

Estudio sobre la recarga artificial en el acuífero detrítico costero del Señorío de Marbella



Trabajo Fin de Máster

Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga

Facultad de Ciencias

Jorge Roperó Morón

Curso 2011/2012



Tutor del Máster Universitario: Bartolomé Andreo Navarro

Tutor de la empresa Aqualogy: Eduardo Lupiani Moreno

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi tutor Bartolomé Andreo la oportunidad de realizar este trabajo fin de máster, que haya estado disponible siempre para cualquier consulta durante la elaboración del mismo y me haya sabido transmitir su amplio conocimiento sobre la hidrogeología. A Ana Ortuño, por ser mi pilar fundamental en la oficina de Aquagest y estar siempre dispuesta a discutir cualquier tema relacionado con la temática en cuestión.

Una parte fundamental de esta memoria ha sido Manuel Argamasilla, con quien he tenido la suerte de poder compartir gran parte de este trabajo, tanto en el Departamento de la Universidad de Málaga como en las jornadas de campo, y no me cabe duda de que muy pronto llegará a ser un magnífico Doctor. También a Matías Mudarra, que siempre ha estado atento a la evolución del trabajo y se ha ofrecido siempre ante cualquier incertidumbre.

A todos y cada uno de mis compañeros del Máster RHyMA, de los que he aprendido multitud de cosas tanto en la faceta personal como la académica, y que me han acompañado durante este intenso año. Quiero hacer una mención especial a Valle Chamorro y Luis Gálvez, compañeros de prácticas en el Departamento de la UMA, con quienes he compartido todas mis dudas relacionadas con el trabajo y me han ayudado en todo cuanto ha estado en sus manos.

Por último, dejo para el final a las personas más importantes durante esta aventura: mi madre, que siempre me ha apoyado en todas mis decisiones y Mercedes, que me ha ayudado con todo lo que he necesitado y me ha aguantado y animado en los peores momentos. Muchas gracias a las dos.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	2
1.3. RECARGA ARTIFICIAL	4
1.4. OBJETIVOS Y VENTAJAS DE LA RECARGA ARTIFICIAL	5
1.5. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	6
1.6. OBJETIVOS.....	6
2. METODOLOGÍA	7
2.1. TRABAJOS DE CAMPO	7
2.1.1. Reconocimiento de la zona de estudio	7
2.1.2. Medidas periódicas en la red de control.....	7
2.2. TRABAJO DE GABINETE.....	8
2.2.1. Ubicación de los sondeos.....	8
2.2.2. Tratamiento de datos.....	8
3. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
3.1. DEMOGRAFÍA.....	10
3.2. CLIMATOLOGÍA	13
3.3. GEOLOGÍA.....	17
3.4. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL	19
3.5. HIDROGEOLOGÍA	22
3.5.1. M.A.S. 060.040 (Marbella-Estepona)	22
3.5.2. M.A.S. 060.067 (Sierra Blanca)	26
4. RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DEL SEÑORÍO	28
4.1. PRIMEROS SONDEOS DE INYECCIÓN	28
4.2. NUEVO SONDEO DE INYECCIÓN	31
4.3. BALANCE DEL ACUÍFERO: RECARGA Y EXTRACCIONES	34
5. PIEZOMETRÍA Y CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL SEÑORÍO.....	40
5.1. EVOLUCIÓN DE LA PIEZOMETRÍA Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA	40
5.2. PERFILES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y TEMPERATURA.....	45
6. HIDROQUÍMICA.....	50
6.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS	50
6.2. DIAGRAMAS DE PIPER Y DE STIFF	53
6.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	55
6.4. RELACIONES IÓNICAS INDICATIVAS DE INTRUSIÓN MARINA.....	57
7. PROPUESTA DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA PARA RECARGA ARTIFICIAL	61
8. CONCLUSIONES.....	68
9. BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXO	73

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

El presente documento se ha elaborado como trabajo final para la 4ª edición del Máster Universitario en Recursos Hídricos y Medio Ambiente, realizado en la empresa Aqualogy, en su oficina de Marbella y en el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (UMA). Los tutores del mismo son D. Bartolomé Andreo Navarro, Catedrático del Departamento de Geología y Ecología de la UMA y D. Eduardo Lupiani Moreno, de Aqualogy Aqua Ambiente Servicios Integrales S.A.

El sector costero español, como en muchos otros países, sufre una importante presión tanto urbanística como poblacional. La ciudad de Marbella ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento demográfico considerable, debido a su lugar privilegiado en la Costa del Sol y a su enorme oferta turística. Por este motivo, llega a duplicar e incluso triplicar su población en los meses estivales, época del año en la que se produce un mayor consumo de los recursos hídricos, si bien es cuando más escasos son. Dicha escasez conlleva una mayor explotación de los acuíferos y problemas de contaminación, que acentúan aún más la situación y dificultan la búsqueda de soluciones efectivas y económicas.

Para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos, se pusieron en marcha una serie de proyectos destinados a asegurar el abastecimiento de la población permanente y estacional. Por un lado, se construyeron el embalse de la Concepción (1971) y la planta desaladora (1996) y, por otro, se mejoró el rendimiento técnico de la red de abastecimiento, gestionado por Aquagest, en un 22%. La última medida llevada a cabo desde finales de 1999 ha sido aumentar los recursos del acuífero del Señorío de Marbella mediante recarga artificial con agua procedente del manantial de Camoján.

Esta técnica se ha configurado en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica económica, de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas, debido a sus bajos costes en comparación con otras técnicas y es una actividad de primer orden en varios países del mundo, como Holanda, Estados Unidos, Australia, Israel, etc.

A pesar de haber existido antecedentes de recarga artificial en España, esta técnica ha sido infrautilizada en las últimas décadas y se encuentra todavía en un estado experimental. Hasta el momento apenas ha recibido consideración por parte de la administración hidráulica del país, aunque cada vez tiene mayor peso en la misma. El volumen anual medio de recursos hídricos resultantes de recarga artificial en España asciende a 300-350 hm³/año (IGME, 2000). Esta cifra no está en consonancia con la estimación realizada por el Ministerio de Medio Ambiente, según el cual «la cuantía total de recursos destinados de forma regular a recarga artificial en España es de difícil

estimación, pero no debe alcanzar siquiera los 50 hm³/año» (MIMAM, 2000, p. 170). La propia fuente considera que los resultados obtenidos en estas experiencias son esperanzadores.

Desde el año 2000, la mejora tanto cuantitativa como cualitativa de las masas de agua subterránea es un objetivo medioambiental prioritario en el artículo 4 de la Directiva Marco Europea del Agua (DMA), para así evitar un deterioro progresivo del estado de las mismas. El presente trabajo está en consonancia con la finalidad pretendida por esta norma del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea.

1.2. Localización y descripción de la zona de estudio

El acuífero plioceno del Señorío de Marbella se encuentra en el término municipal de Marbella, en la zona suroccidental de la provincia de Málaga, a unos 58 km de la capital.

Los sondeos de la zona de estudio aparecen en la Figura 1.1. Siete de ellos son gestionadas por Aquagest Andalucía (Señorío 1, 2, 3 y 4, Torreverde, Oasis y Oasis-Manchones) y son de fácil acceso desde la carretera N-340, mientras que de los dos restantes no existen estudios previos ni se realiza en ellos control alguno. En el marco de este estudio se han denominado como sondeos Jardín y Jeque, debido a que el primero se emplea para regar una zona ajardinada cercana y el segundo está ubicado en la entrada del palacio Mar-Mar, perteneciente al Rey Fahd. Estos últimos puntos se encuentran junto a la carretera MA-427.

En la Tabla 1.1 se muestran las coordenadas UTM de las distintas captaciones, así como su distancia aproximada hasta la línea de costa.

Sondeo	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Distancia a la costa (m)
Jardín	326.735	4.041.416	15	240
Jeque	326.900	4.041.448	11	260
Oasis	326.128	4.041.270	15	320
Oasis-Manchones	326.048	4.041.225	19	480
Señorío 1	327.608	4.042.034	28,26	625
Señorío 2	327.599	4.041.908	24	540
Señorío 3	327.684	4.041.864	22,63	490
Señorío 4	327.590	4.041.940	24,95	600
Torreverde	327.669	4.041.626	13,65	250

Tabla 1.1. Coordenadas y distancias a la costa de los sondeos del Señorío de Marbella



Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio

1.3. Recarga artificial

La técnica de recarga artificial ha tenido multitud de definiciones en las últimas décadas. La primera vez que se utilizó este término se definió como «el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua» (Freeze y Cherry, 1979).

En líneas generales, se puede decir que la recarga artificial consiste en la introducción de agua en el acuífero de manera no natural, para, entre otras cosas, incrementar la disponibilidad y/o mejorar la calidad de las aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 1983).

El *Libro Blanco del Agua* describe la recarga artificial como «un conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada e introducción directa, inducida o estimulada de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía y disponibilidad de los recursos hídricos y actuar sobre su calidad» (MMA, 2000).

Una visión más práctica de la definición es la de Bouwer (2002), según la cual «la recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero».

La UNESCO (2002) aclara que la recarga artificial es «el aumento de la alimentación natural de agua subterránea a los acuíferos o embalses de agua subterránea suministrando agua a través de pozos, inundando o cambiando las condiciones naturales».

Dentro de los métodos de recarga artificial, se pueden distinguir dos grandes grupos (Figura 1.2):

- a) Los sistemas de recarga en superficie, que consisten en extender el agua para favorecer un mayor contacto agua-terreno. Se emplean fundamentalmente en acuíferos libres, que no presentan niveles de baja permeabilidad en las proximidades de la superficie, lo cual permite la llegada del agua al acuífero. En esta categoría se incluyen los serpenteos, represas, vasos permeables y escarificación del lecho del río (recargas en el mismo cauce) y las balsas, fosas, canales y campo de extensión (recargas fuera del cauce).
- b) Los sistemas de recarga en profundidad, en cuyo caso el agua se introduce en el acuífero a través de pozos y sondeos de inyección, simas y dolinas, y drenes y galerías. Se emplea de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables o donde el escaso espacio superficial libre impide la instalación de los dispositivos antes mencionados.

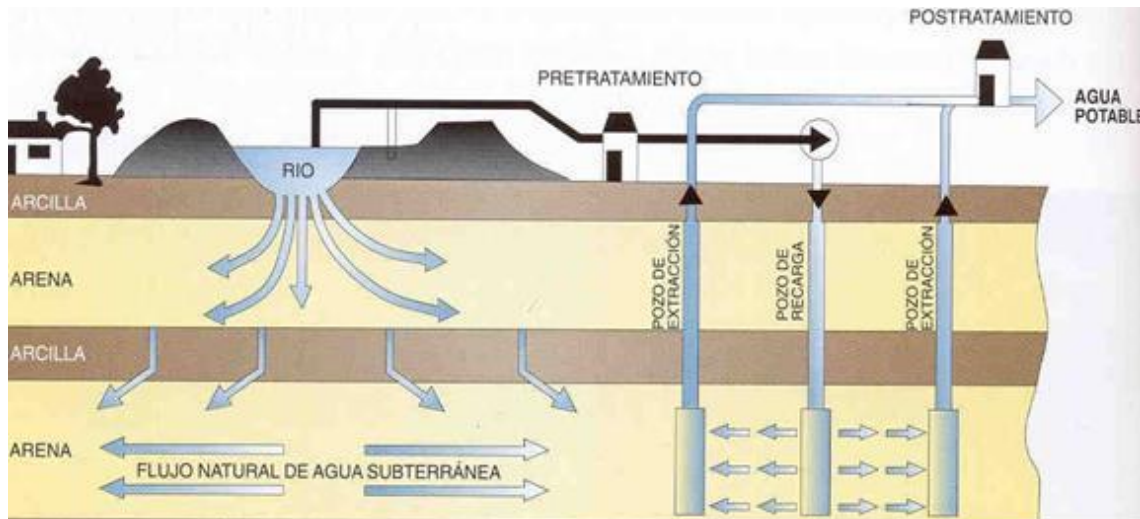


Figura 1.2. Esquema de un dispositivo de recarga artificial (tomado de Murillo et al., 2000)

1.4. Objetivos y ventajas de la recarga artificial

La recarga artificial representa una alternativa cada vez más extendida frente a los sistemas de almacenamiento en superficie, tanto a corto como a largo plazo.

El objetivo principal de esta técnica es aumentar los recursos hídricos subterráneos disponibles, y mejorar la calidad de las aguas (ITGE, 1991; Bouwer, 2002), tal y como se ha mencionado previamente. Otros objetivos son: reducir la intrusión marina, evitar procesos de subsidencia en el terreno, almacenar agua en el subsuelo, mejorar la calidad mediante técnicas de tratamiento de suelo y acuífero o geopurificación, el uso de acuíferos como sistemas de conducción de agua y proporcionar una fuente de abastecimiento subterráneo en aquellas zonas en las que, se prefiere este recurso a las aguas superficiales.

Esta técnica permite reducir e incluso eliminar el descenso del nivel producido por sobrebombeo. También otorga al acuífero un papel importante como embalse regulador y almacén, lo que posibilita disminuir las pérdidas por evaporación, permite a los usuarios disponer de una cierta independencia ante las intermitencias del ciclo hidrológico y una mejor distribución temporal del aprovechamiento de los recursos. A su vez, evita la construcción o instalación de conducciones de agua innecesarias y costosas, ya que el acuífero actúa como red de distribución. También compensa la pérdida de recarga natural en el mismo causada por actividades humanas, tales como los encauzamientos, derivaciones de agua, construcción de obras civiles (Lerner *et al.*, 1990; Bouwer, 1999 y 2002).

1.5. Recopilación de antecedentes

En primer lugar se ha realizado una recopilación bibliográfica geológica e hidrogeológica, en concreto, se ha consultado la hoja nº 1065 (Marbella) del Plan MAGNA (escala 1:50.000) y el Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga, en el que aparecen registradas las características de la masa de agua subterránea 060.040 (Marbella-Estepona).

Se ha recopilado información de diversas Tesis Doctorales de la Universidad de Málaga, Granada y Complutense de Madrid: *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blancas y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España)* (Andreo, 1997); *Caracterización hidrogeológica de acuíferos carbonáticos del sur de España a partir de sus respuestas naturales* (Jiménez, 2010) y *Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales: aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la cubeta de Santiuste (Segovia)* (Fernández, 2004). En las dos primeras se caracteriza hidrogeológicamente los acuíferos carbonáticos de Sierra Blanca y en la tercera se recoge información sobre la recarga artificial y experiencias previas de esta técnica.

También se han consultado algunos documentos realizados por Aquagest Andalucía sobre el acuífero del Señorío de Marbella y del aluvial del Río Verde, donde se describen los antecedentes y las características de la zona de estudio y las medidas llevadas a cabo para subsanar la escasez de recursos hídricos, así como mejorar la calidad del agua de abastecimiento. Además, el Plan General de Ordenación Urbana de Marbella ha supuesto la principal fuente bibliográfica para obtener un análisis ambiental claro y actual del municipio.

Por último, cabe hacer referencia al proyecto DINA-MAR (*Depth Investigation of New Activities for Managed Aquifer Recharge*) (Fernández, 2011), cuyo trabajo de investigación ha pretendido elevar el grado de conocimiento de la técnica de la recarga artificial de acuíferos en España, e intentar que comience poco a poco a ser tenida más en cuenta por la política hidráulica de nuestro país.

1.6. Objetivos

Los objetivos perseguidos con la realización de este trabajo de fin de máster son los siguientes:

- Conocer el estado actual del acuífero detrítico costero del Señorío de Marbella, tanto cuantitativo como cualitativo, con el fin de constatar la evolución que se ha producido en el mismo tras la experiencia de recarga artificial existente.
- Proponer nuevas fuentes de agua que puedan aportar un mayor caudal de inyección en el sistema, para combatir en mayor medida el descenso del nivel piezométrico y los efectos de la intrusión marina.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en la elaboración de esta memoria ha conllevado trabajos de campo y gabinete.

2.1. Trabajos de campo

A lo largo de los tres meses de prácticas se han realizado trabajos indispensables para este proyecto como el reconocimiento de la zona de estudio, la toma de medidas en la red de control.

2.1.1. Reconocimiento de la zona de estudio

Se han llevado a cabo diversas jornadas para conocer “in situ” el acuífero del Señorío de Marbella y algunos de sus principales puntos de agua (Figura 1.1), aunque también se visitaron áreas anexas (San Pedro de Alcántara y los embalses de la Concepción, de la Medrana, del Viejo Ángel y del Nuevo Ángel) como posibles fuentes excedentarias de recursos hídricos para inyectar en el acuífero estudiado.

2.1.2. Medidas periódicas en la red de control

Tras revisar el inventario de puntos de agua, se han realizado campañas de medidas en los distintos puntos. En total se controlaron doce sondeos, si bien cinco de ellos no se incluyen en esta memoria puesto que son objeto de estudio de la Tesis Doctoral que actualmente realiza Manuel Argamasilla Ruiz. Los puntos considerados han sido (Figura 1.1): Señorío 1 y 3, Torreverde, Oasis, Oasis-Manchones y los sondeos Jardín y Jeque, ubicados en la carretera secundaria MA-427.

a) Medidas del nivel piezométrico

Durante el periodo de estudio, se han realizado cuatro campañas de medidas del nivel piezométrico con la ayuda de un hidronivel de 100 m de la marca OTT en los siete sondeos antes nombrados. En otros puntos ubicados de la zona no se han podido hacer mediciones de este tipo puesto que se encontraban equipados, como es el caso del sondeo Señorío 2.

b) Medidas de parámetros físico-químicos

Se han medido “in situ” la conductividad eléctrica y la temperatura del agua en los puntos estudiados. Para ello se han empleado un conductivímetro, modelo 340i de la marca WTW, para las medidas

puntuales y una sonda multiparamétrica de 300 m, modelo KLL-Q de la marca SEBA Hydrometrie, para los registros en la vertical de los sondeos.

2.2. Trabajo de gabinete

El trabajo desarrollado en gabinete ha sido extenso, puesto que se disponía de abundante información relacionada con el tema en cuestión en la zona de estudio.

2.2.1. Ubicación de los sondeos

El software *Google Earth* es un completísimo atlas interactivo en tres dimensiones, que permite visualizar imágenes de satélite y capas que aportan mucha información. Con los trabajos de campo y la ayuda de este programa informático, se revisó el inventario de los puntos de agua del municipio de Marbella y se reconocieron y situaron 9 sondeos de la zona de estudio, de dos de los cuales no existen registros previos ni se efectuaba ningún tipo de control sobre los mismos.

2.2.2. Tratamiento de datos

a) Mapas

Con la ayuda del programa ArcGIS, se han confeccionado diversos mapas sobre la zona de estudio. Este software contiene multitud de herramientas y aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. También se ha utilizado el software Corel Draw x5 para editarlos.

b) Datos pluviométricos

Los datos mensuales de precipitaciones acumuladas utilizados en el presente estudio se han obtenido de la Red Hidrosur (Junta de Andalucía), en concreto de la estación situada en el embalse de la Concepción.

c) Perfiles verticales

Los valores medidos en campo de temperatura y conductividad eléctrica con la sonda multiparamétrica se han representado con el software Grapher, que permite obtener fácilmente los perfiles verticales de

los piezómetros a los que se ha tenido acceso. Los gráficos correspondientes se han representado en la zona de estudio con Corel Draw x5.

d) Hidrodinámica

Se han elaborado tablas de datos con los niveles piezométricos y se han confeccionado gráficos para representar la evolución temporal de dicho parámetro en los principales sondeos de la zona de estudio. Esta labor se ha llevado a cabo con los programas Microsoft Excel y Grapher. En el primero se ha utilizado también la herramienta LOESS, que permite mostrar la tendencia media de los datos representados. Así mismo, se han elaborado histogramas para sintetizar los datos de extracción e inyección de agua, relacionados con la recarga artificial en el acuífero.

e) Hidroquímica

Con la ayuda de diagramas de Piper y Stiff y gráficos binarios se han caracterizado las facies hidroquímicas del agua del sistema, así como la empleada para realizar la recarga artificial, a partir de los datos proporcionados por Aquagest Andalucía. También se ha utilizado la herramienta XLSTAT, un complemento estadístico de Microsoft Excel, para elaborar el análisis de componentes principales (ACP).

3. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Demografía

La población del municipio de Marbella no solo se ubica en el núcleo urbano del que recibe el nombre y en San Pedro de Alcántara, sino que el Instituto de Estadística de Andalucía reconoce en su Nomenclátor otra gran unidad de población, Nueva Andalucía.

En el año 2011 (Tabla 3.1), el núcleo principal de Marbella es el que tenía un mayor número de habitantes, en concreto 89.305 de los 138.662 totales, lo que equivalía al 64'4%. Le seguían en importancia San Pedro de Alcántara, con 34.240 personas (24'7%) y Nueva Andalucía con 15.117 habitantes (10'9%). En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de estos tres núcleos de población dentro del término municipal de Marbella.

Unidad poblacional	Población
Marbella	89.305
San Pedro de Alcántara	34.240
Nueva Andalucía	15.117
TOTAL	138.662

Tabla 3.1. Habitantes de las principales unidades poblacionales de Marbella en 2011 (Nomenclátor de Entidades y Núcleos de Población de Andalucía, 2006).

Según los datos anteriores, Marbella es el municipio más poblado de la provincia de Málaga y el único, a excepción de la capital, que supera el umbral de los 100.000 habitantes. Esto evidencia que la franja costera se ha convertido en el área de mayor dinamismo de la región, no sólo demográfico sino también económico, lo que ha tenido múltiples repercusiones. En todos los casos se puede afirmar que los distintos procesos sociales y económicos que se han desarrollado en el litoral han desencadenado un aumento del número de habitantes y de la superficie urbanizada de los municipios costeros.

Para abordar el estudio de la evolución demográfica reciente, la información del padrón municipal de habitantes facilitada por el Instituto de Estadística de Andalucía presenta, como ventajas, su actualización continua (el último dato publicado es del año 2011) y la existencia de unas series anuales desde 1996 al 2011. En la Tabla 3.2 se recopilan los datos demográficos registrados durante los últimos quince años en el término municipal de Marbella. También se ha optado por incluir una representación gráfica de dicho crecimiento para facilitar su comprensión (Figura 3.2).

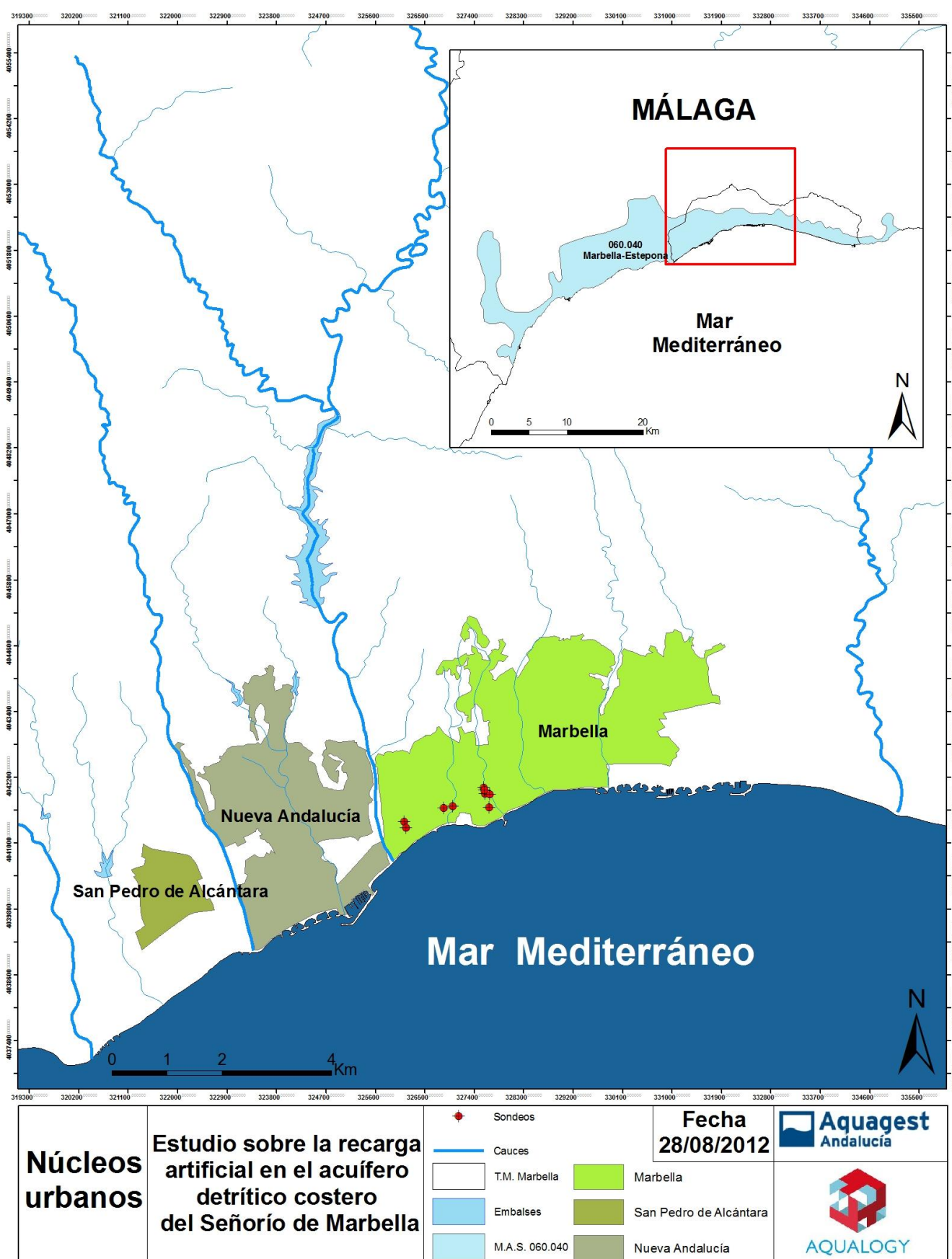


Figura 3.1. Ubicación de los principales núcleos urbanos en el término municipal de Marbella

Año	Población total
1996	98.823
1998	98.377
1999	101.144
2000	105.910
2001	110.847
2002	115.871
2003	116.234
2004	117.353
2005	124.333
2006	125.519
2007	126.422
2008	130.549
2009	134.623
2010	136.322
2011	138.662

Tabla 3.2. Población de Marbella según el Padrón Municipal (período 1996-2011) (Instituto de Estadística de Andalucía)

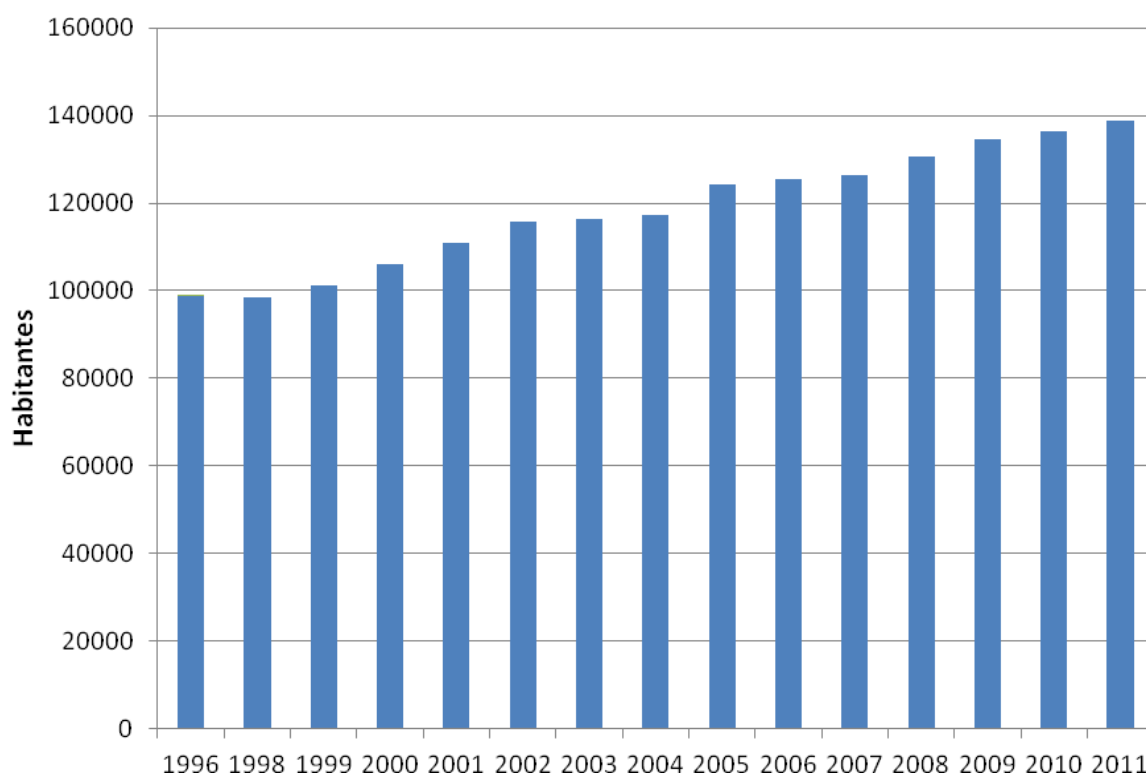


Figura 3.2. Evolución de la población del municipio de Marbella según el Padrón Municipal (período 1996-2011) (Instituto de Estadística de Andalucía)

Como se puede observar, la población del municipio de Marbella se incrementó en 39.839 personas desde 1996 hasta 2011. Esta cifra se traduce en un aumento relativo de más del 34%, valor superior al medio provincial, aunque inferior al de la Costa Occidental, debido a que las restantes localidades costeras que la integran superan ampliamente los crecimientos relativos de este municipio.

Marbella, como municipio turístico de la Costa del Sol y destino de vacaciones del turismo nacional e internacional, presenta una gran variación poblacional entre los meses invernales y estivales. Se estima que en verano se llega a duplicar e incluso triplicar el número de habitantes. Cálculos del Ayuntamiento de Marbella, a partir del volumen de residuos generados, estimaron que la población rondaba los 400.000 habitantes durante los meses estivales de 2010, mientras que fuentes policiales la cifran en cerca de 500.000 personas.

3.2. Climatología

De acuerdo con el sistema de clasificación propuesto por Köppen, toda la provincia de Málaga quedaría incluida en el tipo de clima templado cálido mediterráneo, caracterizado por una estación marcadamente seca, fuerte calor estival y temperaturas invernales suaves. Este tipo de clima puede variar según la comarca o la zona, de tal forma que en la Comarca de la Costa del Sol Occidental existe un clima Mediterráneo Subtropical, con inviernos muy suaves y veranos prolongados y cálidos.

Debido a factores geográficos, Marbella disfruta de un microclima especial, donde no se registran cambios importantes. Entre estos factores se encuentran el carácter de ensenada de sus costas, la orientación predominante de sus tierras hacia el sur, la presencia de unas alineaciones montañosas en la zona norte y la proximidad de un mar de aguas templadas, la situación estratégica en el recorrido de los vientos del sudoeste procedentes del Estrecho de Gibraltar y la latitud, que permite que los rayos solares incidan más perpendicularmente sobre la superficie y, por tanto, que la intensidad de luz y calor recibidas sean elevadas. Esta serie de características propicia la tipología de diagramas climáticos en Marbella, con resultados como los obtenidos en la Figura 3.3.

Estos gráficos corresponden a un periodo de observación de 17 años (1973-1989), en el caso de las temperaturas, y de 18 para la pluviometría (1972-1989). Se puede observar que en Marbella se registran unas temperaturas bastante suaves, con una media anual en torno a los 18 °C.

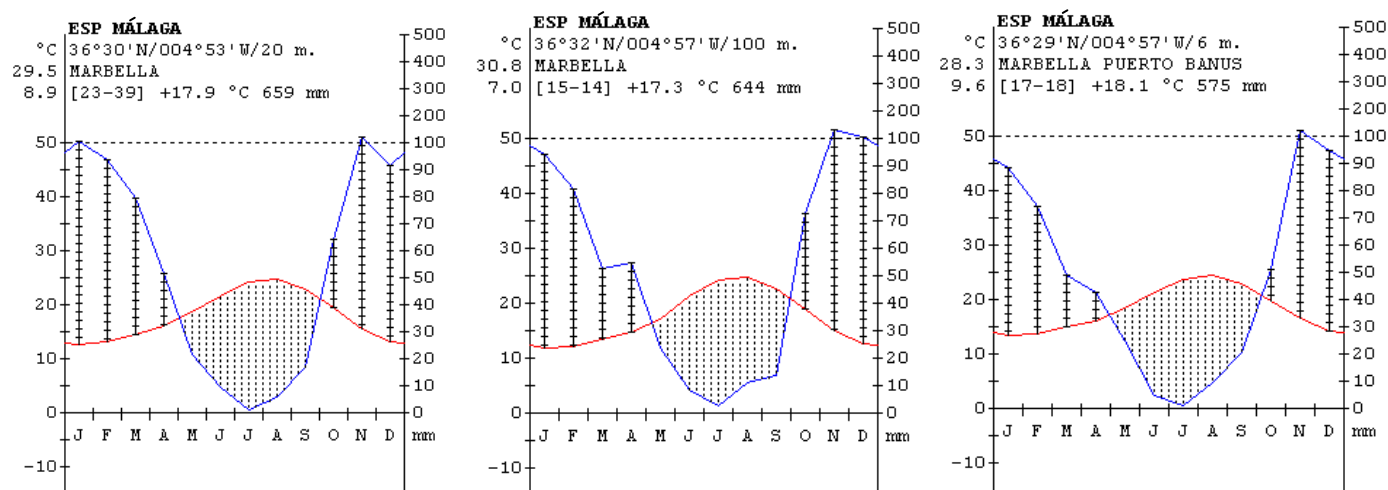


Figura 3.3. Diagramas climáticos de distintas estaciones situadas Marbella. En rojo, temperatura (°C) y, en azul, pluviometría (mm de lluvia) (www.globalbioclimatics.org)

Las características climáticas convierten a Marbella en un reclamo turístico, incluso en los meses de invierno, cuando la temperatura media se encuentra alrededor de los 13 °C y la media de las máximas puede llegar a los casi 17 °C. En época estival se alcanzan las temperaturas más elevadas del año y la media se encuentra en torno a los 23°C, con un valor de la media de las máximas de 26 °C y de la media de las mínimas de 19 °C (Tabla 3.3).

Estación del año	Tª media (°C)	Tª media de las mínimas (°C)	Tª media de las máximas (°C)
Invierno	13,62	10,13	16,97
Primavera	16,61	13,05	20,17
Verano	22,97	19,41	26,53
Otoño	19,31	15,87	22,69

Tabla 3.3. Temperaturas medias estacionales para el periodo 1974-2003 (estación meteorológica Marbella «Puerto Banús») (Ayuntamiento de Marbella, 2010)

El estudio de las precipitaciones se ha realizado a partir de los datos obtenidos de la estación del embalse de la Concepción perteneciente a la red Hidrosur de la Agencia Andaluza del Agua, desde octubre de 1994 hasta julio de 2012. La media aritmética de la precipitación anual en este periodo ha sido de 739 mm.

Para caracterizar el tipo de año hidrológico, se ha considerado como años húmedos aquellos que superan en un 15% la precipitación media anual registrada durante el periodo analizado y años

secos aquellos cuya precipitación es inferior al 85% de la media anual. Los años medios se encuentran entre estos márgenes. En el periodo estudiado se distinguen 6 años hidrológicos secos, 6 húmedos y 4 medios (Figura 3.4). El año más húmedo fue 2009/10, con una precipitación media de 1386 mm y el más seco fue 1994/95 con 250 mm.

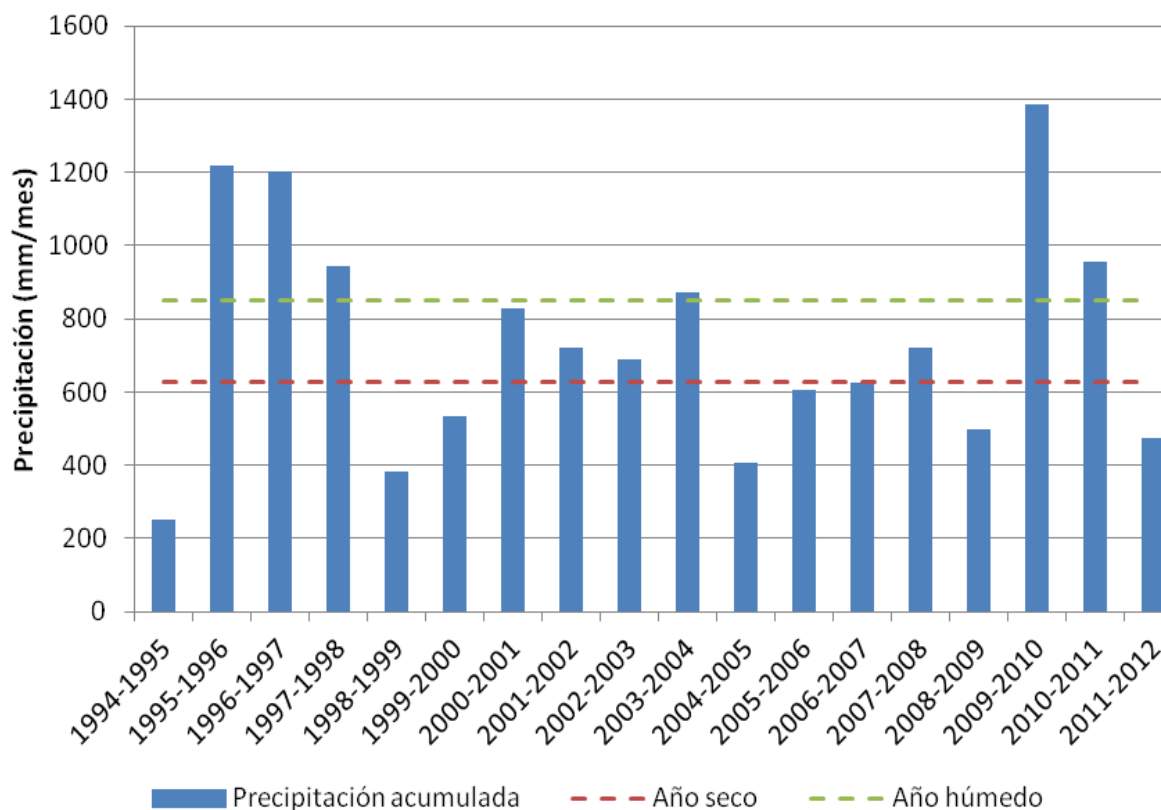


Figura 3.4. Precipitaciones acumuladas en el periodo 1994/95-2011/12 en la estación del embalse de la Concepción

El valor de la precipitación media mensual y su acumulada porcentual en el periodo de estudio (Tabla 3.4 y Figura 3.5) permite observar una gran variación a lo largo del año hidrológico. El mes de diciembre presenta el valor medio de precipitación más elevado (188 mm) y julio el menor (2 mm). Durante los cuatro primeros meses del año hidrológico se recoge más del 60% de la lluvia de todo el año, por lo que esta se concentra en otoño e invierno principalmente, mientras que en verano casi no se registra precipitación.

Mes	Precipitación mensual (mm)	% Acumulado
Octubre	79	10,5
Noviembre	85	21,8
Diciembre	188	46,7
Enero	105	60,6
Febrero	81	71,3
Marzo	78	81,6
Abril	56	89,0
Mayo	34	93,5
Junio	5	94,1
Julio	2	94,3
Agosto	3	94,6
Septiembre	40	100,0
Total	755	
Media	63	

Tabla 3.4. Valores de la precipitación media mensual y acumulada en el periodo 1994/95-2011/12 en la estación del embalse de la Concepción

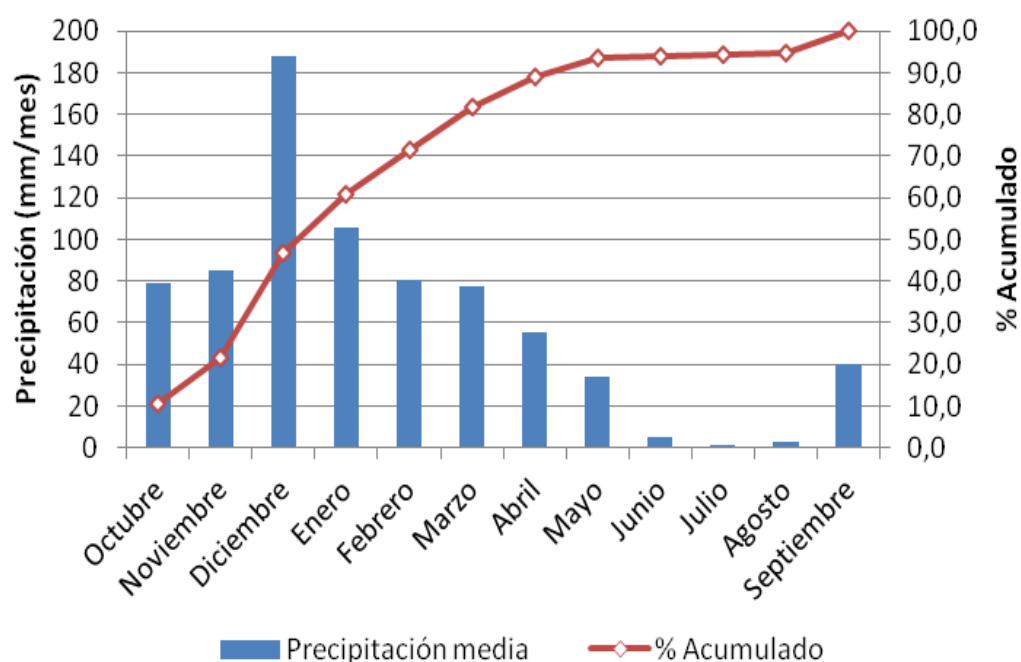


Figura 3.5. Precipitación media mensual y acumulada porcentual en el periodo 1994/95-2011/12 en la estación del embalse de la Concepción

3.3. Geología

En el municipio de Marbella afloran materiales de la denominada Zona Interna de la Cordillera Bética y sedimentos pliocuaternarios en el sector costero. Dentro de la Zona Interna se han distinguido tres grandes Complejos, tectónicamente superpuestos, que de muro a techo son: Nevado-Filábride, Alpujárride y Maláguide.

La Sierra Blanca, al norte del término municipal de Marbella, está constituida por varios afloramientos de materiales carbonatados, pertenecientes al Complejo Alpujárride. En esencia, una serie estratigráfica alpujárride está compuesta por un conjunto metapelítico inferior, de edad Paleozoico, constituido por gneises, esquistos, filitas y cuarcitas, sobre el que reposa una formación carbonatada, de edad Trías medio y superior, integrada por calizas y dolomías (en el sector oriental) y mármoles calizos y dolomíticos (en el sector occidental).

En la franja costera del término, sobre el conjunto de la Zona Interna, se ha depositado una secuencia de materiales sedimentarios de edad Plioceno a Cuaternario, formados, en parte, a expensas del desmantelamiento erosivo de los materiales de la Zona Interna. En esta secuencia se han diferenciado hasta 13 tramos que han sido agrupados en tres grandes secuencias (Aguagest Sur S.A.- Ingemisa, 1995): margosa basal, detrítica marina y detrítica continental, respectivamente. En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran el mapa geológico de la zona de estudio y los esquemas geológicos-hidrogeológicos que se describen a continuación:

- Secuencia margosa-basal: se encuentra por encima de los materiales de la Zona Interna (tramo 1) y comprende el tramo cartográfico 2. Se encuentra ampliamente representada al noroeste de Nueva Andalucía y corresponde a una franja de margas azuladas y verdosas de características litológicas muy monótonas, que alcanzan un mínimo de 200 m de espesor en las proximidades del borde septentrional de sus afloramientos, si bien al sur pueden incrementarse hasta un mínimo de 250 m a la altura de Nueva Andalucía.

- Secuencia detrítica marina: se dispone en paraconformidad sobre la anterior y hay zonas donde la solapa totalmente y llega a disponerse sobre la Zona Interna. Esta secuencia comprende dos tramos detríticos, depositados en sendas regresiones marinas.

El primer tramo tiene un espesor de 20 a 30 m y se presenta en toda el área, especialmente al norte de Puerto Banús. Está formado por un conglomerado heterométrico de matriz arcillosa (3a) y conglomerados y gravas (3b).

El segundo tramo detrítico se ubica a techo del tramo 3 o bien directamente sobre las margas del tramo 2, o incluso sobre las materiales de la Zona Interna (tramo 1). Los materiales cartografiados son arenas gruesas (4a), arenas medias con finos, propias de ambientes deltaicos (4b) y arenas finas y limos (4c).

Por encima, mediante cambio de facies con las arenas gruesas, se presenta un conjunto conglomerático (tramo 5). El único afloramiento cartografiado se encuentra al oeste de Marbella, con espesores que varían entre los 20 y 35 m de norte a sur. La edad de este conjunto sería Plioceno-Cuaternario basal.

- Secuencia detrítica continental: corresponde a sedimentos recientes formados por la dinámica fluvial, marina y eólica. De esta secuencia forma parte la unidad cartográfica 6, que engloba a estos materiales asociados a los cauces actuales y a los depositados en vaguadas, pies de monte y zonas deprimidas. Por datos de sondeos, se conoce que la potencia de estos materiales alcanza 15 m en el Río Verde.

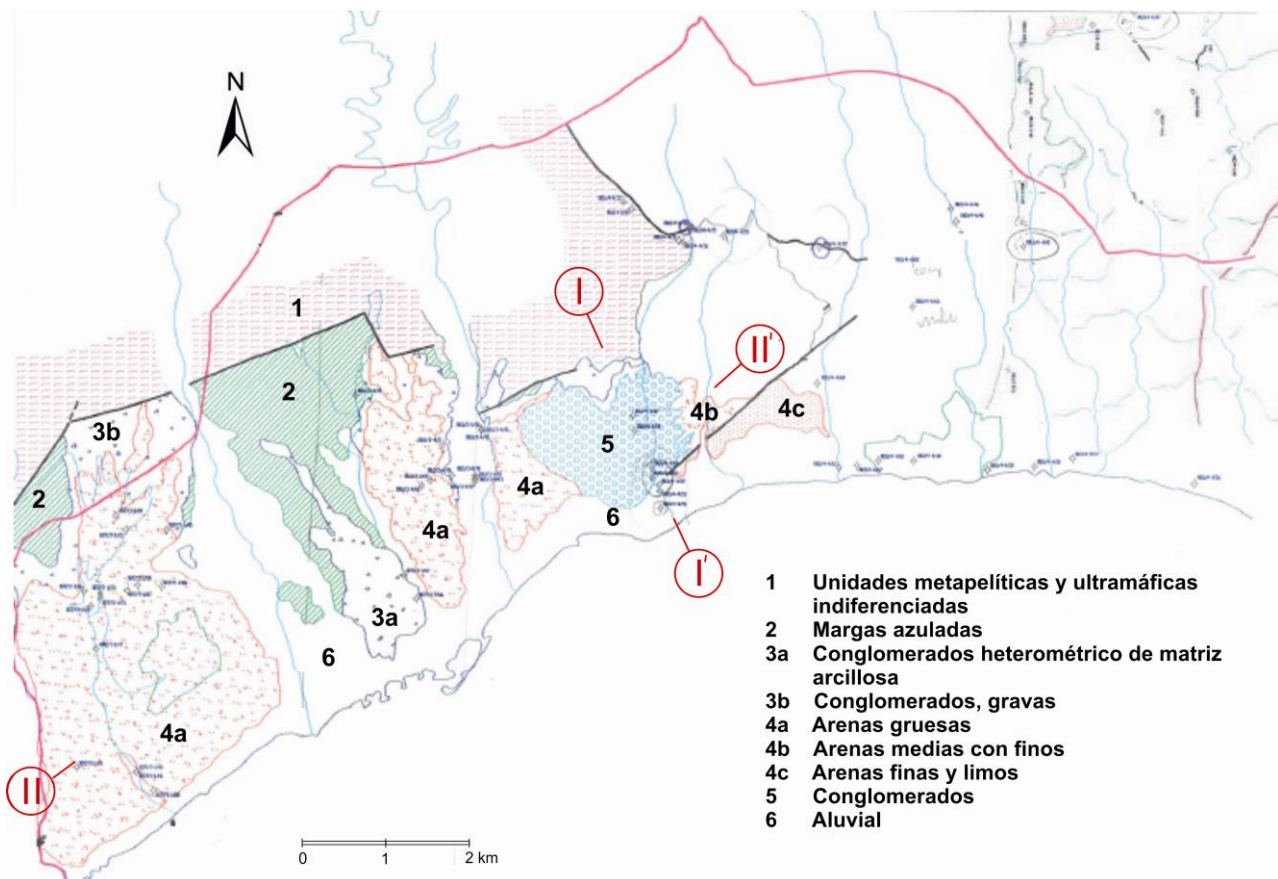


Figura 3.6. Mapa geológico de la zona costera del área de estudio (Modificado de Aquagest Sur S.A.–Ingemisa, 1995)

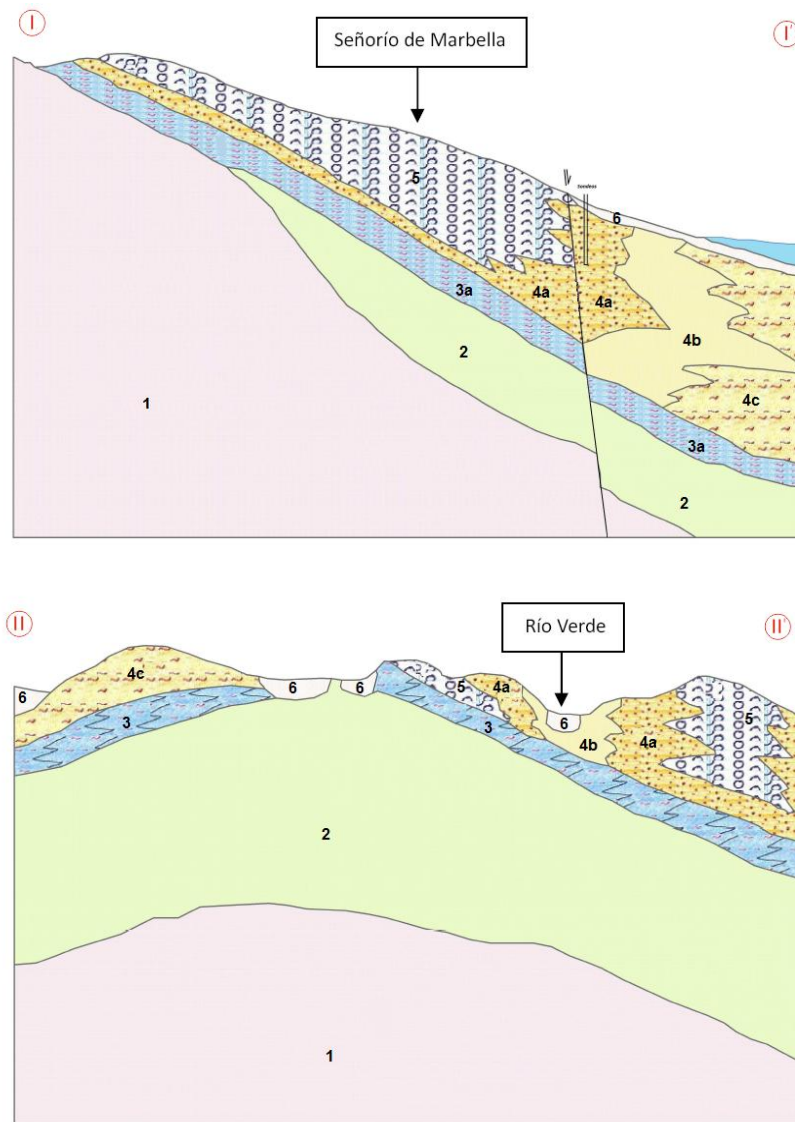


Figura 3.7. Esquemas geológicos-hidrogeológicos de la zona de estudio. Sin escala (Modificado de Aquagest Sur S.A.-Ingemisa, 1995)

3.4. Hidrología superficial

En el municipio de Marbella se pueden diferenciar cuatro cuencas hidrográficas, que recogen la mayor parte del agua: Guadalmina, Guadaiza, Río Verde y Río Real (Figura 3.8). Sus principales características aparecen recogidas en la Tabla 3.5.

Nombre	Superficie cuenca (km ²)	Longitud (km)	Desnivel (m)	Pendiente media (%)
Guadalmina	67,4	22,62	960	4,29
Guadaiza	64	22,18	700	-
Verde	96,5	28,02	1.560	4,89
Real	28,5	11,17	-	-

Tabla 3.5. Características de los ríos más importantes de Marbella (Compendio de Cartografía y Estadística de Andalucía, 2001)

La red de drenaje que discurre por el término municipal de Marbella posee una serie de características que lo diferencian de otras zonas. Por un lado, la proximidad de las sierras al litoral hace que estos cursos tengan un recorrido muy corto, salven fuertes pendientes y se comporten como auténticos torrentes.

Por otro lado, el régimen de lluvias que afecta a la zona, con su marcada irregularidad, hace que, salvo en aquellos cursos que están regulados por embalses, el agua discurra por ellos de modo intermitente con caudal durante los periodos de lluvia y secos durante buena parte del año. Así pues, en esta red hidrográfica predomina la escorrentía estacional.

La zona de estudio se sitúa al este del acuífero aluvial del Río Verde, el más importante de Marbella, a pesar de que sólo una pequeña parte de su cuenca se encuentra dentro del término municipal. Es el río más caudaloso de la comarca. Nace en la Sierra de las Nieves y pasa por el término municipal de Istán hasta llegar al embalse de la Concepción, que abastece de agua potable a Marbella y los municipios de la Costa del Sol. Aguas abajo de la presa, presenta un lecho más ancho que en el resto de su cuenca y da lugar al acuífero aluvial de Río Verde.

En el área de estudio hay cuatro embalses (Figura 3.8): el de la Concepción o de Río Verde (el más importante), el Nuevo del Ángel, el Viejo del Ángel o las Tortugas y el de la Medrana. El embalse de la Medrana tiene poca capacidad y superficie. Se encuentra sobre el Arroyo del Chopo y se localiza en el paraje que le da nombre, en el extremo oeste del término municipal de Marbella. Los embalses Viejo del Ángel y Nuevo del Ángel fueron construidos en 1850 y 1900 respectivamente sobre el cauce de dos afluentes del Arroyo Benabato. El primero tiene una capacidad de 0'30 hm³ y una superficie de 1 ha, y el segundo de 0'20 hm³ y 4'4 ha. Ambos se ubican en el extremo noroeste del término municipal y muy próximos entre sí. El embalse de la Concepción fue construido en 1971, es el de mayor capacidad y superficie dentro del término municipal de Marbella, con 61'85 hm³ y 214 ha, respectivamente. La longitud del río afectada por la construcción de este embalse ha sido de 5 km y su caudal de desagüe es de 175 m³/s.

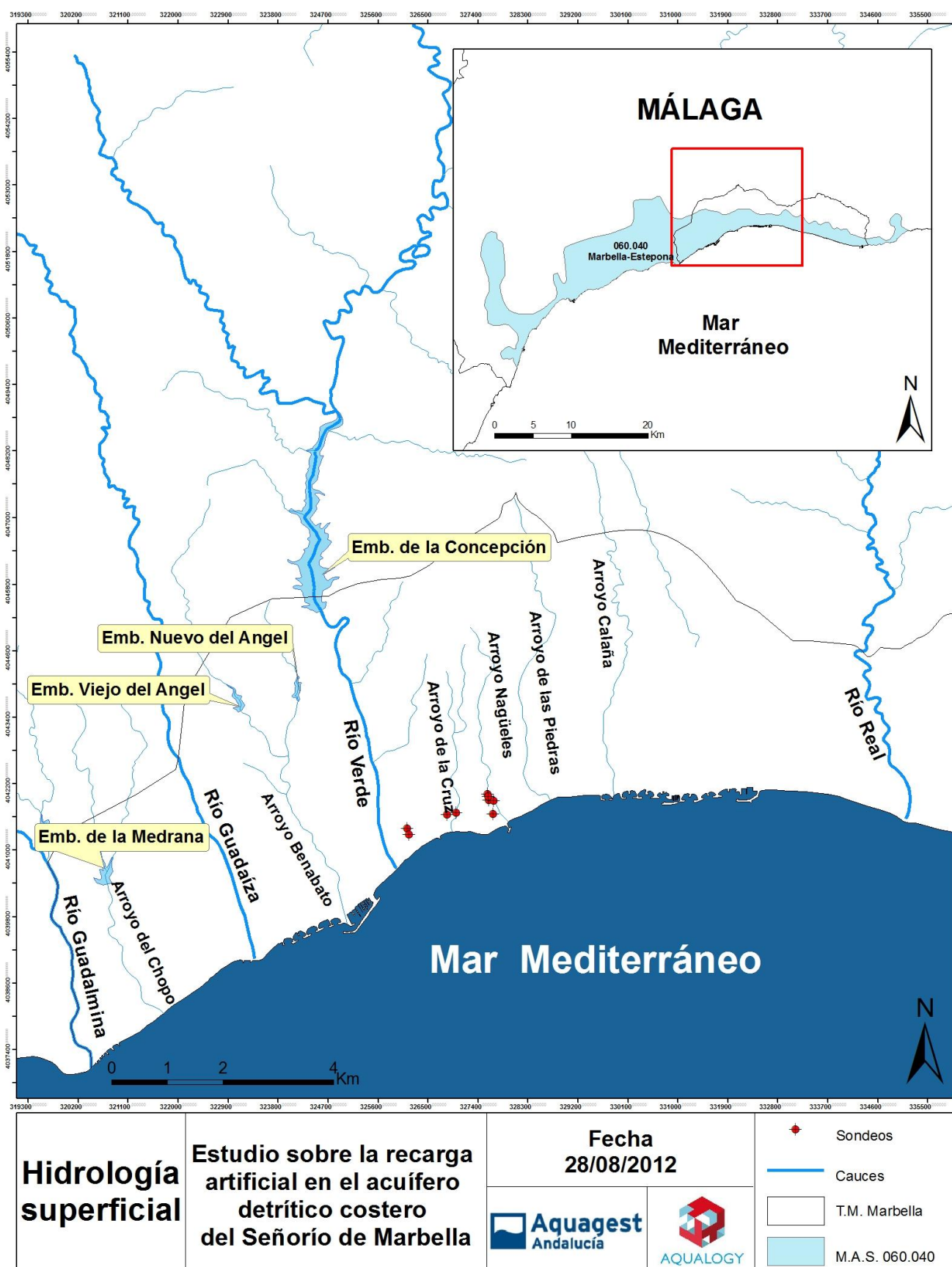


Figura 3.8. Principales cauces y embalses del término municipal de Marbella

3.5. Hidrogeología

En el municipio de Marbella se encuentran representadas dos unidades hidrogeológicas de diferente naturaleza, comportamiento hidráulico y grado de uso y explotación de sus recursos. Por un lado, la denominada masa de agua subterránea (M.A.S.) 060.040 (Marbella-Estepona), de tipo detrítico, que en todo su borde meridional contacta con el mar y soporta las demandas generadas por urbanizaciones, complejos hoteleros, campos de golf y municipios asentados en aproximadamente 40 km de costa. Por otro, la M.A.S. 060.067 (Sierra Blanca), de tipo kárstico, con recursos de difícil regulación, a tenor de los resultados de las numerosas perforaciones de investigación que se han efectuado.

3.5.1. M.A.S. 060.040 (Marbella-Estepona)

El área de estudio queda englobada en la denominada masa de agua subterránea Marbella-Estepona (060.040), que se extiende a lo largo de la franja costera del sector occidental de la provincia de Málaga, entre la Cala de Mijas, al este, y Manilva, por el oeste. Al norte, queda delimitada por la cadena montañosa que va desde la Sierra Bermeja (en la parte occidental) hasta las estribaciones meridionales de la Sierra Alpujata (en la parte oriental), pasando por Sierra Blanca.

Los acuíferos más importantes de la masa de agua subterránea están formados por los materiales pliocenos y cuaternarios que afloran entre Estepona y la Cala de Mijas, con un área total de 80 km². La gran longitud de afloramientos pliocuaternarios (40 km) y su anchura (2 km), unida a las variaciones de espesores y de litologías de los materiales acuíferos, permiten diferenciar varios sectores desde el punto de vista de la gestión y explotación, de oeste a este (Figura 3.9): Estepona-aluvial del Padrón, Aluvial del Guadalmina, San Pedro-Medranas, Aloha-Puerto Banús, Aluvial del Río Verde, Señorío de Marbella y Marbella-sector oriental.

Los materiales pliocenos constituyen un acuífero detrítico multicapa, con el tramo basal confinado hacia el mar y libre hacia el interior, excepto en el sector del Señorío de Marbella, donde el acuífero libre llega hasta el mar y los niveles permeables contactan con este (Lupiani, 2007). Los sedimentos pliocenos con mayor tamaño de grano presentan, en su conjunto, buenas características hidráulicas, aunque existe una distribución irregular de los mismos a lo largo de sus afloramientos. La transmisividad de estos materiales acuíferos está comprendida entre 250 y 500 m²/día, e incluso llega a ser de 2.000 m²/día en algunas áreas, mientras que el coeficiente de almacenamiento varía entre $5,7 \cdot 10^{-3}$ y $2,6 \cdot 10^{-4}$. En la mayor parte del acuífero, el nivel piezométrico se encuentra entre 10 y 40 m de profundidad y, en gran parte de su extensión, tiene un comportamiento propio de acuífero confinado.

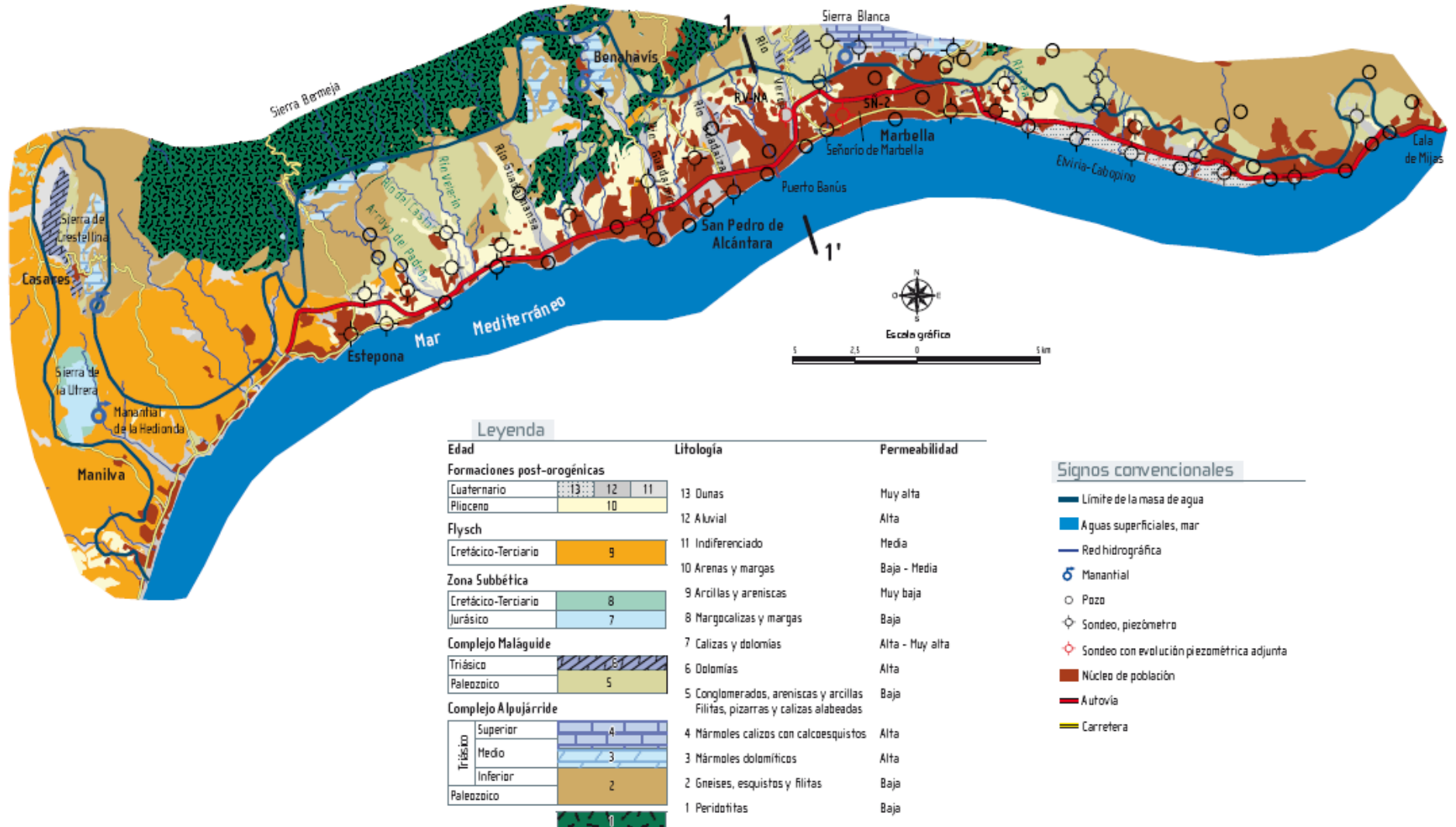


Figura 3.9. Situación geográfica de la masa de agua subterránea Marbella-Estepona (060.040) (tomado de Lupiani, 2007)

Por lo que respecta a los depósitos aluviales, cabe destacar los asociados a los Ríos Padrón, Guadaiza, Guadalmina y Verde, que tienen transmisividades muy elevadas, entre 2.000 y 16.000 m²/día, y el coeficiente de almacenamiento es del 5 al 10%. Se trata de acuíferos libres cuyo nivel piezométrico se encuentra, normalmente, a menos de 10 m de profundidad.

Los datos piezométricos disponibles indican la existencia de saltos y discontinuidades entre los acuíferos plioceno y cuaternario. Por lo general, el nivel piezométrico se encuentra a mayor cota en la parte septentrional de los acuíferos aluviales, mientras que en las proximidades a la costa la cota piezométrica es más alta en el acuífero plioceno.

Las evoluciones piezométricas del acuífero plioceno y del cuaternario muestran importantes variaciones, estacionales y plurianuales, ligadas al régimen de explotación y a las precipitaciones. Las variaciones estacionales son de 5 a 10 m, tal y como se muestra en la Figura 3.10, con máximos en primavera y mínimos en octubre, y afectan tanto al acuífero plioceno como a los aluviales. A escala plurianual se registran variaciones decamétricas en el acuífero plioceno y mucho más atenuadas en los aluviales, con mínimos en periodos secos.

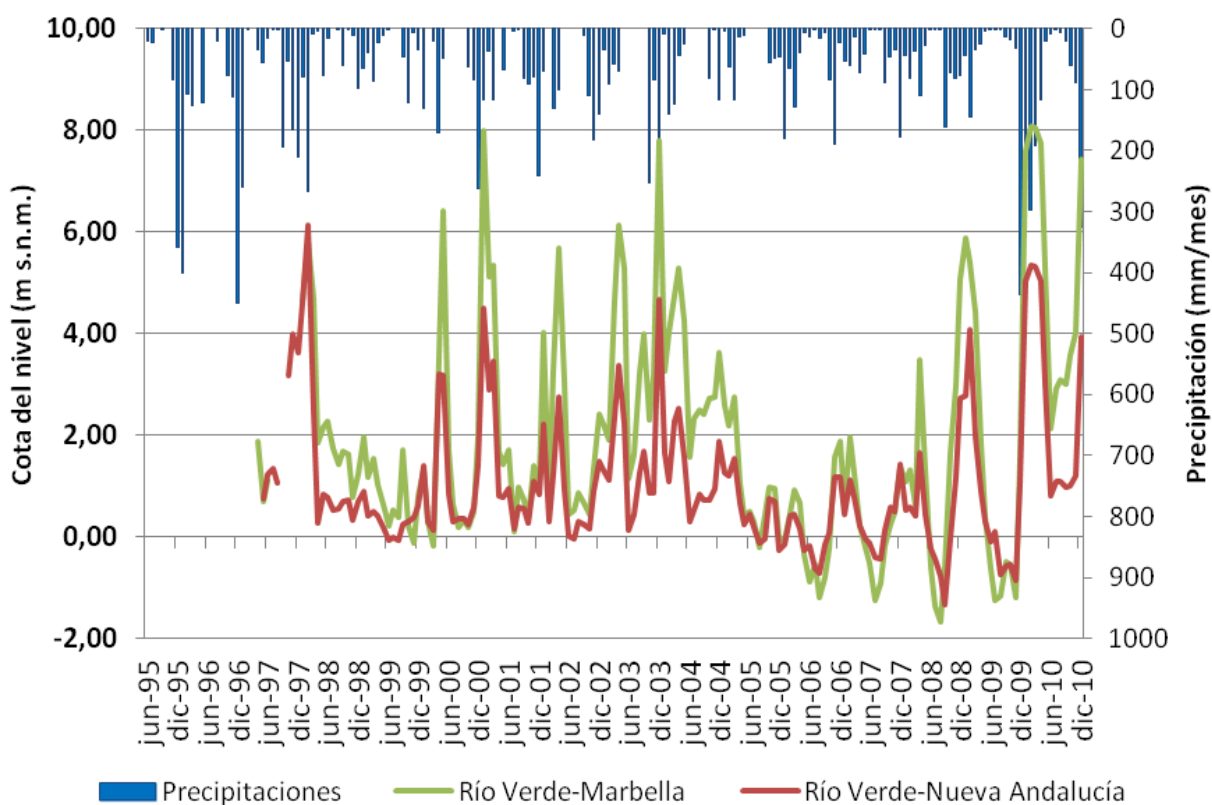


Figura 3.10. Evolución piezométrica en los sondeos Río Verde-Marbella y Río Verde-Nueva Andalucía. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

El acuífero aluvial del Río Verde, al oeste del área de estudio, tiene una extensión de unos 2 km², aguas abajo de la presa de la Concepción. Se extiende en una franja de 500 m de ancho por 4.000 m de longitud, con una pendiente del 1% hacia el mar. Su borde septentrional corresponde con el embalse, mientras que el meridional coincide con la línea de costa.

Este acuífero está constituido por gravas gruesas y arenas ligadas al cauce de dicho río, hasta una profundidad de unos 20 m, y de limos arenosos con un espesor de otros 20 m, según resultados obtenidos en las diversas testificaciones geofísicas efectuadas en algunos de los sondeos (Pozos Reunidos S.L., 1996). El conjunto se dispone discordante sobre materiales paleozoicos del complejo Maláguide y margas y limos del Mio-Plioceno.

Se trata de una formación con elevada transmisividad, entre 3.000 y 16.000 m²/día que se alimenta de la infiltración de precipitaciones y de la escorrentía del río y sus afluentes, con un volumen de recursos del orden de 1'86 a 4'35 hm³/año para la media de los años secos y húmedos respectivamente, y de las filtraciones y drenajes del embalse que pueden superar los 7 hm³/año, cifra que se corresponde con el caudal máximo de flujo subterráneo que permite el acuífero.

Las salidas naturales se realizan al cauce del río en su tramo final y por drenaje subterráneo hacia el mar. Las salidas por bombeo corresponden prácticamente en su totalidad a la explotación de las baterías de sondeos de titularidad municipal.

El acuífero del sector del Señorío está constituido por conglomerados y arenas y limos arenosos del Plioceno, de elevada permeabilidad, que buzan de 5 a 10° hacia el mar, con el que contacta en un frente de 3'2 km. Es un conjunto multicapa de unos 100 m de espesor, confinado en su mitad meridional, con transmisividad de 1.995 m²/día y coeficiente de almacenamiento de 5'7·10⁻³ (Pozos Reunidos S.L., 1996). La alimentación se produce fundamentalmente por la infiltración de precipitaciones sobre una superficie permeable de 7'1 km² y, en menor grado, por infiltración de la escorrentía de los arroyos Nagüeles y Piedras (Figura 3.8), que se alimentan de manantiales de Sierra Blanca. Las principales salidas del sistema se producen mediante bombeos en los sondeos de la zona y por flujos subterráneos hacia el mar.

Los recursos se han evaluado en 1'57 hm³/año frente a un volumen interanual de extracciones de 1'52 hm³/año desde 1995. De estas extracciones, 0'87 hm³/año corresponden a la batería de sondeos municipal y al menos 0'65 hm³/año de las urbanizaciones de la zona. El acuífero ha sido explotado desde hace más de tres décadas, tanto para abastecimiento del núcleo de Marbella como de urbanizaciones, en sondeos situados a distancias entre 50 y 200 m del mar.

3.5.2. M.A.S. 060.067 (Sierra Blanca)

La fracturación y la karstificación de los mármoles que forman la Sierra Blanca permiten la circulación y acumulación de agua subterránea (IGME, 1983, Andreo, 1997). Los condicionamientos litológicos y tectónicos en ambas sierras han permitido diferenciar distintos sistemas acuíferos, con diferentes comportamientos hidrogeológicos (Andreo *et al.*, 1997; Andreo *et al.*, 2000).

El sistema acuífero en el que se encuentra la zona de estudio fue definido por Andreo (1997) como sistema de Marbella (Figura 3.11) y ocupa una superficie de 25 km². Este sistema comprende la parte meridional de Sierra Blanca y está delimitado al sur y oeste por una falla normal que pone en contacto mármoles triásicos con materiales de baja permeabilidad. Al norte y este, el sistema está formado por sendos núcleos anticlinales de metapelitas, que actúan como barrera hidrogeológica (Andreo, 1997).

Los principales puntos de surgencia del sistema, atendiendo al caudal medio drenado, son los manantiales de Nagüeles (MB-9), Camoján (MB-10) y Alfahuara (MB-8) (Figura 3.11), que sufren grandes variaciones estacionales. Los dos primeros están situados en el borde meridional del sistema, a cotas 175 y 192 m s.n.m. respectivamente, mientras que el tercero se encuentra en el extremo noroeste a cota 250 m s.n.m. En los arroyos Calaña y Represas, hay manantiales situados a cota 150 m s.n.m.

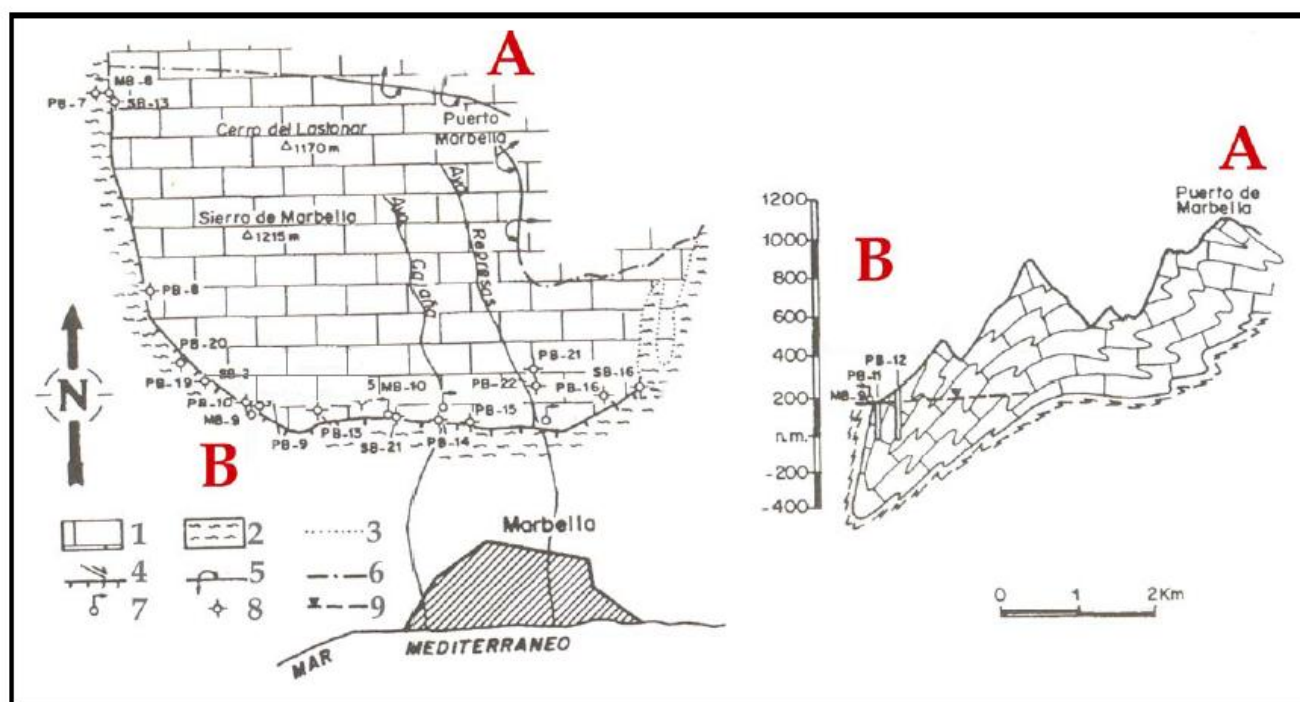


Figura 3.11. El acuífero de Marbella (Tomado de Andreo, 1997). Leyenda; 1, mármoles; 2, gneises y pizarras; 3, contacto concordante; 4, falla normal; 5, anticlinal tumbado; 6, divisoria hidrogeológica; 7, manantial; 8, sondeo y 9, nivel piezométrico

El hidrograma anual de los manantiales de Nagüeles y Camoján muestra crecidas muy rápidas (Figura 3.12) en respuesta a las precipitaciones importantes. El caudal registrado en el manantial de Nagüeles varía entre 0 (noviembre de 1981) y 800 l/s (diciembre de 1989), con un valor medio de 58 l/s, equivalente a una descarga media anual cercana a 2 hm³. Los caudales aforados en el manantial de Camoján varían entre 0 (registrado en todos los estiajes) y 1.100 l/s (diciembre de 1989), con un valor medio anual igual al anterior, 58 l/s. En el periodo 1990/91-1993/94 (Andreo, 1997), los caudales medios registrados fueron, respectivamente, 48 y 41 l/s.

En el manantial de Camoján se produce una respuesta ante las precipitaciones de mayor magnitud que en el de Nagüeles. El primero está situado a cota ligeramente más alta que el segundo y podría considerarse un trop-plein de este último. Las bruscas variaciones de caudal en respuesta a las precipitaciones, desde 0 l/s hasta varios centenares de l/s, son indicativas de un escaso poder regulador y, en definitiva, un elevado grado de karstificación.

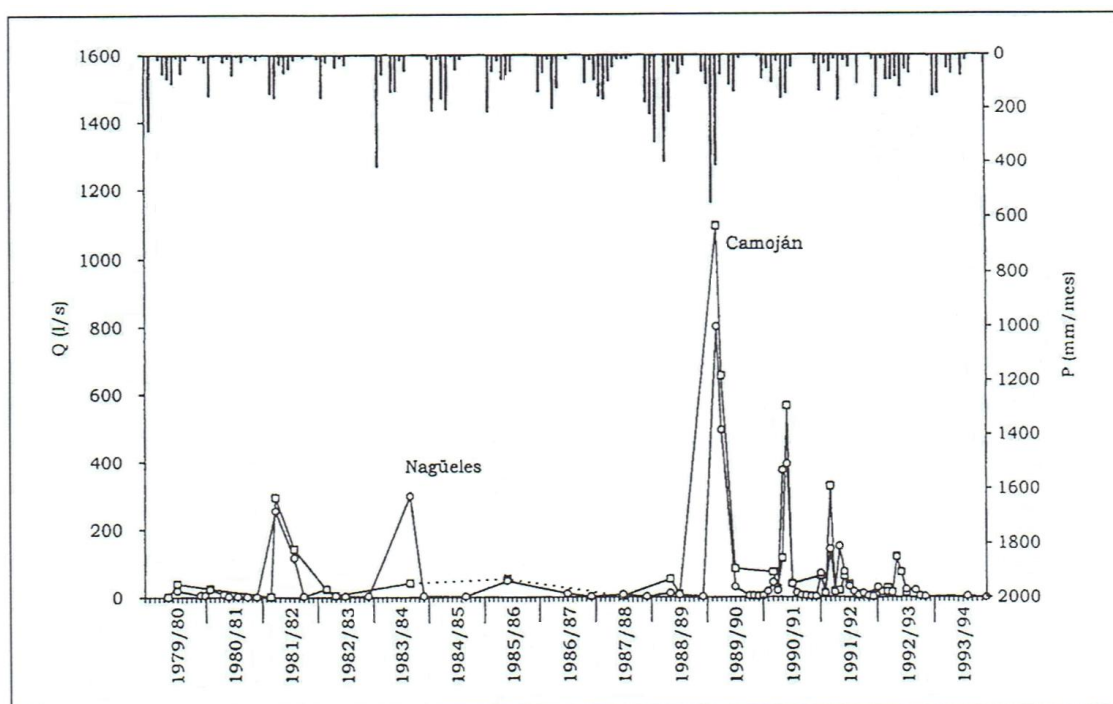


Figura 3.12. Hidrograma de los manantiales de Nagüeles y Camoján (Andreo, 1997)

4. RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DEL SEÑORÍO

4.1. Primeros sondeos de inyección

El acuífero objeto de estudio presenta numerosas captaciones que, hasta la ejecución de la presa de la Concepción, abastecían las primeras grandes urbanizaciones de la costa y parte del propio núcleo urbano. El sondeo Torreverde (Figura 1.1) es el más antiguo de los utilizados en el suministro a Marbella y aportó 208.251 m³ en 1992, 854.243 m³ en 1993 y 779.686 m³ en 1994. En 1995 se incorporaron los sondeos Señorío 1, 2 y 3 y Oasis, con un volumen extraído total de 2.427.679 m³ ese año, del cual 1.435.509 m³ corresponden a las captaciones de Señorío, 745.109 m³ a Torreverde y 247.061 m³ a Oasis.

La explotación continuada a lo largo de los años y sobre todo a partir del periodo de sequía sufrido entre 1990 y 1995, se produjo un deterioro de la calidad del agua subterránea que ha afectado de forma desigual a sus usuarios. La respuesta de los mismos fue distinta según sus hábitos de explotación. Por un lado, las captaciones destinadas al abastecimiento público redujeron preventivamente la extracción para no aumentar la salinidad del acuífero y, por otro, las de carácter privado, derivaron el uso hacia el mantenimiento de zonas verdes, jardines y otras demandas menos exigentes con la calidad. Esta situación se volvió completamente insostenible, puesto que se perjudicaba al acuífero, particularmente a las reservas de agua que no estarían disponibles para los momentos críticos en los que fuera necesario recurrir a ellas.

En este contexto, Aquagest Sur S.A., como responsable del Servicio Municipal de Aguas de Marbella, inició una serie de trabajos para estudiar posibilidades de actuación, teniendo en cuenta que el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur contempla la recarga artificial con aguas residuales depuradas. Como se trataba de abastecimiento público, se optó por utilizar recursos hídricos de una calidad mejor que las anteriores y, por ello, se prefirió hacer uso de los excedentes invernales procedentes de Sierra Blanca como recurso a inyectar, en concreto del manantial de Camoján. A esta decisión se llegó tras evaluar los volúmenes susceptibles de aprovecharse, verificar su calidad y constatar la existencia y disponibilidad de la mayor parte de la infraestructura precisa, es decir, sondeos (Señorío 1 y 3) y conducciones. Esta primera etapa de recarga artificial en el acuífero del Señorío de Marbella comenzó en octubre de 1999 y se mantuvo operativa hasta febrero de 2006. El objetivo principal de esta actuación era aumentar la disponibilidad de recursos de agua para el suministro de agua potable en los periodos estivales o con déficit de precipitaciones, así como mejorar la calidad del agua almacenada.

Las instalaciones se dimensionaron para inyectar caudales de hasta 100 l/s, aunque en un principio no superarían los 80 l/s, caudal similar a los que se puede bombear en los sondeos. La toma de agua se construyó en el propio cauce del arroyo de Camoján, que permite la laminación de la corriente de

agua, con toma de fondo y válvula para regular caudales (Fotografía 4.1). De la toma de agua parte una tubería de PVC de 0'3 m de diámetro hasta conectar, 4 km aguas abajo, con la red de impulsión de los sondeos. En los sondeos se han mantenido las bombas para facilitar la limpieza y en superficie se instaló un sistema de válvulas que permitiera tanto la inyección de agua como el vertido del agua de limpieza y purga hacia el arroyo Nagüeles. La instrumentación del sistema consta de contadores y piezómetros en los sondeos de inyección, más dos puntos de seguimiento situados aguas arriba y abajo (Señorío 2 y Torreverde, respectivamente).



Fotografía 4.1. Toma de agua para recarga artificial en el arroyo de Camoján

Una vez que el agua del manantial entra en la toma, se llenan los 4 km de conducción y finaliza en las válvulas de los pozos de recarga, mediante las cuales se regula el caudal de entrada hasta conseguir que se estabilicen las condiciones de funcionamiento (nivel piezométrico en boca de sondeo y presión entre 7-8 kg/cm²). En estas condiciones se inyectan de 15 a 40 l/s, según la situación hidrogeológica del acuífero. La Figura 4.1 muestra un esquema hidrogeológico del acuífero del Señorío de Marbella con la ubicación de la toma de agua y los sondeos de inyección y de control.

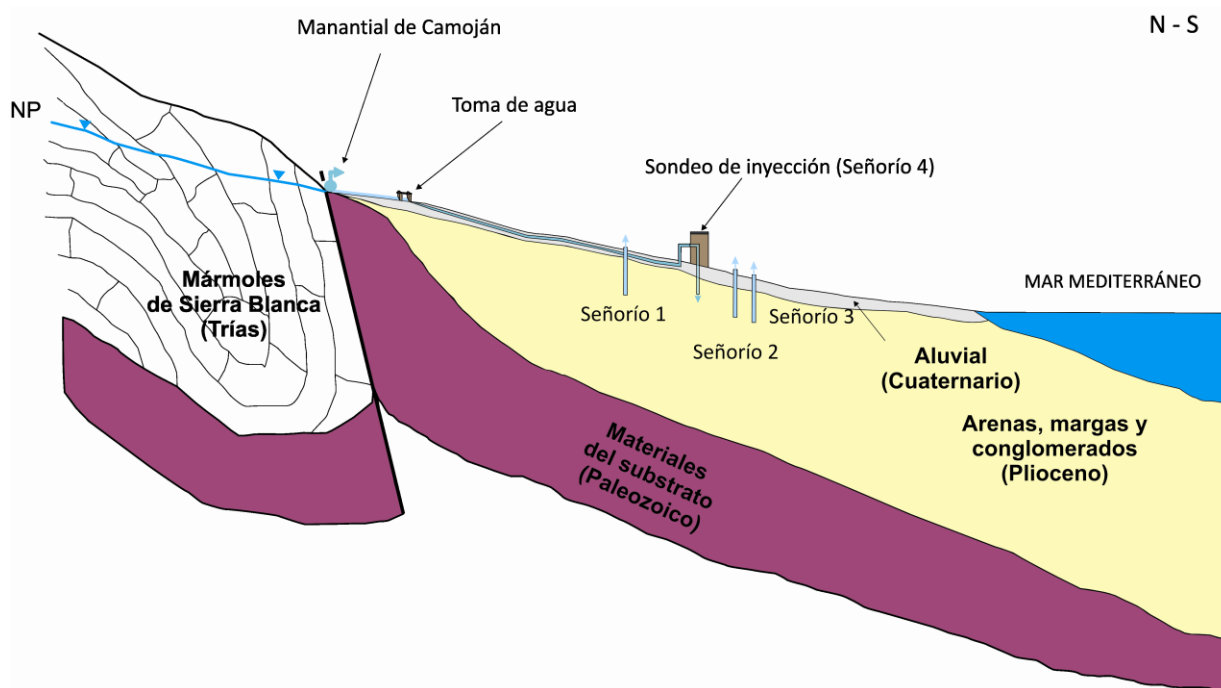


Figura 4.1. Esquema hidrogeológico del acuífero del Señorío de Marbella y la recarga artificial
(Modificado de Sánchez et al., 2005)

El 9 de enero de 2002, Aquagest Sur S.A. realizó un ensayo para determinar cuánto ascendía el nivel piezométrico en Señorío 3, uno de los sondeos de inyección, cuando se introducía el agua procedente del manantial de Camoján. La experiencia apenas duró 50 minutos (Figura 4.2), pero en ese corto periodo de tiempo se produjo un ascenso de casi 3 m, con un caudal medio de inyección de 25'5 l/s.

En los primeros 25 minutos apenas se produjo variación en el nivel piezométrico, pero a partir de ese punto hay un aumento considerable del mismo como respuesta a un ligero aumento del caudal de inyección. Entre los minutos 30 y 40 es cuando se registra un mayor ascenso del nivel por unidad de tiempo, concretamente la profundidad pasó de 4 a 2 m. Esto puede indicar que entre esos puntos existen tramos de menor permeabilidad. En la columna litológica del sondeo (ver anexo al final de esta memoria) aparece registrada una textura limosa-arcillosa con presencia de arenas entre los 0 y 30 m de profundidad.

A partir de los 2 m de profundidad, el nivel piezométrico apenas varió aunque el caudal de inyección se mantuvo en ascenso, con un valor máximo de 28'33 l/s registrado a los 46 minutos, lo cual denota que a partir de ese punto se produce una difusión de los caudales introducidos en el acuífero y se genera un mayor flujo subterráneo hacia cotas piezométricas más bajas.

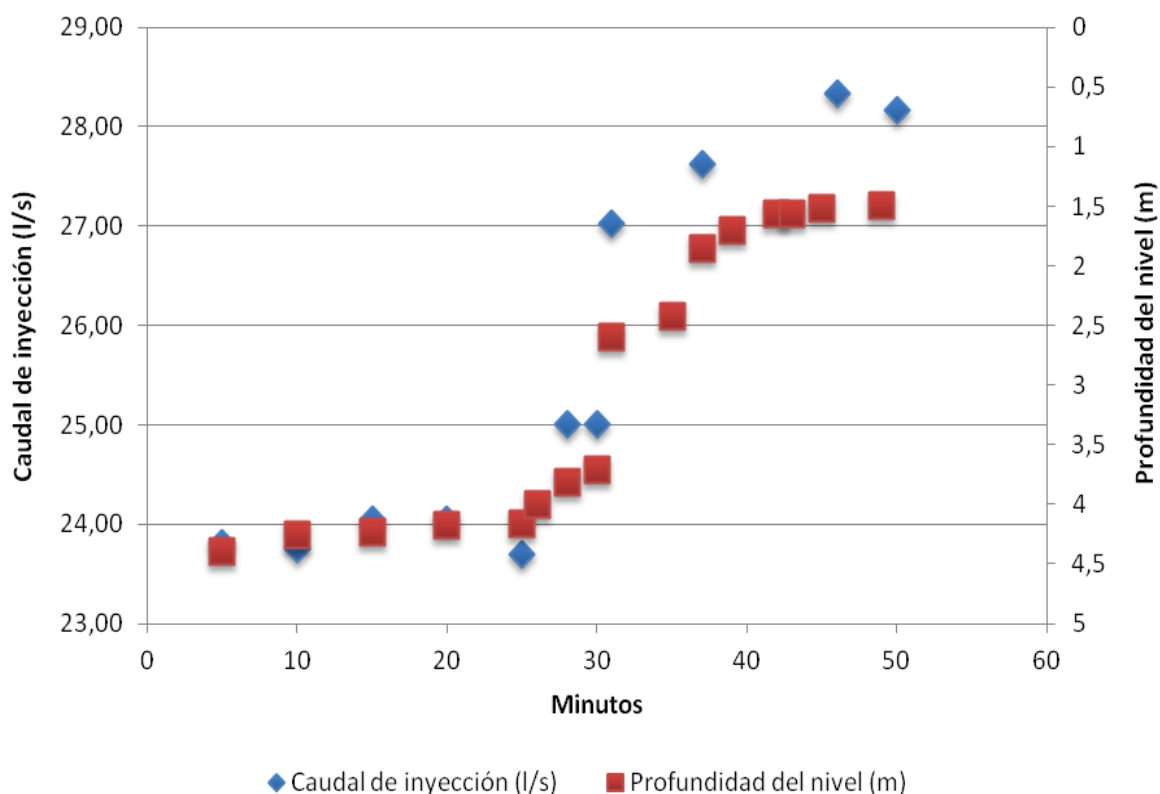


Figura 4.2. Evolución del nivel piezométrico y del caudal de inyección en el sondeo Señorío 3. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

Hasta febrero de 2006 las experiencias de recarga en los sondeos Señorío 1 y 3 fueron cortas e interrumpidas, por lo que no se han obtenido resultados concluyentes. Los caudales de inyección medios en estas captaciones entre enero de 2000 y febrero de 2006 fueron de 6'7 y 16'5 l/s, respectivamente.

4.2. Nuevo sondeo de inyección

El dispositivo de recarga antes descrito presentaba limitaciones en los caudales admisibles. En el año 2005, se planteó la construcción de un nuevo sondeo de recarga (Señorío 4) (Fotografía 4.2), equipado para la inyección de agua a presión en el acuífero y para la limpieza adecuada de las posibles colmataciones que sufra la zona filtrante, con mínimo coste de mantenimiento y puesta en marcha.



Fotografía 4.2. Actual sondeo de inyección (Señorío 4) en el acuífero del Señorío

A partir de estas premisas se optó por una perforación de mayor diámetro que las existentes para abastecimiento y la instalación de un sistema de limpieza por aire comprimido con una impulsión común para la inyección de agua y extracción de la emulsión aire-agua. Para ello, se tuvieron en cuenta las columnas litológicas atravesadas, profundidades, niveles y caudales de bombeo. Con estos datos se calcularon los valores de sumergencia, volumen de aire y diámetros de la tubería de agua y aire, que aparecen en la Tabla 4.1.

Sumergencia (relación entre la longitud de tubería situada por debajo del nivel del agua y la longitud total de la misma)	50%
Longitud tubería (m)	86
Caudal de agua a elevar (l/s)	25
Volumen de aire libre para elevar un litro por minuto de agua (l/minutos)	6,3
Presión de aire (atmosferas)	6,77
Diámetro tubería agua (mm)	196
Diámetro tubería aire (mm)	65

Tabla 4.1. Características del dispositivo de inyección-bombeo de Señorío 4 para recarga artificial.
(Bueso et al., 2006)

La profundidad del sondeo es de 92 m y los diámetros de perforación y entubación son 700 y 450 mm, respectivamente. El esquema constructivo y sistema de inyección del sondeo Señorío 4, así como la columna litológica del mismo, se encuentran en el anexo del presente trabajo.

La diferencia de este sistema con respecto al utilizado previamente estriba en el método de inyección. Anteriormente se hacía por gravedad mientras que ahora se efectúa con presión en cabeza de pozo, lo cual facilita las labores de mantenimiento y permite incrementar el caudal instantáneo de la recarga. Esta última ventaja queda reflejada en la Figura 4.3, en la que se realiza una comparación de los caudales admitidos en el anterior sondeo (Señorío 3) y en el nuevo instalado (Señorío 4), cuando este último entró en funcionamiento el 16 de febrero de 2006. Se observa que los caudales de inyección en el sondeo Señorío 3 son inferiores a los introducidos por el nuevo sistema de recarga, con unos caudales medios de 22 y 32'5 l/s respectivamente.

El caudal medio de inyección entre febrero de 2006 y junio de 2010, según los datos disponibles en este estudio, ha sido de 22'8 l/s. Este valor es significativamente superior a los calculados en los anteriores sondeos de recarga (6'7 l/s en Señorío 1 y 16'5 l/s en Señorío 3), lo que demuestra la mayor efectividad del actual dispositivo de inyección.

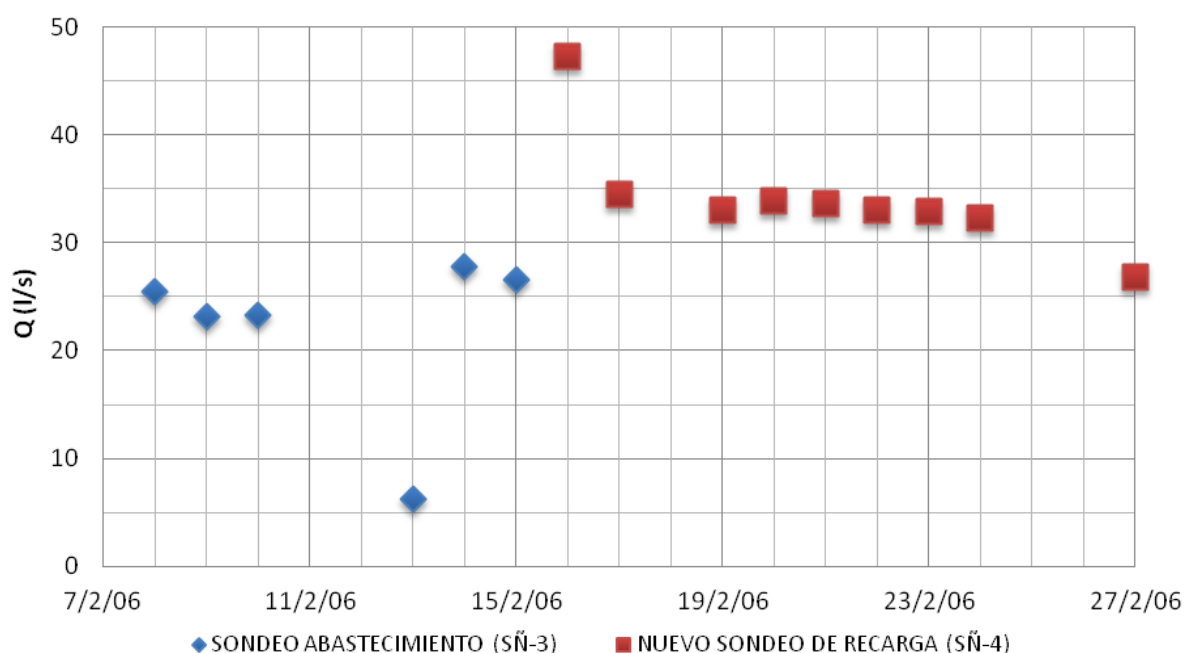


Figura 4.3. Caudales inyectados en los sondeos Señorío 3 y 4. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

Actualmente, cuando se registran los mayores caudales en el manantial de Camoján en respuesta a elevadas precipitaciones, no es posible captar estos recursos de agua iniciales debido a su alto contenido en sólidos en suspensión. Para hacer uso de los mismos, Aquagest Sur S.A. ha instalado recientemente una trampa de sólidos y filtro, conectados a un equipo de inyección en el sondeo Señorío 2, que permiten la retención o decantación de la gran cantidad de sedimento arrastrado. Este sistema tiene una doble funcionalidad, pues permite captar dichos caudales iniciales y también asegura

una mayor calidad del agua almacenada, con menores gastos de mantenimiento y limpieza del sondeo de inyección. Estas instalaciones comenzarán a funcionar en el siguiente año hidrológico (octubre 2012-septiembre 2013)

La trampa de sólidos y filtro se ha ubicado muy cerca de la autovía A-7, junto al campo de golf Monte Paraíso (Figura 4.4). La trampa de sólidos es una pieza de acero de 500 mm de diámetro y 4 m de longitud y el filtro colador está compuesto por un cuerpo recto mecosoldado con malla de acero reforzado de 300 mm.

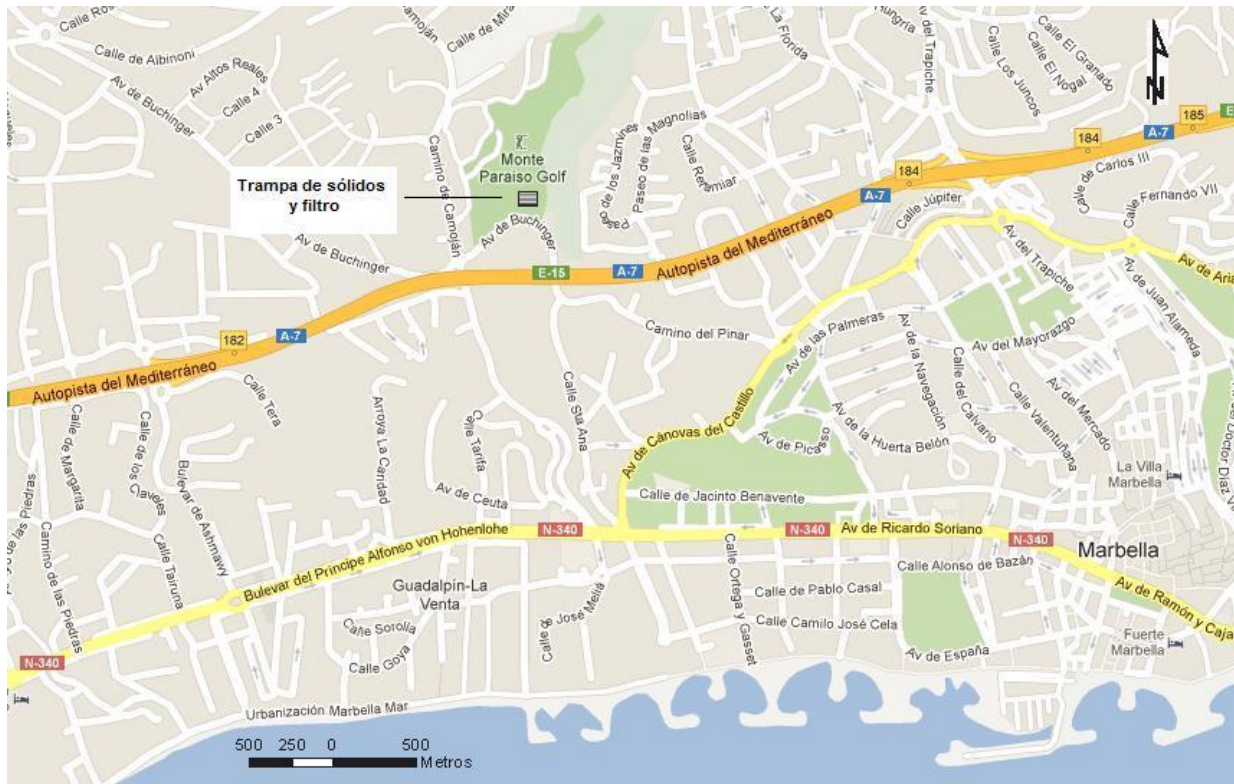


Figura 4.4. Ubicación de la trampa de sólidos y el filtro colador

4.3. Balance del acuífero: recarga y extracciones

Con los datos de extracción e inyección del acuífero del Señorío de Marbella se ha realizado un análisis del balance neto en el sistema entre los años 2000 y 2010. La Tabla 4.2 recoge los volúmenes mensuales de bombeo y recarga artificial, así como los valores medios y acumulados.

Los valores totales indican que el mayor volumen de agua extraído se produjo en el año 2010 (778.280 m³), y el menor fue en el año 2006 (296.526 m³). Esto puede ser debido a una mayor continuidad de

bombeo a lo largo del año 2010 y al periodo seco sufrido en el año 2006, cuando se inició el actual sistema de recarga artificial.

El volumen de inyección más elevado se produjo en el año 2008 (416.007 m³), y el menor en el año 2007 (79.613 m³). El primer valor se debe a que, en el año 2008, se registraron unas precipitaciones relativamente abundantes, lo cual permitió inyectar agua del manantial de Camoján a un ritmo más continuo. El segundo valor es debido a los problemas de obstrucción en la toma de agua de la surgencia en 2007, que impidieron realizar la recarga del acuífero.

En total se ha realizado una extracción de casi 5'12 hm³ en los primeros diez años de la recarga artificial, lo que equivale a un valor medio anual cercano a 0'47 hm³. La inyección del agua procedente del manantial de Camoján en este periodo ha sido de aproximadamente 2'3 hm³, con una cifra media anual en torno a 0'21 hm³.

	Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Media	Total
Bombeo (m³)	TOTAL	398.831	323.628	304.194	451.090	458.232	578.781	296.526	442.904	482.316	604.930	778.280	465.428	5.119.712
	Enero	37.978	0	0	0	0	29.471	47.682	29.427	51.466	29.554	25.030	22.783	250.608
	Febrero	59.790	7.806	17.418	54.370	62.887	30.839	47.707	32.557	33.529	66.257	62.556	43.247	475.716
	Marzo	96.782	0	45.038	113.759	6.648	34.109	34.394	81.645	56.451	82.328	101.234	59.308	652.388
	Abril	47.514	67.947	0	110.100	12.071	87.990	35.912	75.042	76.533	79.240	80.939	61.208	673.288
	Mayo	3.438	60.576	36.568	95.829	86.407	90.807	41.319	70.032	81.694	68.878	85.198	65.522	720.746
	Junio	35.780	48.265	116.739	0	105.369	88.672	37.838	54.120	79.105	85.245	113.309	69.495	764.442
	Julio	52.876	20.079	75.139	77.032	63.928	21.036	22.926	43.781	12.353	52.289	91.771	48.474	533.210
	Agosto	14.907	80.596	13.290	0	3.543	1.497	0	35.040	11.032	26.480	65.941	22.939	252.326
	Septiembre	10.030	33.062	0	0	28.506	2.097	0	172	11.700	32.315	28.161	13.277	146.043
	Octubre	36.346	5.297	2	0	21.892	27.537	0	0	15.761	25.349	26.054	14.385	158.238
	Noviembre	2.607	0	0	0	27.245	68.995	11.389	21.087	22.952	25.902	38.749	19.902	218.926
	Diciembre	785	0	0	0	39.736	95.732	17.358	0	29.739	31.091	59.339	24.889	273.780
Inyección (m³)	TOTAL	146.012	176.278	156.267	243.151	217.131	170.643	277.992	79.613	416.007	162.836	244.819	208.250	2.290.749
	Enero	29.821	51.331	49.077	53.117	47.712	0	0	0	75.599	68.882	42.438	37.998	417.977
	Febrero	21.726	42.327	9.586	44.610	6.136	0	66.018	49.837	34.843	48.746	48.995	33.893	372.824
	Marzo	486	45.921	0	38.411	56.245	77.717	54.710	14.037	46.605	41.064	58.141	39.394	433.337
	Abril	1.407	14.642	39.167	30.128	69.403	62.700	51.690	0	58.729	0	47.332	34.109	375.198
	Mayo	73.140	0	8.733	27.159	18.762	30.222	27.821	0	13.437	0	44.912	22.199	244.186
	Junio	9.516	0	0	0	0	4	0	0	0	0	3.001	1.138	12.521
	Julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	Septiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	47.843	0		4.784	47.843
	Noviembre	0	11.168	3.783	12.093	0	0	53.289	0	68.407	0		14.874	148.740
	Diciembre	9.916	10.889	45.921	37.633	18.873	0	24.464	15.739	70.544	4.144		23.812	238.123

Tabla 4.2. Datos de bombeo e inyección en el acuífero del Señorío de Marbella. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

La Figura 4.5 muestra la distribución media mensual de las extracciones e inyecciones de agua en el acuífero del Señorío durante los diez años de experiencia. Se observa que los meses que registran un mayor y menor bombeo fueron, respectivamente, junio (69.495 m³) y septiembre (13.277 m³). El primer valor es indicativo de una mayor extracción del agua almacenada antes de los meses estivales, cuando la demanda comienza a aumentar, y el segundo sugiere un menor uso de esta agua para evitar un descenso de los niveles piezométricos y que se mantengan por encima de los 0 m s.n.m. El mes con mayor caudal medio de inyección fue marzo (39.394 m³), cuando las precipitaciones no son tan acentuadas y se introduce gran parte del agua drenada por el manantial de Camoján en el acuífero, mientras que en los meses de julio, agosto y septiembre no se produce recarga artificial por la ausencia de caudales en dicha surgencia.

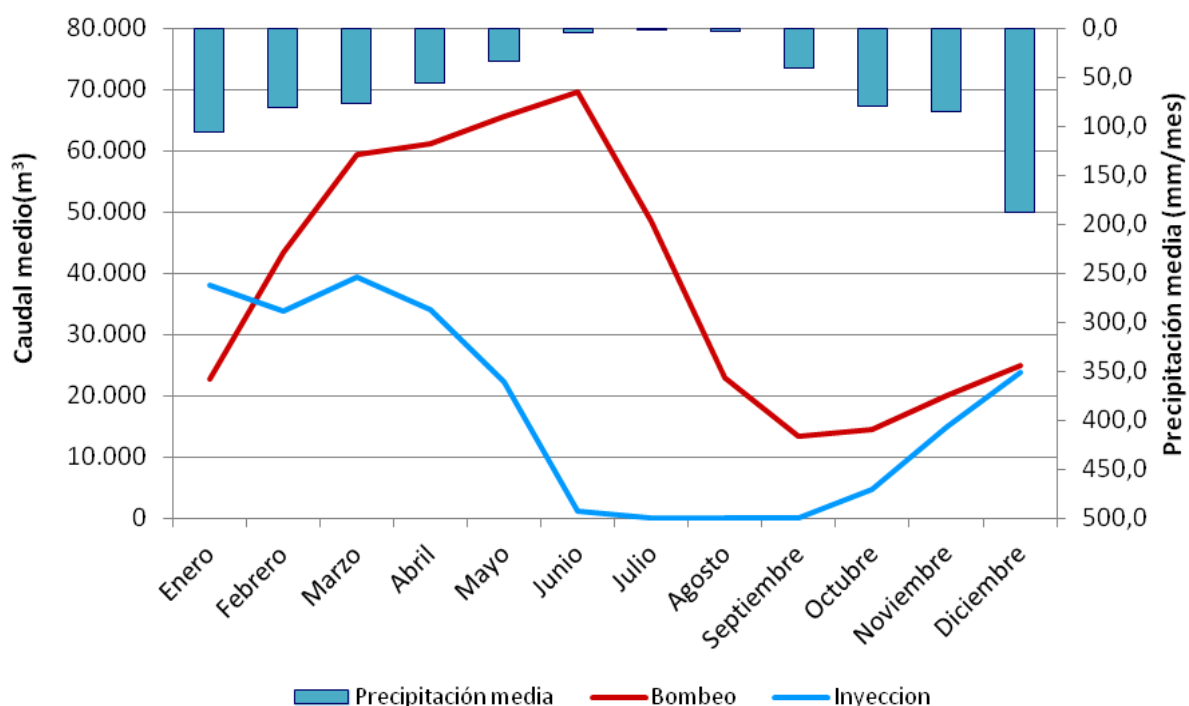


Figura 4.5. Distribución mensual de los bombeos e inyecciones en el acuífero del Señorío de Marbella.

Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

Con los datos de inyección y extracción totales se ha elaborado la Figura 4.6, en la que aparece la evolución del bombeo y la recarga artificial en el acuífero del Señorío (ambos en m³/mes), en comparación con la pluviometría (mm/mes). En general, se puede observar que existe un desfase de entre uno y tres meses entre los máximos caudales de inyección y extracción, ya que las entradas de agua al acuífero se producen en los meses invernales, cuando hay más precipitaciones, y las salidas al comienzo de los meses estivales, cuando existe una mayor demanda del recurso almacenado como consecuencia del clima y del aumento demográfico. Este modelo de gestión, consistente en inyectar agua y extraerla transcurrido un cierto periodo

de tiempo, supone un mayor control de la interfaz salina y permite mantener en mejor estado el agua del acuífero.

En color gris y negro (Figura 4.6) se han representado las tendencias de los caudales de extracción y de inyección para identificar las distintas etapas a lo largo del periodo de estudio. En un primer tramo, hasta junio de 2003 aproximadamente, ambas tendencias se muestran paralelas entre sí, lo cual indica que existe una relación directa entre la recarga artificial del sistema y los bombeos. A partir de esa fecha, la inyección tiende ligeramente a disminuir y la extracción a aumentar, como consecuencia de un periodo especialmente seco entre finales de 2004 y finales de 2005. Posteriormente, muestran un comportamiento similar hasta junio de 2008, cuando la tendencia de los bombeos aumenta considerablemente debido a la continuidad temporal registrada en las extracciones desde 2008 hasta 2010 y la alimentación del acuífero no presenta apenas variación.

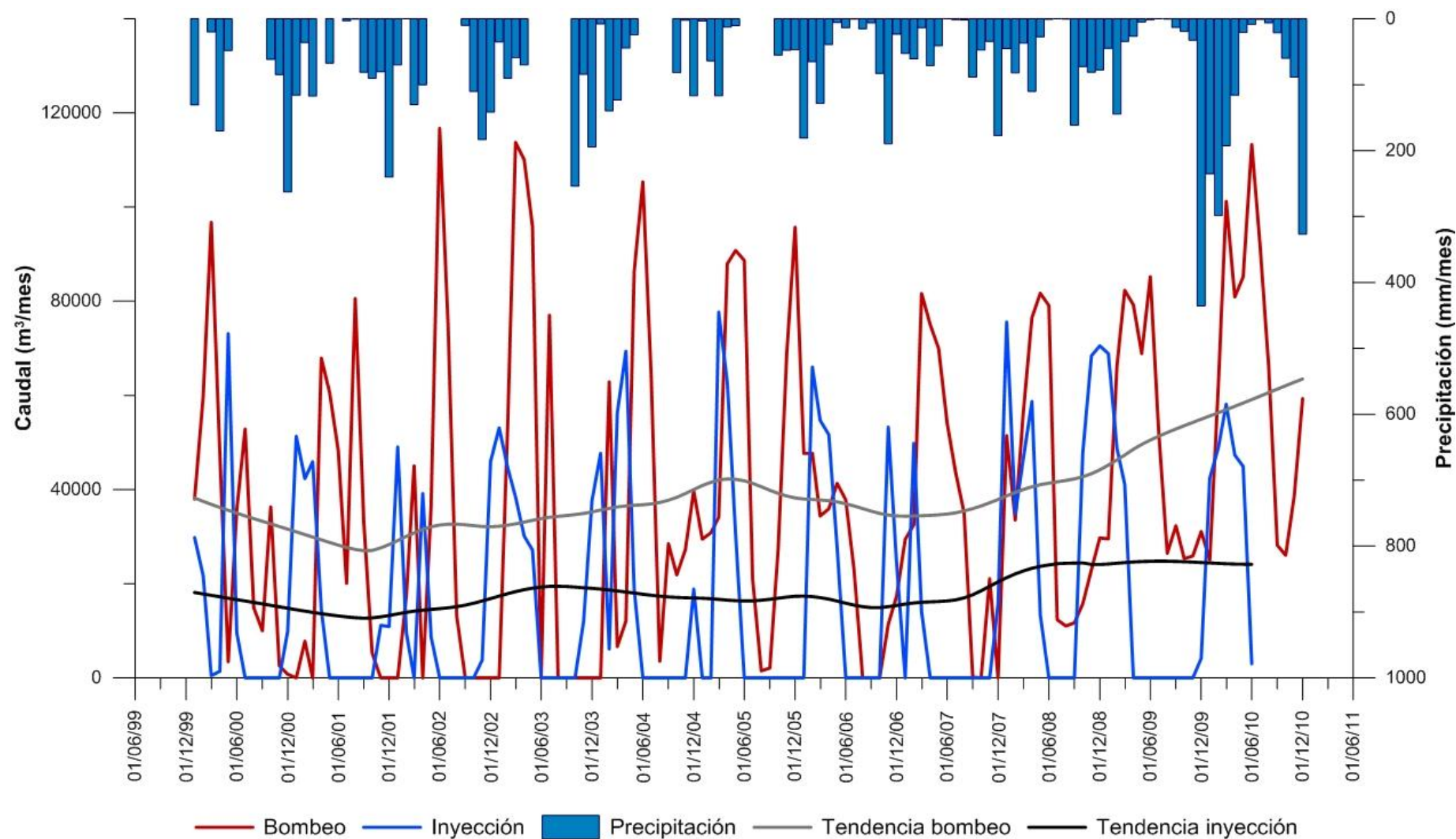


Figura 4.6. Evolución de los caudales de bombeo e inyección en los sondeos del Señorío, con sus respectivas tendencias. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

5. PIEZOMETRÍA Y CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL SEÑORÍO

5.1. Evolución de la piezometría y la conductividad eléctrica del agua

El agua bombeada en los sondeos para abastecer las urbanizaciones de Puente Romano y El Señorío de Marbella mantuvo su salinidad con escasas variaciones entre 1992 y 1994, hasta que se incrementaron los bombeos a un máximo de 15.000 m³/día por el fallo de suministro del embalse de la Concepción en 1995. El agua del sondeo Torreverde, situado a 250 m de distancia al mar, registró en enero de 1995 un aumento progresivo de la conductividad eléctrica de 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a casi 3.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre (Figura 5.1), debido a la intrusión marina; en esa fecha cesó el bombeo y comenzaron a explotarse los sondeos del Señorío a un caudal de 150 l/s, situados en la misma transversal a la costa que Torreverde pero a 500 m del mar. Inicialmente se observó una disminución en la conductividad eléctrica, que bajó hasta los 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pero volvió a aumentar a medida que el bombeo progresaba y en diciembre adoptó la misma tendencia definida desde el inicio de la salinización. Este proceso no afectó a los tres sondeos simultáneamente, sino que primero alcanzó a los más próximos al mar, luego a los más profundos y por último a los más alejados de la costa.

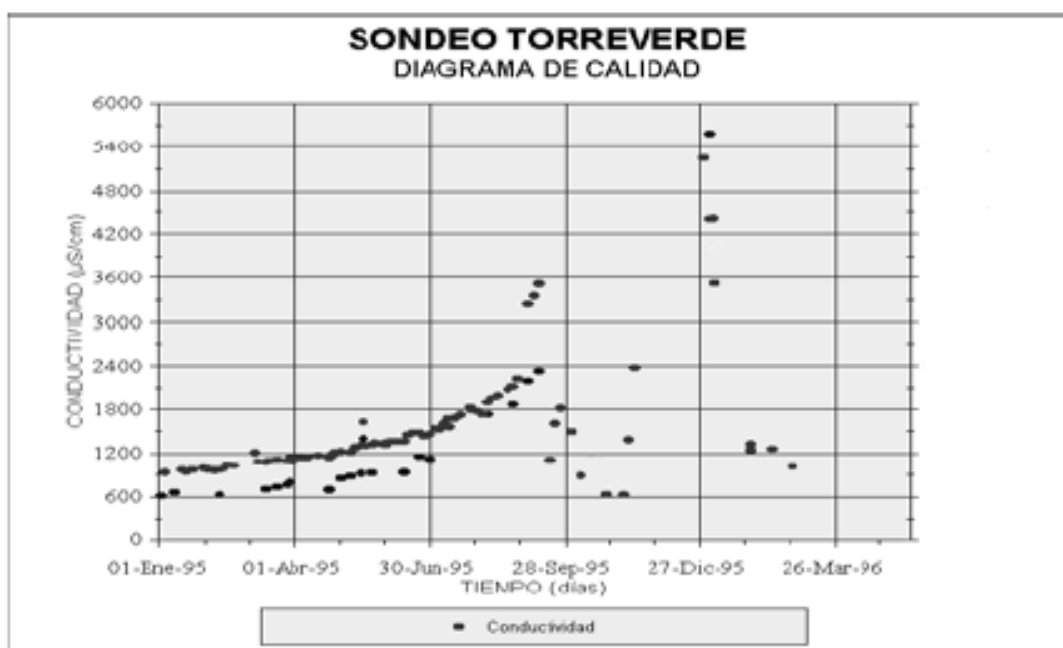


Figura 5.1. Evolución de la conductividad eléctrica en el sondeo Torreverde (tomado de Jaén et al., 2003)

Con el periodo húmedo iniciado en 1996 (760 mm acumulados entre diciembre y enero) cesó la explotación del acuífero y se observó una recuperación de la conductividad eléctrica y de la piezometría prácticamente simultánea. El proceso de mejora de calidad se inició en los sondeos menos profundos, aunque estuvieran más próximos al mar, lo cual indica que la interfase fue desplazada hacia

el mar por el agua dulce. Finalmente se alcanzaron las salinidades iniciales, por lo que la retirada de la interfase fue total. El aumento de las precipitaciones entre 1996 y finales de 1998 (Figura 5.2) permitió el descenso de la conductividad eléctrica (Figura 5.3), pero en 1999 comenzó un nuevo periodo de sequía que provocó una importante pérdida de calidad del agua del acuífero y un descenso drástico de los niveles piezométricos. En concreto, en Torreverde y Señorío 2 se alcanzaron cotas inferiores a los 7 m b.n.m. en julio de ese mismo año (Figura 5.2).

La serie de datos disponibles de los dos sondeos anteriores es más continua cuando comienza el año 2000 y se observa que los niveles piezométricos del acuífero muestran una marcada sucesión periódica asociada a la estacionalidad de las precipitaciones. En los meses estivales comprendidos entre 2000 y 2003 se alcanzan cotas negativas, con mínimos cercanos a los 4 m b.n.m., aunque estos son cada vez menores, lo que indica una cierta recuperación de los niveles en ese periodo de tiempo. Los ascensos piezométricos se producen tras los periodos lluviosos, lo cual denota que el agua caída se infiltra rápidamente en el terreno.

A partir de 2004, las cotas piezométricas se mantienen por encima de los 0 m s.n.m. incluso en los meses más secos, pese a que existe una ligera tendencia negativa en los niveles especialmente a partir de 2005, año en el que se registraron unas precipitaciones muy bajas (356 mm). Esta mayor estabilización de los niveles piezométricos también se atribuye al equilibrio entre la recarga artificial y los bombeos, puesto que en años muy secos como el antes mencionado, los niveles no descienden por debajo de la cota 0 m s.n.m.

A finales de 2005, se volvieron a registrar cotas negativas en el acuífero, aunque solamente en el sondeo Torreverde, y se ha mantenido la tendencia negativa de los niveles hasta agosto de 2007, mes en el que las cotas se aproximan a los 3 m b.n.m.

Desde 2008, el acuífero ha mantenido un ascenso piezométrico progresivo y se alcanzó un máximo histórico en marzo de 2010, en el sondeo Señorío 2 (13'5 m s.n.m.), debido a las cuantiosas precipitaciones caídas a finales de 2009 y principios de 2010.

En general, la evolución de la piezometría es muy similar en los cuatro puntos considerados, especialmente entre los sondeos Torreverde y Señorío 2. Esto es debido a que se sitúan en la misma transversal a la costa pero a cotas diferentes (15 y 24 m s.n.m. respectivamente).

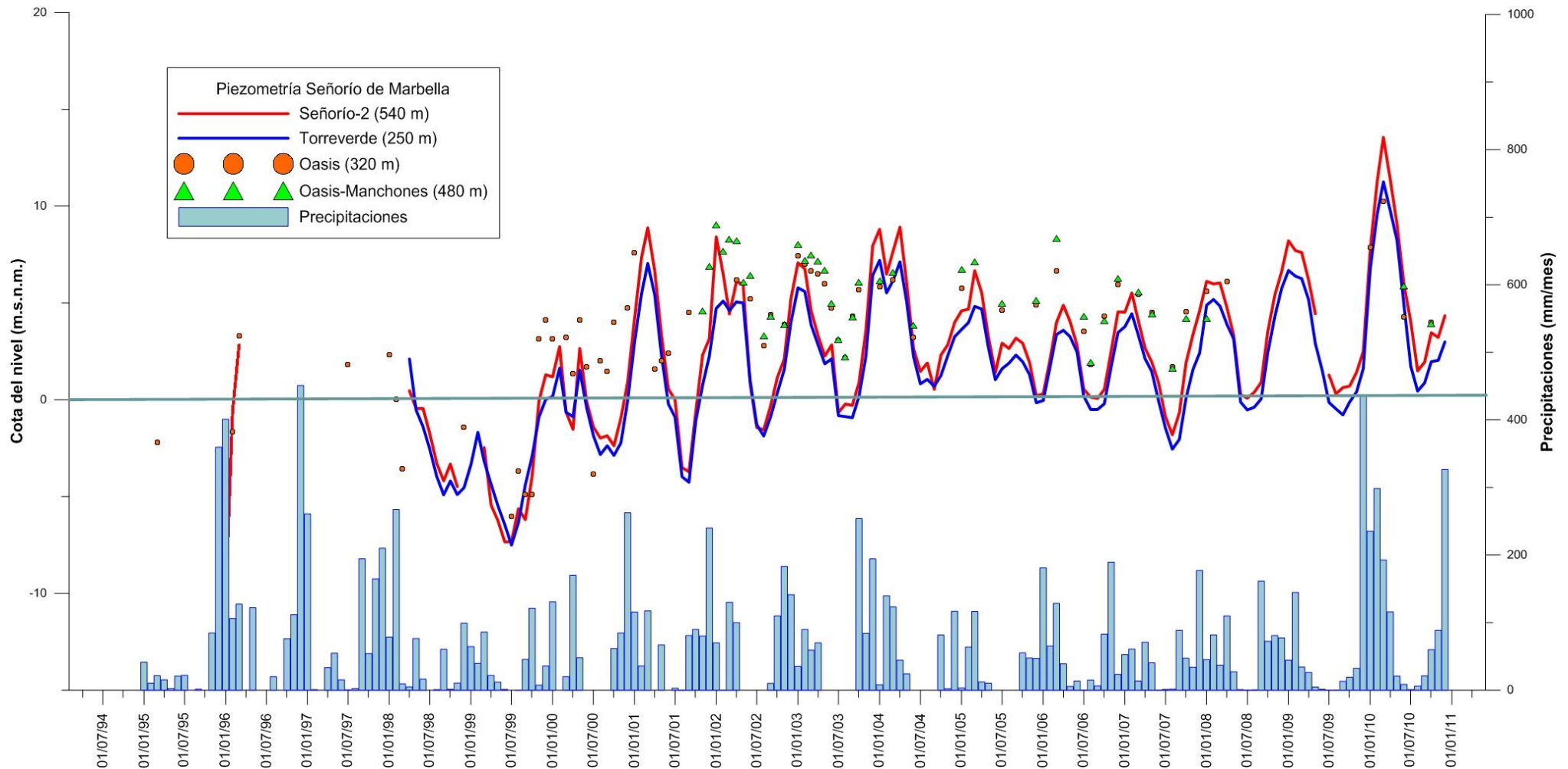


Figura 5.2. Evolución del nivel piezométrico en el acuífero del Señorío de Marbella. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

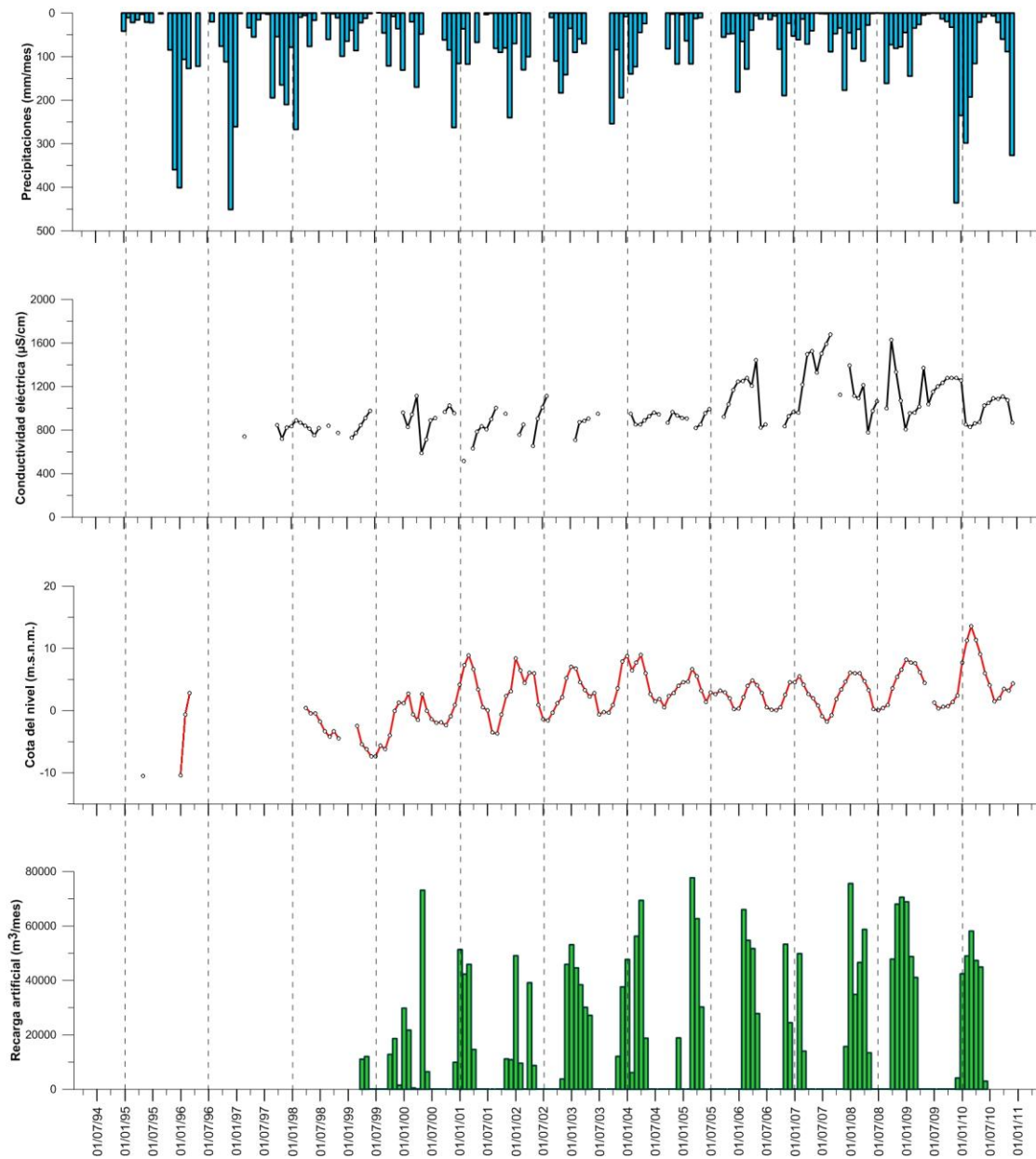


Figura 5.3. Evolución de la conductividad eléctrica en el sondeo Señorío 2. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

En la Figura 5.3 se superponen los datos de recarga artificial en el acuífero estudiado, el nivel piezométrico y la conductividad eléctrica del agua en el sondeo Señorío 2, así como las precipitaciones registradas entre enero de 1995 y diciembre de 2010.

En ella se observa que los caudales de inyección, en m^3/mes , se producen únicamente en los periodos lluviosos, cuando el manantial de Camoján drena el agua infiltrada en Sierra Blanca, mientras que en los meses estivales no se produce recarga artificial. Los valores de inyección mensuales más elevados

registrados se produjeron en marzo de 2005, enero de 2008 y mayo de 2.000 (77.717, 75.599 y 73.140 m³ respectivamente).

De forma general, la conductividad eléctrica presenta una evolución inversa a la piezometría, es decir, los máximos valores se registran en verano cuando no se producen precipitaciones y la profundidad del nivel piezométrico es mayor, acentuado por las mayores extracciones para cubrir la demanda. Algunos años, la conductividad eléctrica aumenta significativamente en apenas seis meses, como ocurre desde enero a julio de 2007 (966 y 1.502 $\mu\text{S}/\text{cm}$), aunque en este último periodo de tiempo se mantiene en unos niveles más o menos constantes y su calidad es aceptable para abastecimiento humano ($< 2.500 \mu\text{S}/\text{cm}$).

Durante el periodo de estudio, se han realizado cuatro campañas de medidas del nivel piezométrico en los sondeos Jardín, Jeque, Oasis, Oasis-Manchones, Señorío 1, Señorío 3 y Torreverde (Figura 1.1). En la Tabla 5.1 se muestran las profundidades del nivel de agua en julio de 2012.

Sondeo	Profundidad del nivel de agua (m)			
	2/7/12	11/7/12	27/7/12	30/7/12
Jardín	13,46	13,62		14,43
Jeque	10,38	10,56		11,38
Oasis	11,6			11,69
Oasis-Manchones	15,15			15,65
Señorío 1	32,5*			
Señorío 3	27,2*		20,83	
Torreverde	13,75			

Tabla 5.1. Profundidad del nivel de agua en los sondeos del Señorío de Marbella. Con asterisco: nivel dinámico

En las captaciones Jeque y Jardín (Fotografías 5.1 y 5.2) se han efectuado un mayor número de medidas. Desde la primera campaña (2/7/12) hasta la última (30/7/12), se ha producido un descenso del nivel piezométrico en los sondeos Jardín y Jeque de 13'46 a 14'43 m y de 10'38 a 11'38 m respectivamente (Tabla 5.1). En este periodo, el descenso piezométrico total ha sido muy similar en ambas captaciones, cercano a 1 m, lo que supone un descenso medio de casi 0'04 m/día.



Fotografías 5.1 y 5.2. Sondeos Jeque (izquierda) y Jardín (derecha)

5.2. Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura

Durante las jornadas de campo, concretamente en el mes de julio, se realizaron medidas en profundidad de la conductividad eléctrica y la temperatura del agua con una sonda multiparamétrica en la vertical de algunos sondeos. Debido al diámetro de la sonda (5cm), no fue posible llevar a cabo estas medidas en otros sondeos con tuberías de menor diámetro, como Señorío 2.

Los perfiles se realizaron en cuatro sondeos: Torreverde (2 de julio), Señorío 3 (27 de julio), Oasis y Oasis-Manchones (30 de julio). La primera captación se utiliza actualmente como piezómetro de control de la intrusión marina, ya que si la cota piezométrica alcanza los 0'5 m s.n.m. se detienen los bombeos en los sondeos del Señorío, pues existe alta probabilidad de que avance la interfase salina en el acuífero, con la consecuente pérdida de calidad del agua almacenada. Las captaciones de Oasis no se encuentran operativas en la actualidad por las elevadas conductividades eléctricas del agua medidas en los últimos años (3.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

El sondeo Torreverde (Figura 5.4A y Fotografía 5.3) presentaba, el 2 de julio, una cota piezométrica de 1'25 m s.n.m.. La temperatura no sufre apenas variación en los más de 40 m medidos, con un mínimo de 20'37 °C entre los 27 y 36 m de profundidad y un máximo de 20'54 °C a los 14,7 m. En los primeros 10 m, la conductividad eléctrica asciende ligeramente desde 204 a 253 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pero inmediatamente por debajo hay un aumento brusco de este parámetro y en 4 m (entre 25 y 29 m de profundidad) se alcanza un valor de 730 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Posteriormente, se estabiliza en torno a 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta casi el final de la captación.



Fotografía 5.3. Sondeo Torreverde

En el sondeo Señorío 3 (Figura 5.4B y Fotografía 5.4), la lámina de agua se encontraba a 20'83 m de profundidad, lo que equivale a una cota piezométrica de 1'8 m s.n.m. En este sondeo se produce un descenso de la temperatura hasta los 31 m, desde un valor de 19'64 °C cerca de la superficie hasta otro de 19'03 °C a dicha profundidad. A partir de ella, no se registra apenas variación en este parámetro hasta los 86 m, cuando se produce un aumento de temperatura y se obtiene el mismo valor medido en superficie (19'64 °C). La conductividad eléctrica sufre un ascenso más o menos continuado en los primeros 10 m de profundidad, de manera que pasa de 509 a 922 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Posteriormente, su valor se muestra casi invariable entre 31 y 86 m, aunque en la última medida registrada a 96 m se produce un ascenso muy acusado hasta un valor de casi 1.650 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Fotografía 5.4. Sondeo Señorío 3

El sondeo Oasis (Figura 5.4D y Fotografía 5.5), situado a 320 m de la costa, presentaba el 30 de julio una cota piezométrica de 3'31 m s.n.m. El perfil de temperatura muestra cómo en los primeros 10 m de profundidad se produce un descenso de la misma, de 19'89 a 19'32 °C. Posteriormente hay un ascenso más o menos constante de 0'3-0'4 °C cada 10 m (equivalente al gradiente geotérmico), desde los 27 hasta los 77 m de profundidad y con posterioridad se registra un aumento cada vez menor hasta alcanzar un máximo de casi 21'5 °C prácticamente al final de la captación. La conductividad eléctrica sufre un ascenso continuado hasta los 87 m, donde alcanza un máximo de 1.175 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y luego se produce un descenso inferior a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta llegar al final de la captación. De los cuatro estudiados, este sondeo es el que ofrece un perfil de conductividad eléctrica con menor variación, puesto que la diferencia del valor máximo y mínimo apenas supera los 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Fotografía 5.5. Sonda Oasis

La cota piezométrica medida en Oasis-Manchones (Fotografía 5.6) fue de 3'35 m s.n.m. (Figura 5.4C), muy similar a la obtenida en el anterior sondeo, dado que distan unos 120 m entre sí. El perfil de temperatura muestra un descenso inicial en los primeros 10 m y, posteriormente, un aumento gradual hasta los 64 m de profundidad, donde se registra un máximo de 20'04 °C. A partir de este punto vuelve a disminuir hasta alcanzar 19'61 °C a los 88 m y finalmente se produce un nuevo incremento en los últimos 15 m, con un valor final de 19'81 °C. La conductividad eléctrica se mantiene en ligero ascenso los primeros 50 m, pero entre los 65 y 66 m de profundidad se produce un aumento muy brusco (de 1.528 a 4.660 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en la siguiente medida, a los 67 m, se llegan a 5.623 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica. Este incremento se mantiene hasta los 88 m de profundidad, donde se alcanza un valor máximo de 6.259 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Fotografía 5.6. Sondeo Oasis-Manchones

Pese a lo comentado en relación con el sondeo anterior, los perfiles verticales en los sondeos de Torreverde y Señorío 3, situados en el sector oriental del acuífero donde se producen los bombeos, permiten afirmar que no existen indicios de intrusión marina incluso en los meses estivales, porque los niveles piezométricos se mantienen por encima de la cota de 0 m s.n.m. aunque se registren escasas precipitaciones (29 mm entre mayo y julio de 2012) y se produzca un mayor uso del agua del acuífero.

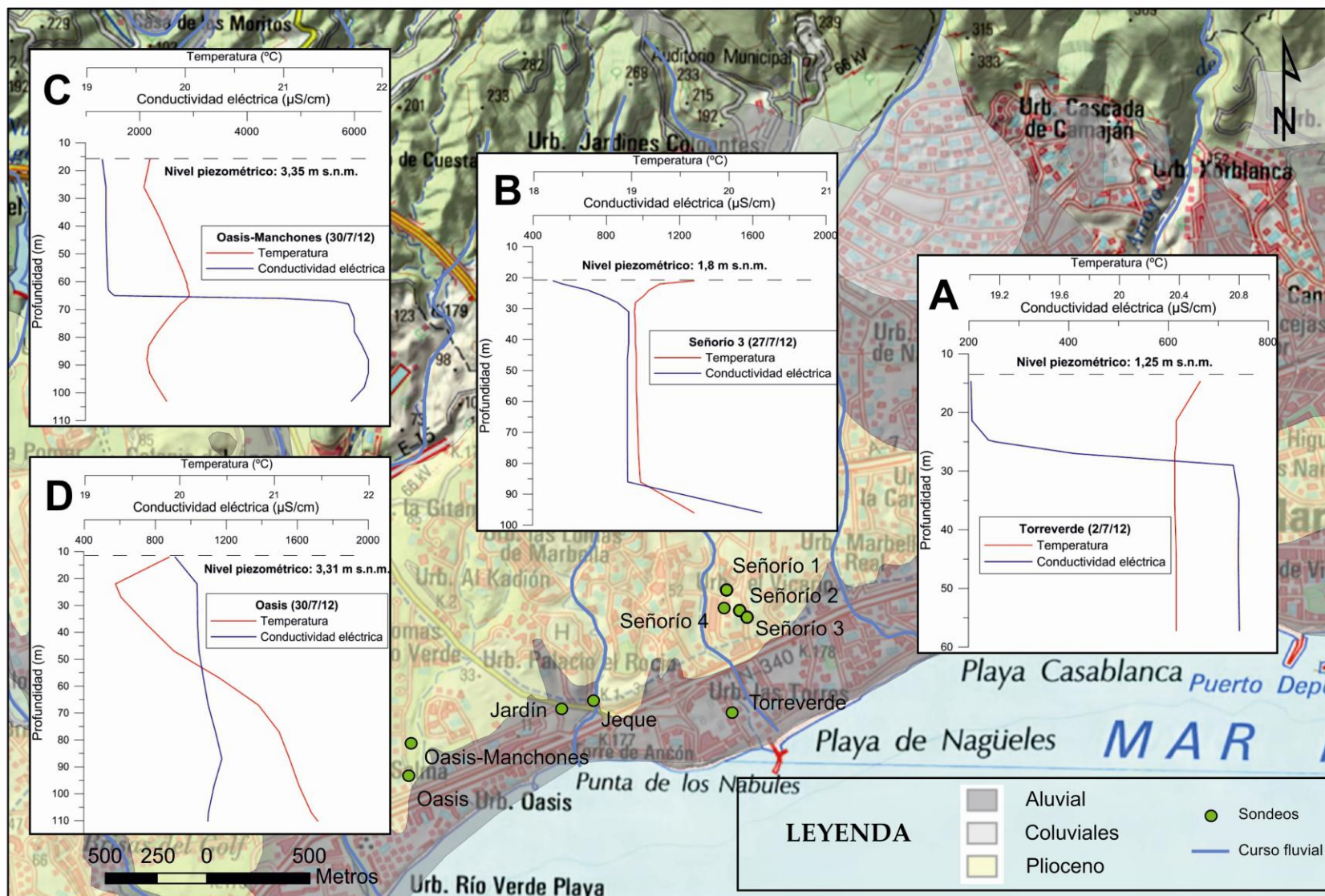


Figura 5.4. Mapa con los perfiles verticales de conductividad eléctrica y temperatura del agua en distintos sondeos de la zona de estudio

6. HIDROQUÍMICA

Existen multitud de factores que determinan las variaciones hidroquímicas en un acuífero, como la procedencia y tipo de materiales atravesados por las aguas subterráneas, los procesos fisicoquímicos que se producen tanto en la zona saturada como no saturada, el tiempo de residencia del agua en el acuífero, los procesos de mezcla con otros tipos de agua y la contaminación por actividades antrópica (Custodio, 1983).

En el primer subapartado de este epígrafe se describe la composición química de las muestras de agua obtenidas en tres de los sondeos del Señorío y del agua de recarga. Este análisis se ha realizado tanto en el espacio como en el tiempo (antes y durante los procesos de recarga artificial). Seguidamente se muestran dos diagramas hidroquímicos, uno de Piper donde aparecen recogidas todas las muestras con análisis químicos completos y otros de Stiff donde se muestran las composiciones medias obtenidas de los cuatro puntos del apartado anterior. Posteriormente se presenta un análisis de componentes principales (ACP) y, por último, se han determinado e interpretado diferentes relaciones iónicas indicadoras de intrusión marina.

6.1. Descripción de los análisis químicos

A partir de los datos facilitados por Aquagest Andalucía se ha conocido la composición química media de muestras de agua de los sondeos Señorío 1, 2 y 3, además del agua de recarga procedente del manantial de Camoján, entre febrero de 1996 y marzo de 2009. El número de observaciones es superior en los sondeos Señorío 1 y 3 ($n=14$ y $n=10$ respectivamente) que en el resto de puntos (con valores de $n=6$ y $n=7$), aunque todos los datos se encuentran en un intervalo temporal similar. Los resultados medios se muestran en la Tabla 6.1.

El contenido medio en Cl^- de las muestras de Señorío 2 (324'81 mg/l) es bastante superior al resto de puntos, especialmente en comparación con el agua de recarga (19'43 mg/l). Este ión conservativo procede de la precipitación sobre la zona y, sobre todo, de la intrusión marina.

El valor medio de HCO_3^- en el sondeo Señorío 1 es superior al resto de captaciones (349'03 mg/l frente a 330'88 mg/l y 308'16 mg/l obtenidos en Señorío 2 y 3 respectivamente), mientras que el mínimo corresponde al agua del manantial de Camoján con 217'25 mg/l. Este anión proviene principalmente del lavado de las formaciones acuíferas.

La procedencia del anión SO_4^{2-} puede estar ligada a procesos de intrusión marina, disolución de sales sulfatadas y oxidación de sulfuros. En el sondeo Señorío 2 se registran los contenidos más elevados en este ión (con un valor medio de 76'16 mg/l), mientras que en el agua de recarga se obtienen los menores, con una media de 19'97 mg/l.

El contenido en NO_3^- apenas difiere en las tres captaciones de Señorío, con valores comprendidos entre 10'39 mg/l (Señorío 1) y 12'08 mg/l (Señorío 3), mientras que el agua de recarga presenta un contenido inferior (5'94 mg/l). El nitrato puede tener su origen en posibles fugas y pérdidas de la red de saneamiento en este sector del acuífero, puesto que no existe actividad agrícola en la zona de estudio.

Cl^- (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	Na^+ (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Dureza (mg/l CaCO_3)	T^a ($^{\circ}\text{C}$)
-------------------------	----------------------------	------------------------------	---------------------------	-------------------------	----------------------------	----------------------------	--	----	--------------------------------------	------------------------------

Señorío 1	n	14	14	14	14	14	14	14	14	14	9
	m	92,83	349,03	56,36	10,39	25,61	61,91	66,34	797,00	7,92	423,39
	min	23,07	262,30	19,00	2,30	12,00	19,54	40,08	436,00	7,59	236,59
	max	149,00	381,25	81,10	16,40	32,00	87,64	80,18	953,00	8,22	514,61
	C.V. (%)	0,44	0,10	0,38	0,41	0,24	0,35	0,15	0,22	0,02	0,21

Señorío 2	n	7	7	7	7	6	7	7	7	7	5
	m	324,81	330,88	76,16	10,83	29,60	137,51	70,96	1493,71	7,84	749,44
	min	60,35	235,16	37,00	1,80	12,00	58,44	44,08	675,00	7,41	353,31
	max	1068,50	390,00	148,10	19,20	46,00	364,80	124,00	4132,00	8,08	1827,57
	C.V. (%)	1,08	0,15	0,47	0,61	0,44	0,79	0,38	0,81	0,03	0,69

Señorío 3	n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	6
	m	141,29	308,16	52,95	12,08	25,69	67,92	71,25	878,82	7,87	460,69
	min	17,75	237,90	4,00	1,20	9,00	22,00	28,05	369,00	7,65	211,94
	max	298,20	366,00	86,40	24,00	45,00	133,27	108,21	1370,00	8,15	730,40
	C.V. (%)	0,64	0,15	0,46	0,50	0,55	0,51	0,37	0,35	0,02	0,34

Recarga	n	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	m	19,43	217,25	19,97	5,94	8,14	19,43	50,22	388,86	7,68	234,1
	min	17,7	189,1	14	1,5	5	8,59	28,06	334	7,4	181,04
	max	28,4	370	35	11,2	18	51,13	77	567	8,41	342,26
	C.V. (%)	0,25	0,3	0,47	0,58	0,6	0,91	0,32	0,21	0,04	0,28

Tabla 6.1. Parámetros estadísticos de los componentes químicos analizados en las aguas del acuífero del Señorío y manantial de Camoján. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía. n= número de observaciones, m= media aritmética, min = valor mínimo, max = valor máximo, C.V. = coeficiente de variación

El contenido medio en Na^+ de los tres puntos de Señorío es prácticamente idéntico, con valores que varían entre los 25'61 y 29'6 mg/l en los sondeos Señorío 1 y 2 respectivamente. El agua de recarga

presenta un valor medio bastante inferior en comparación con los anteriores (8'14 mg/l). Este ión suele estar asociado a procesos de intrusión marina o disolución de depósitos evaporíticos.

El valor medio de Mg^{2+} en el sondeo Señorío 2 duplica a los obtenidos en las otras captaciones (137'51 mg/l frente a 61'91 y 67'92 mg/l de Señorío 1 y 3 respectivamente), mientras que el agua de recarga presenta una concentración mucho menor (19'43 mg/l). Su procedencia está ligada a la disolución de rocas carbonatadas (dolomitas) y también está presente en el agua marina.

El contenido medio en Ca^{2+} es muy similar en todos los puntos, con un rango de valores comprendido entre 50'22 mg/l (Camoján) y 71'25 mg/l (Señorío 3). Este catión procede principalmente del lavado de los materiales carbonatados y también puede estar asociado a procesos de intercambio catiónico.

En general, el mayor contenido en los componentes químicos analizados en el sondeo Señorío 2 hace que presente una conductividad eléctrica media superior al resto (1493'71 $\mu S/cm$), mientras que el agua de Camoján muestra un valor medio significativamente inferior (388'86 $\mu S/cm$). Por otra parte, el pH apenas varía en las muestras analizadas, con variaciones comprendidas entre 7'68 (Camoján) y 7'84 (Señorío 2). El valor de la dureza viene determinado por las concentración de Mg^{2+} y Ca^{2+} , por lo que el contenido medio más elevado se encuentra en el sondeo Señorío 2 (749'44 mg/l $CaCO_3$) y el menor en el agua de recarga (234'1 mg/l $CaCO_3$). La temperatura es muy similar en los tres sondeos, con un valor mínimo obtenido en Señorío 3 (23'03 °C) y el máximo en Señorío 1 (23'28 °C).

A partir de estos mismos datos se ha elaborado la Tabla 6.2, donde se separan las muestras previas a la experiencia de recarga artificial (hasta octubre de 1999) y las tomadas durante la inyección de agua en el acuífero. El número de muestras es mayor cuando comienza la experiencia de recarga artificial (n=24) que con anterioridad (n=7).

En general se observa una notable disminución en los contenidos medios en Cl^- , SO_4^{2-} y Mg^{2+} , mientras que los restantes iones aumentan ligeramente. Ello provoca también una disminución considerable en la conductividad eléctrica y la dureza del agua, que pasan de tener un valor medio de 1378'38 $\mu S/cm$ a 843'92 $\mu S/cm$ y de 688'90 mg/l $CaCO_3$ a 447'08 mg/l $CaCO_3$ respectivamente. El pH apenas sufre variación en este proceso.

Este descenso de la concentración de los iones principales puede estar asociado a una retirada de la interfase salina tras inyectar agua menos mineralizada en el acuífero, ya que se reducen los contenidos de los principales indicadores de intrusión como son Cl^- , SO_4^{2-} y Mg^{2+} .

	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Conductividad (μS/cm)	pH	Dureza (mg/l CaCO ₃)	Tª (°C)
Antes Recarga	n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	5
	m	263,92	329,96	78,58	7,75	27,77	124,14	68,99	1378,38	7,85	22,42
	min	60,35	235,16	44,00	1,80	15,60	63,31	40,08	675,00	7,41	18,80
	max	1068,50	390,00	148,10	16,40	46,00	364,80	124,00	4132,00	8,22	25,30
	C.V. (%)	1,27	0,18	0,40	0,60	0,38	0,81	0,38	0,83	0,03	0,12
Durante Recarga	n	24	24	24	24	24	24	24	24	24	14
	m	125,67	331,36	53,17	12,18	26,10	65,97	69,05	843,92	7,90	23,51
	min	17,75	237,90	4,00	1,20	9,00	19,54	28,05	369,00	7,59	19,50
	max	422,40	384,30	84,00	24,00	45,00	175,30	108,21	1608,00	8,20	26,70
	C.V.(%)	0,72	0,12	0,41	0,42	0,43	0,51	0,27	0,33	0,02	0,10

Tabla 6.2. Parámetros estadísticos de los componentes químicos analizados en las aguas del acuífero del Señorío antes y durante la recarga artificial. n= número de observaciones, m= media aritmética, min = valor mínimo, max = valor máximo, C.V. = coeficiente de variación. Datos proporcionados por Aquagest Andalucía

6.2. Diagramas de Piper y de Stiff

En el diagrama de Piper (Figura 6.1) se observa que la mayoría de las muestras de agua son bicarbonatadas cálcico-magnésicas, mientras que el resto presentan facies cloruradas y/o sulfatadas cálcico-magnésicas. Las obtenidas en el sondeo de Señorío 1 pertenecen al primer grupo, debido a que la distancia que separa esta captación de la costa es mayor que en los otros sondeos y presenta una menor profundidad. Las de los sondeos Señorío 2 y 3 se encuentran repartidas entre los dos tipos de agua antes comentadas. Las muestras procedentes del manantial de Camoján son bicarbonatadas cálcicas, dado que este drena principalmente los mármoles calizos característicos del sector occidental de Sierra Blanca.

Los diagramas de Stiff (Figura 6.2) muestran las composiciones químicas recogidas en las Tablas 6.1 y 6.2. En general se observa que el agua del sondeo de Señorío 2 presenta un contenido mayor en los iones analizados, especialmente en Cl⁻ y Mg²⁺, lo que determina su mayor conductividad eléctrica, mientras que el agua de Camoján presenta un contenido mucho menor en todos ellos (Figura 6.2A).

En el diagrama de la Figura 6.2B se distingue que antes de la recarga artificial existe un mayor contenido en Cl^- y Mg^{2+} y que la inyección de agua menos mineralizada provoca una dilución de los iones presentes y la retirada de la interfaz salina.

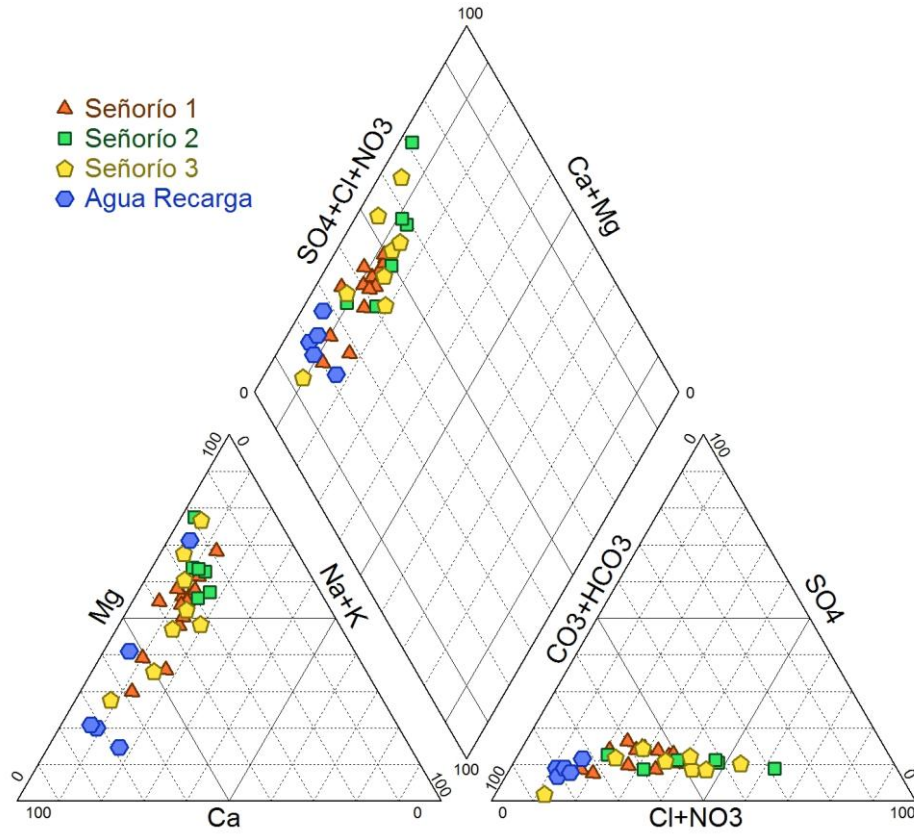


Figura 6.1. Diagrama de Piper con las muestras analizadas de los sondeos del Señorío y Camoján

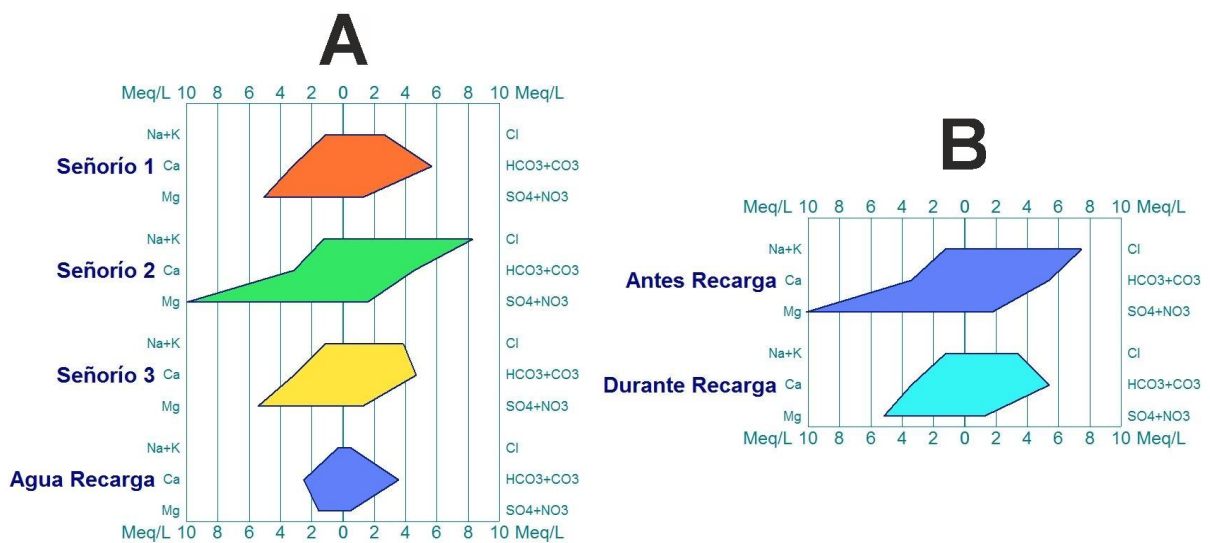


Figura 6.2. Diagramas de Stiff de las muestras de los sondeos del Señorío y Camoján

6.3. Análisis de componentes principales

Se ha realizado un análisis de componentes principales (ACP) para conocer el estado químico del acuífero del Señorío de Marbella. Esta técnica estadística permite realizar una síntesis de la información o varianza hidroquímica sin perder información significativa durante el proceso. Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales.

El ACP se ha obtenido para un conjunto de 31 muestras de los tres sondeos anteriormente analizados. Se han considerado 9 variables: Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , conductividad eléctrica (C.E.) y dureza. En la Tabla 6.3 aparece recogida la matriz de correlación. Se observa que las variables Cl^- , conductividad eléctrica, dureza, Mg^{2+} y Na^+ están muy correlacionadas entre sí y, en menor medida, con SO_4^{2-} y Ca^{2+} . Estos factores son los principales condicionantes de la mineralización del agua.

	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	C.E.	Dureza
Cl^-									
HCO_3^-	-0,245	1							
SO_4^{2-}	0,782	0,283	1						
NO_3^-	0,063	0,205	0,236	1					
Na^+	0,900	-0,396	0,654	-0,011	1				
Mg^{2+}	0,979	-0,163	0,828	0,000	0,862	1			
Ca^{2+}	0,574	0,084	0,555	0,496	0,531	0,448	1		
C.E.	0,990	-0,189	0,828	0,047	0,921	0,980	0,576	1	
Dureza	0,990	-0,132	0,850	0,089	0,877	0,987	0,586	0,992	1

Tabla 6.3. Matriz de correlación obtenida en el ACP realizado con los datos hidroquímicos

El campo de las variables (Figura 6.3) muestra cómo los parámetros C.E., dureza, Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ y SO_4^{2-} se encuentran agrupados en el eje del factor 1 (65'48%). Corresponde al eje de la mineralización del agua del acuífero. En el eje del factor 2 (17'89%) se sitúan HCO_3^- y NO_3^- . Este eje está asociado a los procesos de recarga del acuífero, tanto de forma natural como artificial. La ubicación en el campo de las variables del ión NO_3^- sugiere que existe un lavado desde el suelo y la zona no saturada del mismo hacia la zona saturada del acuífero por efecto de la recarga natural. El Ca^{2+} se encuentra en la zona positiva entre los dos ejes, lo que indica que participa en ambos procesos, ya que contribuye a la mineralización del agua y está presente en los procesos de recarga artificial del acuífero.

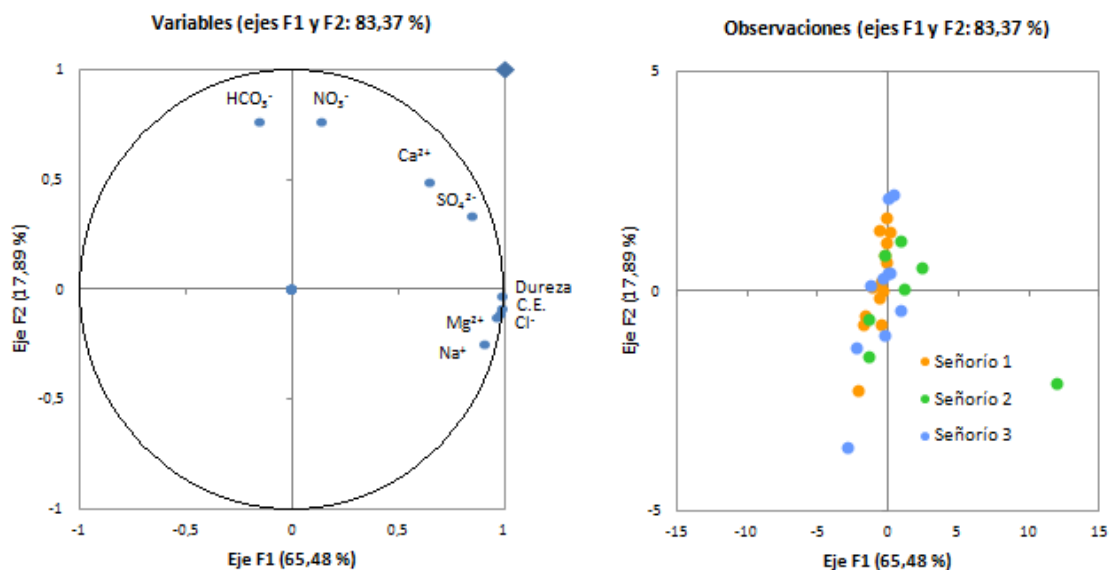


Figura 6.3. Representación de las variables y las observaciones en el plano I-II para las muestras de Señorío

En el campo de las observaciones (Figura 6.3) no se distingue ninguna agrupación clara de las muestras analizadas, lo cual indica que el agua del acuífero del Señorío de Marbella es relativamente homogénea y solo destacan algunas muestras del sondeo Señorío 2 con mayor mineralización que se alinean, en mayor medida, con el eje 1.

La correlación negativa existente entre Mg^{2+} y HCO_3^- (Tabla 6.3) sugiere un origen distinto de estos componentes. El ión Mg^{2+} puede tener un origen marino asociado a los procesos de intrusión en el acuífero. Esto es coherente con la alta correlación entre Ca^{2+} y HCO_3^- .

En la Figura 6.4 se muestra la regresión lineal entre el contenido en Cl^- y Mg^{2+} de los análisis químicos de los tres sondeos. El parámetro estadístico R^2 , con un valor de 0,9573, indica que presentan un origen común en el acuífero del Señorío de Marbella, posiblemente asociado a los procesos de intrusión marina antes mencionados.

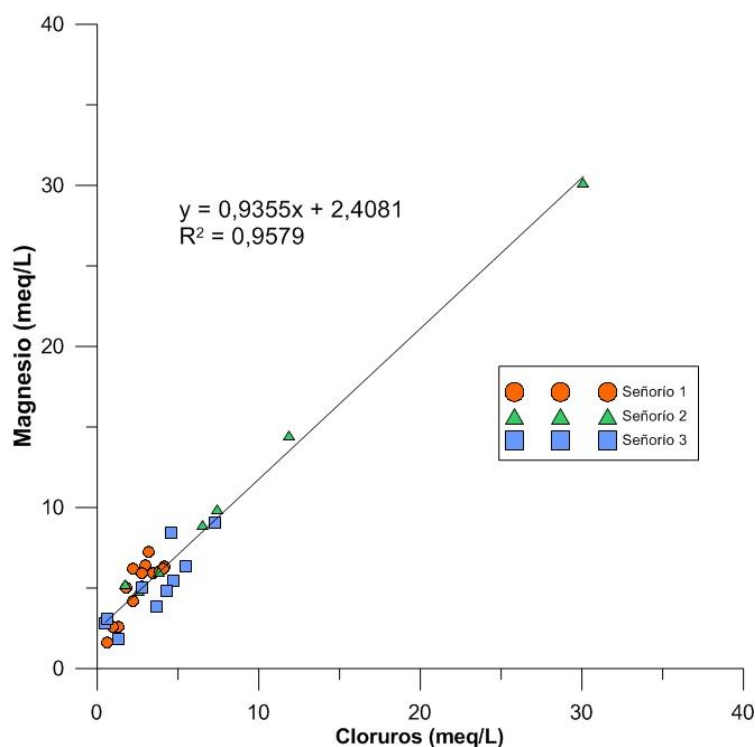


Figura 6.4. Regresión lineal entre la concentración de cloruro y magnesio en el acuífero del Señorío

6.4. Relaciones iónicas indicativas de intrusión marina

El uso de las relaciones iónicas en estudios hidroquímicos tiene como objetivo ayudar a identificar los aspectos relacionados con las reacciones que han tenido lugar en las aguas subterráneas, como resultado de mezclas de diferentes aguas o la interacción agua-terreno. Entre otras posibilidades, cabe destacar la identificación de procesos de disolución-precipitación, de oxidación-reducción, de intercambio iónico y, en el caso de acuíferos costeros, permite determinar el origen continental o marino del agua subterránea (Custodio, 1983).

Se han calculado tres relaciones iónicas indicativas de procesos de intrusión marina: Mg^{2+}/Ca^{2+} , Cl^{-}/HCO_3^{-} y SO_4^{2-}/Cl^{-} . Las dos primeras se han ajustado mediante regresión lineal y la última por exponencial negativa, con correlaciones elevadas y moderadamente altas. En la Tabla 6.4 se muestran los valores medios obtenidos en las tres captaciones analizadas y los intervalos a los que pertenecen el agua continental y marina. En todas las relaciones iónicas se observa, en general, que la media del sondeo de Señorío 2 se acerca más al valor característico del agua marina que las medias del resto de captaciones.

Relación iónica	Agua continental	Agua marina	Sondeos		
			Señorío 1	Señorío 3	Señorío 2
rMg/rCa	0,3-1,5	5	1,61	1,67	2,91
$rCl/rHCO_3$	0,1-5	20-50	0,45	0,66	1,96
rSO_4/rCl	0,2-0,4	0,11	0,49	0,35	0,28

Tabla 6.4. Valores característicos de las relaciones iónicas estudiados en agua continental y marina y medias obtenidas en las captaciones del Señorío

En la relación iónica rMg/rCa (Figura 6.5) se distingue que más de la mitad de las muestras se encuentran fuera del rango que define las aguas continentales sin llegar al valor característico del agua marina, lo que refleja la influencia de esta en el acuífero del Señorío, especialmente en el sondeo de Señorío 2.

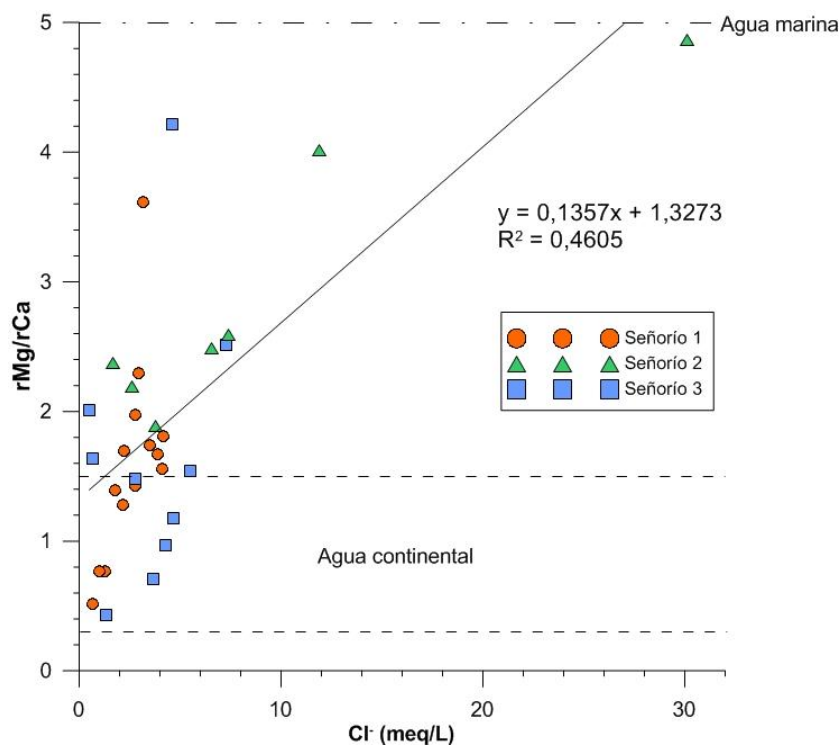
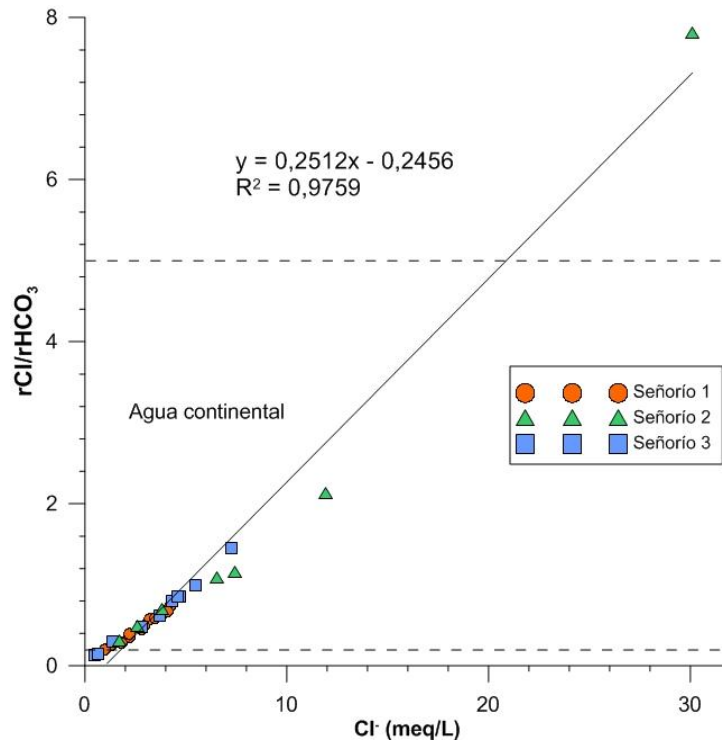


Figura 6.5. Relación iónica rMg/rCa de las muestras de agua del acuífero del Señorío

La Figura 6.6 muestra la relación iónica $rCl/rHCO_3^-$. Todas las muestras se sitúan en la franja característica del agua continental, salvo una del sondeo de Señorío 2 que corresponde al mes de febrero de 2006, cuando aun no se inició la experiencia de recarga artificial y se midió una conductividad eléctrica de 4.132 $\mu S/cm$ en el agua de dicha captación.



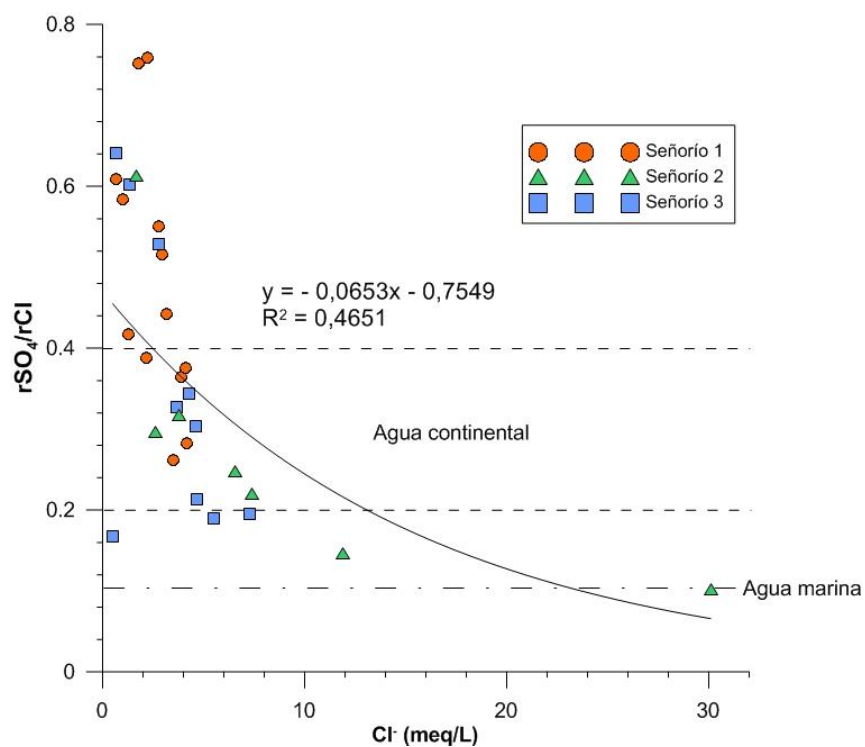


Figura 6.7. Relación iónica rSO_4/rCl de las muestras de agua del acuífero del Señorío

7. PROPUESTA DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA PARA RECARGA ARTIFICIAL

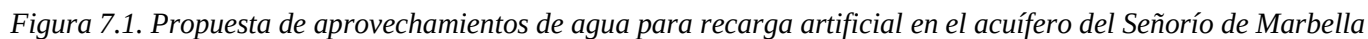
En el estudio del origen del agua de recarga se deben contemplar tanto aspectos cuantitativos como cualitativos. En dicho estudio es necesario incorporar no sólo la perspectiva espacial, sino también la distribución temporal. Por ello, es prioritario estudiar la naturaleza del agua que se va a inyectar, la localización de los puntos de toma para obtenerla, el caudal disponible y el régimen temporal del mismo y las características de calidad.

Los recursos hídricos utilizados para la recarga artificial pueden tener diferentes orígenes, como el agua residual doméstica después de ser tratada o la procedente de otros acuíferos. Sin embargo, normalmente el agua procede de cauces superficiales continuos (cursos fluviales permanentes) o discontinuos (escorrentía durante periodos lluviosos), ya sean tomados directamente o con un cierto grado de tratamiento antes de inyectarla al sistema.

En la zona de estudio se encuentran dos masas de agua subterránea con comportamientos totalmente distintos. Por un lado, la unidad de Marbella-Estepona, de tipo detrítico, que sufre la explotación continuada de numerosas captaciones en la zona costera, tal y como se ha explicado en los apartados anteriores. Por otro, la unidad de Sierra Blanca, de tipo kárstico, con recursos de difícil regulación. La recarga artificial permite hacer uso de estos recursos que, debido a su alta variabilidad temporal, no son aprovechados para uso urbano y podrían ser empleados para recargar el acuífero del Señorío de Marbella, gracias a su buena calidad.

Marbella presenta una dificultad añadida a la hora de seleccionar los dispositivos de recarga artificial. El elevado número de urbanizaciones en todo el sector costero del municipio impide la instalación de sistemas superficiales de recarga artificial, como las balsas y canales de infiltración, porque requieren áreas considerables. Este hecho obliga a escoger dispositivos de inyección basados en sondeos, como el actual sistema del Señorío.

En el marco de este trabajo de fin de máster se han analizado varias alternativas para aumentar el volumen de recursos inyectados en el actual sistema de recarga artificial del acuífero del Señorío. En la Figura 7.1 se muestran las propuestas de recarga artificial estudiadas.



La primera propuesta pretende regular los caudales de diferentes cursos de agua cercanos al actual dispositivo de inyección. Estos serían en concreto, de oeste a este, Nagüeles, Piedras y Calaña. Actualmente no se realiza ningún tipo de uso conocido en ellos, a excepción del primero que está captado cerca de su nacimiento para suministro de una urbanización cercana, a razón de un caudal de 10 l/s, lo que posibilita el empleo de caudales excedentarios para la recarga artificial. Las tomas de estos arroyos se construirían a una cota similar a la que actualmente presenta Camoján, para asegurar el potencial hidráulico y una calidad óptima del agua circulante por los cauces, evitando así contaminaciones desde las urbanizaciones adyacentes. Una vez captados estos caudales, serían conducidos mediante tuberías paralelas a cada curso de agua hasta las captaciones en el acuífero del Señorío.

Estos arroyos, a excepción de Nagüeles, no han sido controlados históricamente aunque el arroyo Calaña puede superar los 100 l/s durante periodos de pluviometría abundante (Andreo, 1997). En el marco del presente estudio se realizaron jornadas de campo para reconocimiento hidrológico de estos arroyos y pudo constatar que estaban prácticamente secos, incluso la Fuente Calaña, nacimiento del arroyo del mismo nombre. Sin embargo, vecinos de la urbanización de Xarblanca, cercana a este curso de agua, aseguran que este arroyo lleva caudales significativos de agua hasta mayo y junio en años húmedos. Esto posibilitaría realizar la recarga artificial no solo en los meses otoñales e invernales como sucede en la actualidad, sino también en la primavera cuando la demanda de agua comienza a aumentar y la pluviometría comienza a disminuir en la zona de estudio.

La composición química del agua drenada por el manantial de Nagüeles es muy similar a la de Camoján, con valores de conductividad eléctrica inferiores a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en ambas surgencias (Andreo, 1997). A finales de julio de 2012, la conductividad eléctrica y la temperatura en el manantial de Nagüeles eran 391 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 20'2 °C respectivamente (Fotografía 7.1).

Una alternativa a esta propuesta sería la de construir una batería de sondeos paralela a la costa y situar cada uno de ellos cerca de los arroyos antes mencionados, para inyectar el agua obtenida en los nuevos sondeos. Esto posibilitaría un efecto más global de la recarga y se mantendrían los niveles piezométricos y calidad del recurso almacenado en todo el acuífero.



Fotografía 7.1. Medida de la temperatura y la conductividad eléctrica del agua en el nacimiento de Nagüeles

La segunda propuesta se refiere a la utilización del agua almacenada en los embalses Viejo del Ángel y Nuevo del Ángel, cercanos a Señorío de Marbella, de los cual se hace un uso recreativo y se deriva parte del caudal para riego de zonas ajardinadas en urbanizaciones cercanas. Para introducir esta agua en el acuífero del Señorío, sería necesario hacer previamente un exhaustivo estudio hidroquímico que permita conocer las principales características de la misma y valorar posibles tratamientos de purificación de estos recursos. Sería necesario, además, construir tuberías que transportaran el agua hasta la zona de estudio o bien derivarla al cauce del Río Verde para utilizar el agua de estos embalses en los sondeos del aluvial del mismo nombre y favorecer posibles transferencias a los acuíferos anexos.



Fotografías 7.2 y 7.3. Embalses Viejo del Ángel (izquierda) y Nuevo del Ángel (derecha)

La tercera propuesta es la construcción de serpenteos en el Río Verde. Estos dispositivos se disponen a ambos lados del cauce, con objeto de reproducir el movimiento natural de los ríos meandriformes y reducir la velocidad del agua, lo que favorece la recarga. Los diques o serpenteos se instalan en el lecho del río mediante excavadoras, transversalmente a la dirección de flujo. La cota de coronación del dique apenas debe superar el nivel medio de la lámina de agua, para evitar inundaciones durante los episodios lluviosos. La instalación de estos dispositivos requiere la realización de estudios topográficos e hidrológicos previos, para confirmar que la topografía es lo suficientemente llana, y verificar la existencia de un flujo continuo aguas abajo. Así mismo, deberá realizarse un mantenimiento exhaustivo que corrija las posibles modificaciones que tengan lugar en el lecho del río. En la Fotografía 7.4 se muestra un ejemplo de serpenteos en el río Santa Ana, California.



Fotografía 7.4. Serpenteos en el río Santa Ana en Anaheim, California (EE.UU.) (tomado de Escalante, 2011)

Otra medida dentro de esta tercera propuesta es la escarificación del lecho del río (Fotografía 7.5), la cual consiste en el arado del cauce para retirar la capa limosa que se deposita en el mismo por la circulación del agua y dejar al descubierto los materiales más gruesos, como cantos rodados, arenas y gravas. Con ello se aumenta temporalmente la capacidad de infiltración del agua del río hacia el acuífero.

La escarificación tiene efectos similares sobre el lecho a los de las crecidas naturales. Durante estas, la velocidad del agua aumenta y el material decantado sobre el fondo es arrastrado, de manera que se limpia el lecho de sedimentos y se favorece la infiltración. En Río Verde, las crecidas se ven limitadas desde la construcción del embalse aguas arriba, por lo que esta medida podría ser bastante útil. Las actividades de escarificado se realizan mediante unos *ripper* montados en una excavadora de cadenas. Para que esta técnica sea efectiva, la velocidad a la que avanza la excavadora debe ser menor que la velocidad de la corriente, para evitar la decantación de los finos en las zonas ya escarificadas, y debe realizarse siempre en el sentido de la corriente.

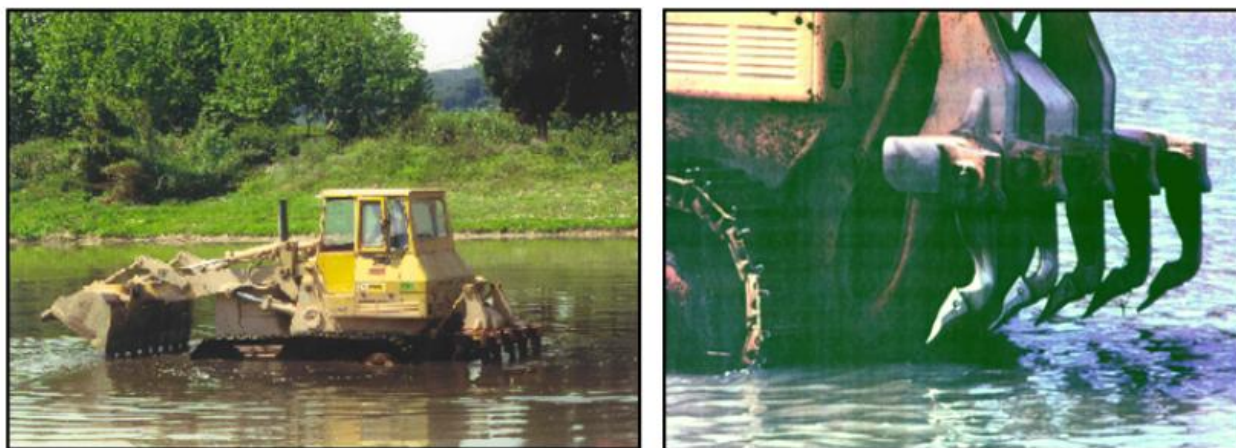


Figura 7.5. Operación de escarificado en el lecho del río Llobregat (Barcelona) (Tomado de Escalante, 2011)

La última posibilidad considerada es el empleo de los desembalses de la presa de la Concepción (Figura 7.6), ya que ante episodios de elevadas precipitaciones es necesario evacuar parte del volumen de agua almacenado para asegurar la seguridad de la construcción. Algunos de los últimos desembalses según los datos obtenidos de la red Hidrosur de la Agencia Andaluza del Agua se estiman en casi 2 hm^3 entre el 30 de diciembre de 2010 y el 9 de enero de 2011; $2'5 \text{ hm}^3$ entre el 14 y el 18 de febrero de 2011 y $0'34 \text{ hm}^3$ en tan solo un día, del 6 al 7 de mayo de 2011. Los caudales medios de desagüe fueron $2'32 \text{ m}^3/\text{s}$, $6'87 \text{ m}^3/\text{s}$ y $6'75 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, lo que supone un considerable volumen evacuado.

Estos caudales presentan una doble finalidad, ya que pueden infiltrarse en el aluvial del Río Verde (favorecido aún más por las labores de escarificación y los serpenteos) y también ser derivados en parte hacia los sondeos del sector del Señorío de Marbella. La construcción de la toma de agua en el cauce del Río Verde permitiría derivar al acuífero solo un pequeño porcentaje del caudal circulante, ante volúmenes de gran entidad como el ocurrido en febrero de 2011. Es preferible que los desembalses se produzcan con los menores caudales de evacuación posibles, para así mantener las características ecológicas en todo el cauce del río y favorecer la infiltración en el acuífero.

En la Tabla 7.1 se han incluido las principales ventajas e inconvenientes de las propuestas descritas anteriormente.

Propuestas de recarga artificial	Ventajas	Inconvenientes
Recarga con excedentes de arroyos cercanos (Nagüeles, Piedras y Calaña)	Buena calidad para abastecimiento	Alta variabilidad de caudal drenado
	No pérdidas por evaporación	Problemas sólidos en suspensión
	Buen conocimiento hidrogeológico por investigaciones previas (acuífero de Sierra Blanca)	Escasez de caudales en épocas estivales
	Buenas expectativas por experiencias previas	Costes de construcción de conducción y toma de agua
	Cursos cercanos al sondeo de inyección	Otros usos del agua (urbanizaciones, etc.)
Recarga con agua de embalses cercanos	Uso sostenible de los recursos hídricos presentes	Costes de construcción de conducciones
	Menores pérdidas por evaporación	Posibles tratamientos de purificación previos a inyección
		Distancia hasta el punto de inyección
Excedentes del embalse de la Concepción	Buena calidad para abastecimiento	Problemas sólidos en suspensión
	Elevados caudales en desembalses	Recursos disponibles solo en años húmedos
	Uso sostenible de los recursos hídricos presentes	Necesidad de mantener caudales ecológicos
	Caudales permanentes de desembalse	Costes de construcción de conducción y toma de agua
	Unidades hidrogeológicas cercanas	Requiere coordinación entre los propietarios de las infraestructuras
Tratamientos activos en el lecho de Río Verde	Medida muy efectiva para favorecer infiltración	Escaso espacio en el cauce del río
	Caudal recargable elevado	Posibilidad de contaminación por vertidos
	Depuración del agua	Incidencia en el régimen hidrodinámico
	Bajo coste	Factores estéticos y ambientales
	No necesarias conducciones hasta sistema de inyección	

Tabla 7.1. Ventajas e inconvenientes de las propuestas de recarga artificial analizadas

8. CONCLUSIONES

Marbella ha experimentado en los últimos años un considerable crecimiento demográfico, con un aumento de decenas de miles de habitantes. Esta situación se agudiza en los meses estivales, periodo en el que llega a duplicar e incluso triplicar el número de residentes, lo cual lleva implícito una mayor explotación de los recursos hídricos cuando más escasos son.

La pluviometría en el municipio de Marbella varía de un año a otro considerablemente, con años muy secos (1994/95) seguido de otros muy húmedos (1995/96), lo que confiere cierta inestabilidad climática y hace necesario disponer de distintas fuentes de agua para asegurar el abastecimiento a la población. Por tanto, es imprescindible gestionar la oferta de recursos hídricos disponibles, medida que se ha llevado a cabo con la construcción del embalse de la Concepción y la desaladora de Marbella en la década de los 70 y los 90 respectivamente, además del aumento del rendimiento técnico en la red de abastecimiento gestionado por Aquagest y de los recursos disponibles en el acuífero plioceno del Señorío de Marbella, mediante recarga artificial con excedentes del manantial de Camoján. Esta última medida comenzó a realizarse a finales de 1999 y sus principales objetivos eran aumentar la disponibilidad de recursos de agua para el suministro de agua potable en los meses estivales o con escasez de precipitaciones, y mejorar la calidad del agua almacenada en el acuífero del Señorío de Marbella

Las cotas piezométricas del acuífero del Señorío presentan una marcada sucesión periódica asociada a la estacionalidad de las precipitaciones, con ascensos rápidos en respuesta a las precipitaciones de otoño e invierno y descensos bruscos en verano, con valores mínimos de 7 m b.n.m. Desde que entró en funcionamiento el primer periodo de recarga artificial se consiguió estabilizar el nivel piezométrico en cotas por encima de 0 m s.n.m. durante casi todo el año, a excepción de los meses estivales. Los caudales medios de inyección durante esta etapa fueron de 6'7 l/s y 16'5 l/s en los sondeos Señorío 1 y 3 respectivamente.

La limitación en los caudales admisibles de inyección en las captaciones previas impidieron optimizar el sistema de recarga y, por ello, se planteó la construcción de un nuevo sondeo (Señorío 4) a finales de 2005. La principal diferencia con el anterior sistema estriba en el método de inyección, ya que anteriormente se realizaba por gravedad y ahora se efectúa con presión en la cabeza de sondeo, lo cual permite un mayor caudal instantáneo de la recarga. El caudal medio de inyección en Señorío 4 ha sido de 22'8 l/s hasta junio de 2010, lo que demuestra el mayor rendimiento del sistema de recarga artificial actual en comparación con el anterior.

Los análisis hidroquímicos ponen de manifiesto que la mayoría de las muestras de agua de los sondeos Señorío 1, 2 y 3 son bicarbonatadas cálcico-magnésicas, mientras que el resto presentan facies cloruradas y/o sulfatadas cálcico magnésicas. Las muestras de agua del manantial de Camoján son

bicarbonatadas cálcicas, ya que drenan los mármoles calizos del sector occidental de Sierra Blanca. El análisis temporal de estos mismos datos permite constatar el efecto positivo que ha producido la inyección de agua menos mineralizada en el acuífero del Señorío, con un descenso medio de la conductividad eléctrica superior a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El análisis de componentes principales y los indicadores de intrusión marina señalan que el agua almacenada en el acuífero es relativamente homogénea y muestra la ausencia de este proceso inherente a los acuíferos costeros, salvo en algunas muestras de Señorío 2 previas a la experiencia de recarga artificial. Los perfiles verticales de conductividad eléctrica y temperatura realizados en el marco del presente trabajo de fin de máster apoyan este hecho, puesto que no se registran valores elevados de conductividad eléctrica en los sondeos situados en el sector oriental del acuífero (Torreverde y Señorío 3), donde se producen los mayores bombeos. En el sector occidental se registran máximos de conductividad eléctrica cercanos a 6.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Oasis-Manchones.

Para aumentar la cantidad de recursos hídricos destinados a la recarga artificial en el acuífero del Señorío se han analizado cuatro propuestas diferentes. La primera permite utilizar los excedentes invernales de Sierra Blanca, provenientes de sus manantiales y de la escorrentía originada en dicha sierra. La segunda alternativa consistiría en derivar el volumen de agua almacenado en los embalses Viejo del Ángel y Nuevo del Ángel, cercanos al acuífero del Señorío, lo que requiere un análisis hidroquímico exhaustivo previo para determinar la calidad del agua. La tercera propuesta sería realizar diversas labores en el aluvial del Río Verde, como los serpenteos y la escarificación del lecho del cauce, que permitirían una mayor recarga de este acuífero cuando se producen, aguas arriba, los desembalses en la presa de la Concepción. Por último, la cuarta propuesta analizada se basaría en explotar dichos desembalses mediante una toma de agua situada en Río Verde, que recogiera el caudal evacuado y conectara, mediante tuberías, los acuíferos aluvial y plioceno de la zona de estudio.

9. BIBLIOGRAFÍA

ANDREO, B., CARRASCO F., SANZ DE GALDEANO, C. (1997). *Types of carbonate aquifers according to the fracturation and the karstification in a southern Spanish area*. Environmental Geology, 30 (3/4): 163-173.

ANDREO, B., CARRASCO, F., DURÁN, J.J., FERNÁNDEZ, G., LINARES, L., LÓPEZ-GETA, J.A., MAYORGA, R., VADILLO, I. (2000). *Hidrogeological investigations for groundwater exploitation in the Sierras Blanca and Mijas (Málaga, southern Spain)*. Hydrogéologie, 3: 69-83.

ANDREO, B. (1997): *Hidrogeología de Acuíferos Carbonatados en las Sierras Blancas y Mijas. Cordillera Bética, Sur de España*. Universidad de Málaga. Málaga, 489 p.

AQUAGEST SUR S.A.-INGEMISA. (1995): *Cartografía Hidrogeológica del Término de Marbella*. Inédito.

AYUNTAMIENTO DE MARBELLA, 2010. *Estudio de Impacto Ambiental del Plan General de Ordenación Urbana de Marbella*.

BOUWER, H. (1999). *Artificial recharge of groundwater: systems, design, and management*. In: Mays LW (Ed.) Hydraulic design handbook. McGraw-Hill, New York, pp 24.1–24.44

BOUWER, H. (2002). *Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering*. Hydrogeology Journal, volume 10, nº 2, April 2002.

BUESO, S., ISLÁN, A., ORTUÑO, A. (2006): *Dispositivo de recarga artificial en el acuífero plioceno de la unidad hidrogeológica Marbella-Estepona*. Marbella (Málaga).

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. Editorial Omega. Volumen I y II. Barcelona

DURÁN VALSERO, J.J. (coord.) (2007): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Instituto Geológico y Minero de España, Diputación de Málaga.

FERNÁNDEZ, E., GARCÍA, M., VILLARROYA, F. (2005): *Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo*. Revista Tecnología y desarrollo, vol. III. Universidad Alfonso X El Sabio. Madrid.

FERNÁNDEZ, E. (2004): *Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales: aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la cubeta de Santiuste (Segovia)*. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 1331 p.

FERNÁNDEZ, E. (coord.) (2010): *La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico. Serie Hidrogeología hoy*, título 6. Madrid.

FERNÁNDEZ, E. (2011): *Gestión de recarga artificial de acuíferos como práctica alternativa a la gestión hidráulica. El proyecto DINA-MAR*. Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid.

FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 604 p.

IGME (1978): *Mapa geológico de España. Marbella*. Segunda serie, primera edición. Servicio de Publicaciones.

IGME (1983). *Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España. Sistema acuífero nº 38 (Mármoles de Sierra Blanca-Mijas)*. Informe técnico nº 6, 2 tomos.

IGME (2000). *Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*.

ITGE (1991). *Tecnología básica de la recarga artificial de acuíferos*. Serie: Lucha contra la contaminación.

JAÉN, M., ISLAN, A., LUPIANI, E., RIERA, S. (2003): *Explotación sostenible de un acuífero aluvial muy vulnerable a la contaminación marina (Marbella)*. Alicante.

JAÉN, M., PARELLADA, C., LUPIANI, E., ISLAN, A., RIERA, S. (2003): *Recarga Artificial en el Acuífero Costero de Marbella*.

JIMÉNEZ, P. (2010): *Caracterización hidrogeológica de acuíferos carbonáticos del sur de España a partir de sus respuestas naturales*. Universidad de Granada. Granada, 388 p.

LERNER, D.N, ISSAR, A.S., SIMMERS, I. (1990). *Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural resource*. IAH Int contribution Hydrogeology, 8. Heinz Heise, Hannover, 345 p.

MIMAM. (2000). *Libro Blanco del Agua en España 2000 (LBAE)*. MIMAM. Madrid. 637 pp.

MURILLO, J.M., ORDEN, J.A., ARMAYOR, J.L., CASTAÑO, S. (2000): *Recarga artificial de acuíferos. Síntesis metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante. Septiembre 1999*.

POZOS REUNIDOS S.L (1996). *Optimización de las explotaciones de aguas subterráneas de suministro a Marbella. Memoria*. 55p.

SÁNCHEZ, L., CASTILLO A. (eds.) (2005): *Itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz*. Instituto del agua. Universidad de Granada. Granada.

SILGADO, A., ROMÁN, J, MARTÍN, M., MANTECÓN, R. (2002). *Uso eficiente del agua en cuencas. Optimización de la gestión de los recursos hidráulicos mediante la recarga artificial Experiencias en la cuenca del Guadalquivir*. Internet: <http://www.unesco.org>.

VADILLO, I. (2003). *Contaminación de acuíferos carbonatados por vertederos de residuos sólidos urbanos: caso del vertedero de la Mina (Marbella, Málaga)*. 224 p.

Web consultadas:

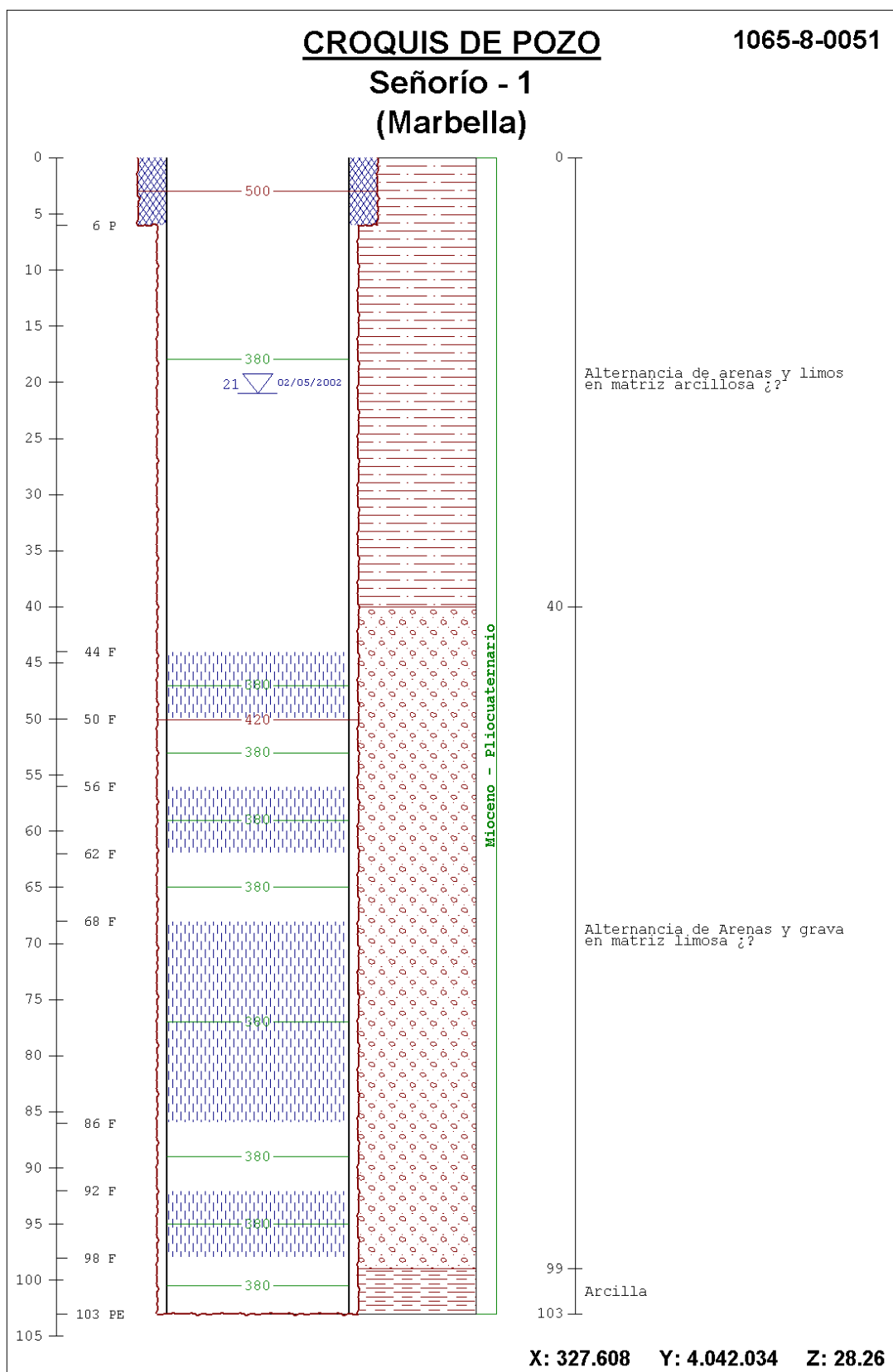
AQUAGEST ANDALUCIA (2009) (en línea). Disponible en: <http://www.aquagestandalucia.es/ESP/home.asp> [Consulta: 04-05-2012]

CD Cicloturista “La Vereita” (2010) (en línea). Disponible en: <http://www.lavereita.es/2010/01/desaguado-de-la-presa-de-la-concepcion.html> [Consulta: 20-07-2012]

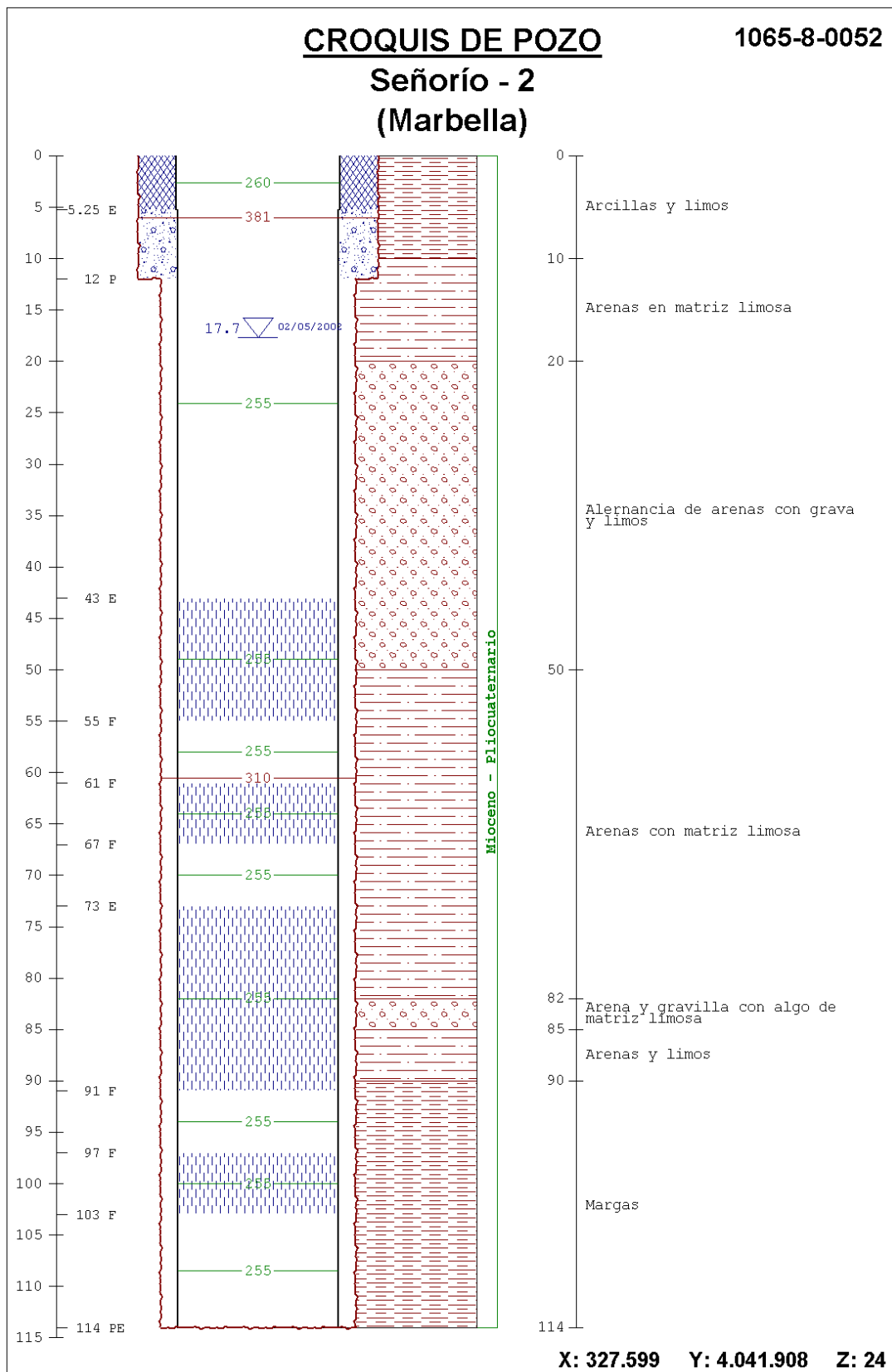
GLOBAL BIOCLIMATICS (2009) (en línea). Disponible en: <http://www.globalbioclimatics.org/> [Consulta: 11-06-2012].

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (2012) (en línea). Disponible en: <http://www.ine.es/nomen2/index.do> [Consulta: 10-05-2012]

**ANEXO: COLUMNAS LITOLÓGICAS DE LOS SONDEOS DEL SEÑORÍO DE
MARBELLA Y ESQUEMA CONSTRUCTIVO DEL SONDEO SEÑORÍO 4 PARA
RECARGA ARTIFICIAL**

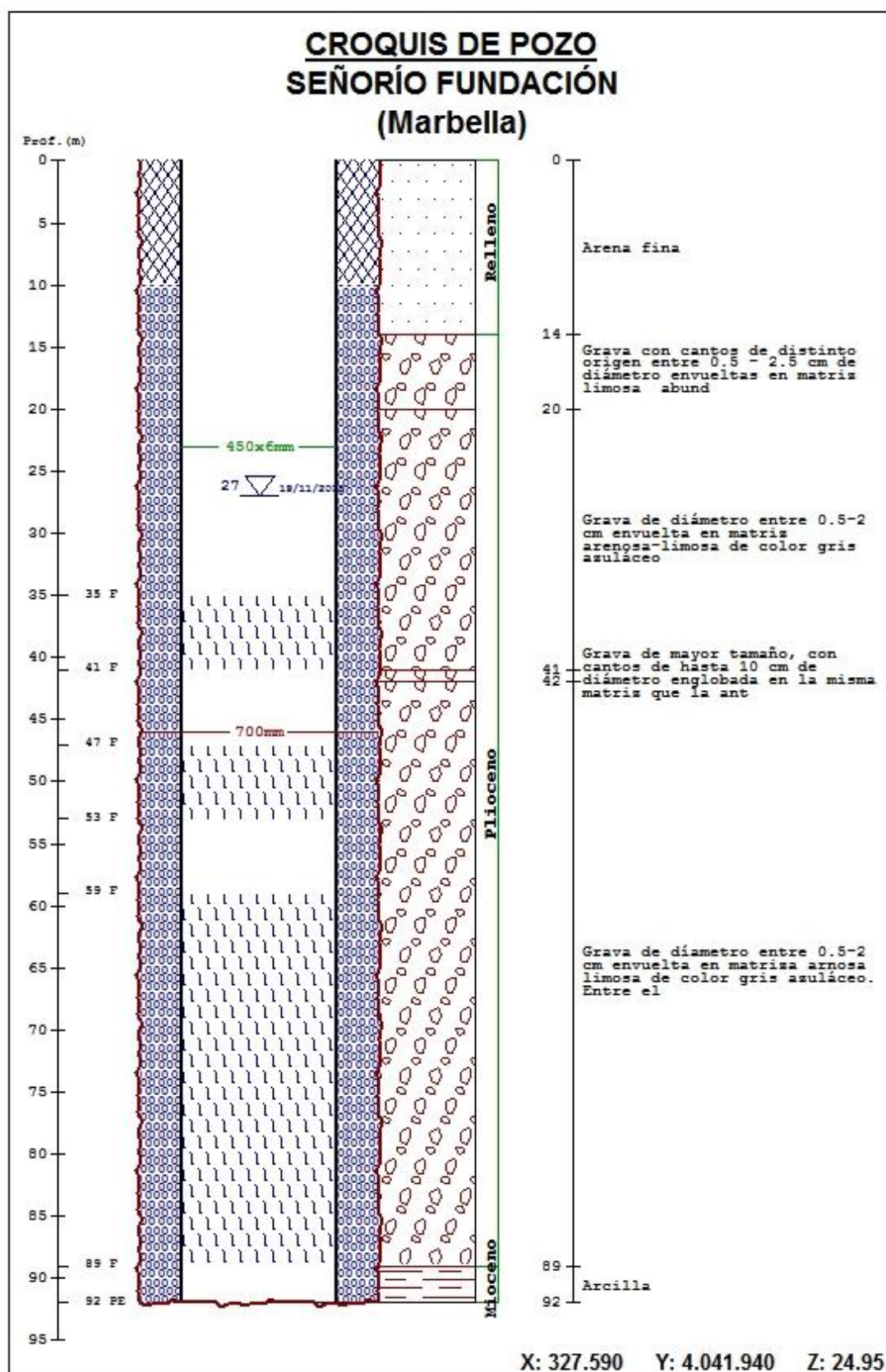


Columna litológica del sondeo Señorío 1

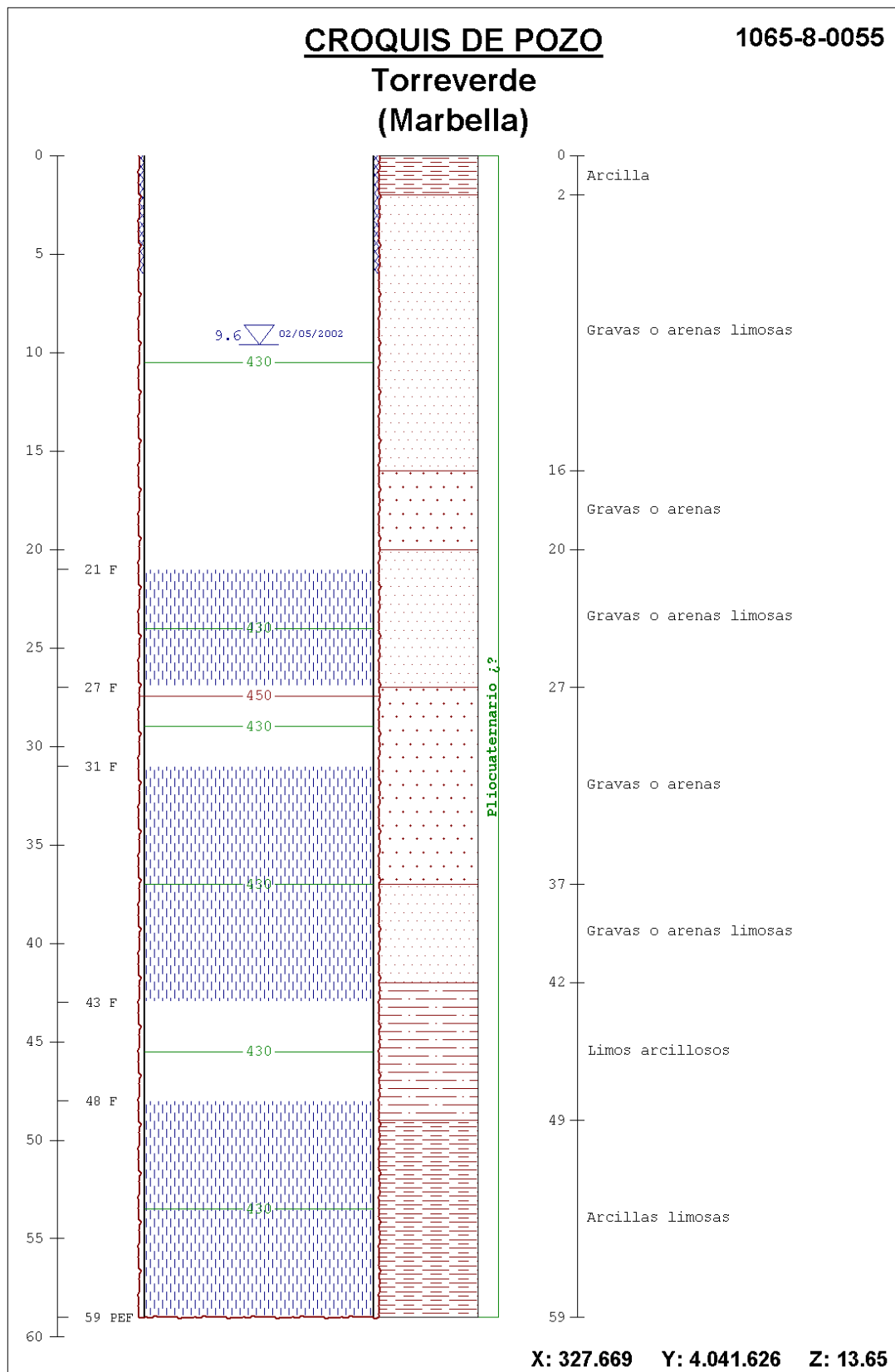


Columna litológica del sondeo Señorío 2

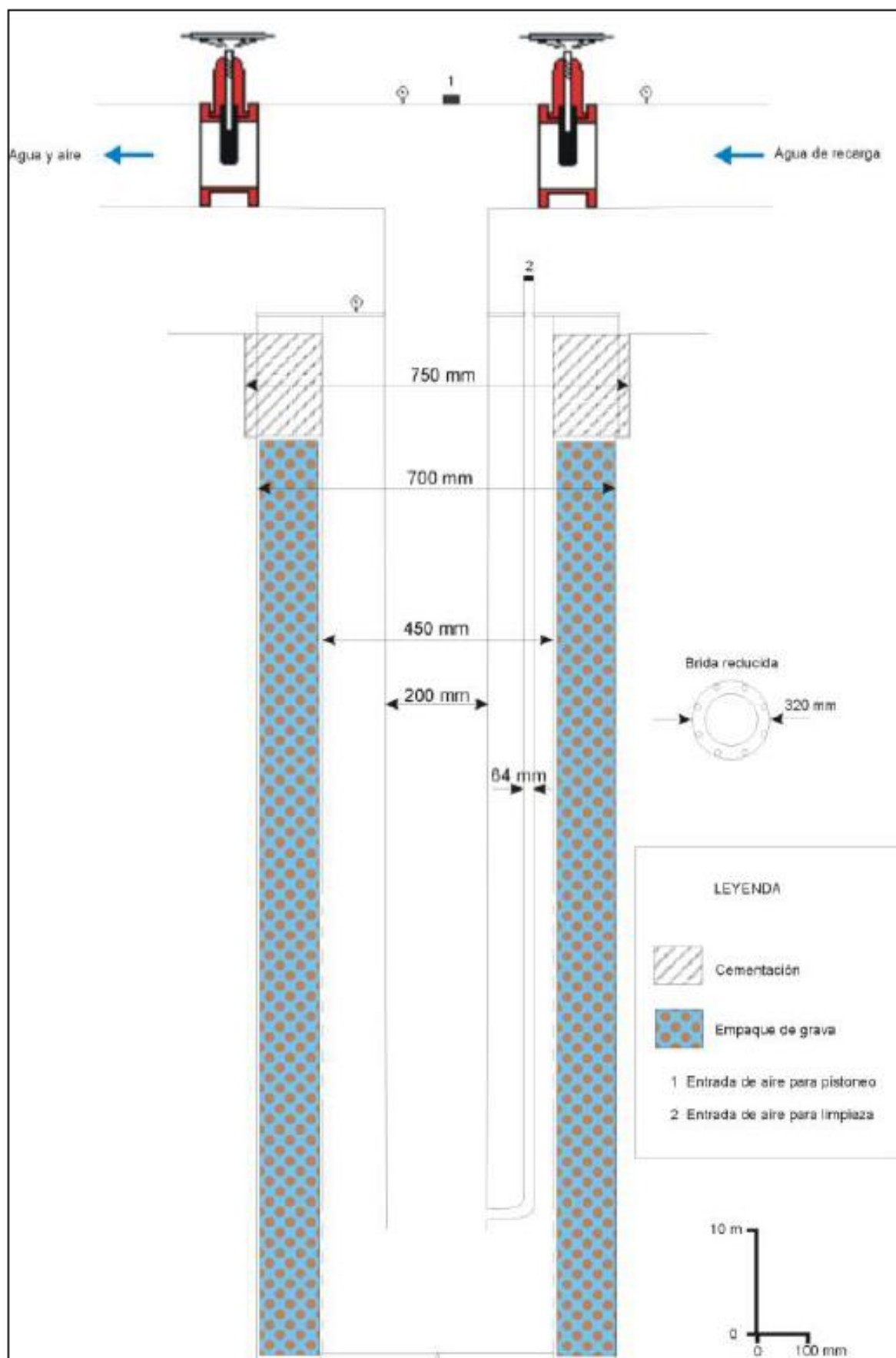




Columna litológica del sondeo Señorío 4



Columna litológica del sondeo Torreverde



Esquema constructivo del sondeo Señorío 4 para recarga artificial

