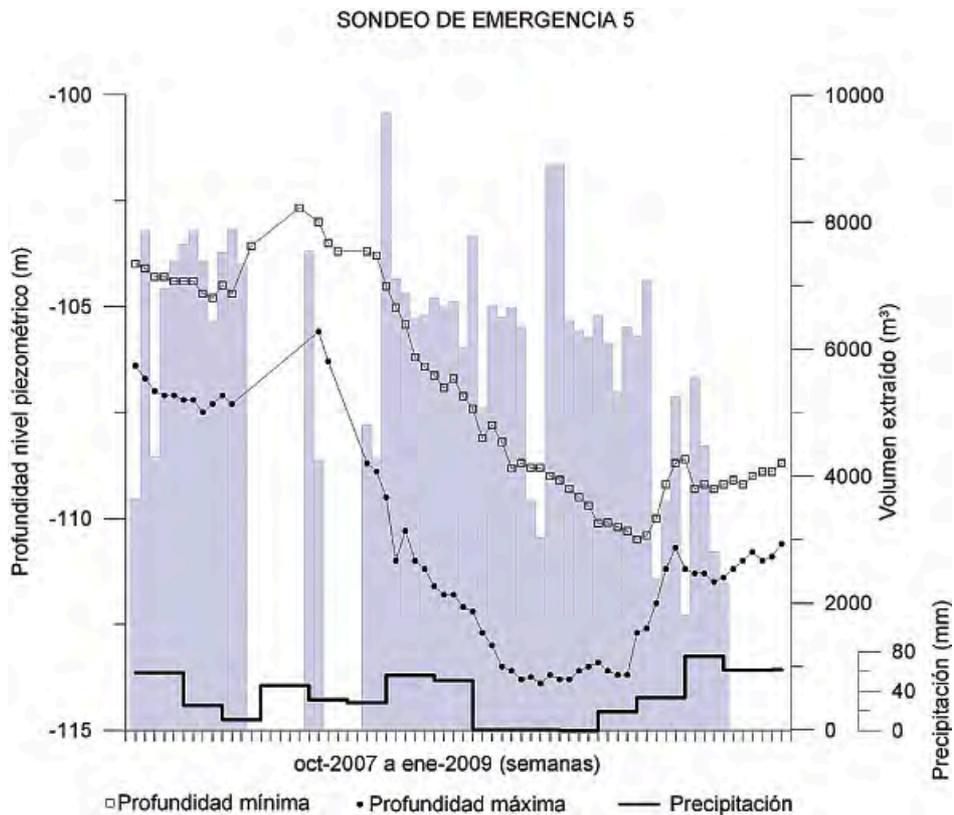
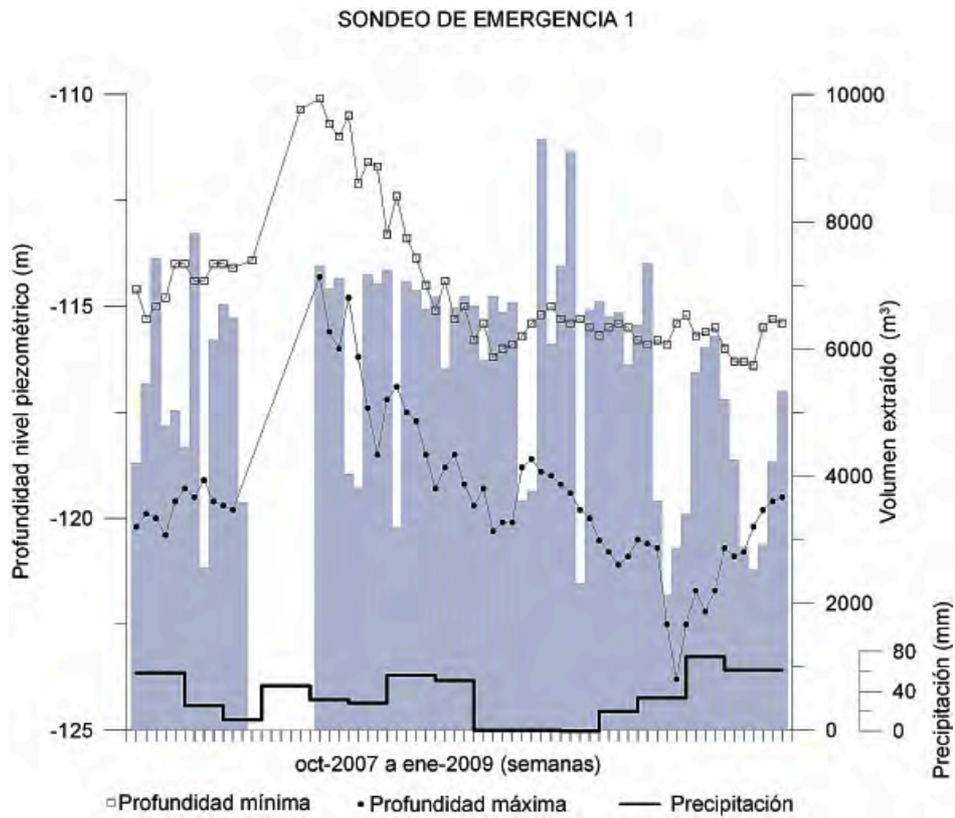


Figura 16 (páginas anteriores). Profundidad del nivel piezométrico y volumen bombeado a nivel mensual para cada uno de los sondeos de la Ronda Sur (localización en Fig. 14), con los datos disponibles para el periodo de octubre de 2007 a octubre de 2010 (a partir de datos facilitados por EMASAGRA).

II.3 Evolución de la piezometría en la red de control de la Universidad de Granada

Aparte de la recopilación, análisis y tratamiento de los datos disponibles de diferentes organismos y empresas (FAO, IGME, CHG, Universidad de Granada y EMASAGRA), expuestos en epígrafes anteriores, se ha llevado en este trabajo un seguimiento del nivel piezométrico en una red de control establecida al efecto. En parte de ella se han realizado medidas periódicas con sonda hidronivel, mientras que otra parte ha dispuesto de registro en continuo (Fig. 17). Más adelante se expondrán también los resultados obtenidos de una campaña de piezometría llevada a cabo durante el verano-otoño de 2008 (en colaboración con técnicos de la CHG), y que dio como resultado la elaboración del mapa piezométrico de la figura 26.



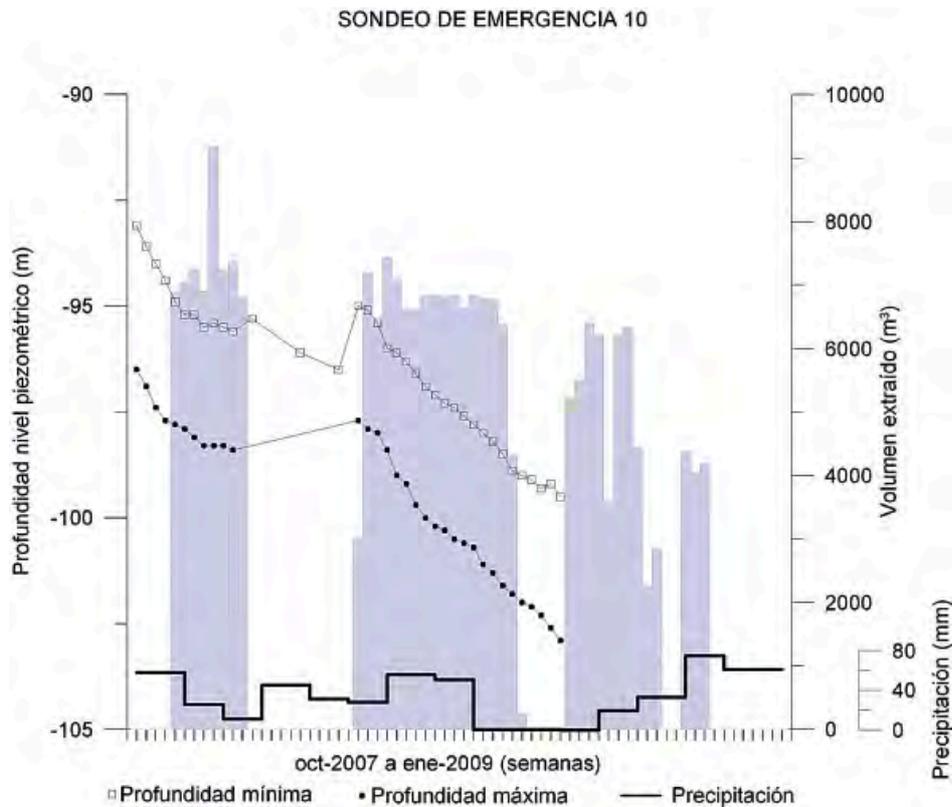


Figura 17. Evolución de la profundidad máxima y mínima obtenida del registro en continuo llevado a cabo por EMASAGRA para los sondeos 1, 5 y 10 de la Ronda Sur (localización en Fig. 14), con datos semanales (representados por cada miércoles) desde octubre de 2007 hasta enero de 2009. También se expone la evolución semanal de las extracciones por bombeo de cada uno de ellos y las precipitaciones mensuales medidas en Granada (procedentes de la CHG).

II.3.1. Red de control de registro temporal

La ubicación de los puntos seleccionados para el seguimiento con sonda hidronivel se ilustra en la figura 18. Se dispone de datos desde finales de mayo de 2008 hasta octubre de 2010. Al principio el seguimiento fue semanal y a partir de abril de 2009 mensual. Los ascensos de nivel freático máximos para el periodo de estudio han estado comprendidos entre 16,5 y 10,3 m. Los descensos provocados por la campaña de bombeos del periodo de estío del año hidrológico 2007-08 se recuperaron entre los meses de febrero y octubre de 2009. Los primeros puntos en experimentar esta recuperación son los mas orientales, existiendo un desfase temporal en la dirección del flujo.

La recuperación de niveles se asocia al incremento de las precipitaciones en los años hidrológicos 2008/09 y 2009/10, que además de suponer mayor recarga, evita que se realicen bombeos, al satisfacerse las demandas con recursos superficiales, que además en una fracción considerable acaban infiltrándose en el acuífero, ya sea a partir de los cursos superficiales que los distribuyen, como por retornos de riego.

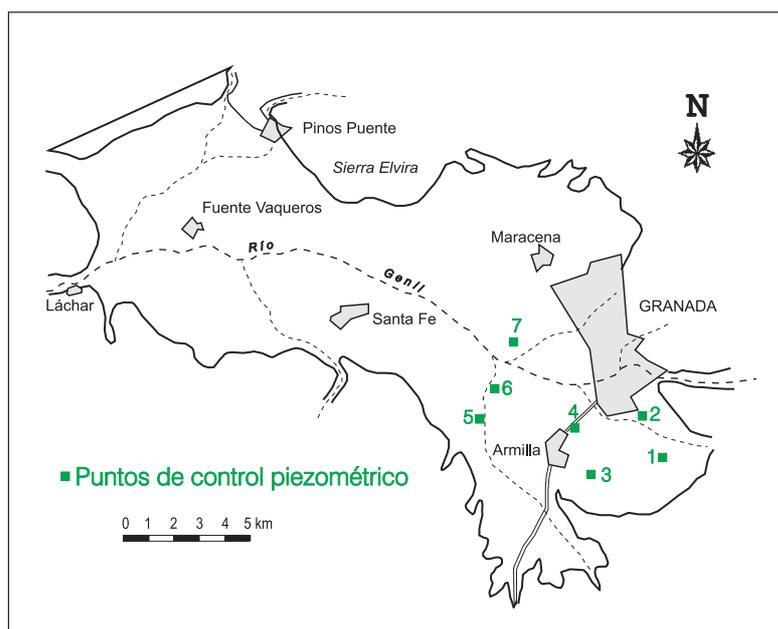


Figura 18. Mapa y fotografía aérea de localización de los piezómetros utilizados para el seguimiento periódico de niveles

En la figura 19 se ha representado la evolución de la profundidad del nivel piezométrico para cada uno de los siete piezómetros considerados.

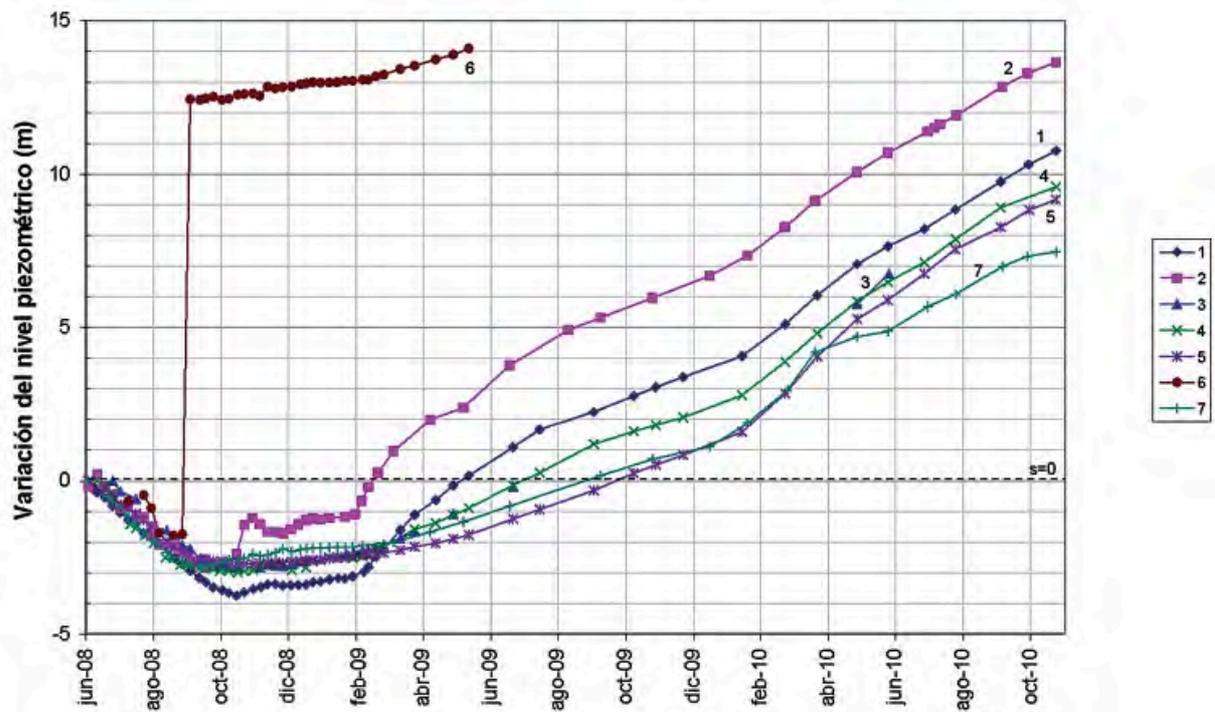
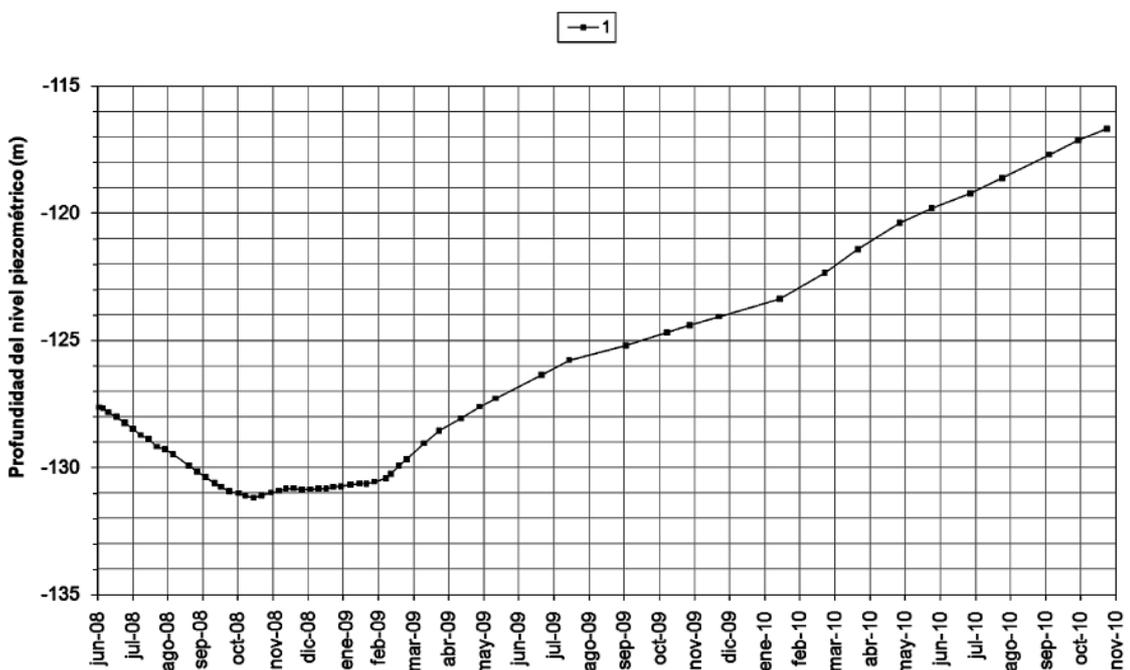
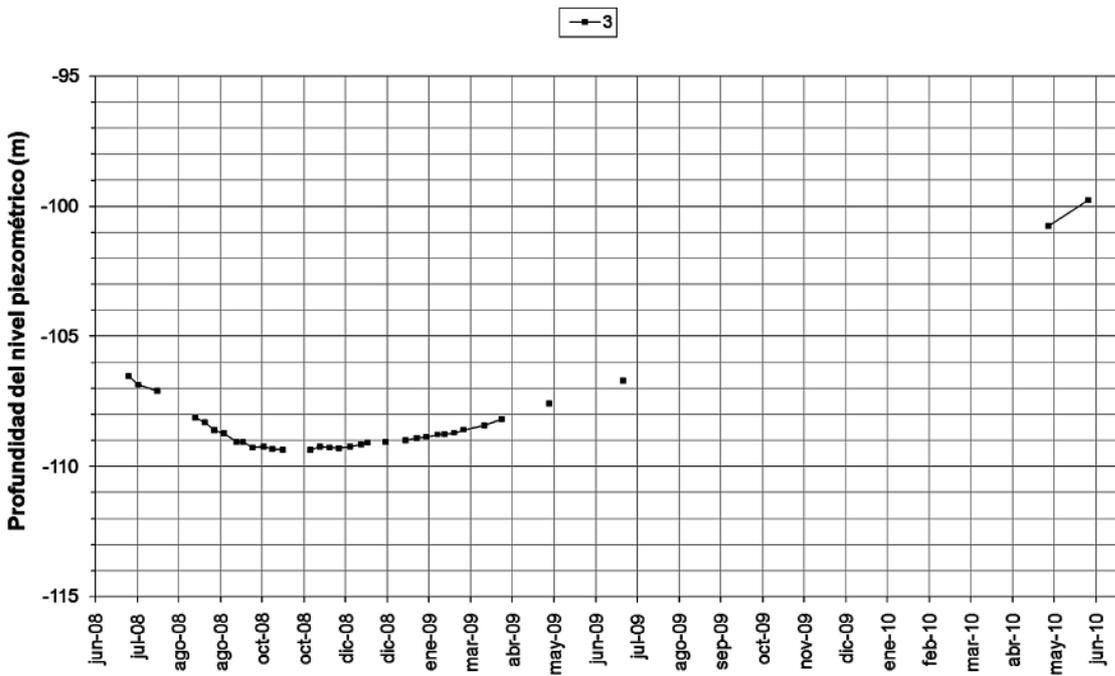
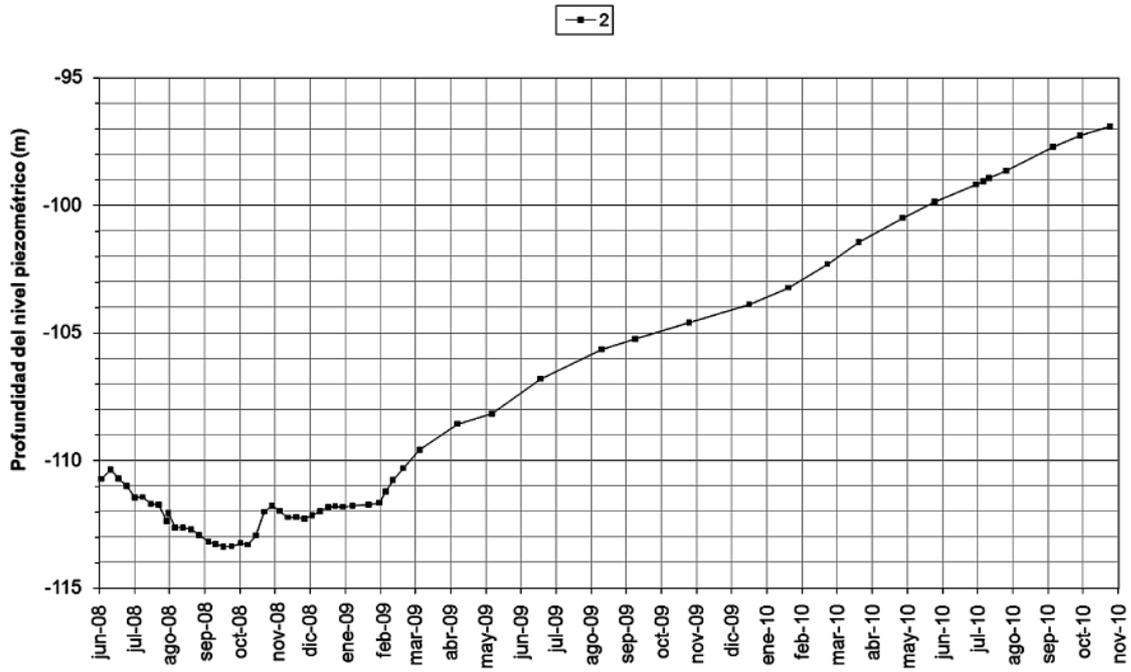
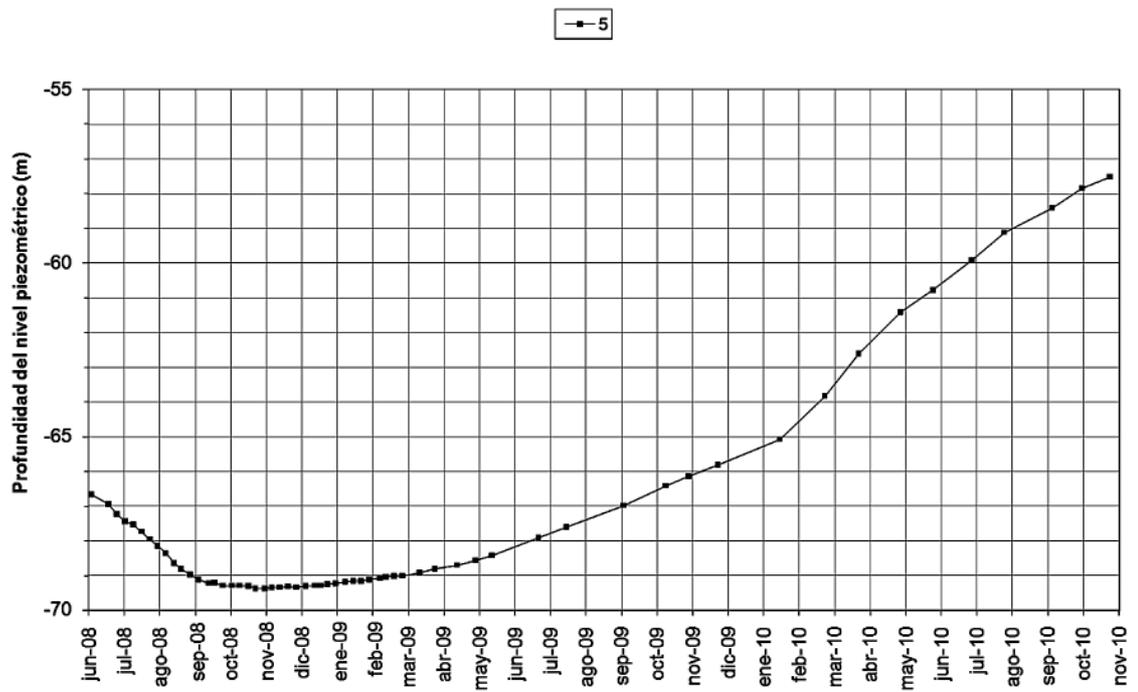
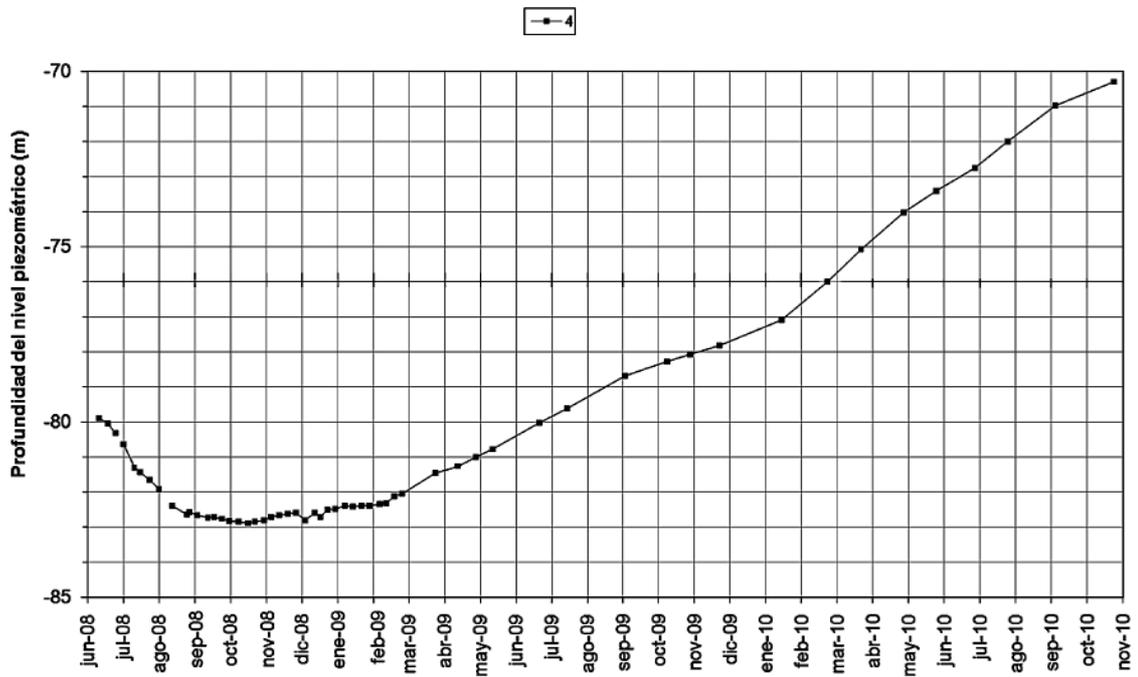


Figura 19. Evolución de las variaciones del nivel piezométrico registradas en los siete puntos de la red de control (localizados en la Fig. 18), desde junio de 2008 hasta octubre de 2010 (el piezómetro 6 quedó fuera de servicio en mayo de 2009, mientras que el acceso al piezómetro 3 es limitado, de ahí la presencia de datos discontinuos).







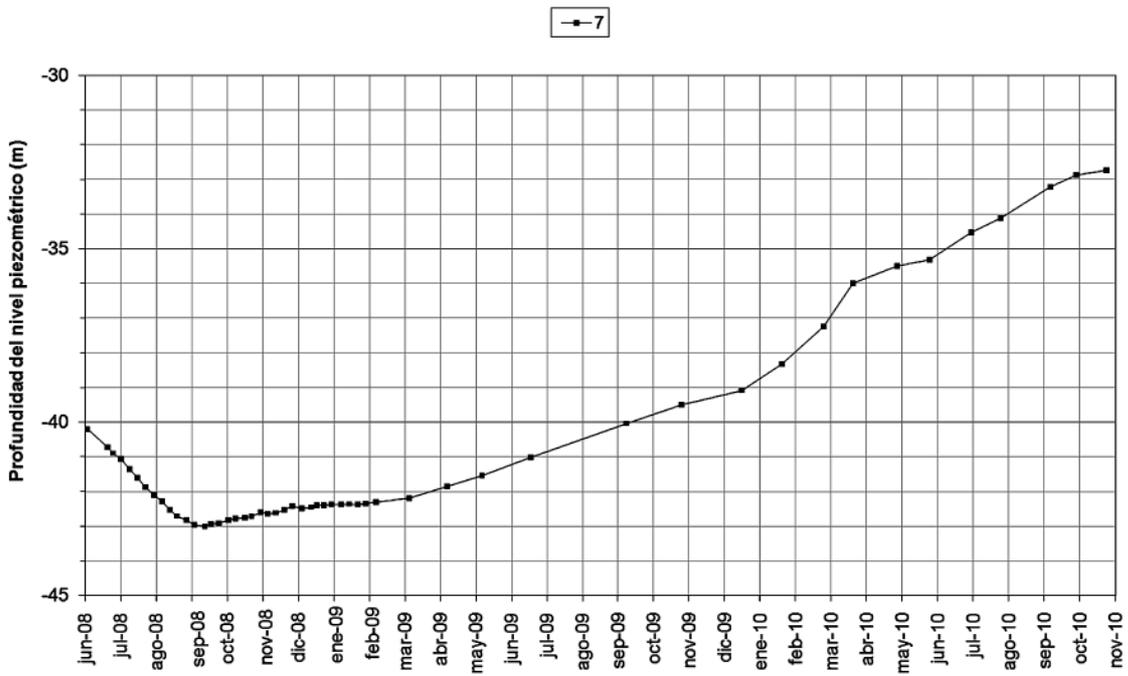
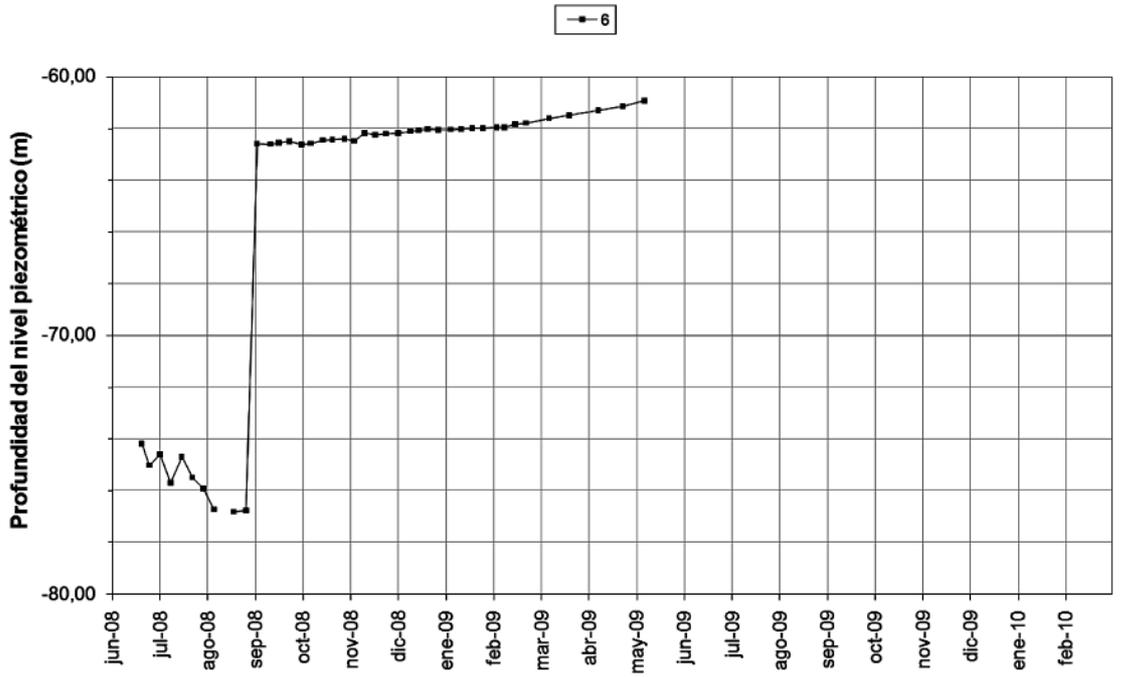


Figura 20 (páginas anteriores). Evolución de la profundidad del nivel piezométrico en cada uno de los siete piezómetros de la red de control periódica (localización en Fig. 18).

II.3.2. Red de control de registro continuo

Como resultado de las observaciones periódicas de nivel piezométrico, se propuso la instalación de sensores de registro en continuo, con el objeto de poder detectar variaciones semanales, diarias e incluso pulsos de bombeo de escala horaria, asociando además las oscilaciones de nivel con otros parámetros, como la conductividad eléctrica o la temperatura del agua. De este modo, se seleccionaron cuatro emplazamientos por su representatividad espacial y condiciones de seguridad y custodia, para albergar estos equipos de medida (Fig. 21).

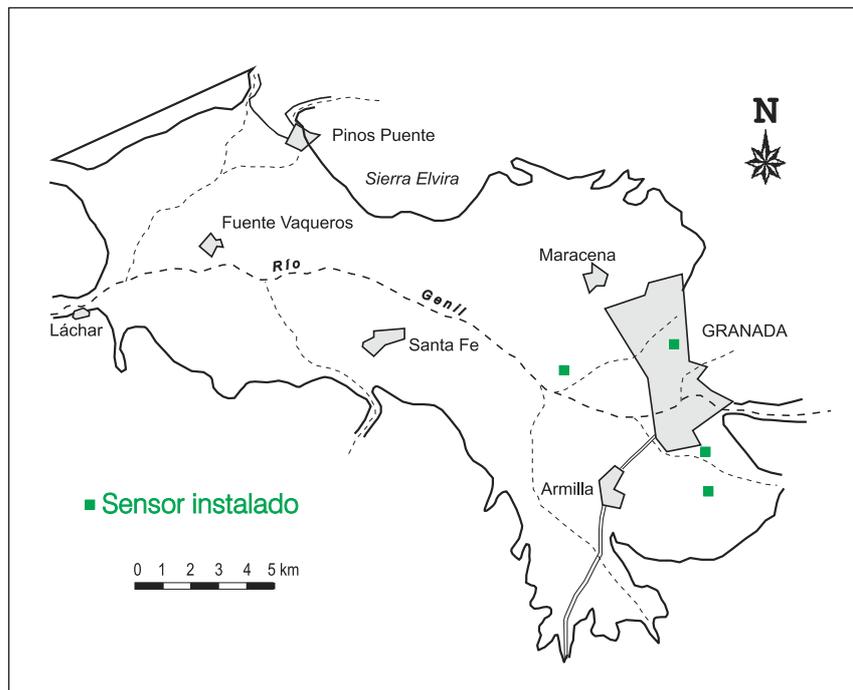


Figura 21. Localización aproximada de los puntos de la red de control piezométrico de registro continuo, donde se instalaron los sensores correspondientes.

Los sensores instalados fueron del tipo CTD-Diver (fabricados por Eijkelpamp-Van Essun; Fig. 22), con posibilidad de registro multiparamétrico, en nuestro caso de temperatura y conductividad eléctrica, parámetros indicativos de la caracterización hidroquímica del agua.

El equipo determina la altura de la columna de agua por medio de la medida de presión de agua en el sensor. Si el CTD-Diver está por encima del nivel, entonces la medida que realiza es la de la presión atmosférica, como si de un barómetro se tratara. Por ello, se utiliza un sensor adicional de medida de la presión barométrica (Baro-Diver), con el fin de compensar la diferencia. La temperatura es medida mediante un sensor semiconductor y la conductividad eléctrica mediante una célula de cuatro electrodos (especificaciones técnicas en la Fig. 22).

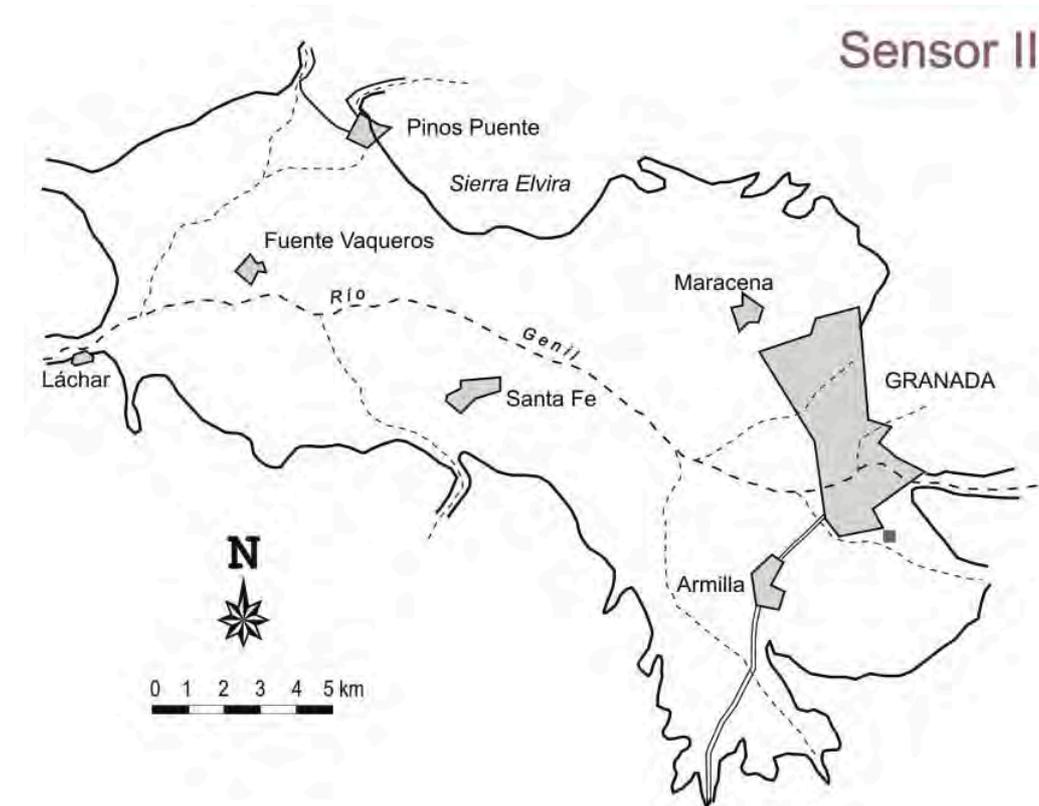
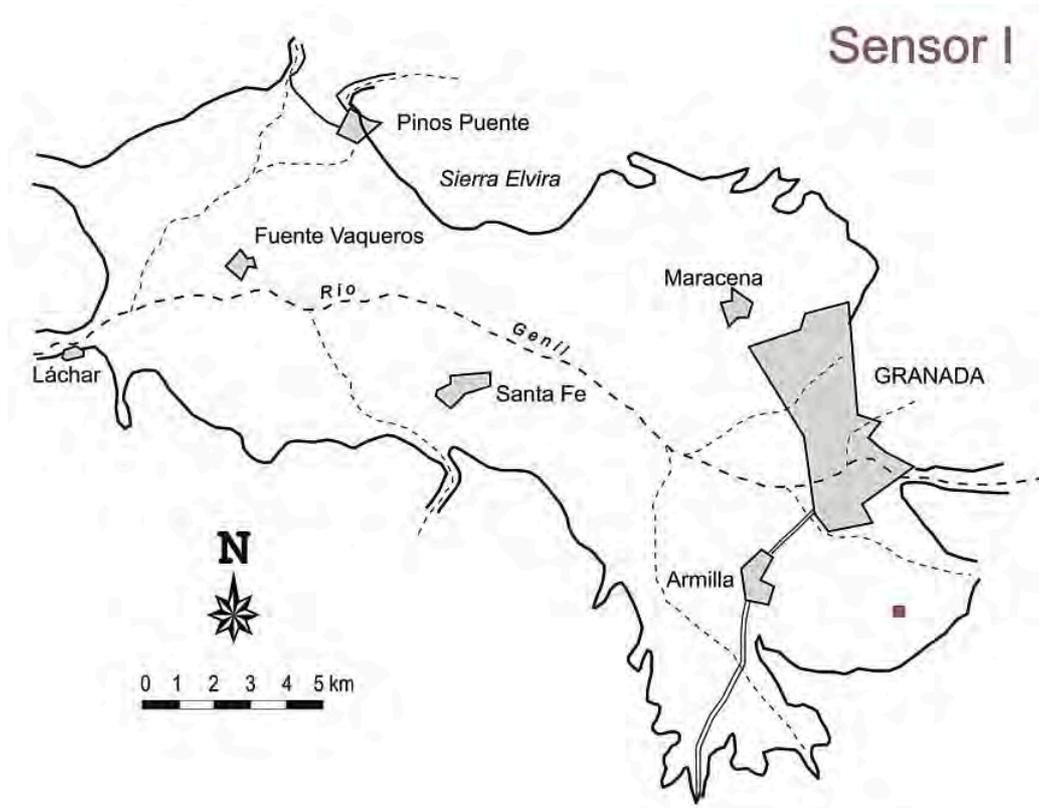
DIMENSIONES	Ø 22 mm x 183 mm
CAPACIDAD MEMORIA	16,000 medidas
FRECUENCIA DE MEDIDAS	0,5 segundos a 99 horas
MATERIAL CARCASA	Cerámica (ZrO2)
TEMPERATURA	-20 ° C a 80 °C
Precisión	± 0,1 ° C
Resolución	°C
CONDUCTIVIDAD	
Campo de medida	0 a 80 mS/cm
Precisión	± 1 % del valor medido
Resolución	% del valor medido
VIDA ÚTIL	10 años (según uso)
MEDIDA NIVEL	
Campo de medida	30 m H2O
Precisión	1 cm H2O
Resolución	0,6 cm H2O



Figura 22. Especificaciones técnicas del sensor CTD-Diver. Detalle del mismo y del trabajo de vaciado de la información al portátil en campo.

Los sensores fueron instalados en el mes de febrero de 2009. Desde entonces, son visitados mensualmente para proceder a la descarga de datos, y a su inspección, ya que descensos o ascensos bruscos de nivel pueden dejarlos fuera del rango de medida.

En las gráficas siguientes (Fig. 23 y 24) se muestran las variaciones de nivel, temperatura y conductividad eléctrica del agua en los cuatro sensores instalados.



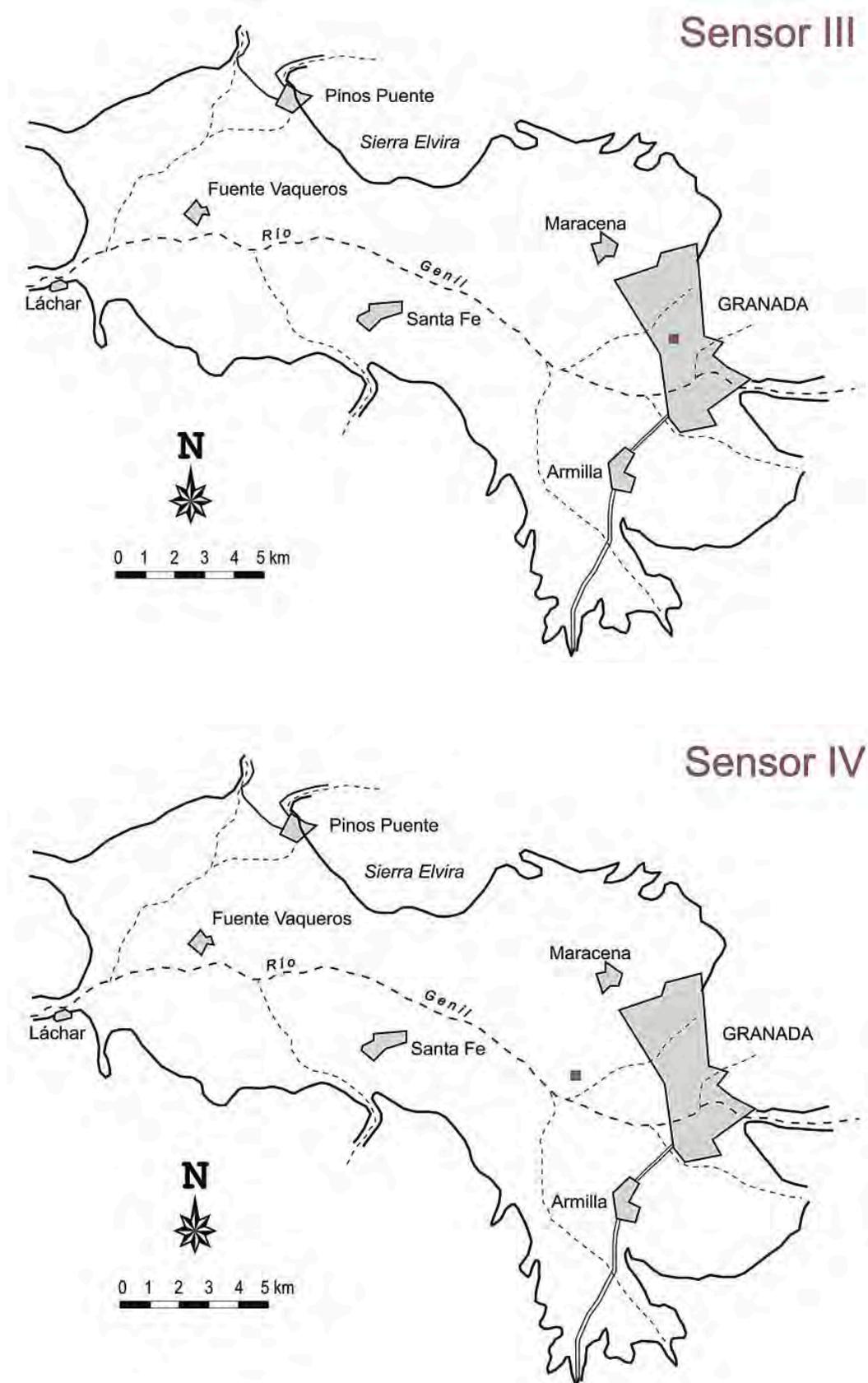
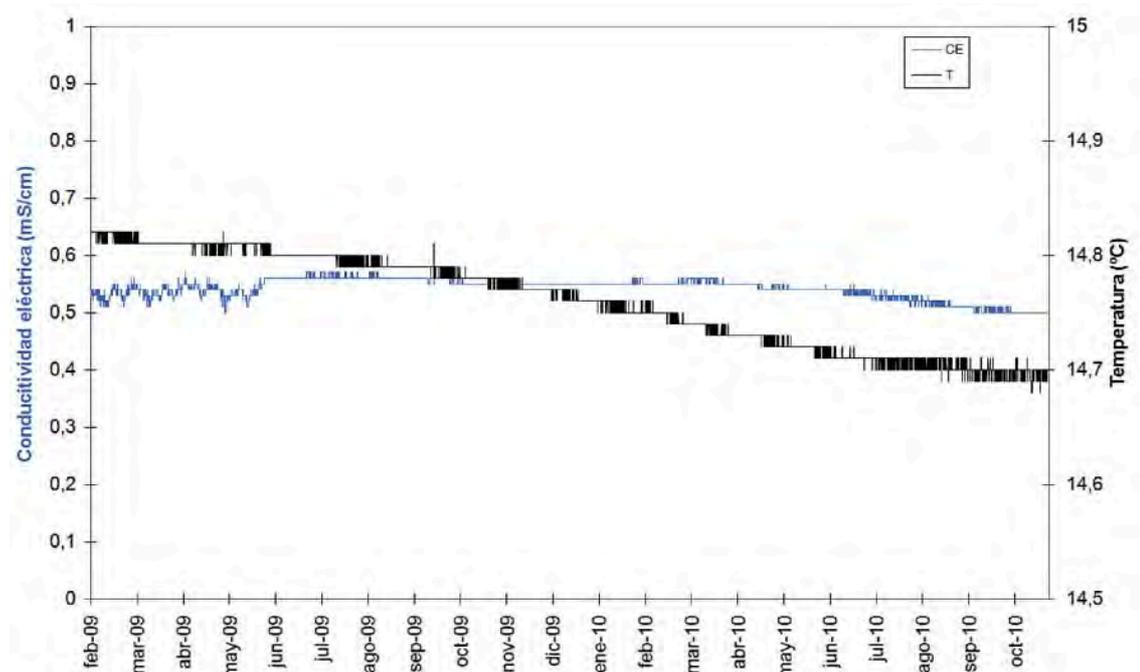
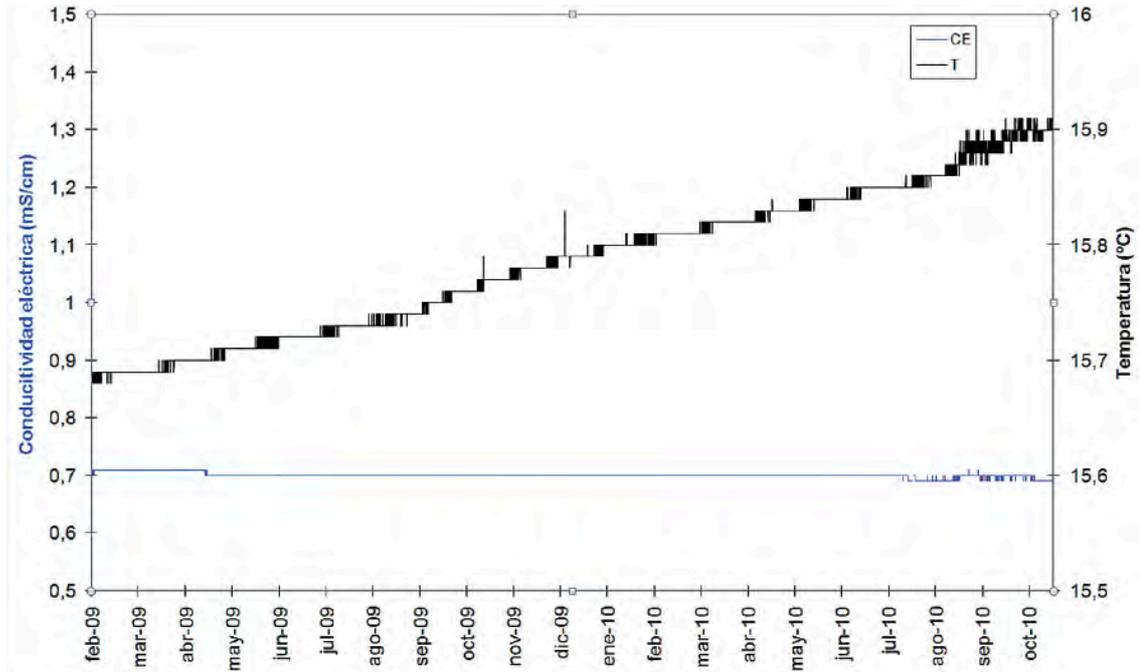


Figura 23. Evolución de la profundidad del nivel piezométrico registrado en los cuatro puntos de la red de control en continuo, entre febrero de 2009 y octubre de 2010.

A partir de estas gráficas se comprueba el continuo ascenso del nivel piezométrico desde su instalación, a pesar de la existencia de bombeos, tanto en las proximidades del sensor II, como en el propio sondeo donde está instalado el sensor III.



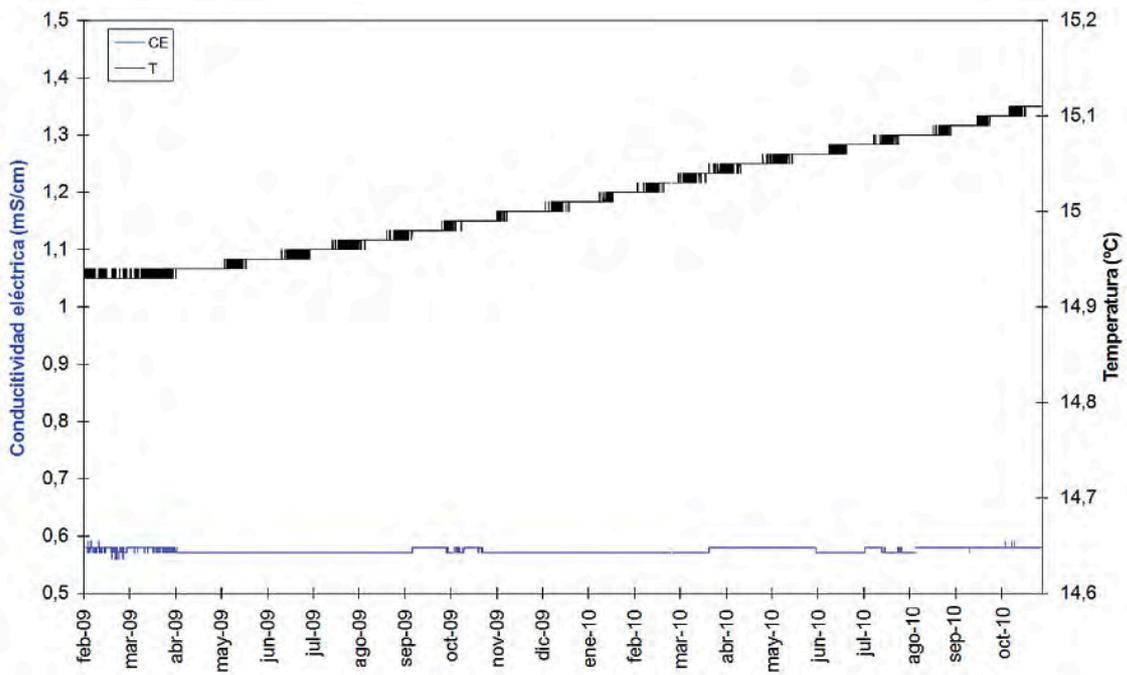
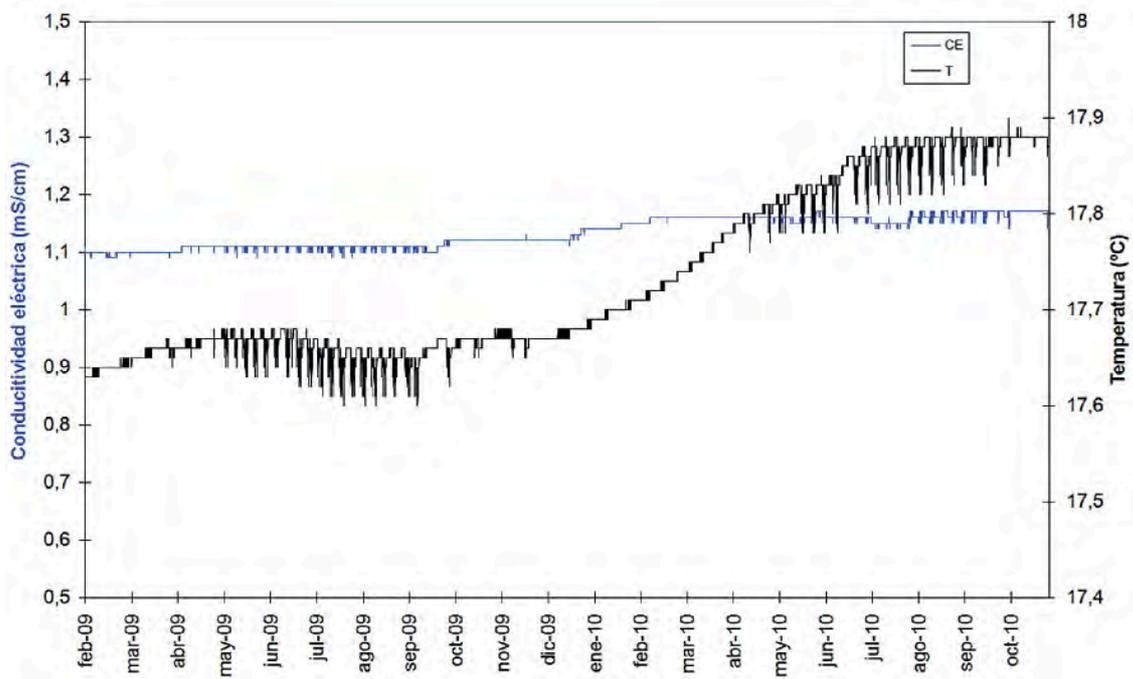


Figura 24. Evolución de temperatura y conductividad eléctrica registrada en los cuatro puntos de la red de control en continuo, entre febrero de 2009 y octubre de 2010.

La ventaja de los datos aportados por los sensores de registro continuo es evidente, pues permite monitorizar todas las alteraciones que afectan al nivel piezométrico. En el caso del sensor I, se comprueba un ascenso continuado de unos 13 m desde febrero de 2009 hasta octubre de 2010. En las gráficas de los sensores II y III se pueden reconocer las afecciones por extracciones. Ello ha permitido establecer incluso el horario de las mismas, constituyendo una herramienta sumamente fiable del control de bombeos. En la gráfica del sensor IV no se reconoce ni un ascenso continuado, ni afecciones por extracciones próximas; lo que si se aprecia son periodos con tasas de recuperación de distinta magnitud, relacionadas con periodos de mayor precipitación, pero desfasadas en el tiempo (Fig. 23).

En lo que se refiere a la evolución de la temperatura, los sensores I, II y III muestran ascensos de entre 0,2 y 0,3 °C, mientras que para el II existe un descenso del orden de 0,1 °C; este hecho se justifica considerando que a esta parte del acuífero le está llegando una recarga de menor temperatura, tal vez procedente del río Monachil o de formaciones laterales, en las que el flujo subterráneo aprovecha paleocauces, con mayor transmisividad, lo que favorece un tránsito más rápido del agua infiltrada. En las gráficas se reconocen pequeñas oscilaciones en paralelo para la temperatura y la conductividad eléctrica, posiblemente causadas por bombeos, lo que conlleva una aceleración del flujo, con la afluencia de aguas de calidades ligeramente diferentes.

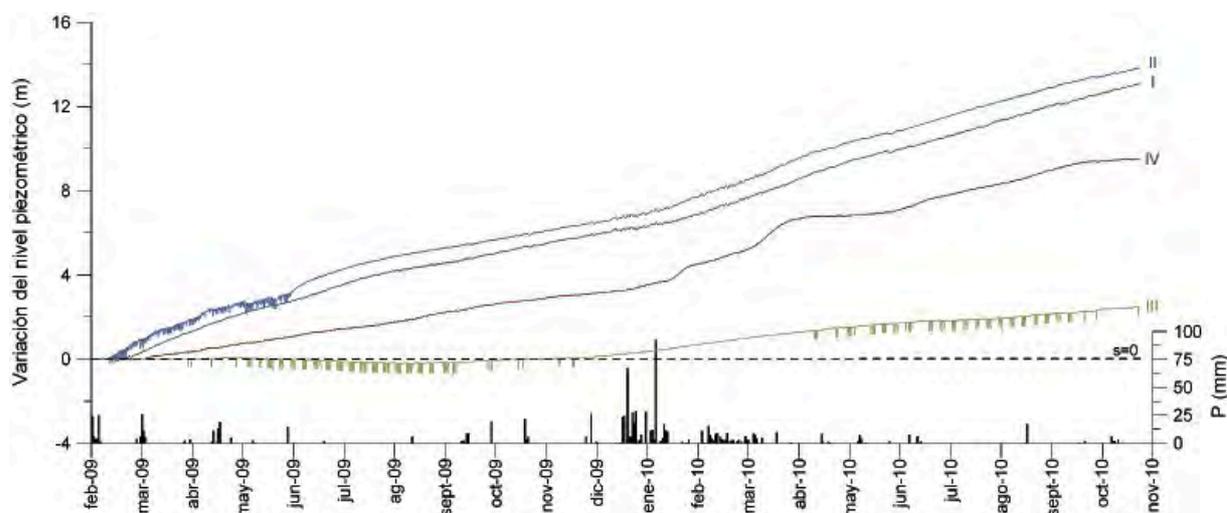


Figura 25. Ascensos del nivel piezométrico registrados para los cuatro puntos de la red de control en continuo, junto con los datos de precipitación diaria registrada en la estación IFAPA-Purchil (febrero de 2009 a octubre de 2010).

II.4. Mapa piezométrico de 2008

Como se comentó en los antecedentes de este informe, el último mapa piezométrico disponible era de 1997. Así pues, se creyó necesario actualizar esta información con un nuevo levantamiento piezométrico, llevado a cabo entre septiembre y octubre de 2008 (Fig. 26). Ello permitió conocer la geometría actualizada de la superficie piezométrica, única forma de diagnosticar el estado de explotación-conservación general del acuífero. Este levantamiento de piezometría pudo llevarse finalmente a cabo gracias a la red de puntos de control de la CHG, y a la facilidad de acceso a sondeos de la Diputación de Granada, de las comunidades de regantes y de particulares.

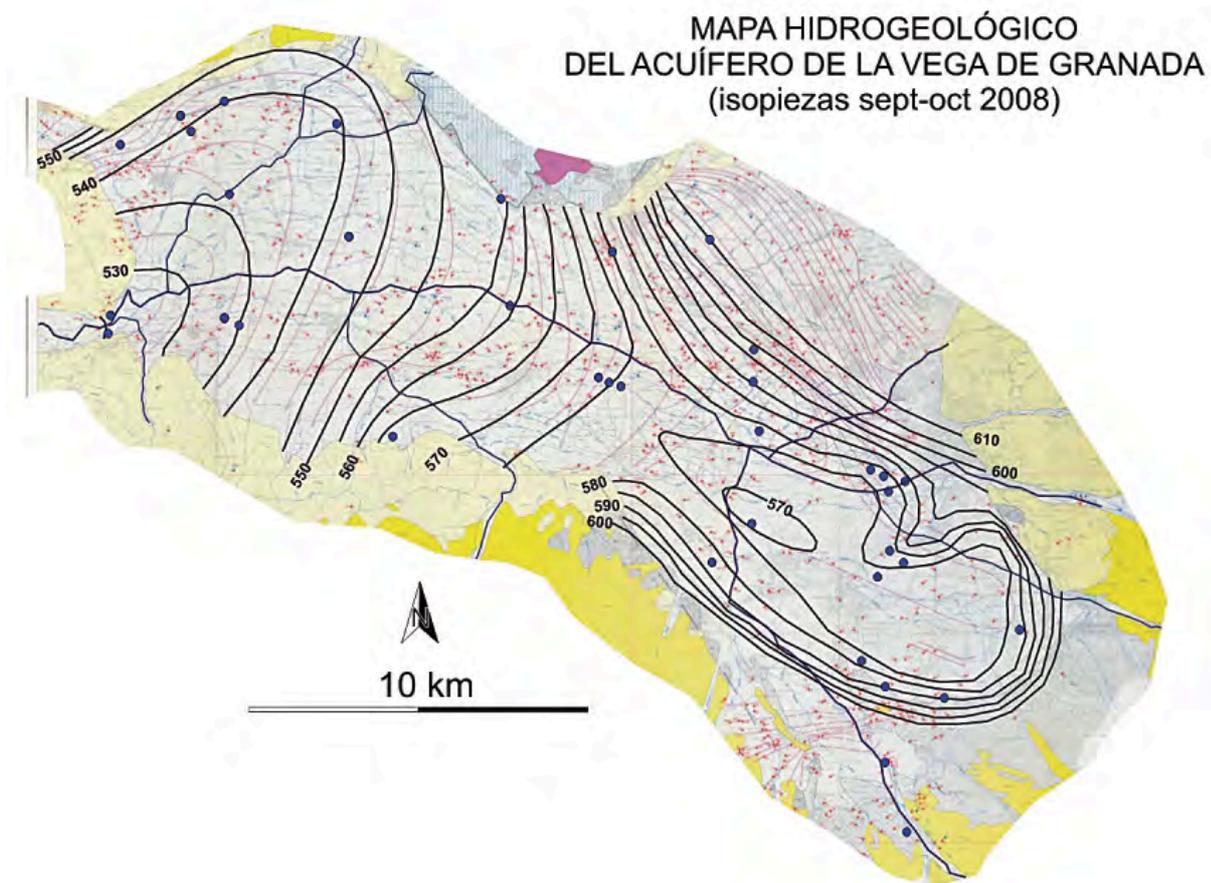


Figura 26. Mapa piezométrico del acuífero de la Vega de Granada, con medidas llevadas a cabo entre los meses de septiembre y octubre de 2008 (datos en m snm).

La morfología piezométrica muestra el mismo patrón general de levantamientos anteriores, que recordamos fueron expuestos en la figura 13. En este caso, la incipiente depresión que se empezó a reconocer en el mapa de 1983 para la zona centro-oriental, ocupa ahora mayores dimensiones, y una forma más alargada de dirección NW-SE, aprovechando posiblemente un antiguo paleocauce del río Genil, de mayor transmisividad; del mismo modo, se detecta un descenso generalizado de los niveles, que se traduce en un retroceso de las isopiezas en sentido contrario al flujo general.

Como se ha comentado anteriormente, se agranda el conoide de depresión del sector centro-oriental. Para ilustrar este proceso de abatimiento, en la figura 27 se muestra la evolución seguida con los años por la línea isopieza de 590 m snm.

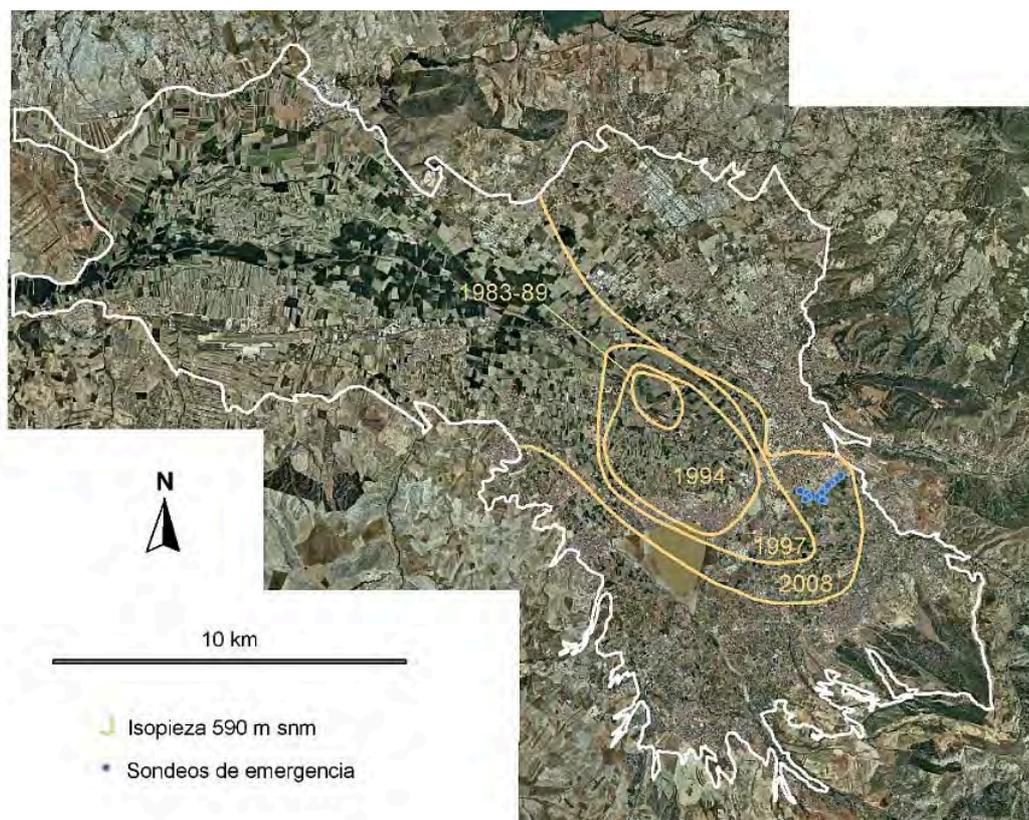


Figura 27. Evolución de la línea isopieza de 590 m snm del acuífero de la Vega de Granada en diferentes años.

II.5 Consideraciones finales sobre las evoluciones de nivel

A la vista de los datos disponibles y de su evolución en el tiempo, cabe concluir que el acuífero, lejos de presentar una estabilización hidrodinámica, presenta continuos reajustes de niveles, en respuesta a las continuas actuaciones de explotación-recarga a que se ve sometido. En general, aún responde al reajuste de un incremento de las extracciones, unido a un descenso de las aportaciones, especialmente de las debidas a infiltración de aguas de superficie (las $\frac{3}{4}$ partes de la recarga en los balances hídricos existentes).

Los niveles, con las lógicas variaciones intraanuales, continúan una tendencia decreciente, que se traduce en una mayor profundidad de la superficie piezométrica regional, lo que lleva aparejado, como ya quedó expuesto en el epígrafe correspondiente, una disminución de las surgencias al río Genil, aguas abajo de Fuentevaqueros. No obstante, la excelente permeabilidad y transmisividad del acuífero, lo hace muy sensible a las recargas en periodos húmedos, con aceptables recuperaciones de niveles.

Una de las herramientas para afinar y diagnosticar cual es el grado máximo de explotación sostenible de este acuífero, pasa por establecer el régimen del caudal ecológico o ambiental del río Genil en la estación de Puente Castilla, por lo que su control en continuo se considera imprescindible. La correlación entre dicho caudal y los niveles de un conjunto de piezómetros testigo (con el

desfase temporal correspondiente) debe servir para establecer una fórmula o algoritmo, una herramienta cómoda y útil para el manejo del futuro modelo de gestión, o, al menos, para establecer mecanismos de alerta temprana.

Así pues, es de suma importancia también continuar con el control en continuo de niveles piezométricos, como única forma de ir comprobando el carácter sostenible de la gestión.

III. EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Las aguas subterráneas del acuífero de la Vega de Granada poseen una excelente calidad para el regadío en general (con la excepción, en sectores concretos, de cultivos muy sensibles a cloruros y de productos de huerta por la presencia de patógenos). No obstante, la calidad del agua posee una alta variabilidad espacial, la cual es mucho menor a escala temporal.

Por lo que respecta a los valores de conductividad eléctrica (CE), relacionada directamente, como se sabe, con la salinidad del agua, se pueden distinguir a grandes rasgos tres zonas: la afectada por la recarga del río Genil y demás afluentes de la mitad oriental de la Vega (con valores de 400 a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$); la del borde septentrional, entre las poblaciones de Pulianas y Valderrubio, influenciada, en gran parte, por lixiviados de evaporitas del Mioceno y del Trías (con valores de 1.250 a 1.750 $\mu\text{S}/\text{cm}$); y, por último, la zona más mineralizada del sector de "Aeropuerto-Romilla", afectada por lixiviados de evaporitas del Mioceno del sector de la Malahá y por infiltración de aguas desde el arroyo Salado (con valores superiores a 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Por lo que concierne al consumo humano, la salinidad es moderadamente alta, con un valor medio para el acuífero de la CE de 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que conlleva problemas de dureza elevada en las aguas, origen de manchas de "cal" e incrustaciones en tuberías y aparatos electrodomésticos, afecciones muy sensibles para la población.

Los sectores donde la salinidad es menor, con aguas de mejor calidad para el consumo humano, estarían situados sobre todo en la cabecera del acuífero y en algunos enclaves del eje central del mismo, en los que la CE es del orden de 600 a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Sin embargo, el problema de calidad más acuciante para el consumo humano se relaciona con los moderados a altos contenidos en nitratos, cuya evolución futura es muy probable que siga siendo al alza, por cuestiones relacionadas con la gestión del recurso (menor alimentación y mayor tiempo de renovación), y no por un aumento de las entradas de nitrógeno procedentes de fertilización, que deben disminuir incluso en un futuro.

No obstante, como en el caso de la salinidad natural, existe una clara distribución espacial de diferentes zonaciones de concentración. En general, el sector Suroriental del acuífero (poblaciones de Churriana, Armilla, La Zubia, Cájjar, etc) presenta concentraciones en torno a 40 mg/l; por el

contrario, el sector de Valderrubio-Escóznar ostenta las máximas concentraciones, con puntos que superan los 470 mg/l, dentro de un fondo regional en el sector superior a 100 mg/l; el resto del acuífero presenta concentraciones promedio muy dispares, comprendidas habitualmente entre 40 y 90 mg/l.

La concentración media de las aguas subterráneas de la Vega de Granada, con datos de 2004, fue de 65 mg/l, cuando el máximo permitido por la legislación europea (y española) para aguas de bebida es de 50 mg/l.

Los compuestos metálicos y los plaguicidas, así como otros compuestos tóxicos más específicos, se encuentran, en general, ausentes en las aguas subterráneas. No obstante, existen áreas muy localizadas en las proximidades de instalaciones industriales con incipientes procesos de afección derivados de vertidos líquidos incontrolados al suelo y a acequias de riego.

Por lo que respecta a la contaminación microbiológica, esta afecta aproximadamente a un 20 % de las captaciones (Castillo y Ramos Cormenzana, 2002), si bien está directamente relacionada con vertidos o riegos puntuales próximos y recientes, y con áreas con profundidad del nivel piezométrico inferior a 20 m. Especialmente significativa es el área de afección del borde Oeste de Granada capital, ligada probablemente a fugas de la red de saneamiento. El resto de sectores contaminados se relacionan con riegos por inundación (generalmente de choperas de la zona central) con aguas residuales brutas o insuficientemente tratadas, lo que aún es práctica frecuente en la Vega de Granada.

III.1. Caracterización hidroquímica. Parámetros indicadores: conductividad, cloruros y nitratos

Para analizar la evolución espacial y temporal de las características hidroquímicas más representativas del agua del acuífero de la Vega de Granada, se ha dispuesto de diferentes mapas de isovalores de CE (indicadora de la salinidad), cloruros (indicadores del flujo, por tratarse de un ión conservativo), y nitratos (indicadores de contaminación agrícola por fertilizantes).

En la figura 28 se muestran cinco mapas de isovalores de CE para diferentes años. En ellos se comprueba que la zona de cabecera, la de menores valores de CE, se caracteriza por recibir aportaciones procedentes de Sierra Nevada desde los cauces y paleocauces de los ríos Genil, Monachil y Dílar. Con el paso de los años, se comprueba una evolución muy lenta hacia el incremento de valores.

Por lo que respecta a la distribución espacial de cloruros, en la figura 29 se exponen cinco mapas de isocontenidos para las mismas fechas que los expuestos para la CE. Siguiendo el patrón de la salinidad, con el paso de los años se produce un incremento de contenidos, que en este caso es mucho más evidente que para la CE. Desaparece la banda de baja concentración que antaño acompañaba la vertical del río Genil hasta Fuentevaqueros, y retrocede la extensión de la zona de cabecera.

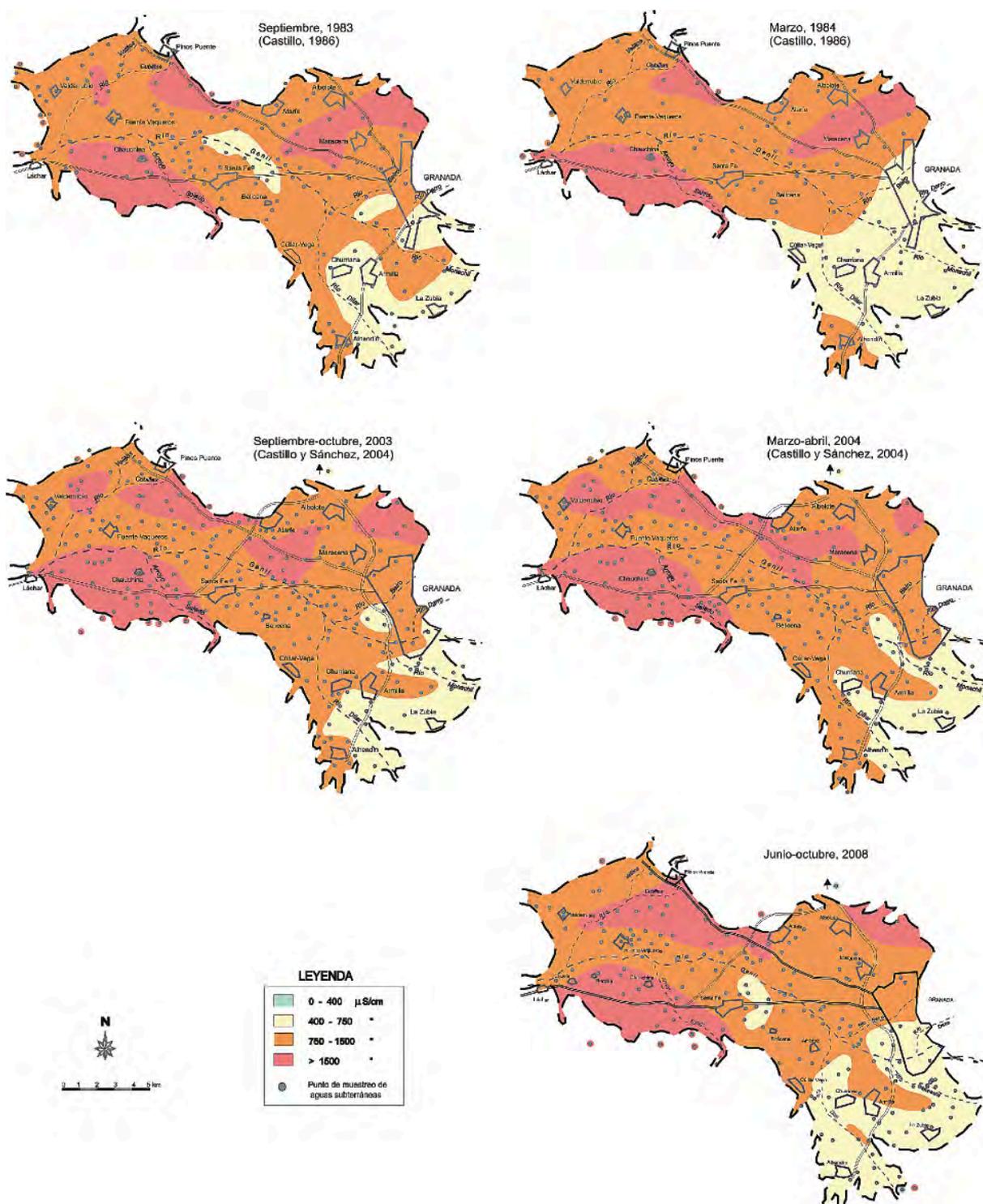


Figura 28. Mapas de isovalores de conductividad eléctrica del acuífero de la Vega de Granada para diferentes meses de los años 1983, 1984, 2003, 2004 y 2008 (Castillo 1986, Castillo y Sánchez, 2004, y Castillo y otros, 2009).

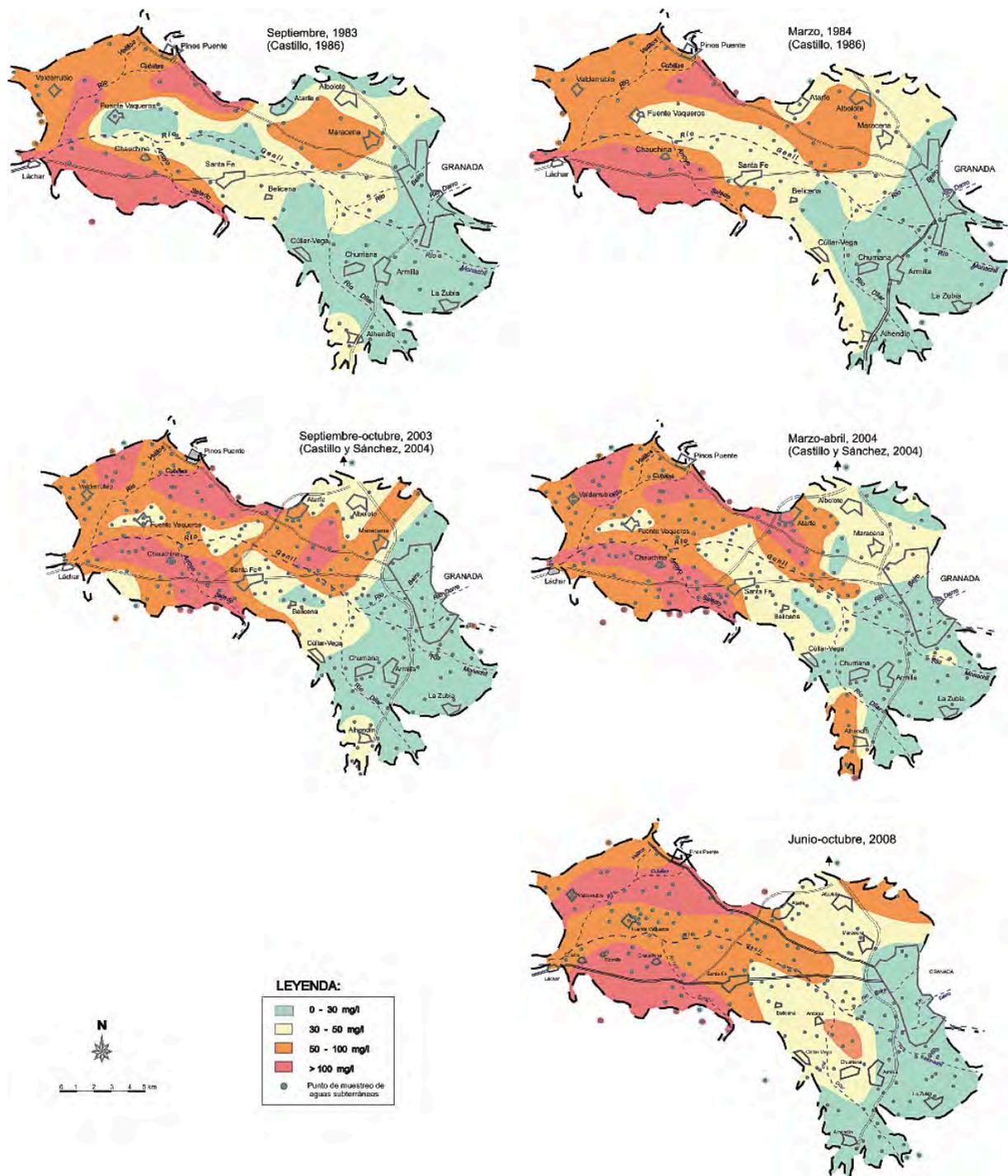


Figura 29. Mapas de isocontenidos de cloruros del acuífero de la Vega de Granada para diferentes meses de los años 1983, 1984, 2003, 2004 y 2008 (Castillo 1986, Castillo y Sánchez, 2004, y Castillo y otros, 2009).

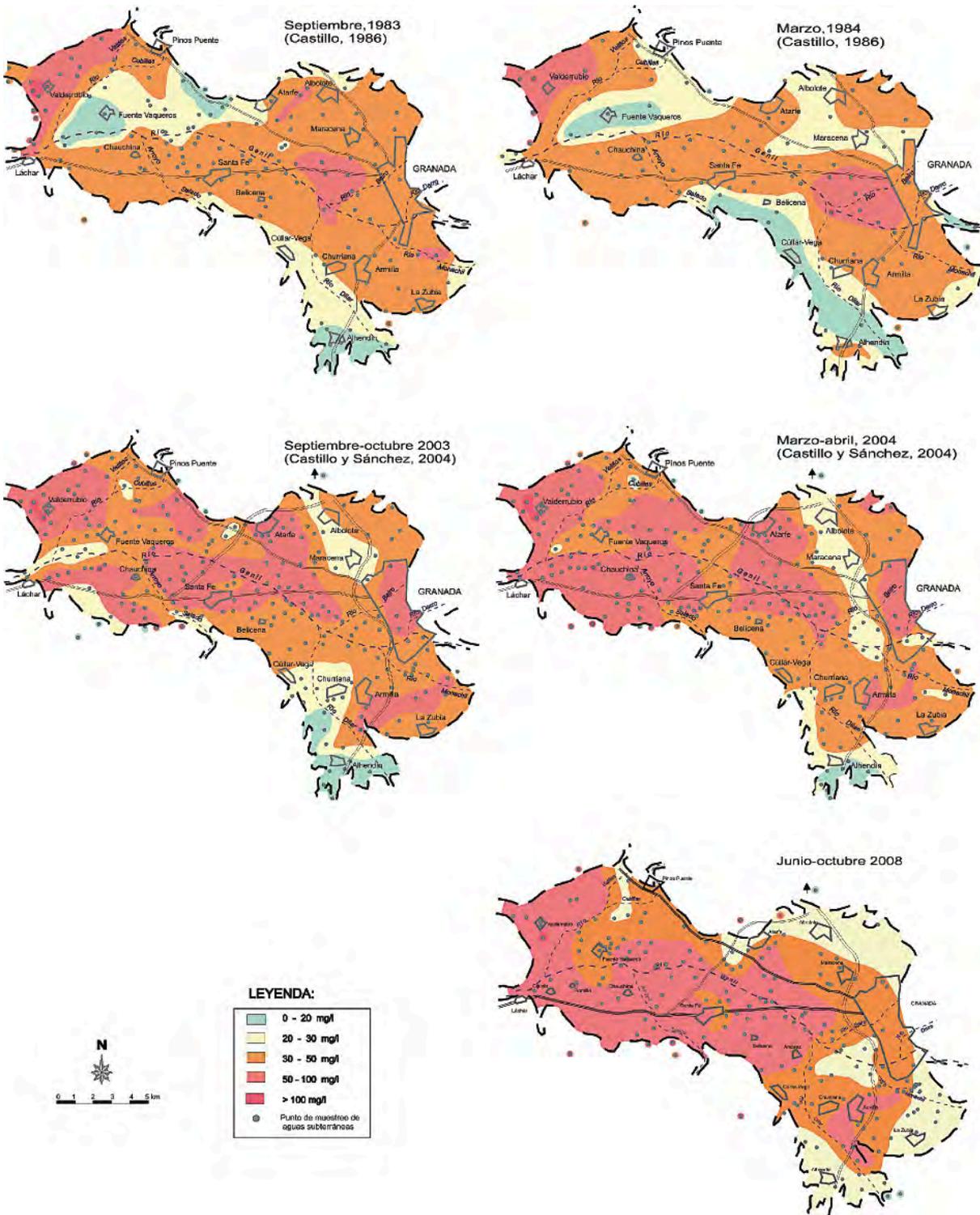


Figura 30. Mapas de isocontenidos en nitratos del acuífero de la Vega de Granada para diferentes meses de los años 1983, 1984, 2003, 2004 y 2008 (Castillo, 1986, Castillo y Sánchez, 2004, y Castillo y otros, 2009).

Igual que en los casos anteriores, en la figura 30 se exponen los mapas de isocontenidos de nitratos. Para ellos se pone aun más de manifiesto, el incremento de valores con el tiempo, lo que es especialmente significativo, en este caso, para los dos tercios occidentales (área donde el nivel piezométrico se halla más próximo a la superficie y, por tanto, es más vulnerable a la contaminación). En esos sectores se hallan valores de concentración elevados (hasta de 500 mg/l), superándose de media los 50 mg/l, límite máximo establecido por el R.D. 140/2003 para las aguas de consumo humano. Por contrapartida, parece haber una ligera disminución de concentraciones al Oeste de Granada, bajo el centro del conoide de depresión allí existente, así como en el extremo suroriental del acuífero.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se inició a petición de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, continuándose a continuación a instancias de la Agencia Andaluza del Agua, organismos que, a través de sus técnicos Jaime Riera, José Castillo, Manuel Labrador y José de la Fuente, nos brindaron información, asesoramiento y apoyo. De igual modo, la empresa EMASAGRA, en la persona de Francisco Ávila, puso a nuestra disposición abundante información y el apoyo de su personal para la toma de datos en campo en los sondeos de la Ronda Sur. El laboratorio Agroalimentario de Granada (Atarfe) y la Asociación "Agua Limpia" aportaron la información analítica correspondiente al año 2008, gracias a la amabilidad de Enrique Lillo y Manuel Cala. En las labores de puesta a punto de los sensores de control en continuo fue inestimable la colaboración prestada por Ángela Vallejos, profesora de la Universidad de Almería.

Una colaboración desinteresada encontramos siempre que fue requerida de las comunidades de regantes de la Acequia Gorda, Arabuleila, Tarramonta y Real de Santa Fe. También fueron muy serviciales los propietarios de los diferentes sondeos de las redes de control, y en especial los de los Cortijos Santa Teresa y Virgen de las Angustias.

A todos ellos nuestro más sincero agradecimiento.

INFORMACIÓN CONSULTADA

Acuña, M.J. (1981). Contaminación por plaguicidas organoclorados de la Vega de Granada. Tesis Doctoral Univ. Granada. 380 p.

Adarve, A. y Castillo, A. (1999). Estimación de los recursos drenados por el acuífero de la Vega de Granada al río Genil mediante el análisis de los hidrogramas de la estación de Puente Castilla (Granada; España). *Geogaceta*, 25: 7-10

Agencia Española de Meteorología. Valores climatológicos normales, Andalucía <http://www.aemet.es/es/elclima/datosclimatologicos/>

Aragón, R. (2003). Efectos geotécnicos del aprovechamiento de acuíferos en infraestructuras urbanas. El caso de la ciudad de Murcia. En: *El agua y la ciudad sostenible: Hidrogeología urbana*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Agua subterráneas, nº 11. 93-109

Campos, E. (1996). Estudio analítico de metales en suelos de la Vega de Granada. Tesis Doctoral Univ. Granada. 350 p.

Castillo, A. (1986). Estudio hidroquímico del acuífero de la Vega de Granada. Tesis Doctoral Univ. Granada. Coed. Serv. Public. Univ. Granada e IGME. 658 p.

Castillo, A. (1986b). Calidad para consumo humano de las aguas de La Vega de Granada. *Sanidad e Higiene Pública*, 60: 1.141-1.152

Castillo, A. (1989). Mapa hidrogeológico del acuífero de la Vega de Granada (esc. 1:25.000). Ed. Serv. Publicaciones del IGME,. ISBN: 84-8499-999-8. 1 mapa escala 1:25.000 (100 x 125 cm)

Castillo, A. (1994). Caracterización de los recursos y reservas del sistema hídrico de la Vega de Granada. Consideraciones sobre la calidad de las aguas. Inf. restringido. Univ. Granada para GIRSA. 117 p

Castillo, A. (1995). El embalse subterráneo de la Vega de Granada, uno de los más importantes de Andalucía. *Tierra y Tecnología*, 9: 37-42

Castillo, A. (2005). El acuífero de la Vega de Granada. Ayer y hoy (1966-2004). Agua, Minería y Medio Ambiente, Libro Homenaje al Profesor Rafael Fernández Rubio. López Geta et al. (eds.). ISBN: 84-7840-574-7. IGME, 161-172 p

Castillo, A.; del Valle, M. y Perandrés, G. (1996). El acuífero de la Vega de Granada, según fue descrito en los "Proyectos de la FAO" (1966-72). *IV SIAGA*, II: 401-414

Castillo, A. y Luque, J.A. (2006). Un macro-acuífero detrítico: la Vega de Granada, en *El agua subterránea en los países mediterráneos: guía de excursiones*. Eds. Ramos, G. y García de la Noce-da, C. IGME. 227-238

Castillo, A. (coord.) y otros (1990). Caracterización físico-químico-biológica de las aguas del Alto Genil. Estudio integral de la calidad y contaminación de las aguas. Inf. Univ. Granada para la Dirección General de Obras Hidráulicas (Madrid). 1 vol. texto 278 pág. y 10 vol. de anexos

Castillo, A. y otros (2009). Instrumentación, seguimiento y propuestas de actuación sobre el acuífero de la depresión de Granada para abastecimiento de la zona en situaciones de emergencia. Inf. restringido CHG

Castillo, A. y Perandrés, G. (2002). Calidad del acuífero de la Vega de Granada. Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete. Ed. IGME, CHG, COPTJA y Diputación de Granada. 185-188

Castillo, A. y Ramos-Cormenzana, A. (2002). Sobre la contaminación microbiológica del acuífero de la vega de Granada. Geogaceta, 32: 185-188

Castillo, A. y Robles-Arenas, V. (2008). La estación de aforos de Puente Castilla, desde 1970 midiendo las descargas del acuífero de la Vega de Granada. Ed. IGME. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas (VII Simposio del Agua en Andalucía), 25: 313-320 pp

Castillo, A.; Robles-Arenas, V.; Luque, J.A. y Sánchez-Díaz, L. (2008). El acuífero de la Vega de Granada: 40 años de medidas de niveles. Ed. IGME. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas (VII Simposio del Agua en Andalucía), 25: 389-396 pp

Castillo, A. y Sánchez-Díaz, L. (2004). Estudio de la calidad de las aguas de la Vega de Granada. Aplicación al riego del tabaco. Inf. Inédito para la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Universidad de Granada. 123 p.

Castillo, A.; Sánchez-Díaz, L.; Chica, M. y Luque, J.A. (2004). Distribución Espacial de nitratos en el acuífero de la Vega de Granada: análisis de las situaciones de 1983 y 2003. Geogaceta, 111-114

CHG (varios años). Anuarios de caudal de estaciones de aforo

CHG (1995). Informe final, de las obras de captación para el abastecimiento a la ciudad de Granada, en el pago del Zute. Inf. Inédito CHG

De la Colina, C. (1996). Metodología para la determinación de residuos de plaguicidas en aguas. Aplicación al acuífero de la Vega de Granada. Tesis Doctoral Univ. Granada. 303 p.

DIPUTACION DE GRANADA/ITGE (1990). Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada. Coed. Diputación provincial-ITGE. 107 pág. y 4 mapas 1:200.000.

FAO-IGME (1968). Proyecto de investigación hidrogeológica de la cuenca del Guadalquivir. PNUD. Inf.

FAO-IGME (1972). Proyecto piloto de las aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir; utilización de las aguas subterráneas para la mejora de los regadíos de la Vega de Granada. Inf. restringido

GAEMO S.L. (2007). Informe de las obras de emergencia para la ejecución de nuevos pozos en el acuífero de la Vega. T. M. de Granada. Inf. restringido

IGME (1981). Informe sobre la evolución y estado actual del acuífero aluvial de la Vega de Granada. Inf. restringido

IGME (2010). Definición del esquema de utilización coordinada de aguas superficiales y subterráneas para los núcleos de la cornisa de la vega de Granada. Inf. restringido

IGME-GEOMECANICA (1983). Modelo matemático de flujo del acuífero de la Vega de Granada. Inf. restringido. 4 vol.

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Datos Agroclimáticos. <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/>

ITGE (1989). Vega de Granada. Serie manuales de utilización de acuíferos

Jerez, F. (1983). El uso conjunto en la Vega de Granada. Curso utilización conjunta. Valencia.

Sánchez-Díaz, L. y Castillo, A. (2005). Calidad general de las aguas de la Vega de Granada. Análisis comparativo de las aguas superficiales, subterráneas y residuales. Publicaciones del IGME: serie Hidrogeología y aguas subterráneas, nº 14. ISBN: 84-7840-579-8. VI Simposio del Agua en Andalucía. II: 1.237-1.245

Trac, N.Q. (1968). Ensayo de establecimiento del balance de la capa freática de la Vega de Granada. Seminario de Hidrogeología. IGME-FAO. 62-75

Trac, N.Q. (1968). Mapa hidrogeológico de la Vega de Granada (1:25.000). FAO-IGME. Madrid

Vallejos, A.; Gisbert, J.M.; Pulido-Bosch, A. y Martín Rosales, W. (2005). Experiencia y problemática de la toma de datos hidrometeorológicos e hidrogeológicos en una zona semiárida. In: Jornadas Internacionales: De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada. Alicante, AIH-GE

ANEXO FOTOGRÁFICO



Foto 1. La Vega de Granada, a los pies de la ciudad del mismo nombre, con el telón de fondo del macizo de Sierra Nevada. Se trata de una depresión intramontañosa de 200 km² de extensión, rellena por materiales aluviales, bajo la que existe un excelente acuífero, con unas aportaciones anuales de 160 hm³ y unas reservas de cerca de 1.000 hm³. Abajo, óleo de Isidoro Marín, recreación de la Vega, con el monumento de la Alhambra presidiendo la ciudad de Granada y Sierra Nevada en último plano.



Foto 4. A la izquierda, prácticas ancestrales de "careo" o inundación de parcelas agrícolas con aguas superficiales de invierno. A la derecha, riego por inundación de una plantación de chopos jóvenes. Estas actuaciones no suponen un despilfarro de agua, ya que en gran parte se infiltra en el acuífero, por lo que son consideradas como prácticas de recarga sumamente eficientes y "baratas". En ausencia de estas actuaciones tradicionales e históricas, el acuífero no tendría capacidad reguladora suficiente para afrontar las tasas extractivas que se le demandan para regadío y abastecimiento.



Foto 5. La Vega de Granada está surcada por una densísima red de acequias de riego, procedentes de los ríos que la atraviesan. Antaño tenían la función evidente de distribución del agua, pero también de recarga o alimentación del acuífero; su progresiva impermeabilización, dentro de la lógica modernización del regadío, ofrece comodidades innegables, pero resta aportes subterráneos y poder de regulación al acuífero, que sería necesario compensar con otras actuaciones.



Foto 6. El río Genil atraviesa al acuífero de la Vega de Granada en toda su longitud. En cabecera, a la izquierda, el río es perdedor. Su encauzamiento para evitar inundaciones ha provocado la profundización de su lecho varios metros por debajo de la superficie del terreno, lo que dificulta las ancestrales prácticas de derivación de aguas de regadío. En la parta baja del acuífero, a la derecha, el río se vuelve ganador, al recibir importantes aportaciones de aguas subterráneas dentro de su lecho.



Foto 7. En esta panorámica del extrarradio de Granada capital se observa el crudo contraste que ofrece el imparable cambio de uso que está sufriendo la Vega de Granada, con la paulatina desaparición de hazas de riego tradicionales y cortijos agrícolas históricos, por el avance del urbanismo de la ciudad. Ello tiene consecuencias inmediatas en el funcionamiento del acuífero, que ve mermadas sus aportaciones por retornos de riego e infiltración de aguas de superficie. Además, se destruyen de forma irreversible tierras de vega de enorme fertilidad, al tiempo que se construye en zonas vulnerables por inundación y eventos sísmicos, ya que el área se sitúa en una zona de tectónica activa dentro de las Cordilleras Béticas.