

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN DOÑANA

Emilio Custodio Gimena.

Ingeniero Industrial.

Catedrático de Ingeniería del Terreno. Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cataluña.

Mariano Palancar Sánchez.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Jefe de Acuífero 27. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

RESUMEN

Los 3400 km² sobre los que se extiende el acuífero Almonte-Marismas dependen casi enteramente del agua subterránea, tanto en lo que se refiere al abastecimiento de agua potable como al regadío. Su papel es vital en los procesos ecológicos que se desarrollan en el Parque Nacional y el Parque Natural del Entorno.

Existen dos regiones diferenciadas: 1) las arenas, cuyo acuífero es de carácter freático, recargado por la precipitación, 2) la marisma, en la que bajo sedimentos arcillosos holocenos se encuentran paleocauces de gravas y arenas y el acuífero regional resulta confinado. El contacto entre ambas regiones forma un ecotono que es también una franja importante de descarga de agua subterránea, junto con otras a lo largo del Arroyo de la Rocina, que cruza las formaciones arenosas occidentales. El nivel freático está próximo a la superficie, de modo que existen lagunas permanentes y temporales en las arenas, en especial relacionadas con paleorelieves dunares, y puede ser aprovechado directamente por amplias masas de vegetación natural o plantada.

El establecimiento de una importante superficie de regadío, y de captaciones para el abastecimiento de poblaciones supone una interferencia con las descargas naturales de agua subterránea que soportan vegetación y encharcamientos esenciales para la vida natural que se pretende proteger mediante la creación de los Parques. También supone un riesgo de introducción de nutrientes y otros productos químicos, los que a la larga pueden afectar notablemente a los ecosistemas. Por todo ello se han llevado a cabo estudios regionales y de detalle, con el apoyo de Instituciones Centros de Investigación Universitarios.

La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, junto con el Servicio Geológico de Obras Públicas, ha realizado una red de control piezométrico que cubre todo el territorio con baterías de sondeos que permiten controlar el nivel piezométrico de cada horizonte permeable del subsuelo. Así como se ha realizado una red de 10 estaciones que controla todas las entradas de aguas superficiales al Parque, posibilitando la obtención de los caudales drenados del acuífero. Por último se plantea la necesidad de una red de control de calidad de las aguas subterráneas, para lo cual se está construyendo un sondeo piloto multitubo que permitirá avanzar en el conocimiento de la contaminación por nitratos y de otros contaminantes agrícolas.

ABSTRACT

The water supply of the Almonte-Marisma wetlands - 3,400 square kilometers - for both drinking and irrigation proceeds almost entirely from groundwater which is vital to the ecology of the National Park and the area as a whole.

There are two separate regions in the area: 1) the sandbanks, with a water-table replenished by rainfall, and 2) the marshes, where Holocene clay deposits overlie sand and gravel palaeochannels that confine the aquifer. The transition zone between the two regions is an important outlet of groundwater together with others along the Arroyo de la Rocina across the western sand area. The water table is near the surface, so there are lagoons, some permanent, some seasonal, related to paleo-dunal formations, and this water supplies large areas of natural or cultivated plantations.

The introduction of extensive irrigation and of wells to supply urban areas impairs the natural outlets of the groundwater that supports plant life and maintains the wetness that is essential to the preservation of natural life - the *raison d'être* of the Parks. It also implies the threat of eventual damage to the ecosystems from the use of fertilizers and other chemicals. Regional and detailed studies of these problems have been carried out, and indeed are continuing, with the help of Institutes and University research Centres.

The Confederación Hidrográfica (Water Board) of the Guadalquivir, in collaboration with the Geological Service of the Ministry of Public Works, set up a monitoring network all over the area. Multipiezometer boreholes register the head of water of each permeable layer, and ten gauging stations measure all the significant inflows to the Park - the drainage from the aquifer. The quality of the groundwater is another aspect that should be examined; a multilevel sampling well is being sunk to provide data on underground contamination by nitrates and other agricultural pollutants.

1. INTRODUCCIÓN

Al tiempo de escribir estas líneas es noticia en los periódicos la lucha por el agua entre Comunidades Autónomas, regiones, provincias, zonas de riego, sectores, agricultores...

Es la Sociedad tomando conciencia en 1.994 de principios básicos elementales proclamados con solemnidad a nivel mundial por la CARTA EUROPEA (Consejo de Europa Estrasburgo) hace más de 25 años, en 1.968:

SIN AGUA NO HAY VIDA
EL AGUA ES UN BIEN ESCASO

La singularidad de Doñana no solamente reside en las múltiples circunstancias que le confieren carácter de única y que son frecuentemente divulgadas, sino también por constituirse en lugar de avanzadilla del debate de vanguardia.

Así pues vemos que este reconocimiento del agua como bien supremo y básico, y la necesidad de la ordenación del uso porque la cantidad no es ilimitada, tienen aquí en Doñana una larga tradición de discusión.

Es bien conocido el carácter pionero de Doñana en demostrar que la Defensa de la Naturaleza, con mayúsculas, es un objetivo de primer orden básico y fundamental.

Veámoslo en dos ejemplos ilustradores de tal precocidad.

Qué fuerza no tendrá Doñana cuando es capaz de motivar la redacción de esas frases tan actuales "Albergamos la profunda convicción de que lo que realmente interesa a España es precisamente conservar el Coto de Doñana respetando su bravía vegetación, a fin de permitir también la conservación integral de su variada y rica fauna salvaje"; perteneciente a una carta escrita por sus propietarios Manuel María González Gordon y su hijo Mauricio González Díez, a Francisco Franco el 3 de Noviembre de, nada menos que 1.953.

Otro dato poco conocido y que nos ayuda a entender la importancia intrínseca de Doñana y su carácter de pionera, esta vez a nivel internacional, lo aporta José Antonio Valverde Gómez,

auténtico PADRE del Parque y primer Director Conservador: "Por lo que sé, DOÑANA, en sentido lato, fue la primera intentona mundial de hacer una reserva con la cooperación económica internacional". Remarca Valverde el adjetivo económica pues añade con orgullo que la faceta técnica de iniciativa y desarrollo fue totalmente nuestra.

Hoy día Doñana vuelve a convertirse en estandarte de la vanguardia defendiendo los siguientes valores en la controvertida oposición entre conservación y desarrollo enumerados en el 2º párrafo del Dictamen de los Expertos (Castells et al, 1992):

"Para poder conservar la naturaleza es necesario asegurar a quienes la habitan un nivel de vida, de educación y de cultura suficientes como para que no tengan necesidad de sobrevivir mediante el gesto desesperado de la destrucción de su entorno; por otro lado, el desarrollo socioeconómico debe integrar en sus objetivos y en sus métodos la conservación de la naturaleza como el elemento fundamental, irrenunciable, sin el cual el desarrollo carece de sentido y, en último término, de viabilidad, por agotamiento de los recursos más preciados".

Es decir, lo que se ha definido como el desarrollo socioeconómico sostenible.

Y termina la introducción del Dictamen con el siguiente deseo "Quisiéramos, al terminar nuestro esfuerzo, que el precedente que pudiera crearse a partir de este Dictamen sirviera como *Ejemplo Europeo* de desarrollo sostenible en equilibrio con la biosfera".

Una vez cumplido el empeño de destacar la importancia vital de Doñana, labor inevitable en cualquier trabajo que se precie, aunque sea por métodos deductivos como aquí se han expuesto, regresamos al tema central que nos ocupa para ser fieles al título: *El Agua*.

El año 1969, un año después de la Carta Europea del Agua, fue un año importante para la zona:

▼ Declaración por Decreto-Ley del Parque Nacional de Doñana.

▼ La FAO (Food and Agricultural Organization) incluyó entre sus programas el "Proyecto de Investigaciones Hidrogeológicas en la Cuenca del Guadalquivir para evaluar los re-

cursos de los principales acuíferos del Guadalquivir entre los que se encuentra el de Almonte-Marismas.

▼ Entrada en vigor de la Ley 2/1.969 que prohibió temporalmente la captación de aguas subterráneas en las zonas incluidas en el proyecto FAO.

La Ley 2/1.969 resultó un contrapunto a la Ley de Aguas de 1.879 que prácticamente no regulaba las aguas subterráneas sino que expedía título de propiedad sobre ellas, a perpetuidad, a favor del que las alumbraba.

Finalizada la investigación programada, el Decreto 735/1.971 de 3 de Abril, implantó las normas de carácter técnico y administrativo para la ejecución de nuevos alumbramientos y la ampliación de los ya existentes. El territorio definido, la zona nº 1, consiste en los términos municipales completos de Almonte, Rociana, Hinojos, Villamanrique de la Condesa, Pilas y Aznalcazar. El volumen disponible se evaluó en 160 hm³ y se reservaron 145 hm³ para la Zona Regable de Almonte-Marismas. Se encargó a la Comisaría de Aguas el control, vigilancia, planificación y emisión de autorizaciones, previo informe vinculante del ITGE.

Sorprende sin embargo que, pese a la simultaneidad en el tiempo de estos hechos, ni en la Ley 2, ni en el Decreto 735 se menciona para nada al Parque Nacional, aunque seguramente resulta ilustrador de la perspectiva con que en 1.971 el desarrollo técnico y económico contemplaba la faceta ecológica.

Entendiéndolo así, la Ley de Doñana de 1.978 recorre pasos de gigante.

En los Planes Hidrológicos que actualmente se diseñan aparece entre los usos del agua tradicionales (abastecimiento, regadíos, etc.) un nuevo concepto de uso: el ecológico. Del total del volumen de agua regulado en los embalses de la cuenca una cierta parte se asigna para atender una demanda con valor propio, no residual: la demanda ecológica.

Este concepto de los años 90 de reserva de un cierto volumen de agua para atender las necesidades ecológicas tiene su precursor en 1.978 en la ley de Doñana que de una forma

más tajante da prioridad al valor ecológico de la función del agua cuando dice:

“Para todas aquellas actuaciones que puedan modificar la cantidad o calidad de las aguas subterráneas o superficiales aportadas al Parque Nacional será preceptivo un informe del Patronato del mismo.”

“El Gobierno, a propuesta del Ministerio de la Presidencia del Gobierno, y previa iniciativa del Patronato, podrá limitar o suspender cualquier actividad que pueda afectar a la cantidad o calidad de las aguas del Parque Nacional. Dicha limitación o suspensión tendrá carácter provisional y se mantendrá hasta tanto se adopten las correcciones oportunas”.

Como se evidencia con claridad el valor de la naturaleza se impone con decisión y se coloca en un lugar prioritario. Mientras en 1.971 ni siquiera se le menciona como posible relación con los usos tradicionales del agua (abastecimiento, regadíos, industria, etc.) en 1.978 se supeditan todas las actuaciones a un informe preceptivo del Patronato, posibilitando incluso la suspensión de la actividad nociva.

Es de destacar, asimismo, la aparición como novedad del aspecto de la calidad, equiparado en importancia a la cantidad.

Finalmente, hoy en día, está en vigor la Ley 29/1985 de 2 de Agosto, de Aguas y su Reglamento que otorga al Organismo de Cuenca plenas competencias sobre las aguas subterráneas. Esta Ley respeta a los antiguos titulares de algún derecho sobre aguas privadas procedentes de pozos o galerías en explotación, el régimen de explotación de los caudales realmente utilizados por un plazo de cincuenta años. Los nuevos alumbramientos o incrementos de caudal requerirán la oportuna concesión.

Merece la pena destacar, por la importancia que tiene en la zona, el derecho que reconoce la Ley a los propietarios de fincas para la utilización de un volumen total anual inferior a 7000 m³ de aguas subterráneas, mediante la simple comunicación al Organismo de Cuenca y la verificación, por parte de éste, de las condiciones que impone la Ley.

El Organismo de Cuenca, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, ejerce su más alta relación con el Parque Nacional a través de

su Patronato, del cual es miembro el Presidente del Organismo. A su vez el Presidente es ponente del Grupo de Trabajo de Aguas del Patronato, del que son miembros:

- ▼ El Viceconsejero de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.
- ▼ El Alcalde-Presidente de Puebla del Río.
- ▼ El Director de la Estación Biológica de Doñana.
- ▼ El Director-Conservador del Parque Nacional de Doñana.
- ▼ El Jefe de la Oficina de Proyectos del Instituto Tecnológico y Geominero de España.
- ▼ Un representante de ADENA.
- ▼ Un representante de los agricultores.

En el Grupo de Trabajo de Aguas se analizan y debaten todos los temas relacionados con el agua que tienen entrada en el Patronato, y otros que el propio Grupo entiende como necesarios; elaborando informes y propuestas que facilitan y clarifican la labor decisoria del Patronato.

2. LOS ACUIFEROS EN DOÑANA

El marco geológico de Doñana, como comarca natural es relativamente sencillo y conocido (Menanteau, 1980; IGME, 1983; ITGE, 1992; Mayoral, 1989; Salvany y Custodio, 1995). Depende de la evolución tectónica y sedimentaria del Bajo Guadalquivir (Viguier, 1977). En buena parte se ha ido modelando durante el cuaternario por la evolución de la red fluvial (Rodríguez Vidal, 1989), la sedimentación litoral (Zazo et al., 1992) y los depósitos eólicos dunares (Flor, 1990; Borja y Díaz del Olmo, 1992). Sin duda los trabajos de perforación de FAO (1970; 1975) y luego del IRYDA (1976) para el establecimiento de la zona regable de Almonte-Marismas y en la actualidad de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y del Servicio Geológico (SG) del MOPTMA, junto a algunos sondeos profundos de prospección de hidrocarburos, son los que han permitido reconocer en profundidad

un territorio que en superficie se presenta como bastante monótono.

La base del sistema acuífero es un nivel de margas miocenas que aflora aproximadamente a lo largo de la Autopista del Quinto Centenario (Huelva-Sevilla) y que se hunde progresivamente por aportes recientes depositados hacia el por causas tectónicas, principalmente por una falla de orientación Matalascañas-El Rocío-Guadiamar. Sobre estos materiales y otros superpuestos de transición se depositó una capa variable de aluviones y depósitos groseros que en general aparecen en todo el dominio. Sobre ellos, en un período subsidiando del territorio, se depositaron arenas fluviales y fluvio-marinas y después arenas fluvio-eólicas que en la costa pueden alcanzar gran potencia (hasta 150 m en Matalascañas). Ocasionalmente pueden aparecer intercalaciones arcillosas o de arenas más finas y limosas, y entre las arenas fluvio-eólicas niveles de turba, que corresponden a estadios lagunares locales, más frecuentes cerca de la actual línea de costa.

En el sector oriental el hundimiento tectónico es de 50 a 150 m. Ha ocasionado una depresión que se ha ido rellenando progresivamente por aportes recientes depositados sobre los materiales antes mencionados del sector occidental, quizás parcialmente erosionados. Se trata de depósitos de estuario y de laguna litoral, con abundante arcilla y materia orgánica, que es predominante en los 50 metros superiores, mientras que a mayor profundidad se encuentran niveles aluviales groseros depositados por antiguos cauces del Guadalquivir y del Guadiamar, así como depósitos litorales de arenas medias y finas. En las etapas finales de relleno ha jugado un importante papel la formación de una barra de arena que desde el área de Matalascañas se fue extendiendo hacia Sanlúcar de Barrameda, la cual obligó a que la desembocadura del Guadalquivir se desposés progresivamente hacia allí. Hoy dicha barra está en buena parte cubierta por médanos recientes. (fig.1). La trasgresión marina Flandriense de hace unos 10000 años, cuando el nivel del mar se elevó unos 100 m en menos de 200 años, hastaniveles muy próximos al actual dejó una bahía que se fue convirtiendo una laguna litoral, que aún

existía en tiempos de los Romanos, aunque muy somera. Actualmente está rellena hasta un poco por encima del nivel medio del mar, en un proceso de colmatación que aún continúa. Son las Marismas del Guadalquivir.

De esta manera se ha formado un conjunto de sedimentos permeables, saturados de agua, que constituyen el sistema acuífero de Doñana, conocido también como acuífero 27 en la antigua designación del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y actualmente acuífero 05.51 (+04-14) por el SG y el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).

Cabe distinguir un dominio arenas (arenas del Condado) que ocupa el sector occidental, entre el Río Tinto y las Marismas del Guadalquivir, y que continúa por el lado Norte hacia Villamanrique de la Condesa, hasta enlazar gradualmente con El Aljarafe (fig.1). El contacto de las arenas con las Marismas es la Vera, que pasa a dominarse Retuerta cuando se trata de las dunas litorales.

Como resultado de la progresiva abrasión marina sobre las arenas del Condado en el sector occidental se encuentra un acantilado costero. La línea de costa puede haber retrocedido

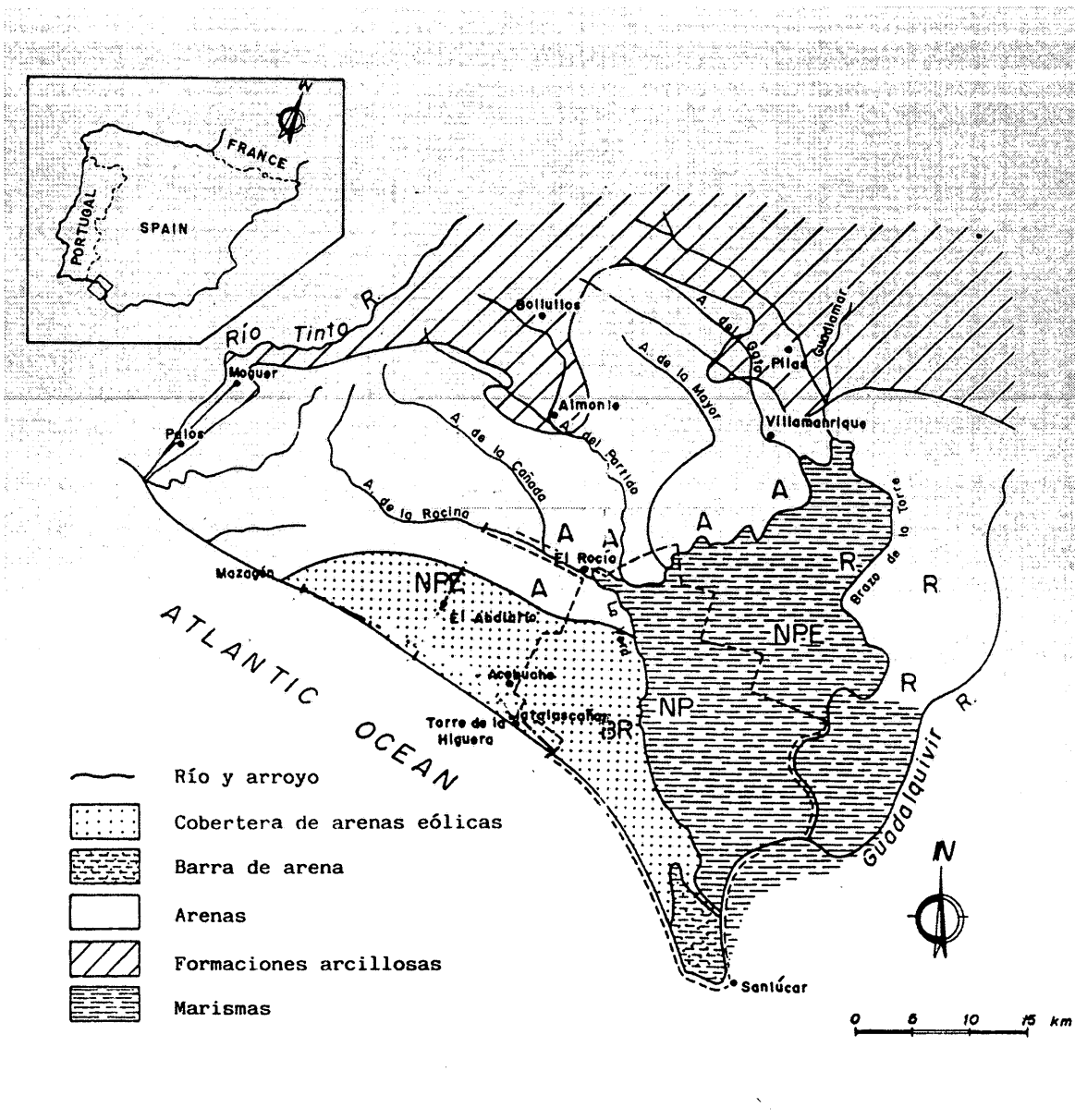
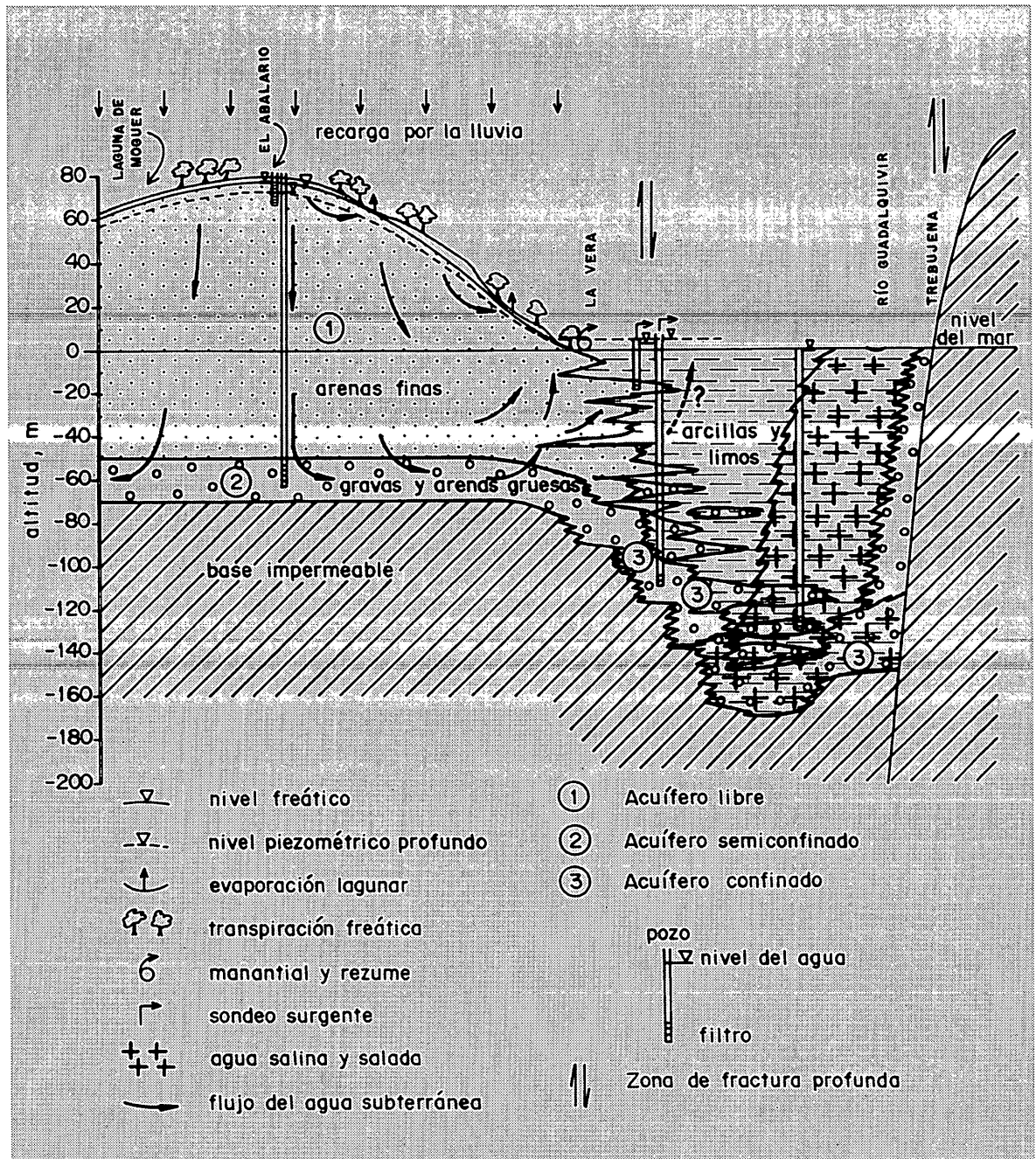


Figura 1. Dominios hidrogeológicos del área de Doñana, a grandes rasgos. La línea de trazos indica los límites del Parque Nacional de Doñana.

Figura 2.
Sección hidrogeológica idealizada y simplificada desde el área de las Lagunas de Moguer (cerca de la cabecera de La Rocina) hasta la margen izquierda del Guadalquivir, a través del dominio de arenas y de marismas. La escala vertical está notablemente exagerada.



varios centenares de metros durante el Holoceno (Cuaternario reciente). El viento ha retomado parte de esas arenas y además de formar un alto cordón litoral de dunas ha extendido un manto eólico sobre buena parte del territorio, con formas dunares más o menos bien conservadas, según la edad. Se identifican tres fases diferentes (Borja y Días del Olmo, 1992). Actualmente los médanos están fijados por vegetación, aunque talas excesivas e incendios han

producido removilizaciones y avances de arena en épocas recientes, en parte sobre el borde de las Marismas (Vera). El espesor del manto eólico puede variar desde cero a escasos metros en unos lugares hasta varios metros en las áreas de acumulación. Son arenas diferentes de las fluvioeólicas subyacentes.

La Rocina es un arroyo más o menos paralelo a la actual línea de costa, entre 9 y 14 km de la misma, que desde su desembocadura en

las Marismas en El Rocío (marisma del Rocío en la Madre de las Marismas) se extiende hacia el oeste, hasta cerca de Moguer, con toda la cuenca en arenas. El espacio entre La Rocina y el mar, denominada área de El Abalarío, drena en parte hacia La Rocina y en parte es un área en buena manera arreica, cerrada por el cordón de dunas litorales sobre el acantilado costero, con escasas salidas, como arroyo del Río Loro y el arroyo de Madre del Avitor.

A grandes rasgos se identifica la existencia de un acuífero freático en las arenas que actúa de impluvio a la recarga de la lluvia, y un conjunto acuífero cautivo bajo los materiales de baja permeabilidad de Las Marismas. (fig.2). Ambos acuíferos están en continuidad lateral (Suso y Llamas), 1990, 1993; Llamas, 1990).

En la realidad el acuífero freático está formado por un nivel profundo de gravas y arenas cubierto por arenas finas hasta la superficie, que actúan con respecto al acuífero profundo como un acuitardo, aunque tienen suficiente permeabilidad como para alimentar pozos de pequeño caudal y abrevaderos de ganado en excavaciones (zacallones). El nivel freático se sitúa dentro del acuitardo y el nivel profundo resulta así semiconfinado.

En el área de El Abalarío la recarga por la lluvia origina un domo piezométrico (fig.3) de modo que el agua subterránea fluye hacia el mar, hacia el arroyo de La Rocina y hacia la Vera, en el contacto entre las arenas y Las Marismas. Además una parte importante de la recarga es descargada por la vegetación cuyas raíces alcanzan la franja capilar, por ejemplo

Figura 3. Elevación sobre el nivel medio del mar de la superficie freática en el sector de El Abalarío - El Rocío - Matalascañas, estado natural. Corresponde a la situación media anterior a 1970.

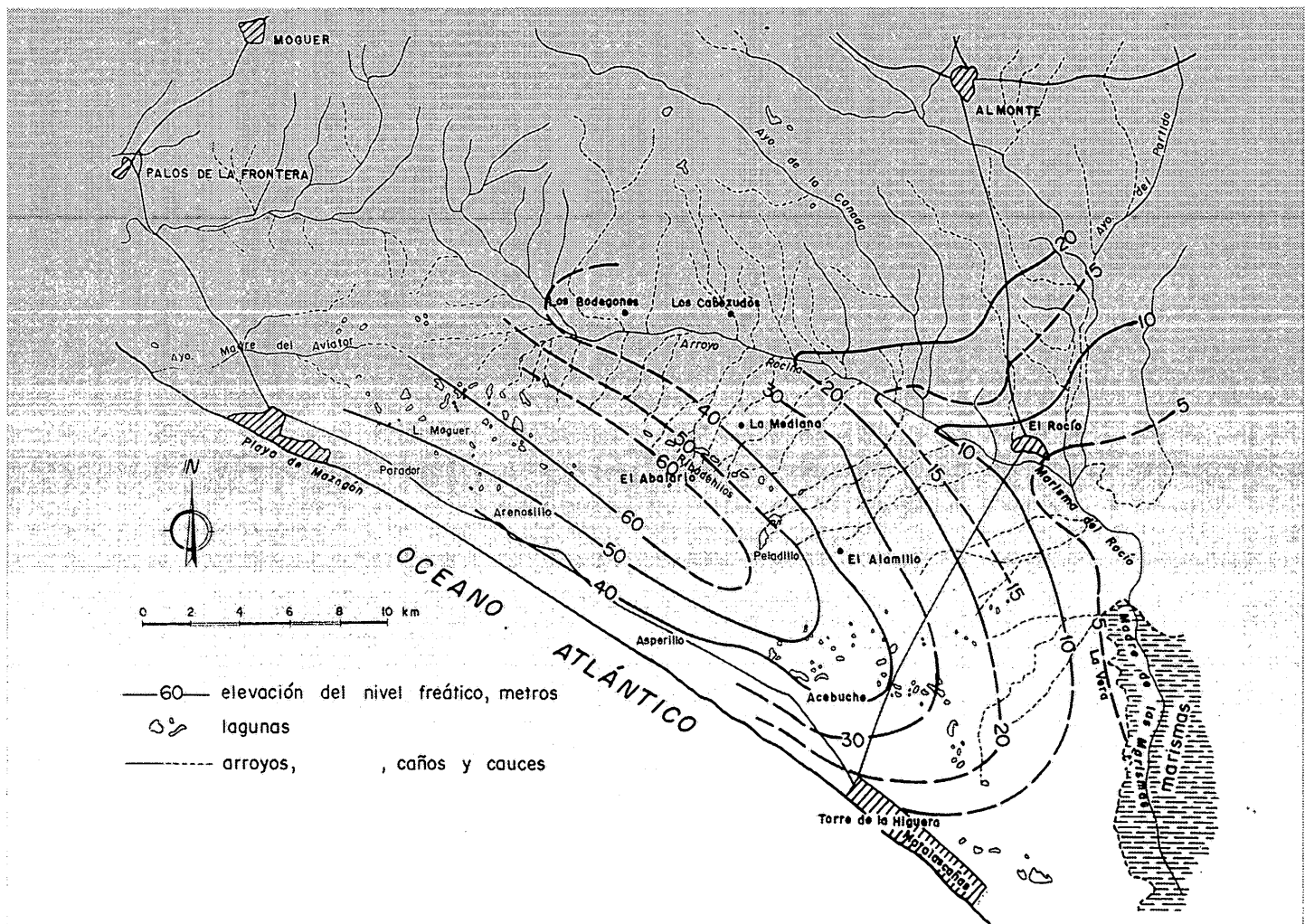


TABLA 1

BALANCE HIDRICO ESTIMATIVO DEL SISTEMA ACUIFERO 27, EN ESTADO DE EQUILIBRIO (CON SUFICIENTE TIEMPO TRAS UNA ACTUACION). NO SE CONSIDERA LA PORCIÓN DE ACUIFERO EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL GUADALQUIVIR. VALORES EN HM³/AÑO.

Entradas	Natural (1)		Con Bosque (2)		Actual(3)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Recarga por lluvia (a)	180	500	150	400	150	420
Retornos riego(b)	0	0	0	0	5	5
TOTAL	180	500	150	400	155	425

Salidas						
	Natural (1)		Con Bosque (2)		Actual(3)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Evapotranspiración del acuífero(c)	50	250	75	265	50	265
descargas naturales (d)	130	250	75	135	32	78
Extracciones (c)	0	0	0	0	73	82
TOTAL	1800	500	150	400	155	425

Notas:

- 1.- Sin intervenciones humanas y con clima actual
- 2.- Con plantaciones forestales, sin regadío ni abastecimiento
- 3.- Con regadío y abastecimientos actuales, y las plantaciones forestales reducidas por ocupación agrícola y talas dentro del PND.
- a. Mínimo = valores pesimistas de recarga media.
Máx= valores optimistas de recarga media.
- b. Principalmente retornos de riego. Poca agua de vertidos se re infiltra sobre el acuífero.
- c. Cifras muy inciertas que incluyen la vegetación lagunar de rivera y de áreas de nivel freático somero.
- d. Salidas a los arroyos y caños, difusas al mar y en el acantilado costero, incluyendo la ría de Huelva y tramo final del río Tinto. Cifras inciertas y quizás infravaloradas.
- e.- Incluye abastecimiento, regadío y las extracciones con fines ecológicos.

DETALLES DE LAS DESCARGAS NATURALES DE EQUILIBRIO.

Las cifras se basan en las características hidrogeológicas y longitud de las diferentes zonas.

	Natural		Con Bosque		Actual	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Ayo. Rocina y charcos	25	50	10	20	5	10
Ecotono Norte	30	50	20	30	5	20
Ecotono Oeste	25	45	15	20	10	15
Marisma por flujo ascendente	0	5	0	5	0	0
A lo largo de la costa	20	50	10	30	10	25
Tramo inferior del río Tinto y Ría de Huelva	30	50	20	30	2	8
TOTAL	130	250	75	135	32	78

DETALLES DE LAS EXTRACCIONES ACTUALES (1991)

	Min.	Max.
Riego, sector W(Moguer, Palos, Lucena)	12	15
Riego, sector central (Plan Almonte-Marismas y otros)	55	60
Abastecimiento, sector W(Mazagón, Moguer, Palos, Lucena)	1	1
Abastecimiento, al sector central (Matalascañas, El Rocio, Almonte, Bollullos, Rociana Hinojos y Villamanrique)	5	5
TOTAL	73	82

los alcornoques como vegetación natural y los eucaliptos como vegetación introducida con fines comerciales. La evapotranspiración de agua freática por el bosque en galería (bosque de rivera) a lo largo de La Rocina y cerca de la Vera es importante. Hay numerosos lugares en que el nivel freático intersecta o queda cerca de la superficie del terreno. Así aparece un conjunto muy numeroso de lagunas temporales y algunas permanentes en el Parque Nacional y en el Natural del Entorno, que responden al modelado dunar.

El área de las arenas al norte de La Rocina y de la Marisma también drena aguas subterráneas por La Rocina y otros arroyos, como el del Partido o el de la Cañada Mayor, o aportan humedad a la porción Norte de la Vera.

El nivel profundo de gravas y arenas gruesas bajo el área de El Abalarío actúa de medio de transferencia lateral; se recarga verticalmente a través de las arenas y también descarga verticalmente a través de las mismas.

La conexión hidráulica de los niveles aluviales profundos bajo las Marismas con el sistema acuífero de las arenas hace que naturalmente aquellos sean acuíferos cautivos surgentes, es decir, con nivel piezométrico más alto que el del terreno. La posible descarga vertical ascendente a través de los sedimentos arcillosos de las Marismas parece muy pequeño y no existe descarga significativa hacia el cauce del Guadalquivir, que discurre sobre esos sedimentos arcillosos, ni hacia el mar, ya que no existe potencial hidráulico suficiente para compensar la diferencia de densidades a la profundidad de las capas aluviales; además es dudoso que haya afloramiento submarino próximo (Custodio, 1993). Esto explica que dichos niveles aluviales bajo la porción de las Marismas más próximas a la desembocadura del Guadalquivir contengan agua salobre y salada, residual del agua marina de formación.

La puesta en funcionamiento de los regadíos del Plan Almonte-Marismas, tanto de los de promoción oficial como particulares, y en menor grado las captaciones de abastecimiento-aunque con efectos locales importantes- ha supuesto una extracción de aguas subterráneas que modifica de forma importante el balance

del sistema acuífero y la distribución de potenciales. Lo mismo puede decirse de las extracciones agrícolas y de abastecimiento del sector más occidental próximo a Moguer.

El balance hídrico general, a grandes rasgos es el de la tabla 1, modificado de Castells et al. (1992). Se trata de valores medios una vez pasado el régimen transitorio de relativa larga duración (10 a 15 años) tras la puesta en explotación intensa que se inició en la década de 1970 y que concluyó a finales de la 1980, con grandes variaciones de un año a otro y aumento progresivo de las extracciones de abastecimiento.

Los datos referentes a las extracciones son el resultado de un trabajo específico que reconoce la posibilidad de errores, dada la ausencia de datos de contadores. Los datos estimados del Organismo de Cuenca, valoran las extracciones agrícolas en 43 Hm³ más los 12 Hm³ consumidos por el fresón en la zona occidental, mientras que los referentes a consumo de abastecimiento, se cifran en 7,65 Hm³.

A rasgos generales de agua subterránea es poco mineralizada, de tipo clorurado sódico por concentración de sales marinas aportadas como aerosol, muy blanda y escasa en bicarbonatados. Es debido a que el medio está formado por arenas silíceas sin carbonatos, con un suelo pobre. Este tipo de aguas subterráneas, que dominan en el área de El Abalarío, se extiende hacia La Rocina, la costa y la Vera. En áreas más hacia el Norte y el Este las aguas son algo más cloruradas a causa de la menor recarga (suelos más retentivos) más duras y bicarbonatadas a causa de la presencia de carbonatos organógenos en el nivel detrítico grosero y arenas infra-yacentes.

En los niveles acuíferos cautivos bajo las Marismas el agua es dulce, de baja dureza en el sector W y más dura en el sector N. Hacia la desembocadura del Guadalquivir y desvío del Guadiamar se hace salina e incluso salada. También hay aguas salinas y saladas en los sedimentos bajo el mismo sector de las Marismas, que en ocasiones pueden ser salmueras de evaporación.

El agua de las lagunas permanentes tiene salinidad variable en función del balance de en-

TABLA 2

NÚCLEOS DE POBLACIÓN	HABITANTES		CONSUMO (hm ³)
	P. estable	P. estacional	
Almonte	14614		1,16
Bollullos	12575		0,69
Rociana	6121		0,60
El Rocio	1373	1.000.000 (*)	0,50
Matalascañas	1013	100.000	2,59
Hinojos	3539		0,20
Chucena	1924		0,12
Villamanrique	3600		0,27
Mazagón	1085	50.000	1,08
Lucena	2052		0,13
Bonares	4949		0,31
Total	52.845	1.150.000	7,65

(*) La romería del Rocio dura una semana.

tradas y salidas superficiales y subterráneas, como sucede en Santa Olalla (Sacks et al., 1992) o en área de El Abalarío.

Los tiempos medios de permanencia del agua subterránea en el terreno es muy variable según las condiciones. Así la transferencia hasta el nivel freático es de menos de un año a pocos años, de pocos años para las descargas en manantiales freáticos, y de varias decenas de años para agua de pozos profundos y de descargas regionales del sistema de las arenas. Los niveles aluviales profundos bajo las Marismas pueden contener aguas de hasta varios miles de años de tiempo medio de permanencia (Baonza et al., 1982; Plata et al., 1983; Yagüe y Ilemas, 1984).

3. LOS USOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Prácticamente, en la actualidad, toda la actividad que se desarrolla en el territorio afectado por el acuífero Almonte-Marismas (unos 34.000 km²) se realiza con recursos de agua

subterránea. No existe ninguna regulación de agua superficial para atender las demandas de todo tipo que aquí se producen. Solo se utiliza alguna escorrentía del río Guadamar para el riego de parte de alguna finca, mientras que el abastecimiento de Palos de la Frontera y Moguer se atiende con recursos trasvasados del embalse del Chanza.

Todas las demandas, la urbana de abastecimiento de agua potable, la agrícola para el riego, tanto de iniciativa pública como estatal, así como las medioambientales derivadas de la gestión del Parque Nacional, son de procedencia subterránea.

Los núcleos de población abastecidos son los reflejados en la Tabla 2.

En un futuro próximo la Junta de Andalucía tiene previsto abastecer con aguas superficiales reguladas en el embalse de El Corumbel, entre otros, a los siguiente pueblos pertenecientes a la Mancomunidad de Aguas del Condado: Almonte, Bollullos Par del Condado, Rociana, Hinojos, Chucena, Lucena y Bonares.

El abastecimiento más importante de la región es el del núcleo turístico de Matalascañas.

Se realiza a través de una batería de sondeos situados en una línea en el borde de la urbanización paralela a la playa, a un kilómetro de ésta, frontera con el Parque Nacional de Doñana. Aunque el uso es estacional también lo es muy intenso afectando de alguna forma a dicho borde del Parque.

La demanda agrícola para riego se extiende sobre una superficie de alrededor 12.000 ha en la zona más próxima al Parque Nacional de Doñana.

Los riegos de iniciativa pública de la zona del Plan de Transformación de Almonte Marismas han sufrido grandes vicisitudes a lo largo de la historia que son objeto de comentario en otros artículos de esta publicación. Actualmente la zona entregada a concesionarios, ya sean asentamientos familiares o concesiones administrativas a cooperativas, se limita a 6.546 ha distribuidas en dos zonas separadas. El sector I (2.911 ha) al sur de Villamanrique de la Condesa y el sector II (3.635 ha) en los alrededores de la aldea de El Rocio.

Los cultivos principales son: fresón, sandías, melón, patatas, espárragos, girasol, algodón y melocotones.

La principal característica de esta zona regable es su bajo nivel de ocupación, debido fundamentalmente a las fuertes inversiones necesarias para los cultivos intensivos. Así el índice de ocupación de las tierras cultivadas del sector I es del 50 %, mientras que en el sector II es solo del 30 %, por lo que la superficie efectivamente regada es 2.726 ha.

Los riegos de iniciativa privada ocupan el resto hasta las 12.000 ha mencionadas, con variaciones anuales en la superficie regada, aunque con un índice de ocupación muy superior al anterior. Distinguiremos también los que se sitúan en la zona de El Rocio, donde destaca la explotación de la finca los Mimbrales iniciada a finales de los años 60 (738 ha dedicadas al monocultivo de naranjos), de los situados en la zona de Marismas al sur de Villamanrique de la Condesa, en el antiguo sector III de la zona de transformación del Plan Almonte-Marismas, desechado por el IRYDA para su puesta en riego. Allí se sitúan fincas que iniciaron sus riegos también a finales de los años 60 con nombres

tan sonoros en la tradición como Hato Blanco. Es en esta zona donde se cultiva el único arroz regado con aguas subterráneas en la cuenca del Guadalquivir y donde se producen excesos en el riego sobre lo legalmente permisible.

Además de los riegos mencionados existen pequeños aprovechamientos dispersos a lo largo del territorio más una superficie dedicada al monocultivo del fresón en los términos municipales de Palos de la Frontera, Moguer, Lucena del Puerto, Rociana del Condado y Almonte. Es éste un cultivo de gran trascendencia económica y social en la zona cuyas principales cifras son las siguientes:

Superficie total fresón = 3340 ha.
 Producción total fresón = 100.000 Tm.
 Jornales generados = 1.500.000 jornales.
 Ingresos brutos = 14.000 millones de pesetas.

En cuanto a las demandas medioambientales se clasifican en tres grupos:

▼ Las destinadas a atender necesidades derivadas del uso público como la laguna del Acebuche que, alimentada por cuatro sondeos, conserva el agua durante todo el año posibilitando un punto de observación libre de las aves acuáticas.

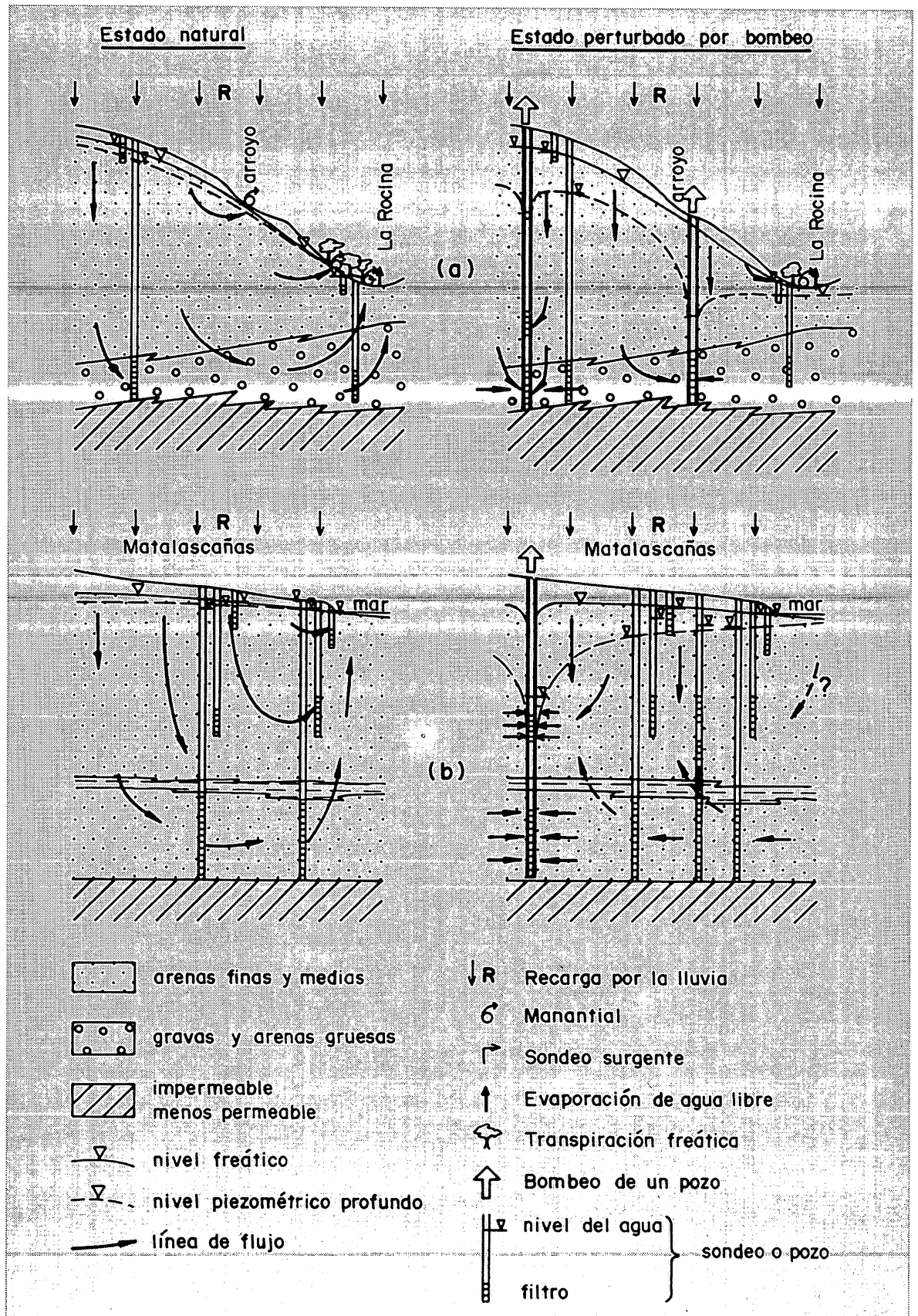
▼ Las destinadas a satisfacer necesidades de investigación como la zona encharcada del Palacio de Doñana, frente al laboratorio de observación, que alimentada por un sondeo equipado con bomba se mantiene constantemente inundada de agua.

▼ Las destinadas a la conservación de forma artificial de enclaves con agua para la supervivencia de la fauna en épocas de sequía como el Lucio de Mari-López, el del Lobo y los Garridos.

4. ASPECTOS PARTICULARES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL PAISAJE DE DOÑANA

Las manifestaciones de las aguas subterráneas en Doñana son muy diversas y forman parte esencial del paisaje, de la existencia de

Figura 4. Efecto de los bombeos en los entornos de La Rocina y Matalascañas, idealizados y simplificados.



determinadas formas de vegetación y de la subsistencia de parte de la fauna, tanto en el parque Nacional como en el Parque Natural del Entorno.

Constituyen áreas regionales de recarga la mayor parte de las arenas. La descarga es de tipo lineal. La moderada permeabilidad de las arenas y la relativamente elevada tasa de recarga hace que los niveles freáticos sean altos y que intersecten a la superficie del terreno en numerosas circunstancias. Aunque la precipitación media es de apenas 550 mm/año, la recarga en las arenas se estima en 100 a 150 mm/año (Guimerá et al., 1991), favorecida por la poco densa vegetación natural, sin dosel continuo, la baja capacidad de campo del suelo, y posiblemente la repelencia superficial del agua de los chubascos, que en parte escurre, se concentra en depresiones del micorelieve y allí se infiltra hasta por debajo de la profundidad de evapotranspiración.

El arroyo de La Rocina es la descarga de agua subterránea permanente más conspicua y mantiene un denso bosque de ribera a lo largo del mismo y varios encharcamientos grandes a modo de lagunas. El flujo de aguas es permanente aunque en veranos secos la descarga a la Madre de las Marismas en El Rocío se llega a anular a causa de la intensa transpiración de vegetación, y en parte a la detracción de aportes de agua que produce la zona de regadío.

A lo largo de La Rocina y de la Vera existen otras descargas de aguas subterráneas al final de los arroyos o caños, unas permanentes y otras que llegan a secarse en épocas de elevada transpiración por la vegetación que nace en sus proximidades. Existe vegetación arbórea densa allí donde no ha sido talada como ha sucedido en el tramo inferior del arroyo del Partido y otros que llegan a la Marismas por su lado Norte.

A lo largo del acantilado costero, en especial desde El Asperillo hacia Mazagón, se producen descargas de agua subterránea en diferentes puntos, con manchas densas de vegetación y pequeños manantiales, ambos permanentes. Posiblemente existiesen también en lo que hoy es Matalascañas, pero han desaparecido con la urbanización. Además hay que considerar la

salida difusa de agua dulce a lo largo de la playa, de la que no hay estudios de detalle.

En numerosas áreas del territorio el nivel freático está normalmente a pequeña profundidad de modo que la franja capilar es accesible a la vegetación, que se hace más frondosa y de mayor porte (monte negro). Estas áreas suelen corresponder a zonas próximas a las de descarga y a depresiones locales en el manto eólico. Fuera de ellas la vegetación es arbustiva xerofítica, adaptada a períodos prolongados de deficiencia hídrica ya que la capacidad de campo (humedad de retención) de esas arenas es muy pequeño (4 al 6%). Sólo se modera esta tendencia cuando, aún estando profundo al nivel freático, el manto eólico reciente desaparece o es poco espeso y las plantas pueden utilizar la mayor capacidad de campo de las arenas fluvioeólicas subyacentes y su zona de alteración edáfica (fragipan), en ocasiones rica en pisolitos (nódulos de tamaño milimétrico a centimétrico) y en capas litificadas por acumulación de óxidos férricos. Esta situación es más frecuente en la cabecera de La Rocina y al norte de la misma.

En el área de Doñana son muy frecuentes las lagunas temporales, que además tienden a agruparse en enjambres. En general son de dos tipos extremos, con situaciones intermedias. Unas corresponden a manifestaciones de nivel freático alto en pequeñas depresiones de la morfología dunar residual. Desaparecen en épocas secas, en que el nivel freático se deprime entre 1 y 3 m, y reaparecen tras una secuencia de años húmedos. Algunas de ellas parecen ser un rosario de depresiones, residuo de un valle muy suave cortado por el avance de los frentes dunares, como en el caso de las lagunas de Ribetehilos en la línea de la Mediana, o el conjunto de las lagunas de Las Pajas, El Huerto y El Acebuche, hoy modificado por acción humana, tanto por el aporte artificial de agua como por la remodelación de las salidas, como por el descenso del nivel freático a causa de las extracciones próximas de agua subterránea. En años excepcionalmente húmedos estos antiguos valles pueden volver a ser funcionales, según informan los naturales del lugar, como el arroyo de Bernabé (afluente a La Rocina) o el Soto Grande (afluente a La Vera).

Cuando la depresión es profunda la laguna puede ser permanente, salvo en épocas anormalmente secas. Tal es el caso del conjunto Taraje-Dulce-Santa Olalla-Las Pajas, en la Reserva Biológica, que también ocupan restos de un valle cortado por las dunas, y que llega a ser funcional en años muy húmedos. La intensa evaporación del agua libre y la transpiración de la vegetación del contorno hace que el agua se haga más salina al pasar de las lagunas de mayor altitud a las de menor altitud (Sacks et al., 1992). El conjunto está hoy afectado por el descenso freático ocasionado por las captaciones de abastecimiento a Matalascañas (Vela et al., 1991). El efecto equivale a que la duración de las sequías sea mayor y éstas se presenten con mayor frecuencia.

Pequeñas intercalaciones de baja permeabilidad en el campo de médanos, como suelos turbosos de antiguos encharcamientos, pueden dar lugar a pequeños manantiales colgados, cuya agua después se reinfiltro.

Hacia el Oeste de El Abalarío las depresiones en el manto eólico también pueden originar lagunas temporales, pero en este caso no son freáticas sino alimentadas por la lluvia, que queda retenida sobre un fondo rico en material fino y con materia orgánica. Unas veces es la lluvia directa la que aporta el agua y otras veces se incrementa por el agua que se infiltra en el manto eólico circundante y que escurre a poca profundidad sobre el nivel infrayacente de alteración edáfica que cubre las arenas fluvioeólicas.

En cualquier caso la vegetación arbórea juega un papel importante en la descarga de agua subterránea si las raíces alcanzan a la franja capilar sobre el nivel freático, y se acentúa el efecto estacional ya que la transpiración es máxima en verano y casi nula en invierno. Todas las especies arbóreas capaces de llegar a la franja capilar, naturales (alcornoques) o introducidas (pinos, eucaliptos) evapotranspiran, pero el eucalipto es especialmente significativo por la posibilidad de extender más las raíces, competir favorablemente contra otras especies y dar un espeso dosel foliar. No hay estudios específicos locales pero las informaciones de otros lugares y observaciones de las naturales señalan

que su introducción en gran escala en el área de Doñana se ha manifestado como menor duración y frecuencia de la inundación de lagunas y disminución del caudal de base de La Rocina y otros arroyo y caños. Su progresiva eliminación del interior del Parque Nacional y la reducción de superficie ocupada por eucaliptos en el Parque Natural del Entorno tendrá efectos hídricos que están en estudio.

En las dunas móviles de la barra que cierra las Marismas por la costas aparecen también manifestaciones del agua que se infiltra en los médanos y aflora al pie de los frentes dunares. Las arenas de la barra y los sedimentos de marismas cubiertos por el avance de las arenas en la Retuerta actúan como base semipermeable. Así, las depresiones alargadas entre frente dunar y cola del tren siguiente (corrales) tienen humedad permanente y mantienen la vegetación que sirve de alimento a la fauna local, que no tiene otra alternativa cuando las Marismas están secas en verano.

En las marismas propiamente dichas las manifestaciones del agua subterránea son escasas ya que la descarga desde los niveles cautivos profundos a través de los sedimentos arcillosos es muy pequeña, prácticamente imperceptible y menor que la evaporación en verano. En todo caso solo existe en la franja más próxima a la Vera.

Ocasionalmente aparecen "ojos" en la llanura desecada de la marisma, que no llegan a secarse durante el estiaje. Se trata de depresiones localizadas, circulares y ovaladas, con agua o terreno encharcado y que en ocasiones se comporta como tierras movedizas. En ellas bebe la fauna y el ganado, pero también pueden acabar siendo trampas mortales, pero lo que con frecuencia están protegidas por empalizadas. Su origen no está del todo esclarecido pero muy probablemente son descargas de niveles arenosos someros recargados desde la Vera o por las propias aguas de inundación de las Marismas. Si fuesen descarga de agua de niveles acuíferos profundos se hubieran secado ya que dichos niveles han dejado de ser surgentes.

Como los niveles acuíferos profundos de aluviones bajo los sedimentos de las Marismas eran naturalmente surgentes, ya en la década

de 1950 y 1960 se perforaron pozos cuya surgencia alimentaba abrevaderos de ganado y mantenían encharcamientos. A causa de las extracciones de agua subterránea han dejado de surgir y actualmente los niveles piezométricos quedan bajo el nivel del terreno. Como consecuencia se han abandonado esos usos o se ha tenido que instalar bombas para mantener algunos. De este modo se conservan con agua en verano uno de los lucios y los encharcamientos frente al Palacio de Doñana. Próximos a la Vera queda un antiguo sondeo de abrevadero que aún es surgente y otro que apenas surge, pero se trata de perforaciones de poca profundidad que explotan niveles de arena de los cotos que han quedado indentados con los sedimentos de marisma. Algunos sondeos piezométricos recientemente perforados en esas áreas también son surgentes, mientras que los que tienen los filtros a poca profundidad (drenaje a la Vera) o a gran profundidad (afectados por las extracciones regionales de aguas subterráneas) no lo son.

Los pozos con filtros profundos pueden tener fluctuaciones rápidas de nivel al cambiar el estado de bombeo en el área, a causa de la elevada difusividad hidráulica de esos niveles acuíferos profundos. Incluso alguno situado

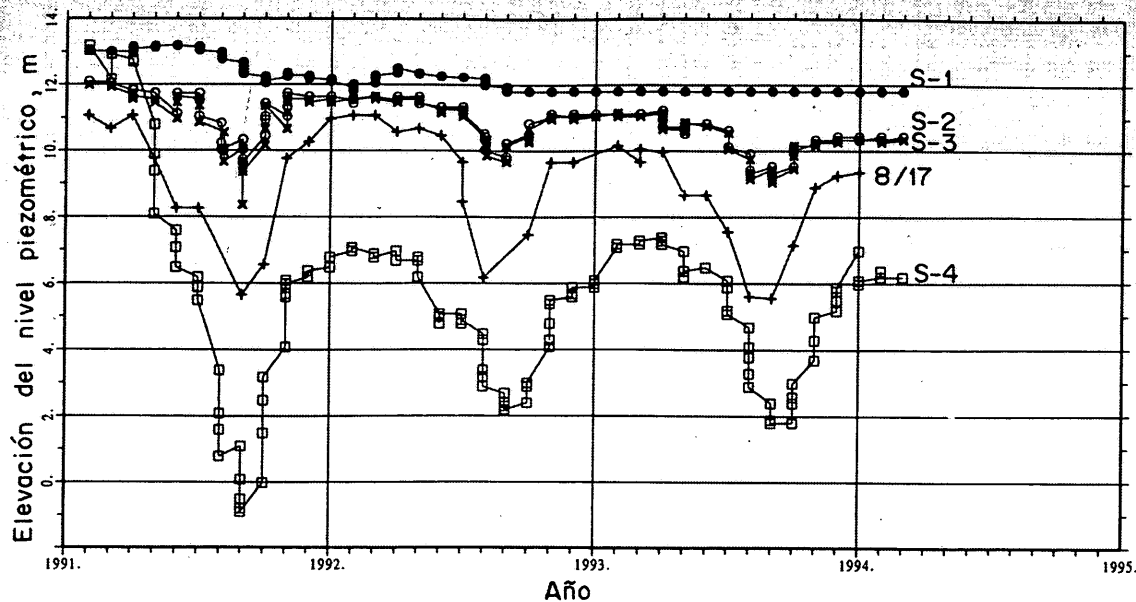
cerca de La Vera a poca altitud puede llegar a ser surgente tras una época de lluvia, a causa del cese temporal de buena parte de las extracciones agrícolas situadas hasta varios kms. de distancia.

En buena parte del área la vegetación tanto la que depende de la humedad del suelo como la que depende del nivel freático, son especies adaptadas a aguas ácidas, de baja mineralización y escasa dureza, pobres en nutrientes. Sólo en las proximidades de lagunas con alta tasa de evaporación la salinidad es mayor. Ocasionalmente pueden haber descargas de aguas ferruginosas cuando se movilizan los oxihidratos de hierro que forma la pátina de las arenas a causa de la existencia de materia orgánica abundante (fondos lagunares turbosos, actuales o relictos), que hacen decrecer el potencial redox, ayudado por la acidez del agua.

Hacia el Norte del área las aguas y suelos pueden ser ya algo alcalinos y la vegetación se modifica. También sucede en el cordón de dunas móviles entre Matalascañas y la desembocadura del Guadalquivir, donde las arenas contienen carbonatos procedentes de la trituración de conchas marinas.

Una causa importante de perturbación de las características fisicoquímicas naturales de

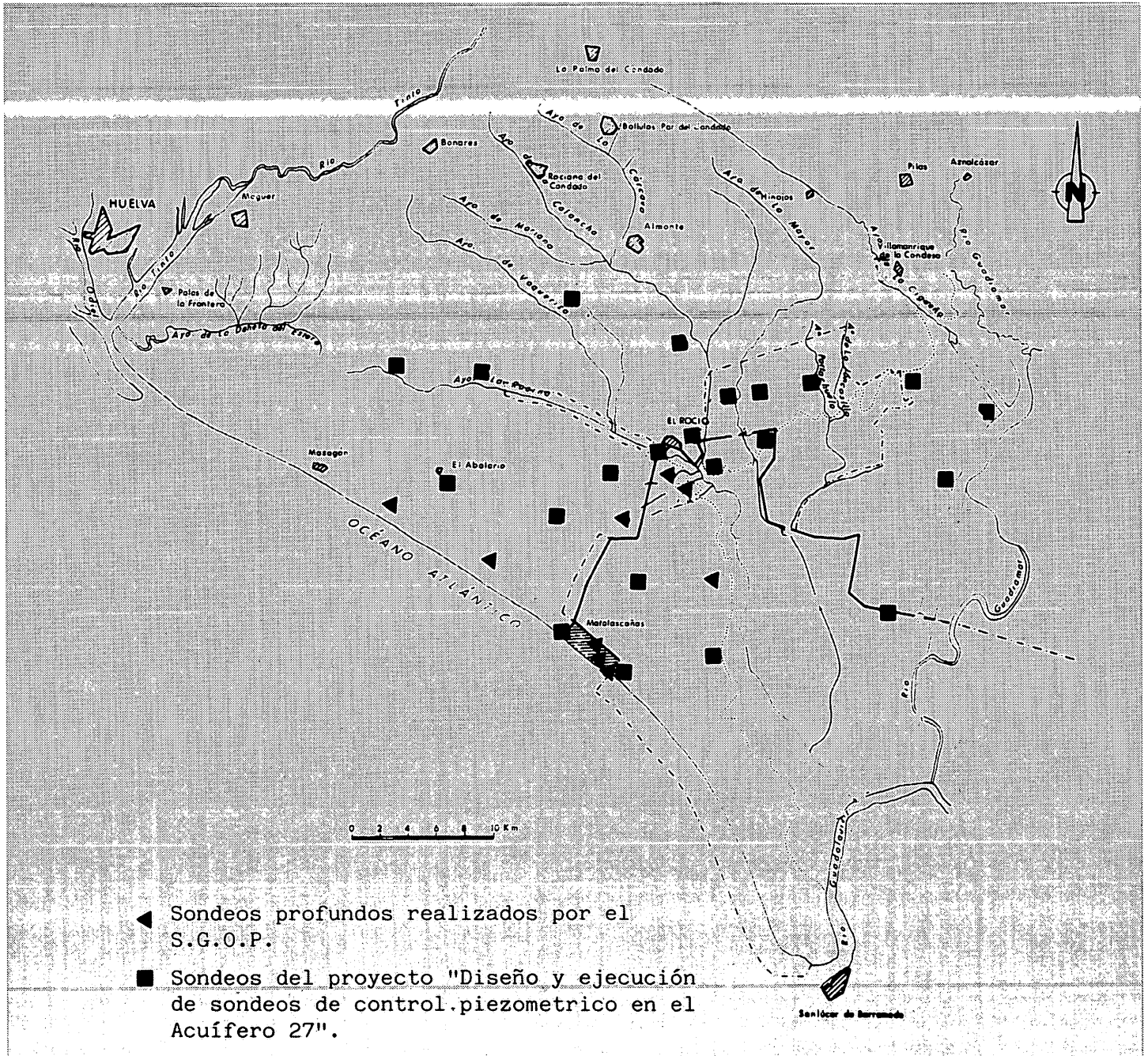
Figura 5. Evolución de los niveles de agua medidos en una instalación multi-piezómetro en Matalascañas (sondeos Matalascañas I del SGPO-CHG). El S.1 es freático y la profundidad va creciendo hasta el S-4, que queda confinado bajo una intercalación arcillosa a 90 m. de profundidad. Las extracciones de abastecimiento en el área captan preferentemente niveles medios y profundos, lo que origina un flujo vertical descendente, y situaciones de la parte inferior del acuífero en que se anula el flujo hacia el mar e incluso se invierte. El piezómetro 8/17, con múltiples filtros, produce una información piezométrica media de poco valor para comprender lo que sucede.



las aguas subterráneas son las áreas de regadío a causa de la adición de sustancias agroquímicas en gran cantidad. Se hace así por la pobreza de los suelos y su sensibilidad a infecciones. Es importante el aporte de fertilizantes nitrogenados, fácilmente lixiviados por la lluvia y los exedentes de riego. El efecto es aún poco conocido a causa de la lenta transferencia hacia los puntos de descarga de aguas subterrá-

nea y pozo profundos (Custodio, 1994). Sin duda existe aunque aún no se manifieste con todas su intensidad, sobretodo en pozos profundos. Las cantidades de nitratos introducidos y a en el sistema y en tránsito por el acuífero (arenas y medios) es posiblemente elevada. Su descarga en La Rocina, arroyos y caños puede producir en un futuro no lejano cambios importantes en la vegetación local y la depen-

Figura 6. Sondeos profundos realizados por el S.G.O.P. Sondeos del proyecto "Diseño y ejecución de sondeos de control piezométrico en el Acuífero 27".



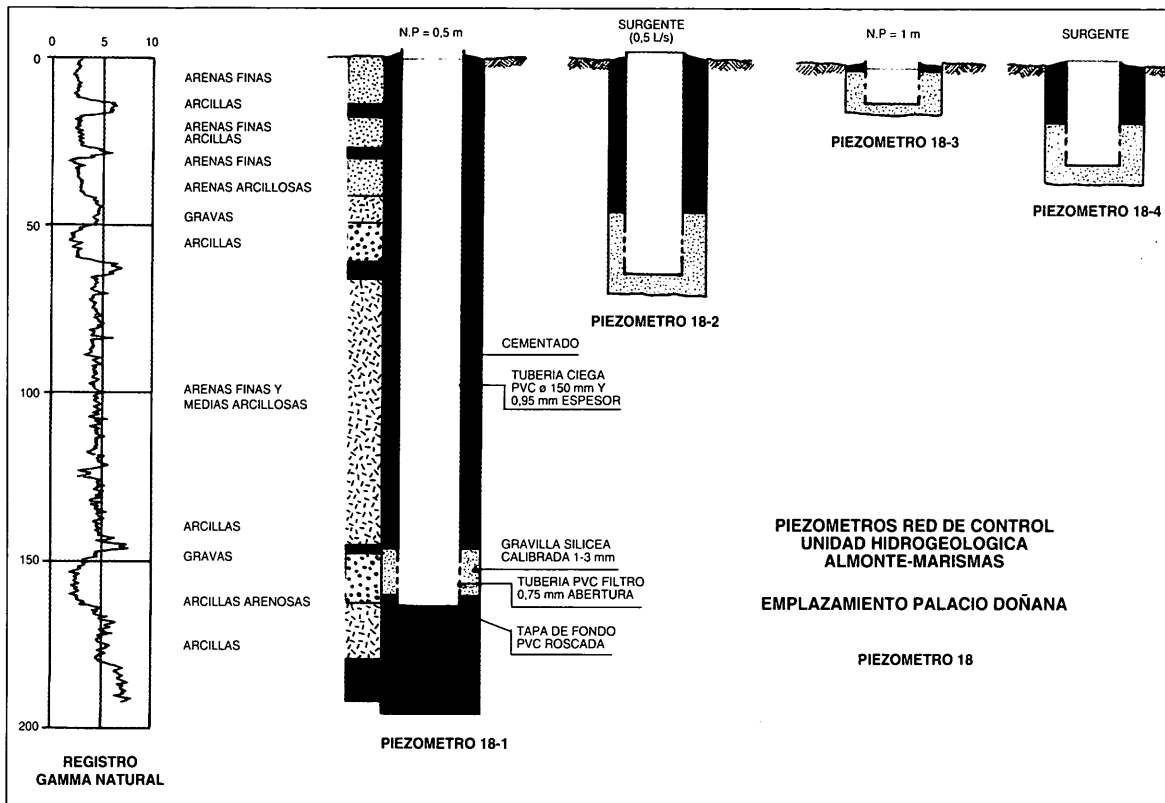


Figura 7. Piezómetros Red de Control. Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas.

diente del nivel freático, además de poder crear serios problemas de abastecimiento de agua a la población.

5. LAS REDES DE OBSERVACIÓN Y CONTROL

RED DE CONTROL PIEZOMÉTRICO

El acuífero Almonte-Marismas, Unidad Hidrogeológica 05.51, es posiblemente uno de los más estudiados de España. Sin embargo, las características especiales de la zona, junto con la novedad y sutileza de los problemas ecológicos, han provocado la existencia tanto de diversas teorías de funcionamiento como de distintas opiniones sobre la afección a la Naturaleza del Parque.

Asumida la gestión de las aguas subterráneas por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, uno de los problemas iniciales que surgen reside, en primer lugar, en la ausencia

de información en el Organismo, junto con la dispersión de los datos existentes en diferentes Entes. Así existe información en el ITGE, en el IARA, en el ICONA y en distintas Universidades. Cada uno de ellos gestiona una red adecuada a sus planteamientos; mientras la del ITGE es amplia y general, la del IARA es intensa pero muy local, la del ICONA se reduce al interior del Parque y son fundamentalmente pozos antiguos prácticamente cegados, y la de la Universidad se concreta a puntos de especial relevancia ecológica. La información pues está dispersa, no es uniforme en el territorio y sobre todo no es homogénea en el tipo de piezómetros utilizados.

En 1991, mediante un convenio entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir con el Servicio Geológico de Obras Públicas, se inicia en Matalascañas un primer trabajo eligiendo 3 emplazamientos en un perfil perpendicular a la playa y realizando varios sondeos de diferente profundidad en cada emplazamiento. La entubación de cada sondeo es ciega y su exterior está cementado, salvo en su parte

más profunda donde se instalan los filtros. En el gráfico se observan con claridad los distintos niveles piezométricos obtenidos en el mismo emplazamiento, dependiendo de la profundidad de los filtros, confirmándose la no homogeneidad de los datos de las distintas redes de control. En total el SGOP ha realizado baterías de sondeos en diez emplazamientos distintos, a lo largo de la costa, a lo largo de la Rocina y en el interior del Parque, más una red de piezómetros someros en zonas de descarga del acuífero.

En base a esta información la CHG desarrolló un proyecto que viene ejecutándose desde noviembre de 1992 denominado "*Diseño y Ejecución de Sondeos de Control Piezométrico en el Acuífero 27 (U.H. 05.51) en el Parque de Doñana y su entorno*", que pretende cubrir todo el territorio significativo del acuífero con esta técnica.

Los objetivos parciales a cubrir en las cuatro fases contempladas en este Proyecto son:

- ▼ 1ª Fase. Diseño de una red para el control piezométrico de la Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas.
- ▼ 2ª Fase. Ejecución material de las obras necesarias (sondeos) para llevar a cabo dicho control.
- ▼ 3ª Fase. Instrumentación de la red.
- ▼ 4ª Fase. Toma de datos en la red implantada y análisis de los mismos.

En la actualidad se encuentran completadas las fases 1ª y 2ª, habiéndose iniciado los trabajos encaminados a fijar las características técnicas de los equipos necesarios para instrumentar la red implantada.

El diseño de la red de control piezométrica de la Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas se ha llevado a cabo a partir del análisis de la información geológica, hidrogeológica e hidroquímica existente, así como la obtenida mediante la realización de una serie de trabajos complementarios de campo, destinados a fijar un diagnóstico actualizado sobre la situación hidrodinámica y problemática de la Unidad.

Para el tratamiento del gran volumen de información existente se ha creado el programa AGS, en el que se han almacenado, tras un mi-

nucioso proceso de análisis para detección y corrección de errores, así como de homogeneización de la información, todos los datos referentes a columnas litológicas y equipados de sondeos, registros de evolución piezométrica, análisis de aguas, etc, que se encontraban dispersos en los archivos de diferentes organismos, principalmente ITGE, IARA, ICONA, Universidades y CHG.

En la base AGS se encuentran almacenados, en la actualidad, datos referentes a más de 2.100 puntos de agua, unos 1.000 columnas litológicas de sondeos, unos 1.700 análisis de agua, unos 1.000 datos de parámetros hidrodinámicos y más de 65.000 registros de nivel piezométrico.

El programa AGS funciona como un paquete autónomo capaz de facilitar la gestión de un gran volumen de datos y conocer, sin la ayuda de aplicaciones informáticas externas, el estado de un punto o conjunto de puntos de una manera rápida y sencilla.

La base, accesible a cualquier tipo de usuario no necesariamente experimentado en el manejo de ordenadores, dispone de múltiples capacidades de búsqueda así como de una serie de utilidades gráficas incorporadas, evitando el uso de paquetes gráficos externos.

La cantidad de datos a almacenar en la base está exclusivamente limitada por la capacidad física del ordenador, lo que unido a su gran versatilidad, por ser un sistema totalmente abierto, hacen posible su futuro uso en la gestión de múltiples Unidades Hidrogeológicas e, incluso de cuencas hidrográficas completas.

Además de la base de datos hidrogeológicos (AGS) se ha creado una base de datos bibliográficos, denominada BCGS, en la que se ha almacenado información referente a más de 100 publicaciones y artículos científicos que tratan sobre aspectos hidrogeológicos, hidrológicos, hidroquímicos y medioambientales relacionados con el Parque Nacional de Doñana y su entorno.

De acuerdo con las necesidades planteadas en el diseño de la red, se procedió a la construcción de 55 nuevos sondeos piezométricos (agrupados en 22 emplazamientos) que, junto con otros sondeos y pozos ya existentes y los sonde-

os realizados en los cuatro últimos años por el SGOP, constituirán la futura red de control piezométrica de la Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas.

Los nuevos sondeos realizados, representan un total de 3.000 metros lineales útiles entubados. Todos ellos han sido equipados con tubería roscada de PVC de 150 mm de diámetro nominal y 7,5 ó 9,5 mm de espesor. Los tramos de filtro, ranurados en fábrica, tienen una abertura de 0,7 mm. La perforación se ha realizado con diámetro de 445 mm y/o 311 mm, rellenándose con gravilla calibrada de 1-3 mm de diámetro, el espacio anular comprendido entre la perforación y el tramo de tubería filtro, y cementándose los tramos no filtrantes.

En la mayor parte de los emplazamientos se han realizado baterías de 2 o más sondeos, de diferentes profundidades, de modo que cada uno dispone sus tramos filtrantes en distintas formaciones permeables, cementándose el resto del sondeo. Este procedimiento permite controlar de forma independiente el nivel piezométrico de cada horizonte permeable del subsuelo.

Durante la ejecución de todos los sondeos se han obtenido muestras del terreno a lo largo de toda la columna atravesada. Además, una vez finalizados los trabajos de perforación y, antes de proceder a su entubación, se procedió a la testificación geofísica de los sondeos (registros de radiación gamma natural), mediante un equipo portátil Mount Sopris 1000-C. Esta testificación permite diferenciar con precisión los niveles litológicos, posibilitando la correcta ubicación de los filtros. Posteriormente, se procedió a limpiar, mediante bombeo, los piezómetros construidos.

Con el fin de obtener una información más detallada sobre las características geométricas, litoestratigráficas e hidrodinámicas de la Unidad, una vez entubados se ha realizado en todos los piezómetros de nueva construcción, incluidos los realizados por el SGOP, así como en varios sondeos construidos por el IRYDA durante el Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas, una testificación geofísica más completa mediante un equipo Century Compu-Log III provisto de sondas para registro de radiación gamma natural, resistividad y

temperatura del fluido, potencial espontáneo y verticalidad del sondeos. En total, hasta Julio de 1.994 el número de sondeos testificados ha sido de 47, lo que representa unos 4.500 metros de registro.

En un futuro inmediato, se procederá a la instrumentación de una parte importante de los puntos integrados en la red de control diseñada.

La instrumentación es un aspecto importante en el control de las aguas subterráneas en Doñana. Pensemos en primer lugar que las 300.000 ha sobre las que se extiende el acuífero representan una extensión que obliga a un gasto considerable de tiempo. Asimismo el territorio es de muy difícil tránsito, por la escasez de caminos, por ser arenas el material del suelo que obliga a utilizar vehículos todo terreno, e itinerarios que necesitan muchas horas para realizar solo algunos kilómetros, efectivos. Existen por otra parte puntos de gran interés hidrogeológico pero simultáneamente de gran valor ecológico y que por tanto tienen su acceso muy limitado. Por último existen otros puntos donde una medición en continuo es necesaria para preciar efectos provocados por bombeos.

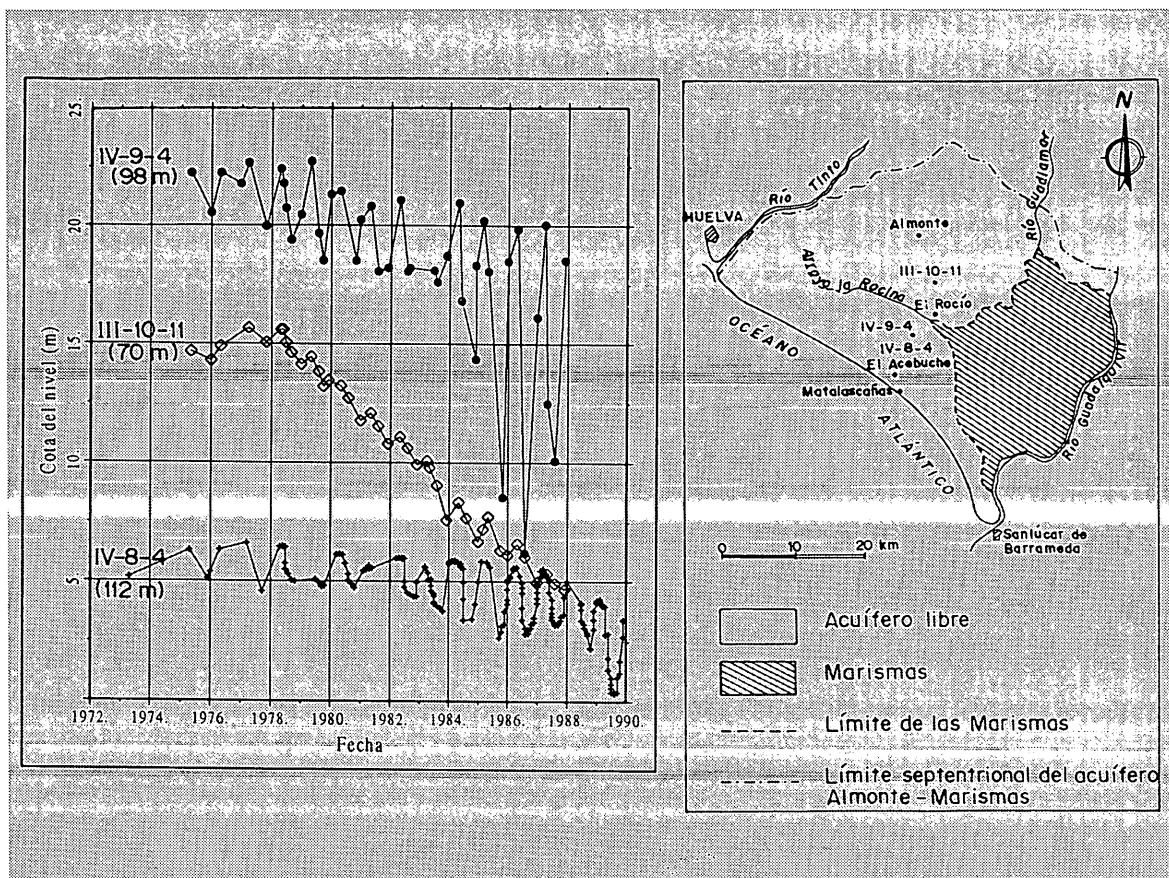
Con el fin de determinar el tipo y características de los equipos a adquirir e instalar, así como el soporte informático necesario para la eficaz gestión de los datos a obtener en el futuro, se está llevando a cabo un estudio comparado de los diferentes modelos existentes en el mercado, que incluye ensayos de campo con varios de estos equipos.

Desde enero de 1994 se viene controlando, con periodicidad mensual, la evolución piezométrica en los sondeos de nueva ejecución, estando previsto continuar con este seguimiento hasta que se lleve a cabo la instrumentación y se establezca el programa de explotación a la red.

RED DE CONTROL FORONÓMICO

La medición de las aguas superficiales que acceden a la marisma del Parque Nacional de Doñana ha sido objeto de debate desde hace largo tiempo.

Figura 8. Evolución de los niveles en tres pozos profundos en el área de El Rocio. Los IV-8-4 y IV-9-4 representan niveles profundos bajo una cobertura de arenas finas que actúan de acuitardos; se aprecian las oscilaciones anuales debidas a la variación estacional de las extracciones en su entorno; éstas han aumentado en el IV-9-4. El pozo III-10-11 representa el área de pequeño semiconfinamiento, donde los niveles freático y piezométricos profundos son similares; el continuado descenso es la evolución transitoria ante la extracción en un medio de transmisividad moderada y recursos limitados.



La dificultad de conjugar la necesidad de construir unas obras para tales fines con la nula alteración del cauce natural, defendida por los naturalistas más estrictos, hicieron imposible esta misión durante largo tiempo.

La demanda insistente por parte de todos los sectores implicados, junto con disposiciones más realistas por parte de los equipos dedicados a la conservación, unido a la búsqueda de soluciones imaginativas, posibilitaron la materialización de una red de control de todos los caudales aportados al Parque.

Estas estaciones de aforo deben de ser sensibles para caudales pequeños (l/s) al tiempo que lógicamente medir toda la gama de caudales. Y esto es así, porque uno de los datos de mayor valor ecológico consiste en la componente de agua subterránea que entra en el Parque como agua superficial una vez que es drenada del acuífero por el arroyo. El valor reside en que una parte del año, y de forma más duradera e importante en los años secos, el único caudal aportado es el procedente del drenaje de las

aguas subterráneas, posibilitando unas condiciones de vida que de otra forma no existirían.

Su medición sensible nos permite cuantificar su importancia y controlar las posibles afecciones derivadas de las extracciones de agua que se realizan del acuífero para otros fines.

El número de arroyos controlados es de 10, con una gama variada de necesidades y soluciones. En aquellos lugares en que era necesario ser particularmente sensible con los caudales pequeños se diseñó una combinación de vertedero triangular en chapa y muro- vertedero de pared gruesa. En otros emplazamientos de más envergadura se combinó un muro-vertedero grueso con una canal sensible donde se construyó un vertedero V-Flat, consistente en una sección de control en V, con unos planos de entrada y salida muy definidos según ensayos. En el Caño del Guadiamar que entra al Parque a través de una apertura en el muro gobernada por una compuerta, el caudal se deduce controlando los niveles de agua, aguas arriba y aguas



Sondeo piezométrico ejecutado por el SGOP, instrumentado.

abajo de la compuerta y el grado de apertura de ésta.

En el arroyo de la Rocina, de gran importancia cuantitativa y cualitativa, se diseñó la estación de aforos en el único punto posible en plena desembocadura de la Marisma, en un punto del río con perfil sin pendiente alguna, restituyendo un antiguo y tradicional vado.

El sistema sensible, consistente en cuatro vertederos rectangulares en pared delgada, cada uno a distinta altura, se colocó en cada uno de los cuatro caños con que se rehízo el vado. El problema más grave es que un año de grandes aportaciones llena de agua la marisma, elevando el nivel de aguas abajo y manteniéndolo así durante largo tiempo, anegando el vertedero, que por otra parte no puede colocarse más alto para no alterar el medio natural; para solucionar este problema se diseñó un elemento modular que es capaz de elevar la cresta del vertedero a la altura necesaria.

Como elemento destacable mencionaremos que todas estas estaciones están instrumentadas con aparatos de medición de nivel de agua y grabación electrónica de los datos. Periódica-

mente el encargado recoge la información grabada en unas tarjetas electrónicas y en gabinete se vuelcan al ordenador que las transforma en caudales.

En las estaciones de la Rocina y El Partido se ha instalado un sistema redundante de seguridad:

- ▼ Un limnógrafo tradicional que graba en papel los movimientos de un flotador.
- ▼ Un sensor piezorresistivo que lee niveles de agua y los graba en una unidad de adquisición de datos.
- ▼ Un potenciómetro que convierte los movimientos del flotador en señales eléctricas que son grabadas en la unidad de adquisición de datos

En las demás estaciones el instrumento consiste más simplemente en un flotador con un potenciómetro que envía las señales a una unidad de adquisición de datos.

En el caño del Guadiamar los niveles y apertura de compuertas también se graban electrónicamente.

Con la realización de las redes de control piezométricas y foronómicas mencionadas que-

dan acometidas buena parte de las tareas recomendadas en el documento anexo al Dictamen de los Expertos titulado "Revisión crítica de los trabajos de modelación del flujo subterráneo".

RED DE CONTROL DE CALIDAD

Finalizada la ejecución de la red de control piezométrica con la técnica antes descrita, que nos permite diferenciar los distintos niveles acuíferos, es necesario desarrollar un plan de vigilancia y control hidrogeoquímico y de calidad del agua subterránea que permita determinar las influencias de las actividades agrarias, industriales y urbanas del exterior y las variaciones de calidad interna (salinidad) propiciadas por los procesos de explotación.

Para poder realizar un diagnóstico de la situación actual se estima necesario realizar una campaña de muestreo general que abarque entre 100 y 150 puntos, incluyendo sondeos, piezómetros y descargas naturales, que representen las diversas unidades y situaciones hidrogeológicas existentes en la zona, incluyendo determinaciones analíticas de tipo químico comunes e isotópicas ambientales.

Con esta información básica, más la acumulada a lo largo del tiempo, junto con el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico referido a los flujos principales de recarga, descarga y movimientos internos, se realizará un diagnóstico que permita establecer una red de control permanente que nos informe acerca de los procesos contaminantes.

Complementariamente se deberán realizar estudios específicos, como el control de calidad de agua de lluvia, fuente de recarga, posiblemente influenciada por efectos marinos o el Polo Químico-Industrial de Huelva, o profundizar en el conocimiento del fenómeno de la descarga en la zona de la Vera en el contacto entre arenas y arcillas, o estudiar el sistema de transporte de contaminantes agrícolas por el medio hidrológico, punto controvertido en la actualidad, suponiéndose que gran parte de ellos aún se encuentran en zona no saturada o en niveles muy someros del acuífero. En este sentido la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir está realizando un sondeo piloto multitubo que permi-

tirá aclarar este fenómeno en relación con la contaminación por nitratos. Este sondeo, situado en una de las parcelas de riego del Plan Almonte-Marismas con mayor historia de cultivo de fresón continuado, tiene 25 metros de profundidad y 450 mm de diámetro, alojando en su interior 4 tubos piezométricos de 80 mm de distinta profundidad y aislados uno de otro por bentonita.

6. NECESIDADES DE CONOCIMIENTO

El correcto entendimiento de los procesos hidrogeológicos en Doñana ha llegado a un estado de parcial madurez gracias a los esfuerzos acumulados desde finales de la década de 1.960 y ha dado un paso adelante importante en los últimos 10 años, en buena parte gracias a los trabajos de perforación y conservación de la CHG y del SC, y de los estudios desarrollados por el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, sin olvidar a los otros organismos públicos que trabajan en el área. No obstante, subsisten aspectos de importancia general aún insuficientemente elaborados a pesar de los esfuerzos realizados. Tales son:

a) Evaluación precisa de la recarga y descarga al sistema acuífero, con detalle de las variaciones estacionales e interanuales.

b) Efecto de las extracciones sobre las profundidades del nivel freático y sobre las descargas del sistema, con evaluación de los cambios en las propiedades estadísticas de las series temporales.

c) Movilidad y desplazamiento de las aguas subterráneas profundas salinas en las Marismas ante los cambios potenciométricos producidos por las extracciones.

d) Movimiento en el sistema acuífero de los productos agroquímicos empleados en las áreas de regadío, tanto de los nitratos (el más móvil), como de plaguicidas y quizás de compuestos de fósforo.

e) Relaciones agua continental-agua marina a lo largo de la costa en función de los cambios verticales del potencial hidráulico, sobretudo en las áreas urbanizadas. ●

REFERENCIAS

- Baonza, E., Plata A., Silado A** (1982). Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia. Cuadernos de Investigaciones, C7, CEDEX, MADRID: 1-139.
- Borja, F.; Díaz del Olmo, F.** (1992). Eastern sector of the cliffs at El Asperillo (Huelva coast, SW Spain): formation and Chronology. MBSS. Neuxsletter, 14:87-93.
- Castells, M.; Cruz, J.; Custodio, E. García Novo; F.; Gaude-mar, J.P.;González Vallvé, J.L., Granados V., Magraner, A., Román, C., Smart, M.; Van der Maarel, E.** (1992). Dictamen sobre estrategias para el desarrollo socioeconómico sostenible del entorno de Doñana. Comisión Internacional de Expertos sobre el Entorno de Doñana, Junta de Andalucía. Sevilla: 1-124.
- Custodio, E.** (1993). preliminary outlook of saltwater intrusion conditions in the doñana National Park (Soutnern Spain). Sudy and Modeling of Saltwater Intrusion into Aquifers. CIMNE, Barcelona: 295-315.
- Custodio, E.** (1994). posibles procesos de contaminación agrícola en el área de Doñana (Huelva).Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterránea. Asocia. Intern Hidrogeólogos-Grupo Español, II: 283-308.
- Custodio, E.; Iglesias, M., Manzana, M., Trick, T.** (1994). Sal-water intrusion risk along the western Doñana area coast (South-western Spain). 13 th Salt Water Intrusión Meeting. University of Cagliari, Sardinia (en prensa).
- FAO** (1970). Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalquivir: informe técnico 1. AGL: SF/SPA 9, Roma 1-15 (informe inédito).
- FAO** (1975). Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. Proyecto de transformación de la zona regable Almonte-Marisma: informe técnico 7 AGL:SF/SPA 16. Roma: 1-157(informe inédito).
- Flor, G.** (1990). Tipología de dunas eólicas. Procesos de erosión sedimentación costera y evolución litoral de la provincia de Huelva (golfo de Cádiz occidental, Sur de España). Estudios Geológicos , 46: 99-109.
- Guimerá, J.: Custodio, e., Candela, L.** (1991). Caracterización de la recarga a los acuíferos mediante trazador artificial en el Parque Nacional de Doñana (Huelva,España). Revista de Geofísica. Madrid, 47.135-147.
- IGME** (1983). Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entonomo. Serv.Publ. Min. Industria y Energía: 1-120, 1 mapa.
- YRYDA** (1976). Informe final de sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas (Huelva-Sevilla). Sevilla. 1-110 (informe inédito).
- ITGE** (1992). Hidrogeología del Parque nacional de Doñana y su entorno. Serv. Publ. Min. Industria y Energía: 1-64, 2 mapas.
- Llamas, M.R.** (1990). Geohydrology of the eolian sands of the Doñana National Park (Spain). Catena Supplement, 18: 145-154.
- Manzano M.; Custodio, E., Poncela, R.** (1991). Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de la hidrodinámica de los acuíferos en el área de Doñana. El Agua en Andalucía ITGE. I: 475-486
- Mayoral, E.** (1989) Geología de la depresión inferior del Guadalquivir. El Caternario en Andalucí Occidental. AEQUA Monografía, 1: 7-20.
- Menanteua, J.** (1980). Les Marimas du Guadalquivir: exemple de transformation d'un paysage au curs du Quaternaire réente. Thesis (3emre cycle), Universite de París-Sorbone, 2 vol.
- Plata, A., Boanza, E.; silgado A.** (1983). Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y su zona de influencia. Isotopes in Hydrology, IAEA-Viena: 321-340.
- Rodríguez Vial, J.** (1989). El inicio de la red fluvial cuaternaria en el sector occidental de la depresión del Guadalquivir. El cuaternario en Andalucía Occidental; EAQUA, Monografías 1: 27-31.
- Sacks; L.A.; Herman, J.S.; Konikow, I.F.; Vela, A.L.** (1992). Seasonal Dynamics of Groundwater lake interactions at Doñana National Park, Spain. J. of Hydrology, 136: 123-154.
- Salvany, J.M., Custodio E** (1995). Características sedimentológicas de los depósitos pliocuaternarios del Bajo Guadalquivir en el área de Doñana. Rev. Soc. Geológica de España. Madrid 8 (1-2).
- Suso, J.: Llamas, M.R.** (1990). el impacto de la extracción de aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana. Estudios Geológicos, 46: 317-345.
- Suso; J.: llamas, M.R.** (1993). Influence of groundwater development on the Doñana National Park ecosusterns (Spain). Journal of Hydrology, 141: 239-269.
- Vanney, J.R.; Menanteau, L.** (1985). Mapa fisiográfico del litoral atlántico de Andalucía. Publ. Junta de Andalucía.
- Vela, a., Rodriguez-Arévalo, J.; Tenajas, J.L.** (1991). Análisis de los efectos de la explotación del acuífero costero en las proximidades del Parque Nacional de Doñana. Auifer Overexploitation. XXIII IAH International Congress, Pueto de la Cruz: 1: 179-182.
- Vigüer, C.** (1977). Les grands traits de la tectonique du bassin néogène du Bas-Guadalquivir. Boletín Geológico y Minero, 88-1: 39-44.
- Yagüe, A., Llamas, M.R.** (1984). Simulación del flujo subterráneo del sistema acuífero del estuario del Guadalquivir en un perfil vertical. 1er. Congreso Español de Geología. Segovia. IV: 435-451.
- Zazo, C.: Dabrio, C.J., Goy, J.L.; Meco, J.** (1994). Evolution of the littoral lowlandfs of Huelva and Cadix (gulf of Cadix, SW Spain) frm the Flandrian until present. The Ocean Change: Management Patterns and the Environment (Súarez Vivero, ed). Serv. Publ. Univesidad de Sevilla: 27-38.