



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

HIDROGEOLOGIA DEL PARQUE NACIONAL  
DE DOÑANA Y SU ENTORNO

1989



## PRESENTACION

El Coto de Doñana, uno de los humedales más importantes de Europa, fué declarado Parque Nacional en 1969. Inicialmente abarcaba una superficie de 37.425 ha de las que 19.946 correspondían a terrenos del antiguo coto y 17.479 a marismas exteriores. En 1978 se reclasifica el Parque, ampliando su territorio a 73.000 ha y creando unos límites más naturales. Dentro de estos límites se pueden definir tres grandes ecosistemas, denominados cotos, marismas y playas con dunas.

La supervivencia del Parque está ligada a muchos factores, prácticamente todos relacionados con la actividad humana. Uno de ellos es el agua, tanto la subterránea como, principalmente, la superficial.

El ITGE, consciente de la responsabilidad que le confiere la legislación en materia de aguas subterráneas, mantiene, desde hace varias décadas, una línea de investigación prácticamente ininterrumpida, cuyo objetivo es el de conocer, cada vez con mayor precisión, tanto los parámetros que intervienen en el funcionamiento de los acuíferos existentes, como los términos del balance, evolución de las calidades del agua, etc. Todos los trabajos realizados hasta la fecha se encuentran publicados en los correspondientes informes técnicos, citados en bibliografía. Un resumen se publicó en 1983 con el nombre de "Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno", en la Colección Informe. Esta segunda edición se basa, fundamentalmente en la anterior, pero de la que se han suprimido pasajes que se consideran accesorios y se han añadido otros nuevos, centrados, prioritariamente, en la aplicación del modelo matemático realizado.

Madrid y Sevilla, marzo de 1989

## 1.- EL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA Y SU ENTORNO

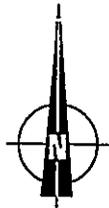
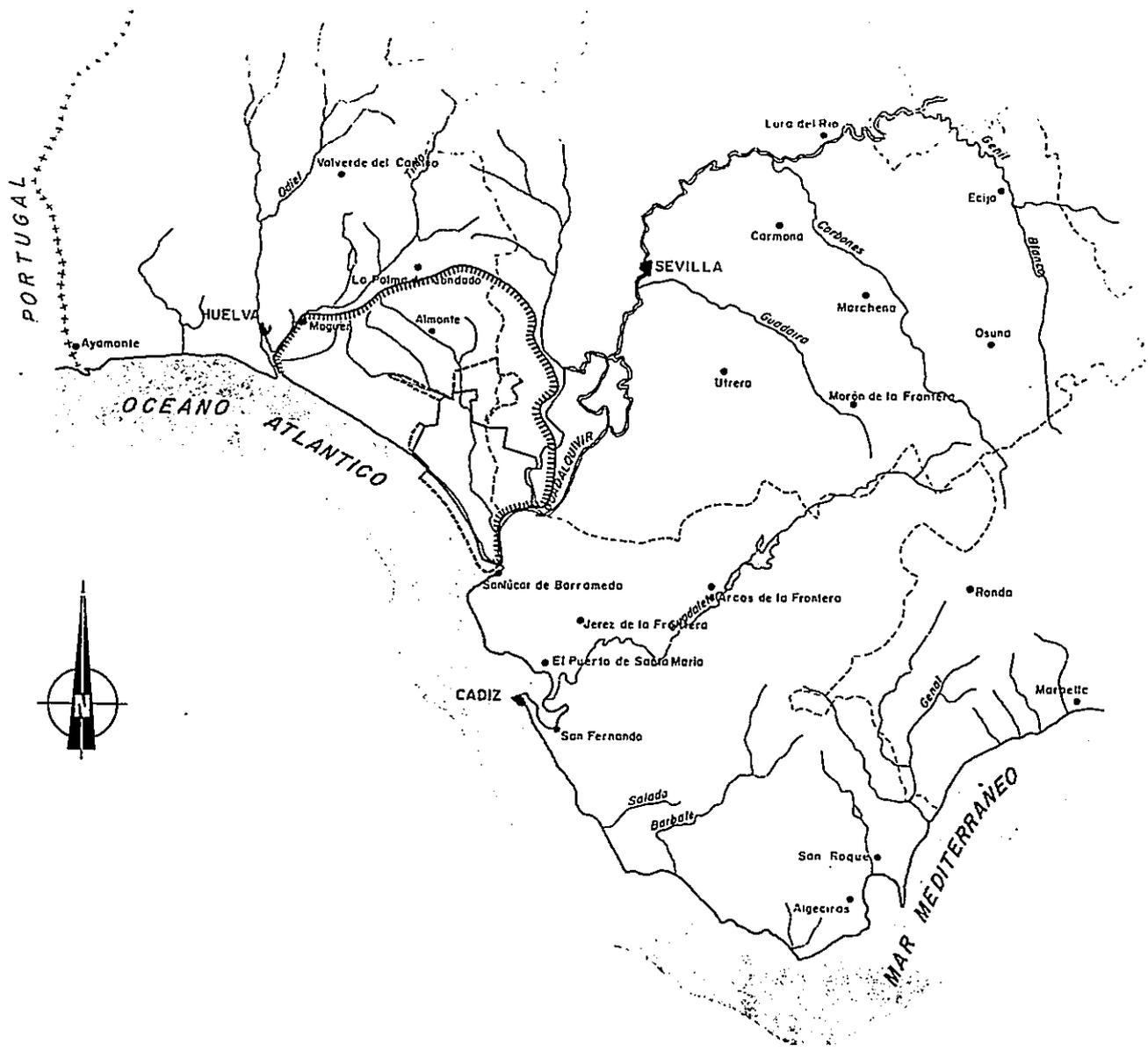
Para estudiar el comportamiento y la interrelación de las aguas subterráneas con el Parque Nacional es preciso definir unos límites más amplios que los que circunscriben al Parque ya que es preciso abarcar las zonas por donde se recarga el agua, por donde circula y por donde se drena, es decir, el conjunto del acuífero en el que se ubica esta importante reserva ecológica.

En 1970, el IGME, hoy ITGE, definió el sistema acuífero nº 27, que incluía dos subunidades, la Almonte-Marismas y el acuífero de Espartinas, separadas ambas por el río Guadamar que actúa como eje drenante.

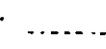
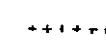
El Parque Nacional de Doñana se localiza, íntegramente, en la subunidad acuífera Almonte-Marismas, en el tercio más meridional. La subunidad queda limitada al norte por el afloramiento de las margas azules que coincide, aproximadamente, con la carretera Sevilla-Huelva, por el este por el río Guadamar, por el sur con el Guadalquivir y por el oeste con el océano Atlántico. Tiene una forma, aproximadamente, triangular rectangular, con la hipotenusa coincidiendo con la costa, con una dirección NO-SE. A estos límites (plano nº 1) se circunscribe este informe.

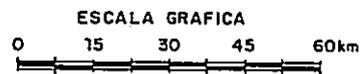
### 1.1. ENCUADRE GEOLOGICO

El sector estudiado se encuentra situado en la depresión del Guadalquivir. Geológicamente está formado por depósitos marinos del Neógeno y por otros de origen fluvio-marino y eólico del Cuaternario. Todo el conjunto de formaciones yacen, prácticamente, horizonta-



**LEYENDA**

-  LIMITE UNIDAD ALMONTE MARISMAS
-  LIMITE DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA
-  LIMITE DEL PREPARQUE
-  LIMITE PROVINCIAL
-  FRONTERA



**PLANO GENERAL DE SITUACION**

les al no haber sido afectadas por importantes movimientos tectónicos.

#### 1.1.1. Estratigrafía

Las principales características estratigráficas y sedimentológicas de las formaciones que afloran -(Ver plano general al final del informe )- son las siguientes:

##### **Margas azules (Mioceno superior-Plioceno inferior)**

Esta formación, que aflora en todo el borde septentrional del área, es la base impermeable del acuífero. Está constituida por margas de facies típicamente marina con estratificación masiva. Hacia el techo aparecen intercalaciones de limos y de arenas. La potencia total es del orden de 1.200 m.

El techo presenta una topografía suave, con cotas descendentes hacia el sur. Al alcanzar la zona de las marismas la pendiente del techo se acentúa de forma acusada, de modo que en las proximidades del Guadalquivir se encuentra, a veces, a profundidades del orden de 250 m bajo el nivel del mar. Esta última depresión se prolonga hacia el norte en dos alargamientos, uno bajo el arroyo de La Rocina y otro bajo el río Guadiamar.

##### **Limos basales (Plioceno medio)**

La regresión producida a finales del Plioceno inferior provocó un cambio en la sedimentación, lo que ocasionó que se sedimentasen margas con contenidos crecientes en arenas, o que incluso continuase con una serie de limos arenosos calizos. Como resultado se tiene una formación poco homogénea, con zonas en las que pre-

dominan las arenas sobre los limos y otras donde el contenido arcilloso aumenta considerablemente.

En el recinto del Parque Nacional de Doñana y en las marismas esta formación no aflora. Según los datos de sondeos, está constituida por alternancia de capas arenosas y/o areniscosas y lumaquelas de ostreas negras. Se observa que las litofacies en esta zona son bastante diferentes con respecto a las que presenta la formación en los afloramientos situados al norte.

#### **Arenas basales (Pliocuaternario)**

Este tramo está constituido, fundamentalmente, por arenas blanco-amarillentas o amarillo-rojizas de granos de cuarzo y en menor proporción de feldespatos y de fragmentos de rocas metamórficas. Se superpone, discordantemente, sobre los materiales del Plioceno medio. Se observa a veces, entre ambas formaciones, una costra ferruginosa-conglomerática. En la zona costera presenta una potencia comprendida entre 10 y 30 metros.

El ambiente de depósito de estas arenas corresponde a un medio holomarinero, con regresión posterior generalizada y con dispersión fluvial e influencia eólica en algunos sectores.

Las arenas basales constituyen el nivel acuífero más importante, entre los que existen en el área. Su importancia se debe a la permeabilidad elevada que posee, como consecuencia del tamaño, redondeamiento y homogeneidad del grano, y a la gran extensión superficial que ocupa.

## Marismas

Una importante extensión del Parque de Doñana está situada sobre sedimentos cuaternarios de marismas.

Aunque la génesis de esta formación no está suficientemente conocida puede admitirse que, durante el Cuaternario antiguo y medio, el golfo marino existente en esta zona comenzó a cerrarse parcialmente por la formación del cordón litoral, dando lugar a una amplia albufera que, progresivamente, se colmató con sedimentos de origen continental.

Litológicamente se inicia con unos sedimentos groseros de origen fluvio-marino, que subyacen a los actuales de marisma. Se encuentran directamente apoyados sobre los materiales más o menos erosionados del Pliocuaternalio.

Los datos de sondeo ponen de manifiesto la existencia, en las marismas, de dos capas bien individualizadas, con predominio de cantos rodados y gravas. La más profunda se encuentra entre los 90 y 150 metros de profundidad y tiene una potencia comprendida entre 10 y 30 m. La más superficial se sitúa entre los 50 y 80 m y su potencia varía entre 5 y 30 m. Hacia los bordes, las dos capas detríticas groseras se confunden en una sola, con potencia del orden de los 10 m. (ver planos nº 5 y 6).

Entre las dos capas citadas, y también por encima de la más superficial, aparecen niveles arcillosos y arcillo-arenosos de coloraciones grises y azuladas que contienen gran abundancia de microfauna, típica de mares poco profundos y aguas salinas.

A partir de estudios micropaleontológicos y de microfacies de muestras tomadas en sondeos perforados en las inmediaciones del Parque Nacional de Doñana, se pueden establecer las condiciones medioambientales en las que se formaron las marismas, y que debieron ser las siguientes: la sedimentación se produjo en un medio de tipo marino muy litoral, con influencias salobres o lacustres, sobre todo en la parte más superficial. En la más profunda, en la que existe abundancia de fósiles re-sedimentados, gravas y arenas, los episodios de origen fluvial pueden haber sido muy importantes.

Durante el año 1981 el Centro de Estudios y Experimentación del MOPU realizó algunas dataciones de sedimentos de la zona de marismas a partir de análisis isotópicos, llegando a la conclusión de que los más superficiales (5 a 15 m) se depositaron entre los 4.000 y 7.500 últimos años, por lo que resulta para esta zona una velocidad de sedimentación del orden de 1 a 2,5 mm al año.

#### **Playas, dunas actuales y barra costera.**

Las playas están formadas principalmente por arenas silíceas. Paralelamente a la línea de costa, desde la desembocadura del río Tinto hasta la del Guadalquivir, se extiende una serie de dunas actuales que alcanzan su mayor grado de desarrollo en el extremo meridional. En este complejo se pueden distinguir a veces hasta cuatro cordones dunares.

En los sectores de Torre del Loro y Médano del Asperillo, se han diferenciado dos tramos eólicos, que a su vez se pueden encontrar separados de las arenas basales infrayacentes por una capa de turba. Sin embar-

go, esta separación, en los demás sectores, viene marcada por una superficie en la que son abundantes los óxidos de hierro.

**Terrazas, manto eólico, dunas antiguas, formación roja, margas verdes y turbas.**

Las terrazas están compuestas, generalmente, por cantos de cuarcita, de esquistos y de pizarras, arenas cuarcíticas y matriz limo-arenosa, y en algunas ocasiones se han observado también restos de margas. La potencia alcanza como máximo 7 u 8 m.

El manto eólico y las dunas antiguas están constituidos, principalmente, por arenas blancas. La potencia es muy variable, pero como máximo llega a alcanzar los 3 m. Proceden de antiguos trenes de dunas móviles que, posteriormente, fueron degradados (manto eólico), aunque en ciertos puntos se conserva, todavía, la morfología dunar (dunas antiguas).

La formación roja es suprayacente y discordante a las arenas basales. Está constituida por gravas, arenas y conglomerados con cemento, fundamentalmente ferruginoso. La litología varía de unos puntos a otros, predominando, a veces, las arenas y, en otras ocasiones, los conglomerados cementados o las gravas sueltas. Los granos son de cuarzo y, en menor proporción, de fragmentos de roca metamórfica y de feldespatos. La potencia es muy variable pasando de pocos decímetros a 15 ó 20 m.

Las características sedimentarias parecen indicar un origen típicamente fluvial, a veces torrencial; o bien, intermedio entre playa marina y eólico, removilizado posteriormente por la acción de los ríos.

Entre las arenas basales y la formación roja existe, a veces, un nivel discontinuo, escasamente representado, de unas margas verdosas, muy plásticas, mezcladas con granos de cuarzo. De los restos de microfósiles encontrados se puede deducir que se depositaron en un medio sedimentario claramente marino.

Localmente se encuentran algunas turberas formadas, frecuentemente, por alternancias de turba con arcillas y/o arenas negras. Los espesores son variables pero pueden llegar a ser hasta de unos 20 m (turbera de Las Madres), y su edad, probablemente, corresponde al Holoceno medio. Tienen su origen en los ambientes lagunares que se formaron en este área.

#### **Aluviales**

Se trata de los sedimentos recientes depositados en los lechos de los ríos y arroyos. Están constituidos principalmente por conglomerados, gravas, arenas y limos. Estos sedimentos, en la zona más costera, suelen ser muy finos.

#### **1.1.2. Tectónica**

Los materiales descritos anteriormente forman parte de una cobertera terciaria-cuaternaria que no ha sufrido ninguna deformación importante, salvo algunos basculamientos recientes de poco interés para la hidrogeología de la zona.

### 1.1.3. Historia geológica

Durante el Mioceno superior-Plioceno las condiciones de depósito reinantes, parecen corresponder a los de la cuenca marina de profundidad de media a grande, en la que se depositaron potentes capas de margas. En las zonas marginales se formaron áreas inestables, que favorecieron el deslizamiento de masas de materiales subbéticos hacia el fondo de la cuenca. Estos sedimentos, que incluyen los denominados "albarizas" se encuentran, en parte, intercalados entre los materiales autóctonos del Mioceno.

Hacia el techo, las margas, (margas azules), son cada vez más arenosas, lo que indica que, la cuenca entró en un periodo regresivo. Al final se produjo una emersión, con erosión parcial del techo del tramo margoso, sobre el que a continuación se depositaron sedimentos costero-litorales (arenas basales). En las zonas emergidas se generó una importante red fluvial, así como un glacis (formación roja) que llegó a ocupar una extensión considerable.

Posteriormente, entre finales del Plioceno y principios del Cuaternario se produjo una nueva transgresión marina, pero de mucha menor envergadura que la del Mioceno superior. Se instaló así un golfo en una zona que prácticamente coincide con la ocupada por las actuales marismas.

De forma simultánea a esta trasgresión, probablemente, se inició el crecimiento, en dirección SE de una barra litoral arenosa que paulatinamente, cerró el golfo, convirtiéndolo en una albufera. Esta se rellenó, principalmente, con sucesivos aportes fluviales, los

cuales junto con algunas interferencias de origen marino-costero, contribuyeron a la colmatación final. Así, el avance progresivo de las arenas pudo llegar a cerrar, en muchos casos, las desembocaduras de algunos arroyos y a dificultar o impedir el drenaje, lo que originó ambientes lagunares locales, en los que se pudieron dar las condiciones precisas para la formación de turba.

En la actualidad en la costa se produce una intensa removilización eólica, y en las marismas una colmatación, a expensas, fundamentalmente, de materiales detríticos finos.

El análisis de la evolución de las playas actuales, permite conocer el cambio reciente de la línea de costa entre Mazagón y la desembocadura del Guadalquivir. Así se puede observar un avance entre Mazagón y la Torre del Loro, y una retirada de la misma entre Matascañas y Sanlúcar de Barrameda, originando en este último sector una serie de playas colgadas que aumentan en número hacia la desembocadura del Guadalquivir.

## **1.2. ENCUADRE CLIMATICO**

El clima existente en el Parque Nacional de Doñana y su entorno corresponde con el denominado Mediterráneo subhúmedo con influencia atlántica. Se caracteriza por la variabilidad hiperanual e interanual de las precipitaciones, lo que condiciona la irregularidad de las aportaciones fluviales. El número de horas de insolación es elevado, con una media anual del orden de 3.000 horas. Los vientos predominantes son los del suroeste y oeste.

La influencia del Atlántico produce una suavización de las temperaturas, de modo que la media anual es del orden de 16-17°C, y las medias mensuales oscilan entre los 9,9°C en enero y 24,7°C en julio (Observatorio de Almonte "Bodegones"). Las heladas son poco frecuentes, del orden de 5 días al año.

La precipitación anual media es del orden de 575mm que se distribuyen del siguiente modo: 20% en primavera, 5% en verano, 35% en otoño y 40% en invierno.

Las lluvias en otoño tienen un carácter generalmente tormentoso, siendo de carácter frontal en primavera e invierno.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se ha seguido el método de Thornthwaite. Los valores deducidos (840 mm/año) suponen cifras muy elevadas, ya que superan en casi el 50% al valor de la precipitación anual media.

Para evaluar la evapotranspiración real se han distinguido las siguientes zonas:

- zona forestal. Con una superficie de 710 km<sup>2</sup>, a la que se le ha asignado una retención de 300 mm, y
- zona de textura más suelta y escasa vegetación (1130 km<sup>2</sup>). En este caso la retención considerada es de 100 mm.

Considerando los valores de retención anteriormente expuestos, se obtiene para la evapotranspiración real un valor medio de 420 mm/año, equivalente al 73% de la precipitación anual media.

### 1.3. ENCUADRE HIDROGRAFICO

La zona sur oriental del subsistema acuifero está ocupada por las marismas que son subhorizontales, y en las que no es posible definir cuencas hidrográficas. Por este motivo, parece más lógico delimitar las distintas subcuencas hidrográficas hasta la entrada de los cauces en esta formación. Con este criterio se pueden definir las señaladas en la tabla nº 1 (ver plano nº 2).

A partir de la década de los años 40 se han llevado a cabo diferentes actuaciones que han modificado la compleja red hidrográfica de las marismas, cambiando su estructura. Así, se realizó el encauzamiento del río Guadiamar, el del arroyo de La Cigüeña, se ha construido un recinto dentro del cual el antiguo caño Travieso ha desaparecido por completo, etc. En general todas estas actuaciones tenían por objeto el desecar zonas inundadas.

Para retornarlas a la situación natural, se ha abordado, recientemente, el Plan de Regeneración Hídrica de Doñana. En la actualidad se han llevado a cabo las obras de la llamada Montaña del Río y las obras de acondicionamiento del caño Guadiamar, que se encuentra ya en funcionamiento y que permite el trasvase de hasta  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas del río Guadiamar al caño Guadiamar. (Solución centro-norte).

Además se trabaja en la conexión del río Guadiamar con el caño Travieso, a través de un cauce artificial y se proyecta eliminar parte del muro derecho de defensa y encauzamiento del río Guadiamar a fin de que las riadas de éste vuelvan a inundar las marismas (Solución sur).

Plano nº 2

SUBCUENCAS DE DOÑANA (Pendiente de hacer)

TABLA N° 1.- SUBCUENCAS HIDROGRAFICAS

SUBCUENCA DEL RIO ARROYO DE	VIERTE A	SUPERFICIE EN LA SUBUNIDAD ACUIFERA ALMONTE-MARISMAS (km <sup>2</sup> )
Guadamar Alcarayón	Marismas	81,4 (1)
Gato	Marismas	166,2
Entre el Gato y la Mayor	Marismas	86,0
La Mayor	Marismas	73,4
Del Partido	Marismas	314,0
La Rocina	Marismas	400,0
Entre la Rocina y El Guadalquivir	Marismas	152,2
Entre el Guadalquivir y la Madre del Avitar	Atlántico	216,0
La Madre del Avitar	Atlántico	42,8
Entre la Madre del Avitar y Domingo Rubio	Atlántico	14,4
Domingo Rubio	Atlántico	96,8
Varios arroyos	Tinto	<u>185,0</u> (2)
	TOTAL .....	1.828,2
Marismas	Guadamar / Guadalquivir	<u>531,6</u>
	TOTAL .....	2.359,8

(1) 16,6 km<sup>2</sup> en las margas azules

(2) 48,8 km<sup>2</sup> en las margas azules

Con la ejecución de todas estas obras se garantizará un volumen de aportación superficial suficiente para la conservación de los complejos marismesños.

Los caudales circulantes por los arroyos que llegan a las marismas provienen, fundamentalmente, de la escorrentia superficial generada y del drenaje del subsistema acuífero Almonte-Marismas. En el caso del rio Guadiamar, la mayor parte de su caudal proviene del área situada al norte, fuera de los límites del acuífero. Estos caudales no estan suficientemente acotados, debido a la inexistencia de estaciones de aforo.

Ante la imposibilidad de conocer con precisión los aportes de agua de las distintas subcuencas, se han calculado globalmente, por diversos métodos más o menos teóricos que arrojan valores medios del orden de  $140 \text{ hm}^3/\text{a}$ .

#### 1.3.1. Las Mareas

Como es lógico, la costa se encuentra sometida a la acción de las mareas. En esta zona los niveles de pleamar y bajamar oscilan del orden de 2,30 m.

Con el fin de comprobar la interconexión entre el mar y el agua subterránea en el acuífero en carga por debajo de Las Marismas, los técnicos del IRYDA instalaron un limígrafo en el sondeo denominado "Señuela bis", situado a unos 30 km de costa, y próximo a la margen izquierda del Guadalquivir. La experiencia se realizó durante varios días de diciembre de 1977. Los resultados obtenidos evidenciaron una oscilación del nivel del agua subterránea en el sondeo con el mismo periodo que la marea y una amplitud del orden del 7 por ciento

de la de aquella. Las oscilaciones en el piezómetro presentaron un retraso de 3 horas y 30 minutos respecto a las de la marea en el oceano.

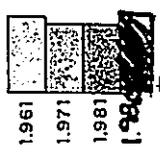
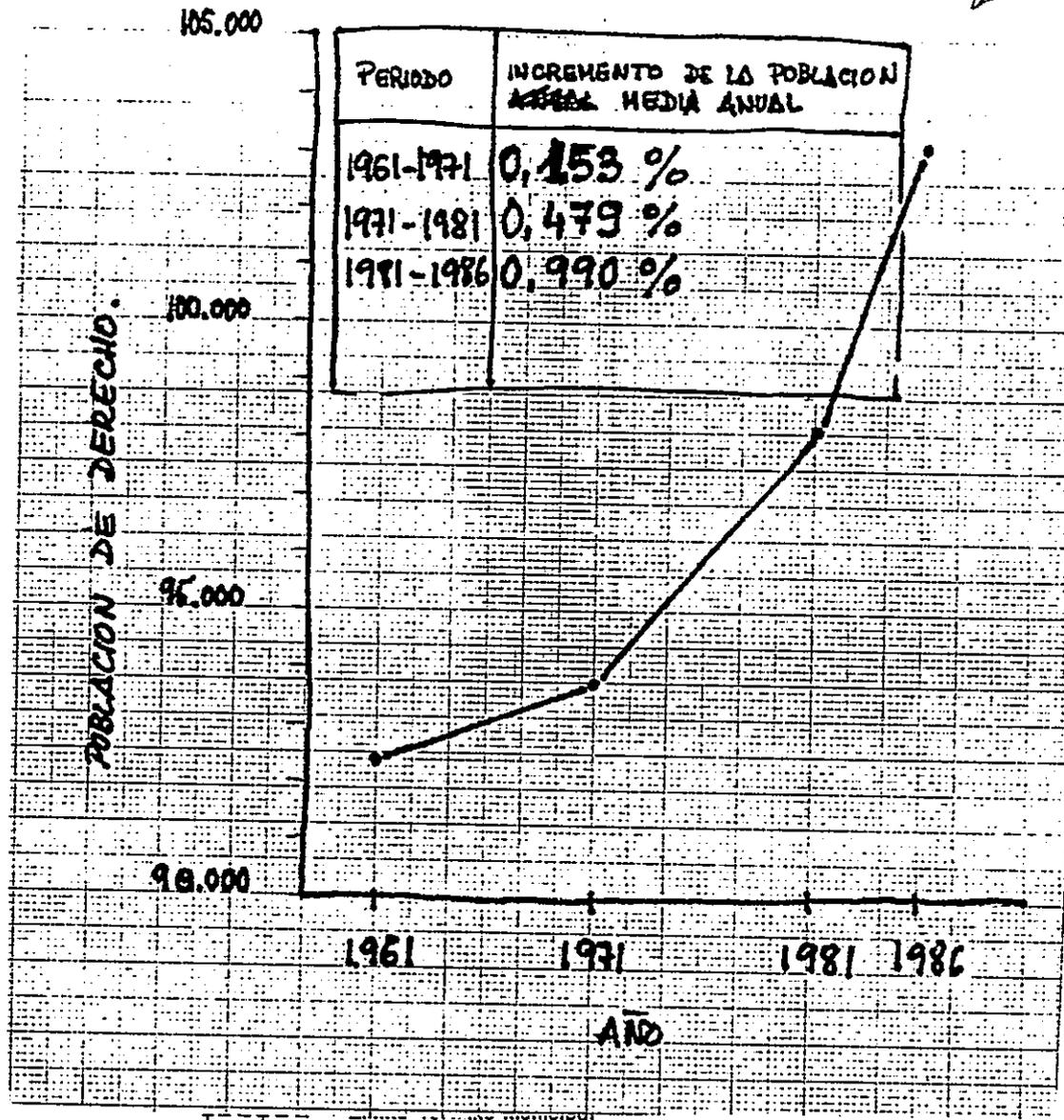
#### 1.4. ENCUADRE ADMINISTRATIVO: POBLACION Y VIAS DE COMUNICACION

La zona en cuestión incluye parcial o totalmente dieciocho municipios: catorce de la provincia de Huelva y cuatro de la de Sevilla. Tiene una superficie de 2.817 km<sup>2</sup> de los que 2.197 (78 por ciento) corresponde a Huelva y 620 (22 por ciento) a Sevilla.

La población de derecho, referida a los 18 municipios, es de 103.088 habitantes segun el censo del 1 de abril de 1986, resultando una densidad media de población de algo más de 36 habitantes/km<sup>2</sup>, cifra muy inferior a la media nacional (75 hab/km<sup>2</sup>) y a la media de Andalucía (74 hab/km<sup>2</sup>) (Ver plano nº 3).

La distribución espacial de la población es muy heterogénea, debido, entre otros, a los siguientes factores: intenso desarrollo de los sectores económicos secundario y terciario en las áreas más próximas a Huelva capital y en Matalascañas y a diferencias productivas en la agricultura: en las comarcas de El Condado y El Aljarafe el desarrollo agrícola es muy importante, mientras que es prácticamente nulo en las marismas.

Debido a estas causas las densidades de población presentan grandes variaciones. Aparece un máximo en el término municipal de Bollullos Par del Condado con 253,70 hab/km<sup>2</sup> y un mínimo de Aznalcazar con 6,77 hab/km<sup>2</sup>. Existen casos como Hinojos y Aznalcazar donde este valor se encuentra por debajo del límite de desertiza-



Población de derecho del municipio para los años 1961, 1971, 1981 y 1986.  
Evolución de la población del municipio



EVOLUCION DE LA POBLACION

FUENTE CENSOS DE POBLACION, 1961, 1971, 1981 y 1986



ción (13 hab/km<sup>2</sup>). (Fuente: Mapa de Cultivos y Aprovechamientos, escala 1:50.000, nº 1.018, El Rocio, Ministerio de Agricultura).

El ritmo de crecimiento de la población es muy bajo y en algunos casos nulo, a excepción de los municipios de Palos de la Frontera, Moguer y Almonte, donde se registra un aumento progresivo durante los últimos tiempos.

En cuanto a vías de comunicación se puede observar una clara diferencia entre la zona norte y la sur. Por la zona más septentrional discurre la línea de ferrocarril de Sevilla-Huelva y una buena red de carreteras cuyos ejes principales son la autovía de Sevilla a Huelva y la carretera N-341 (Sevilla-Huelva) de las que vertebran una serie de carreteras locales. Por el contrario, en el sur, la mayoría de las vías de comunicación están constituidas por caminos sin firme que enlazan algunos cortijos de la zona. La única excepción es la carretera comarcal Hu-445 (Almonte-Matalascañas, por El Rocio).

#### 1.5. ENCUADRE ECONOMICO

La economía de la zona puede considerarse deprimida. Así, los únicos municipios de la provincia de Huelva que superan la renta media provincial (Anuario del Mercado Español, Banesto, 1977) son Niebla, Almonte, Hinojos, Moguer y Palos de la Frontera, y en la de Sevilla no hay ninguno que la supere, siendo el valor más alto Aznalcazar.

### Sector primario: agricultura, ganadería y pesca

En los últimos años, la agricultura de la zona ha experimentado un espectacular desarrollo debido, fundamentalmente, a la masiva implantación de cultivos tempranos (fresón y en menor medida hortalizas, melón y uva de mesa). También tienen cierta importancia los cítricos, arroz, viñedo y olivar. Paralelamente al desarrollo agrícola se ha producido un claro retroceso del sector pesquero, actualmente, solo tiene cierto interés en Palos de la Frontera. La ganadería también tiene un elevado peso específico en la economía de la zona.

### Sector secundario: industrias.

Las industrias más importantes se localizan en la franja costera próxima a Palos de la Frontera. Además, la mayoría de los municipios de la zona cuenta con algunas industrias artesanales y de transformación y elaboración de productos agrarios, así como con industrias derivadas de la construcción.

### Sector terciario: servicios

Está escasamente desarrollado en la zona, aunque empieza a incrementarse en los municipios de Almonte, Moguer y Palos de la Frontera debido, fundamentalmente, al turismo.

En el caso de Almonte, el turismo se localiza en las playas de Torre de la Higuera y Matalascañas, donde, en los meses de verano, la población pasa de algo menos de 800 habitantes a más de 80.000. En Mazagón también se registra un importante incremento poblacional durante el verano, pasando en dicho periodo de 2.000 a

50.000 habitantes. Mención aparte merece la romería de El Rocio, que congrega durante unos días a cientos de miles de personas.

#### 1.6. ECOLOGIA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA

Existen en el área ocupada por Doñana tres grandes ecosistemas que le confieren un gran interés. Son los siguientes: Arenas estabilizadas o cotos, cordón litoral de dunas móviles y marismas. (Plano nº 4).

La zona de contacto entre las arenas y las marismas constituyen el importante ecotono de La Vera-La Retuerta, de una gran riqueza biológica.

Las arenas estabilizadas o "cotos" ocupan la zona más nor-occidental del Parque. Se desarrollan sobre arenas pertenecientes al manto eólico y a las dunas antiguas arrasadas por la erosión, que a veces aún conservan su morfología dunar. La topografía es ondulada y la permeabilidad del terreno es bastante alta (zona del acuífero libre), quedando la superficie piezométrica a muy poca profundidad respecto de la del terreno, a la cual se adapta generalmente.

Dependiendo precisamente de la proximidad del nivel freático, quedan condicionadas las variantes de flora. Así son típicos los bosquetes de enebro cuando la humedad del subsuelo es más baja y, como contraste, en los lugares de humedad mayor, suelen localizarse alcornoques y espesuras, a veces impenetrables, constituidas por madroños, mirtos y densos brezales. Entre uno y otro extremo existen gran variedad de facies de matorrales transicionales que, junto con la vegetación circundante de los charcos y lagunas temporales, da una abundante diversificación y colorido al paisaje.

Plano nº 4.

ECOSISTEMAS

Entre la fauna, se puede destacar: la tortuga griega, la culebra rayada, la víbora, el águila imperial, el milano real, el alcaraván, la perdiz, la comadreja, el meloncillo, el lince, el conejo, el jabalí y los cérvidos.

El segundo ecosistema, el cordón litoral de dunas móviles, es uno de los paisajes más llamativos del parque. El movimiento rápido de las arenas, provoca fenómenos importantes de sucesión ecológica que posibilitan una investigación muy detallada.

El avance de las dunas es, en valor medio del orden de 6 m anuales. Entre dunas y dunas se originan unas zonas deprimidas, igualmente móviles, a las que se denomina "corrales". El paso de las dunas por encima de un pinar supone la destrucción del mismo, aunque posteriormente, tras del paso de la misma aparece de nuevo vida vegetal. El reciclaje de esta dinámica da lugar a un proceso de sucesión ecológica muy rápido, de modo que los distintos estadios, dunas y "corrales", se encuentran siempre presentes en el conjunto de la franja costera.

La flora de este biotopo es escasa. Aparte de los pinos y de sus sotobosques, se pueden ver camariñas y algunas gramíneas y compuestas. En cuanto a la fauna, viven entre otros: víboras, águilas culebreras, conejos, tortugas, lince y meloncillos.

El tercer ecosistema definido es el de las marismas. A grandes rasgos, resalta considerablemente su gran homogeneidad. Ahora bien, la realidad es que, a es

cala local, se presentan gran multitud de formas, que tienen una importancia trascendental y que controlan las zonas de inundación, así como su duración. Lógicamente, esto trae consigo un control indirecto de la flora y fauna existente, así como la relación entre éstas y las de otros ecosistemas de Doñana con los que mantiene estrechas relaciones. La multiformidad que presentan se puede agrupar escuetamente en marismas secas y marismas sumergidas.

En líneas generales se puede llamar marisma seca a una zona en la que, aunque durante la primavera e invierno puede llegar a encharcarse total o parcialmente, el periodo seco es grande. Incluye los llamados paciles, vetas y vetones. La flora queda reducida a especies típicamente halófilas. La fauna más representativa está constituida fundamentalmente por aguiluchos, avefrías y liebres y ratas comunes.

La marisma sumergida es, aquella que durante bastantes meses del año está cubierta de agua. Incluye los caños, lucios, ojos y albinas.

En el conjunto marismeño, en donde las variaciones de cota raramente superan los 2 m las más bajas corresponden a los llamados "caños" y "lucios". Los primeros son pretéritos cauces y los lucios, constituyen auténticas lagunas de muy poca profundidad. Por otra parte, los "ojos" se comportan como singulares resurgencias de agua que no suelen llegar a secarse en verano.

En la zona de marismas sumergida, existe una densa vegetación, compuesta principalmente por bayancos y castañuelas, que emergen en febrero y se secan a finales de verano. Esta densa cobertura vegetal, permite y favorece la reproducción de numerosas poblaciones de aves.

La zona de contacto entre las arenas y las marismas que se extiende desde la desembocadura del Guadalquivir hasta la aldea de El Rocio y desde ésta hacia el noreste hasta Villamanrique de la Condesa forma el importante ecotono de La Vera-La Retuerta.

Se trata de una franja, de unos 60 km de longitud de gran riqueza biológica por sus peculiares características de humedad equilibrada, por su textura y por ser una zona frecuentemente fertilizada ya que es lugar de alimentación y paso para muchas especies animales. Entre la flora característica de la zona predominan los pastizales y los juncales, lo que hace que sea un lugar muy frecuentado por gran número de herbívoros, como jabalíes, ciervos, gamos y conejos. En esta zona también se asientan algunas especies de aves como las garzas, las espátulas, las garcetas y los martinetes.

Todos estos ecosistemas y ecotonos dependen, en gran parte, del agua, por lo que cambios importantes en las condiciones hídricas naturales pueden provocar desequilibrios de graves repercusiones en las características ecológicas y medioambientales de los mismos, por lo que no deben llevarse a cabo, sin la realización de estudios previos muy detallados que demuestren su viabilidad.

## 2.- EL AGUA EN EL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA Y SU ENTORNO

La supervivencia del Parque Nacional de Doñana depende, entre otros factores, del agua superficial y subterránea. La primera aporta caudales que inundan la marisma durante parte del año, y a la segunda se debe la existencia ininterrumpida de zonas húmedas, charcas, etc.

Los orígenes de las aguas que provocan la inundación de las marismas son, fundamentalmente, la lluvia caída directamente sobre su superficie, y el desbordamiento de los ríos que confluyen a ese área, es decir, lo que clásicamente se denomina aguas superficiales.

Ahora bien, en el sector de la unidad hidrogeológica que funciona como acuífero libre, estas aguas y las subterráneas están íntimamente conexionadas en los ríos y arroyos, y por tanto, una parte del agua que alcanza las marismas tiene un origen subterráneo, al proceder de la descarga del acuífero.

El papel del agua subterránea en el Parque Nacional es, no por menos llamativo, menos importante, ya que no queda limitado a estas aportaciones que incrementan las inundaciones de las marismas. En estiaje, al vida animal y vegetal puede continuar gracias a las aguas subterráneas. Si éstas no existiesen, no se hubiera podido desarrollar la importante reserva ecológica que representa Doñana. Así, en el ecosistema de las dunas, en donde el nivel piezométrico del acuífero está próximo a la superficie, es posible mantener en los "corrales" una humedad en el suelo que se conserva durante todo el año. En el ecotono de La Vera-La Retuerta, la superficie piezométrica se sitúa también muy alta, ligeramente por encima del nivel de marismas. Como consecuencia, en toda esta

franja límite, son normales las zonas húmedas y las lagunas.

Las aguas subterráneas que circulan por el acuífero profundo influyen igualmente en la ecología del Parque. Una parte de las mismas pueden ascender, muy lentamente, a través de las arcillas semipermeables, cargándose en sales. Al llegar a la superficie se evaporan, salinizando los metros más superficiales, fundamentalmente con cloruros.

En las marismas existen pequeñas depresiones circulares, de algunos metros de diámetro, llamadas "ojos" que suelen mantener una lámina de agua durante todo el año. Aunque la procedencia de estas aguas no está suficientemente estudiada, parece evidente que se corresponde con el drenaje de paleocauces localizados en la zona más superficial de las marismas, y, que conectan los mencionados ojos con el sector del acuífero que funciona como libre.

Las aguas subterráneas pueden contemplarse en otra vertiente distinta. Los conocimientos adquiridos pueden aplicarse para potenciar la vida en el ecosistema. Así, mediante la explotación racional de los recursos subterráneos pueden crearse nuevas zonas húmedas, como la laguna artificial del Acebuche. En épocas particularmente secas, es posible llenar lucios y lagunas naturales mediante la construcción de sondeos y extracción de agua subterránea, tal como se hizo en el Palacio de Doñana, Lucio de Mari-Lopez, etc.

La explotación de los recursos subterráneos del acuífero, no tiene por que estar reñida, por tanto, con la conservación del medio físico y biológico del Par-

que, sino que ha de llevarse a cabo de modo que los perjuicios que origine sean mínimos. Por el contrario, la explotación inadecuada, desordenada y no suficientemente controlada que se da en determinadas zonas puede llegar a originar en un futuro perjuicios difíciles de evaluar.

### 2.1. ESCORRENTIA SUPERFICIAL

Si bien estas aguas no son motivo de la publicación, se presenta a continuación un resumen de las características más comunes que presentan.

Las aportaciones de los arroyos que nacen en la subunidad acuífera presentan una gran variedad de caudales, que pasan, en tiempos relativamente cortos, de varios  $m^3$  por segundo a unas decenas de litros por segundo, o incluso a caudales nulos. Solo el río Guadiamar, que tiene una cuenca de recepción mucho mayor, presenta caudales con variaciones menos bruscas, de unos  $m^3$  por segundo en la época más húmeda, a prácticamente seco en verano.

Como ya se ha indicado, estas aportaciones, junto con las precipitaciones, originan la inundación de las marismas. Este proceso se inicia, en general, hacia octubre, con las primeras lluvias y aportaciones, y continúa, progresivamente, hasta inundar toda la superficie marismeña, lo que se consigue entre diciembre y abril. A continuación, al iniciarse el estiaje, las pérdidas por evaporación o evapotranspiración desecan progresivamente la marisma, salvo los ojos y los lucios, culminando así un ciclo de inundación/desecación.

La calidad química de estas aguas superficiales se ha estudiado a partir de la red de control de

la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, durante el período 1979 a 1988. El análisis de los resultados obtenidos permite diferenciar los tres grupos siguientes:

- Aguas que alcanzan al Parque por la zona oeste. Incluyen las del arroyo de La Rocina, las del arroyo del Partido y las del caño de la Venta.
- Aguas que lo alcanzan por la zona este. Incluyen las del complejo sistema del Guadiamar (incluyendo muro de encauzamiento).
- Aguas de los lucios. Se dispone de información para el lucio del Lobo y el lucio de los Ansares.

Entre las características comunes a estos grupos cabe citar, fundamentalmente, la variabilidad temporal. Este comportamiento era de esperar, ya que son aguas superficiales, producto de la composición de efectos climáticos, aportes subterráneos, mezclas de caudales variables, etc.

#### Contribuciones de la zona oeste

Mientras que el arroyo de La Rocina y el caño de la Venta presentan unas conductividades medias de 706 y 800  $\mu$  S/cm con un rango de variación muy importante (306-4364)  $\mu$  S/cm y 309-960  $\mu$  S/cm respectivamente, el arroyo del Partido posee una mineralización media mayor (1950  $\mu$  S/cm de media) Y en general bastante constante (entre 515 y 3215  $\mu$  S/cm). El vertido de alpechines y residuos urbanos de la zona de Almonte parece la causa más clara de este aumento de conductividad, que también causa valores altos de cloruros y DQO.

También el arroyo del Partido es el que registra mayor cantidad y variedad de microcontaminantes orgánicos, que en muchos casos superan con creces las concentraciones tolerables por la reglamentación técnico sanitaria sobre aguas potables (hasta  $0.1 \mu \text{ g/l}$  por compuesto individual y  $0.5 \mu \text{ g/l}$  en conjunto). Los mayores niveles son los de aldrina, HCB y A-HCH, lindano, heptaclorados y 2,4-D (IOE). En el arroyo de La Rocina los niveles de estos productos son inferiores, aunque, esporádicamente, también rebasan estos límites. El caño de la Venta posee unos contenidos mucho menores (así como en DQO).

Respecto al contenido en metales pesados, prácticamente igual para las estaciones estudiadas, sólo hay concentraciones algo más altas en el caso del Fe y Mn, como es de esperar en aguas superficiales, que transportan estos metales en suspensión, o como complejos acuosos.

#### Contribuciones de la zona este (Zona Guadiamar)

Cerca de la confluencia del Guadiamar con las marismas, las aguas superficiales registran una conductividad media de  $3145 \mu \text{ S/cm}$ , con un rango de variación comprendido entre  $320$  y  $10860 \mu \text{ S/cm}$ . Los pH más bajos se dan en el período seco de 1980-1981, presentando un mínimo de 4.8 en diciembre de 1980.

Respecto a los metales pesados, las concentraciones de cadmio, mercurio y cromo(VI) se sitúan en niveles bajos, mientras que los contenidos en cinc son, en gran parte de las ocasiones mayores que  $5 \text{ g/l}$ .

Aguas abajo, más cerca del Parque Nacional, los análisis muestran altas conductividades (se trata de aguas salobres y saladas) y aumento de pH hacia condiciones básicas. Parecen representar un carácter intermedio entre agua en movimiento y aguas estancadas. La tendencia hacia pH alcalinos, con el aumento de mineralización, es un proceso típico en aguas sometidas a evaporación, y por tanto a precipitación intensa de sales. Los altos valores de DQO indican abundancia de materia orgánica y especies reductoras durante la desecación.

#### Las aguas de los lucios

Los valores de conductividad son muy semejantes en el lucio del Lobo y de los Ansares. Los mínimos son bastante altos y los máximos están en el rango del agua marina. La clara basicidad de estas aguas, en especial en los momentos de conductividades más altas, indica un sistema sometido a procesos de evaporación intensísimos, que alcanza la saturación en algunos minerales, precipitándolos.

Los contenidos de metales pesados son bajos, aunque esporádicamente se superan los niveles de potabilidad para el cadmio y cromo, así como hierro y manganeso. Es previsible que los iones metálicos de alta densidad precipiten en los primeros estadios y se acumulen en la fase sólida.

Hay considerables concentraciones de pesticidas orgánicos: aldrina, lindano, heptaclorohexano, 2, 4-D (IDE) y 2, 4, 5-T (ME) principalmente. Estos compuestos se concentran en la fase acuosa con escasa preferencia por la fase sólida.

Por otra parte, los valores de DQO no son excesivamente altos, por lo que gran parte de la materia orgánica en suspensión debe tender a coprecipitar con las sales inorgánicas.

### **3.- LAS AGUAS SUBTERRANEAS**

El Parque Nacional de Doñana se localiza en el extremo meridional del sistema acuífero número 27, y dentro de éste en la subunidad Almonte Marismas, que abarca una superficie del orden de 2.300 km<sup>2</sup>, limitada, al norte por el Tinto y los afloramientos de las margas azules del Mioceno superior-Plioceno, al este y suroeste, los ríos Guadiamar y Guadalquivir, y de noroeste a sureste, el océano Atlántico (ver plano general).

El comportamiento hidrogeológico de estos límites es distinto. Las margas azules se presentan como afloramientos de la base impermeable, el Guadiamar como divisoria de aguas subterráneas con la subunidad de Espartinas, el océano con límite a nivel constante, el Tinto como eje de drenaje, y el Guadalquivir, prácticamente, es independiente del acuífero, ya que está separado de las formaciones permeables por el nivel semipermable de las marismas.

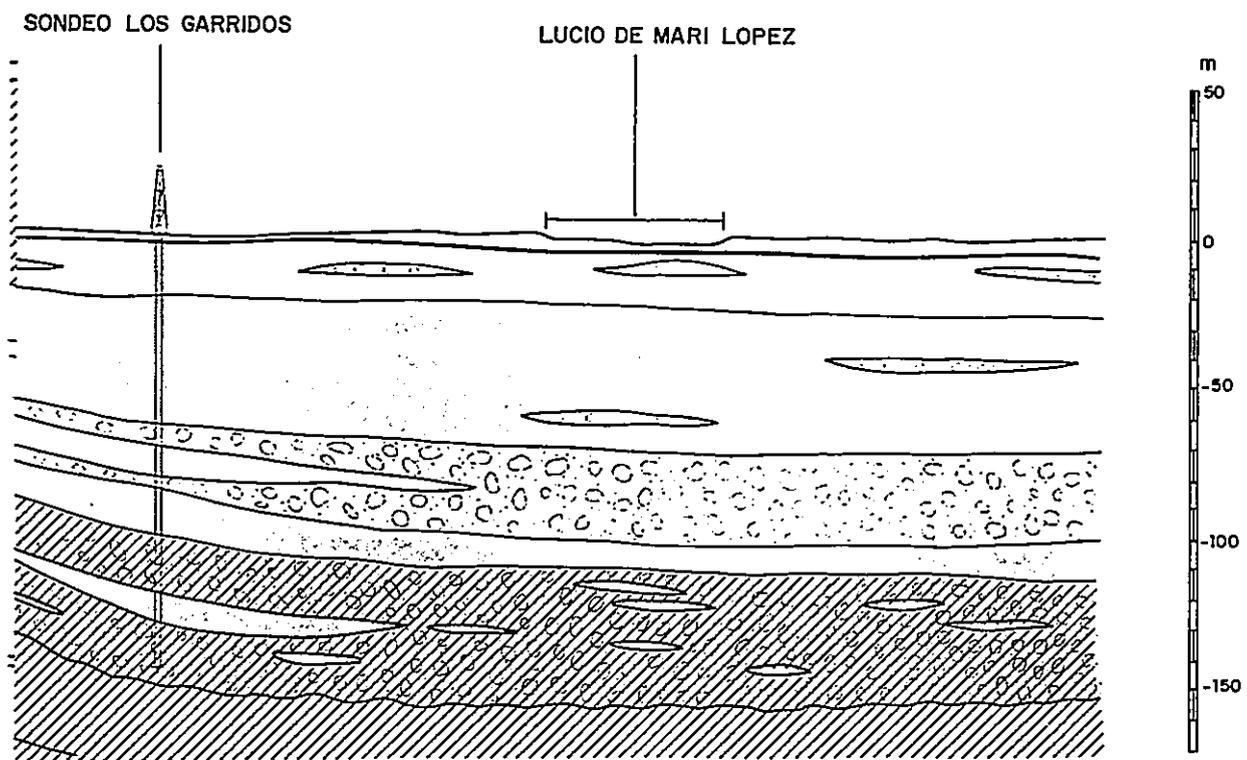
La topografía de toda la región es bastante suave, sobre todo en la zona de marismas donde es prácticamente llana.

#### **3.1. LAS FORMACIONES ACUIFERAS. POTENCIAS**

Las formaciones geológicas que constituyen el acuífero del subsistema de Almonte-Marismas se pueden agrupar, de forma sintética, en: (ver mapa general y cortes localizados en los planos números 5 y 6):

- Arenas basales del Pliocuaternario. Su espesor varía entre algunos metros a la altura de Almonte, 80 a 100 m en el borde las marismas, y un orden de 200 m en el extremo más meridional bajo las marismas.

SE.



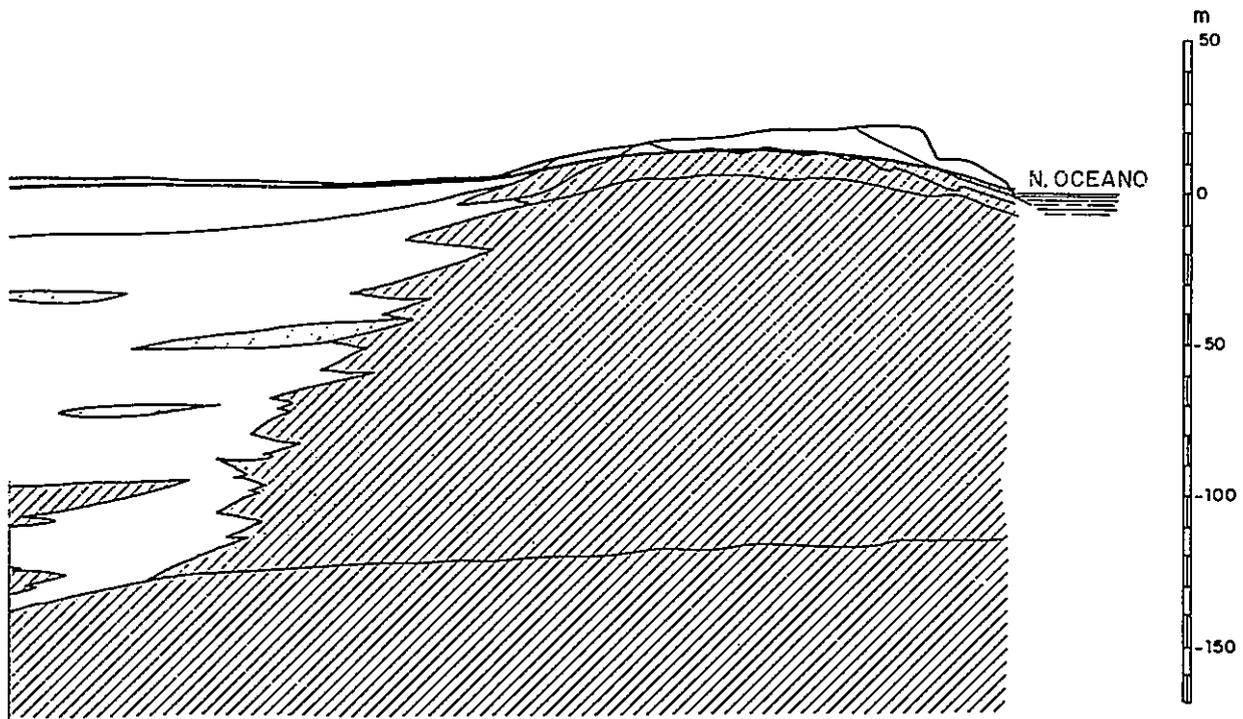
CORTE HIDROGEOLOGICO I-I'



INSTITUTO GEOLOGICO  
Y MINERO DE ESPAÑA

PLANO N° 5

SW.



ados ( Formación roja)

CORTE HIDROGEOLOGICO II-II'

lce

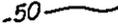
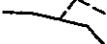
lada



**INSTITUTO GEOLOGICO  
Y MINERO DE ESPAÑA**

PLANO Nº 6

## LEYENDA

-  Cota del techo
-  Marismas
-  Limites del Parque y Preparque

NOTA- Las líneas de igual cota se han tomado del " INFORME FINAL de los SONDEOS de la ZONA REGABLE de ALMONTE- MARISMAS y SINTESIS HIDROGEOLOGICA" IRYDA 1.976.



## COTA DE LAS MARGÁS AZULES



**INSTITUTO GEOLOGICO  
Y MINERO DE ESPAÑA**

PLANO N<sup>o</sup> 7

- Barra costera y dunas actuales, formadas por arenas de origen eólico y dunas antiguas. Los espesores máximos son superiores a 60 m.
- Materiales cuaternarios de las marismas, constituidos por un nivel de grava y cantos rodados bastante continuo cuyo espesor varía entre 10 y 30 m. Además de este nivel inferior existe, generalmente, otro más superficial y de menor continuidad lateral formado por lentejones de 5 a 30 m de espesor y formados, igualmente, por gravas y cantos rodados.

Estos tres términos son los principales componentes del acuífero. Asociados a los dos primeros se encuentran las tres siguientes formaciones permeables:

- Manto eólico y dunas antiguas: constituidas por arenas finas y algunas intercalaciones de arcillas menos importantes; afloran en la parte más occidental del Parque. Su potencia es variable alcanzando valores máximos de 7 a 8 m.
- Formación roja del Cuaternario antiguo y Plioceno superior: está constituida por gravas, arenas y conglomerados rojizos con matriz arcillosa. En esta formación son muy frecuentes los cambios laterales de facies. Su potencia es muy variable, llegando a alcanzar como máximo los 15 a 20 m.
- Terrazas fluviales: Formadas, principalmente, por niveles de gravas y cantos rodados englobados en una matriz areno-arcillosa, que pueden llegar a tener hasta 30 m de espesor.

A partir de los datos de sondeos y de las prospecciones geofísicas realizadas, se conoce que la potencia global de las formaciones permeables varía, en la zona libre, de 15 a 20 m al norte a 80 a 100 m al sur. Por debajo de las marismas incrementa aún más su potencia llegando a alcanzar valores del orden de 200 m en una gran extensión (ver plano nº 8).

### 3.2. EL MURO DEL ACUIFERO

Todo el conjunto permeable descansa en las margas azules del Mioceno superior-Plioceno inferior, que constituyen, por tanto, la base del acuífero. Ya se ha indicado que presentan una morfología suave, con una disminución progresiva de cotas de norte a sur, de modo que en el límite septentrional se encuentran a unos 100 m s.n.m., mientras que en el meridional están por debajo de las marismas, a una cota de unos 200 a 250 m bajo el nivel del mar. Se ha constatado la existencia de dos vaguadas en el fondo impermeable, que se sitúan, aproximadamente, por debajo del arroyo de La Rocina y del río Guadiamar (ver plano número 7).

### 3.3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

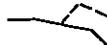
En la subunidad Almonte-Marismas se han inventariado más de mil puntos de agua. Aproximadamente la mitad corresponden a sondeos y el resto a pozos y pequeños manantiales. Los datos hidrogeológicos correspondientes se encuentran en el Archivo Nacional de Puntos de Agua del ITGE.

## LEYENDA

Potencia en metros de la formación permeable saturada



Marismas



Limites del Parque y Preparque

NOTA- Las líneas de igual potencia se han tomado del "INFORME FINAL de los SONDEOS de la ZONA REGABLE de ALMONTE-MARISMAS y SINTESIS HIDROGEOLOGICA" IRYDA 1.976.



POTENCIA DE LOS NIVELES PERMEABLES SATURADOS



**INSTITUTO GEOLOGICO  
Y MINERO DE ESPAÑA**

PLANO Nº 8

Los pozos tienen profundidades, casi siempre, inferiores a 10 m. La mayoría se sitúa en la zona norte del acuífero y presentan unos caudales que, en general, son inferiores a los 2 l/s. En las zonas costeras existen algunas captaciones a base de grandes zanjas de drenaje, que tienen una profundidad, generalmente, inferior a 6 m.

En el área estudiada no hay manantiales significativos. Existen surgencias temporales, pero están poco localizadas. Generalmente, las aguas drenadas pasan directamente a la escorrentía superficial, o se evaporan, o bien, rellenan zonas relativamente deprimidas sin dar lugar a escorrentías superficiales fácilmente cuantificables.

Los sondeos se localizan, casi exclusivamente, en una franja situada al norte del Parque Nacional. Las profundidades son variables en función de su localización. En las zonas de acuífero libre raramente sobrepasan los 70 m y en las del acuífero en carga, alcanzan hasta los 150 ó más metros. Los caudales medios son del orden de 70 a 80 l/s, con mínimos de 20 a 30 y máximos de hasta 120 l/s. Se han realizado, además, otros sondeos en las proximidades de la costa (Matalascañas y Mazagón) destinados al abastecimiento de los importantes enclaves turísticos existentes en la zona.

En muchos de ellos se han realizado ensayos de bombeo, lo que permite disponer de un número considerable de datos de transmisividad del acuífero y algunos valores de porosidad y de coeficiente de almacenamiento.

En la tabla nº 2 se indican algunas características de los sondeos perforados dentro del recinto del Parque Nacional. El objetivo de los mismos es explotar aguas subterráneas que se utilizan para el llenado de lucios, como el del Lobo, Mari Lopez y Caño Travieso, que en el estiaje pueden quedar prácticamente secos.

#### 3.4. PIEZOMETRIA

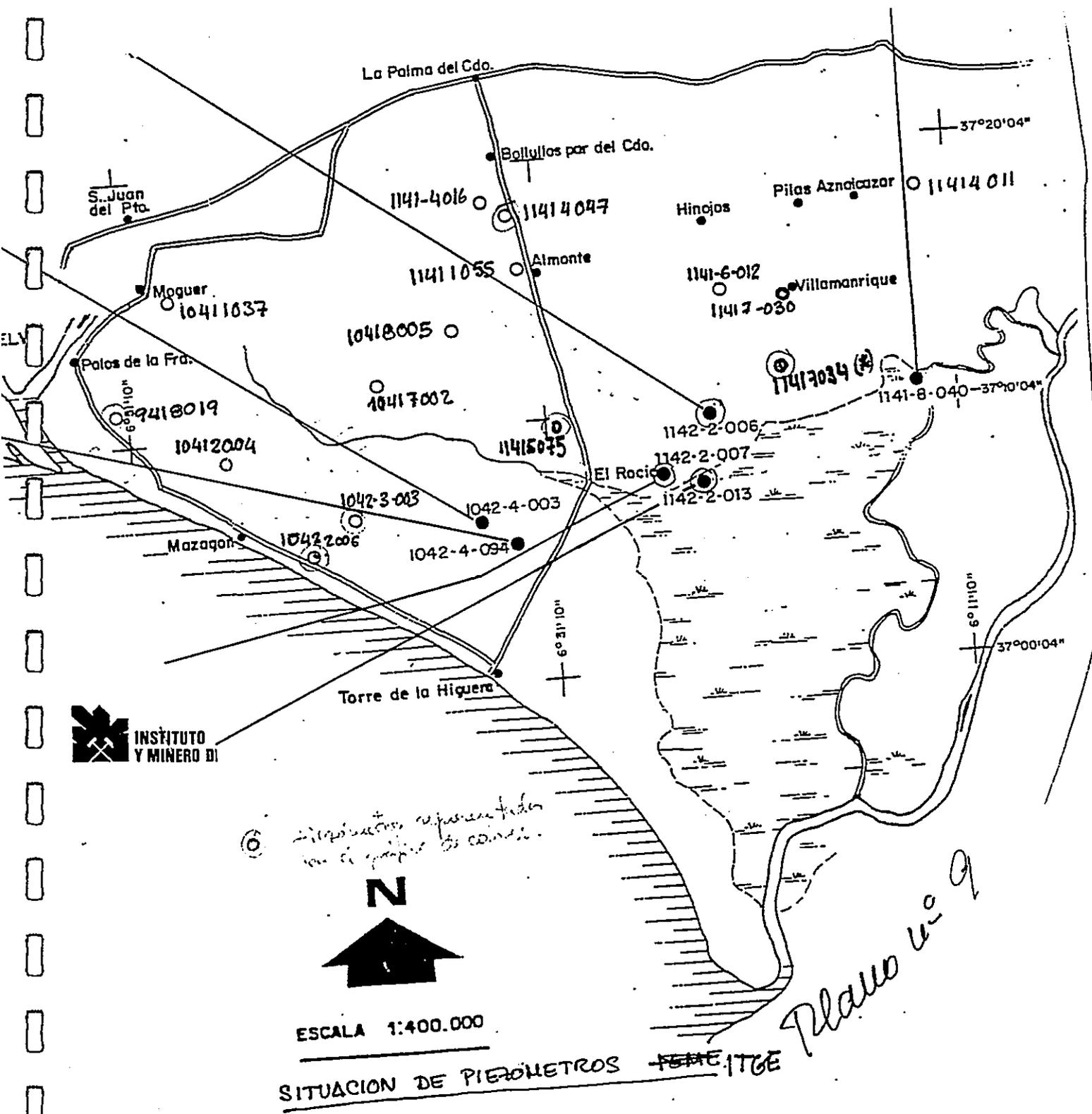
Durante los meses de junio y julio de 1982 y abril de 1989 se han llevado a cabo dos campañas generales de medidas piezométricas, cuyos resultados se señalan, en forma de isolíneas, en el plano general. Independientemente el ITGE controla una red más restringida y el IARA otra localizada en las zonas de explotación, en las que se miden los niveles periódicamente.

Como puede observarse, las piezometrías generales se adaptan bastante a la topografía; la profundidad a la que se encuentra el agua, es en un 90 por ciento de los puntos medidos inferior a 10 m, pudiendo establecerse como profundidad media, unos 6 m. Las mayores profundidades se localizan en la zona de Villamanrique de la Condesa-Hinojos-Almonte, donde se sitúa a unos 15 ó 20 m. Las mínimas se encuentran al sur de El Rocio, coincidiendo, en gran parte, con la zona ocupada por el Parque Nacional de Doñana, donde se encuentra a menos de 5 m, o incluso se sitúan sobre el terreno (zonas de surgencia).

Los gradientes hidráulicos medios que presenta la superficie piezométrica, son del orden del 5 por mil. Los valores máximos se sitúan en las proximidades del arroyo Alcarayón: 25 por mil, en la mitad más septentrional del sistema: 12 por mil y en la zona costera: 12 por mil. Los valores mínimos se corresponden con la zona de las marismas, que no llegan a superar un 0,25 por mil.

TABLA Nº 2.- CARACTERISTICAS DE LOS SONDEOS LOCALIZADOS EN EL  
P.N. DE DOÑANA

Situación sondeos	Profundidad (en m)	Cota del nivel estático (en m s.n.m)	Cota de la base impermeable (en m s.n.m)	Cota del techo del acuífero (en m s.n.m)	Caudales aforados (en l/s)
Lucio del Lobo	238,00	+1,89	-223	-104,96	110,47
Lucio de Mari López	153,85	+1,50	-153	-114,00	135,41
Caño Travieso Nº 1	210,00	+0,27	-205	- 95,00	125,98
Caño Travieso Nº 2	182,00	Surgente	-184	- 77,00	131,66
Al Sur de El Rocío	40 a 120	+16 a 0	-113 a -20	-39 a +7	30 a 115
Palacio	210,00	+1,10	-193	- 48,00	30,00



① Piezómetros representados  
con el símbolo de círculo.

(\*) Piezometro IARA.

Plano nº 10.

Evoluciones pizométricas

Las variaciones de niveles piezométricos estacionales son del orden de 3 m. En algunos piezómetros situados en la zona de transformación se constata, para los últimos años descensos continuos de nivel, que en algún caso llega a superar, en el período 1979-1988, los 6 metros (ver planos números 9 y 10).

### 3.5. FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO DEL ACUIFERO

La Unidad Almonte-Marismas es un acuífero de tipo detrítico, con permeabilidad primaria por porosidad intergranular. Tal como se ha señalado anteriormente, se comporta como acuífero libre, donde afloran las arenas, y como semiconfinado, por debajo de las marismas.

#### 3.5.1. Recarga natural del acuífero

La entrada de agua al acuífero se origina a partir de la infiltración directa de parte del agua de lluvia caída sobre la superficie del acuífero libre. En función de la capacidad de infiltración del terreno, se pueden distinguir tres zonas, según un orden decreciente de poder infiltrante:

- área oeste y cordón litoral, que está constituido por arenas muy permeables
- área que bordea las marismas, formada por arenas permeables que presentan una topografía suave, y
- área norte en la que se encuentran arenas y limos con una topografía más acentuada.

Por distintos métodos indirectos se ha evaluado la tasa media de infiltración anual para el conjunto de la subunidad Almonte-Marismas, que resulta ser del orden de 200 hm<sup>3</sup>.

### 3.5.2. Drenaje del acuífero

Si bien la recarga natural del acuífero es un fenómeno esencialmente discontinuo en el tiempo, la descarga se presenta de una forma prácticamente ininterrumpida, salvo la ocasionada por los bombeos.

La localización de las zonas en que se produce, así como su evaluación, se ha llevado a cabo por distintos métodos, que posteriormente, se ajustaron en la etapa de modelización.

El drenaje del acuífero se produce:

- a) en los rios y arroyos cuando el nivel piezométrico del entorno se encuentra más elevado que los cauces.
- b) en la costa, directamente al mar.
- c) en los campos de bombeo
- d) en el borde norte, en el contacto con las margas azules
- e) en las zonas con nivel piezométrico muy superficial o con eucaliptus, por evapotranspiración.
- f) en la zona de maismas, por un drenaje ascendente a través del semipermeable. ←

g) aunque sin verificar, posiblemente de forma directa al mar, desde el acuífero en carga al oceano, en la zona localizada bajo el Guadalquivir.

El volumen medio anual drenado en las zonas a) y d) se estima en unos  $30 \text{ hm}^3$ , en la b) en algo menos de  $40 \text{ hm}^3$ , en la e) en unos  $75 \text{ hm}^3$ , en la f) y g) en unos  $15 \text{ hm}^3$ . El drenado por bombeos se indica en el subapartado siguiente.

#### 3.5.2.1. Explotación del acuífero

El aprovechamiento actual de parte de los  $200 \text{ hm}^3$  /a en que se han estimado los recursos subterráneos se lleva a cabo mediante bombeos.

En la tabla nº 3 se presentan los consumos de agua subterránea, originados en los abastecimientos de los distintos núcleos urbanos del área, obtenidos mediante la realización de encuestas directas llevadas a cabo por el ITGE. En conjunto la población es de unos 82.000 habitantes en invierno y unos 200.000 en verano. El consumo total estimado es del orden de  $5,8 \text{ hm}^3$  anuales.

Contabilizando un porcentaje de agua consumida y no facturada del 20%, se deduce que las extracciones de agua subterránea, en el acuífero Almonte-Marismas, destinadas para abastecimiento urbano suponen un volumen medio anual de unos  $7 \text{ hm}^3$ .

TABLA Nº 3.- CONSUMO DE AGUA EN ABASTECIMIENTOS URBANOS

NUCLEO URBANO	POBLACION DE DERECHO 1986	CONSUMO SEGUN FACTURAC. EN m <sup>3</sup> /año	DOTACION m <sup>3</sup> /hab/ año
Almonte (Casco urbano)	12.713	396.000	31,1
Almonte (El Rocío)	1.111	146.000	131,4
Almonte (Mastalascañas)	780(1)	1.800.000	80,0
Bollullos Para del Condado.	12.304	453.600	36,9
Bonares	4.872	173.000	35,6
Chucena	1.914	73.000	38,1
Hinojos	3.421	205.312	60,0
Lucena del Puerto	1.988	83.038	41,8
Manzanilla	2.471	115.474	46,7
Moguer (Mazagón)	2.000(2)	492.100	32,5
Niebla	3.941	292.000	74,1
Palma del Condado (La)	9.252	273.600	29,6
Pilas	10.173	588.560	57,8
Rociana	6.153	263.000	42,7
Villalba del Alcor	3.770	168.446	44,7
Villamanrique de la Condesa.	3.423	157.529	46,0
Villarrasa	2.246	116.800	52,0
T O T A L E S	82.532	5.798.059	

(1) En verano unos 80.000 habitantes

(2) En verano unos 50.000 habitantes

TABLA N° 4.- EVOLUCION DE LA SUPERFICIE EN RIEGO DE LA ZONA ALMONTE-MARISMAS Y SU ENTORNO

→ Hej/orej

AÑO	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
<b>RESUMEN POR SECTORES</b>																			
<b>SECTOR I (VILLAMANRIQUE)</b>																			
-Riegos particulares	-	-	160	160	160	160	295	295	510	590	670	685	685	910	1055	1135	1135	975	975
-Riegos I.A.R.A.	-	-	-	-	-	60	60	60	60	60	60	60	60	-	-	-	-	800	1485
TOTAL SECTOR I.	-	-	160	160	160	220	355	355	570	650	730	745	745	910	1055	1135	1135	1775	2460
<b>SECTOR II (EL ROCIO)</b>																			
-Riegos particulares	600	600	600	650	650	675	710	710	740	880	980	1000	1020	1040	1060	1160	1120	1170	1170
-Riegos I.A.R.A.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	150	225	275	425	900	1230	1230	1530
TOTAL SECTOR II	600	600	600	650	650	675	710	710	740	880	1080	1150	1245	1315	1485	1960	2350	2400	2700
<b>SECTOR III (MARISMAS)</b>																			
-Riegos particulares	-	-	-	-	40	90	140	260	410	535	555	750	950	1200	1400	1940	1980	1740	1740
-Riegos I.A.R.A.	-	-	-	-	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
TOTAL SECTOR III	-	-	-	-	75	125	175	295	445	570	590	785	985	1235	1435	1975	2015	1775	1775
<b>TOTAL ZONA ALMONTE-MARISMAS</b>																			
-Riegos particulares	600	600	760	810	850	925	1145	1265	1660	2005	2205	2435	2655	3150	3515	4135	4235	3885	3885
-Riegos I.A.R.A.	-	-	-	-	35	95	95	95	95	95	195	245	320	310	460	935	1265	2065	3050
TOTAL RIEGOS	600	600	760	810	885	1020	1240	1360	1755	2100	2400	2680	2975	3460	3975	5070	5500	5950	6935

En cuanto al aprovechamiento agrícola, en la tabla nº 4 se indica la evolución, desde 1968 a 1986, del número de hectáreas regadas en la zona de Almonte-Marismas y su entorno. Se observa que en el período la superficie ha variado de unas 600 ha a cerca de 7.000.

En la tabla nº 5 se resumen las estimaciones llevadas a cabo por distintos organismos, para 1988. Como se observa, existen para el total del sistema acuífero una superficie de regadío de 14.464 ha de las que 6.780 corresponden a riegos estatales (IARA) y el resto 7.684, a riegos de iniciativa privada.

Las dotaciones medias, según la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir son de 6.000 m<sup>3</sup>/ha/año para los riegos del IARA y 4.000 para los particulares.

De acuerdo con estas cifras se obtienen los siguientes valores de explotación media para regadío:

	hm <sup>3</sup> /año
- Volumen medio de la explotación para riegos del IARA .....	40,7
- Volumen medio de la explotación para riegos de particulares .....	30,7
- TOTAL .....	71,4

si se supone que de estas explotaciones, un 18% retornan al acuífero, la explotación neta fue del orden de 58 hm<sup>3</sup>/año.

Además de las extracciones destinadas a abastecimiento urbano y regadío, en el palacio de Doñana y en la zona de marismas se extrae un volumen anual medio del orden de  $0,2 \text{ hm}^3$  para alimentar artificialmente, durante los meses de abril a octubre, una serie de lagunas y lucios.

Se tiene, por tanto, que la explotación actual del acuífero, mediante bombeos, y para todos los usos, es del orden de  $65 \text{ hm}^3$  anuales.

### 3.5.3. Circulación del agua subterránea

El sentido de la circulación del agua subterránea en el acuífero libre se dirige, fundamentalmente, hacia las marismas, salvo en la franja costera, en la que parte de esta circulación presenta una dirección hacia el océano, y en la franja septentrional que es hacia el Tinto.

Al alcanzar el agua subterránea a la zona de las marismas, el funcionamiento hidrogeológico se hace muy complejo debido a varias razones, entre las que se señalan las siguientes:

- El acuífero pasa de libre a semiconfinado.
- La formación permeable infrayacente a las marismas no presenta ninguna zona de drenaje directo, salvo (quizás) al océano a través de una estrecha franja situada bajo la desembocadura del Guadalquivir. Entre la desembocadura y Matalascañas no puede existir un drenaje de las marismas al océano, ya que la piezometría muestra que en el cordón litoral y dunas existe una divisoria de aguas subterráneas, paralela a la costa, con sentidos de flujo hacia las marismas (mitad oriental) y hacia el océano (mitad occidental).

TABLA Nº 5.- SUPERFICIES EN RIEGO CON AGUAS SUBTERRANEAS

PROVINCIA	TIPO RIEGOS	ha	ZONA / FINCA	FUENTE INFORMACION
HUELVA	I.A.R.A.	3.530	Subsectores II-9, II-10, II-11 II-14,II-16 y II-17	I.A.R.A. Datos del 18-11-1988
	Particulares Sector II	850	Los Mimbrales, La Cañada	I.A.R.A. Datos del 18-11-1988
	Particulares Fuera Sector	300	El Alamillo y El Alamo	
	Término munic.Moguer	2.338	Las Madres,Sta.Catalina,Calde- rón, Las puercas... etc.	Cámara agrária
	Término munic.Palos de la Frontera	678(1)		Cámara agrária
SEVILLA	Término munic.Luce- na del Puerto	290		Cámara agrária 1-11-1988
	I.A.R.A.	3.250	Subsectores I-2,I-3,I-4,I-5 parcela Sector III	I.A.R.A. Datos del 18-11-1988
	Particulares Villamanrique (I)	53	La Carpintera y La Molineta	I.A.R.A. Datos del 18-11-1988
	Particulares Aznalcázar (II)	1.138	Casanievas, Los Madrigales,Cerrado Huerto Gordo,Los Pescantes, La Sarteneja	
	Particulares Aznalcázar (III)	1.037	Pichardo, Partido Resina, Hato Ratón	
Particulares Aznalcázar (IV)	1.000	Hato Blanco Nuevo, Hato Blanco Viejo		
		14.464		

(1) Fresa 520 ha, Patatas 80 ha, Lechuga 12 ha, Pepino 6 ha, Berengena 2 ha, Tomate 23 ha, Pimiento 10 ha, otros: 25 ha.

- La formación semipermeable de las marismas puede contener agua con alta concentración salina y por tanto más densa que el agua dulce infrayacente, lo que puede imposibilitar, en gran parte, el flujo ascendente a través del semipermeable.

Los dos últimos factores condicionan y acotan el volumen de agua subterránea que puede pasar del acuífero libre al confinado, de modo que si el caudal subterráneo que procede del acuífero libre es mayor que un umbral determinado, el caudal en exceso tiene que resurgir, formando manantiales, humedales, etc. Este comportamiento se produce en una estrecha franja que incluye el contacto de ambos tipos de acuíferos, y que coincide con el ecotono de La Vera-La Retuerta.

Se tiene, en resumen, que una parte del agua subterránea que alcanza a la zona de marismas, debe emerger en una banda subparalela al contacto acuífero libre/semiconfinado, y el resto circulará por el acuífero profundo, del que emergerá bien a través del semipermeable, bien al océano por una zona bajo el Guadalquivir, bien por una conjunción de ambos procesos.

### 3.6. RESERVAS. SU PAPEL REGULADOR

El cálculo de las reservas de aguas subterráneas almacenadas en el acuífero solo se puede conocer de una manera muy aproximada, ya que no se tienen suficientes datos de porosidad eficaz del mismo. Extrapolando los existentes, se estima que en el acuífero libre existen alrededor de  $2.500 \text{ hm}^3$  de agua y en el semiconfinado unos  $3.000$ , lo que hace un conjunto de unos  $5.500 \text{ hm}^3$ .

Sin embargo, y pese a que el valor de las reservas, es muy superior al de los recursos anuales actualmente utilizados, la capacidad de movilización de las mismas se ve muy limitada, debido a las características hidrodinámicas del acuífero.

### 3.7. CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS

Los valores de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero, en el entorno inmediato del parque, son suficientemente conocidos. Se han calculado a partir de ensayos de bombeo, que han dado los siguientes resultados:

#### Transmisividad

La transmisividad del acuífero aumenta de noroeste a sureste, como consecuencia de los incrementos del espesor saturado y/o de la permeabilidad que se dan en el mismo sentido. Se pueden diferenciar las siguientes áreas:

- Area más septentrional: Las transmisividades suelen ser inferiores a  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.
- Franja que rodea a las marismas: En donde los valores medios son del orden de  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.
- Area de marismas: La transmisividad es, en general, superior a  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, llegándose a valores de hasta  $4 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s hacia el sector más oriental.

#### Permeabilidad

La evolución de las permeabilidades es muy parecida a la de las transmisividades: aumenta de noreste a sureste, según la siguiente zonalidad:

- Area más septentrional, con permeabilidades inferiores a  $4 \times 10^{-6}$  m/s.
- Franja que rodea a las marismas, con valores medios comprendidos entre  $10^{-5}$  y  $4 \times 10^{-4}$  m/s.
- Zona de marismas, con permeabilidades superiores a  $10^{-4}$  m/s.

#### Coefficiente de almacenamiento. Porosidad eficaz

En el acuífero semiconfinado se han deducido valores de coeficiente de almacenamiento comprendidos entre  $10^{-4}$  y  $10^{-3}$ .

En la zona de acuífero libre, al sur de Almonte, existen abundantes áreas en las que se presenta un nivel de baja permeabilidad, bastante superficial y discontinuo, que actúa como capa semiconfinante. Este nivel es el causante de que se origine durante los primeros tiempos de bombeo un comportamiento anómalo del acuífero, con valores del coeficiente de almacenamiento del orden de  $2 \times 10^{-4}$  a  $2 \times 10^{-3}$ . Sin embargo, para explotaciones prolongadas hay que considerar la porosidad eficaz que varía entre el 2 y 5 por ciento.

#### **3.8. CALIDAD NATURAL DEL AGUA SUBTERRANEA EN EL ACUIFERO DE ALMONTE-MARISMAS**

Atendiendo a la calidad del agua subterránea se pueden diferenciar en el acuífero tres sectores:

- . el acuífero libre,
- . la parte del acuífero en carga con agua dulce y
- . el resto del acuífero en carga y los lentejones permeables incluidos en las formaciones semiconfinantes con aguas con elevado contenido en sales.

Las características químicas de las aguas de estos tres sectores se han estudiado en función de los contenidos en cloruros, sulfatos y total de sólidos disueltos.

En el primer sector, en el acuífero libre, las aguas son de muy buena calidad. Los contenidos en cloruros, en la mayor parte del acuífero, son inferiores a las 25 ppm, aunque existen áreas aisladas, muchas veces representadas por un solo punto, con concentraciones comprendidas entre 25 y 350 ppm e incluso con valores superiores a los 350 ppm (ver plano nº 11).

Los sulfatos, en prácticamente todo el sector, están por debajo de las 400 ppm con amplias zonas en las que no se alcanzan ni siquiera las 25 ppm. Como en el caso de los cloruros existen algunas áreas aisladas, sin ninguna representatividad, donde se superan las 400 ppm (ver plano nº 12).

El total de sólidos disueltos es inferior, en una gran parte, a los 750 ppm y, en el resto, se presentan contenidos comprendidos entre 750 y 1500. Únicamente en algunos puntos aislados se supera este último valor (ver plano nº 13).

En el acuífero semiconfinado existe agua dulce y agua salada, separadas por una interfase cuya posición actual, aunque mal conocida, se encuentra al oeste del brazo de La Torre.

El agua del segundo sector definido, que coincide con la situada al oeste de la interfase se ha

podido analizar en algunos puntos. Presenta una calidad muy similar a la del acuífero libre, con concentraciones bajas y medias de cloruros, sulfatos y total de sólidos disueltos.

Por último, en el tercer sector, que coincide con el acuífero semiconfinado situado al este de la interfase y con los lentejones permeables incluidos en la formación semiconfinante de las marismas o en las margas azules infrayacentes al acuífero, las aguas presentan contenidos en cloruros y en total de sólidos disueltos de varios gramos por litro.

### 3.8.1. Calidad de las aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana

Limitándose el recinto ocupado por el Parque Nacional de Doñana, aún a pesar del escaso número de puntos donde es posible tomar muestras del agua subterránea, se pueden establecer las siguientes consideraciones para cada uno de los parámetros analizados:

#### Cloruros

En general se presentan contenidos inferiores a las 25 ppm existiendo puntos aislados donde se sitúan entre 25 ppm y 350 ppm y otros en que las concentraciones superan el límite de 350 ppm. Al este de la interfase las aguas subterráneas evolucionan de cloruradas

cálcico-magnésicas a cloruradas sódicas y, lógicamente, las concentraciones en iones cloruro son bastante elevadas, superándose claramente las 2.000 ppm.

#### Sulfatos

Prácticamente en todas las muestras analizadas, procedentes de sondeos de la zona de marismas, no superan las 25 ppm. En el resto del área los contenidos están comprendidos entre 25 y 400 ppm, no sobrepasándose esta última concentración en ninguna de las muestras analizadas.

#### Total de sólidos disueltos

En la mayoría de los análisis, el contenido total de sales disueltas no llega a 750 ppm y en el resto de las aguas del acuífero dulce presentan concentraciones entre 750 y 1.500 ppm. Únicamente se han encontrado valores superiores a 1.500 ppm en las aguas procedentes de la fase salina del acuífero semiconfinado.

### **3.9. CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS**

En la subunidad hidrogeológica de Almonte Marismas, la zona de acuífero libre es la más vulnerable y dentro de ella las que presentan mayor permeabilidad (dunas y arenas basales) y menor profundidad del nivel piezométrico.

Las causas potenciales de la contaminación, pueden dividirse en cuatro grupos, relacionados con la actividad humana que los origina:

- Vertederos de residuos sólidos urbanos, aguas residuales.
- Vertidos industriales
- Actividades agrícolas extensivas, fertilizantes, pesticidas
- Bombeos excesivos que demanden aguas subterráneas situadas en zonas alejadas del acuífero y que sean de mala calidad.

Se analiza a continuación la incidencia de estas actividades en el acuífero de Almonte-Marismas bien entendido que, por el momento, el acuífero, tanto fuera como dentro de los límites del Parque Nacional, no sufre problemas graves de contaminación que puedan afectar seriamente ni a los usos del agua subterránea ni a la ecología de la zona.

### 3.9.1. Focos potenciales de contaminación de origen urbano o industrial

#### a) Vertederos de residuos sólidos urbanos

Se resumen en la tabla nº 6 la cuantía de los vertidos producidos en los principales núcleos urbanos durante 1986, según datos de encuestas directas, llevadas a cabo por el ITGE en los diferentes municipios de la zona.

TABLA Nº 6.- RESIDUOS SOLIDOS URBANOS GENERADOS.

<u>MUNICIPIOS</u>	<u>HABITANTES</u>	<u>R.S.U. (t/año)</u>
Almonte (Núcleo urbano)	12.713	4.590
Almonte (El Rocío)	1.111	2.025
Almonte (Playa de Matalascañas)	780(1)	6.480
Aznalcázar	3.070	1.300
Bollullos Par del Condado	12.304	4.600
Bonares	4.872	1.836
Chucena	1.914	475
Hinojos	3.421	1.071
Huevar	2.071	871
Lucena del Puerto	1.988	612
Manzanilla	2.471	630
Moguer (Núcleo urbano)	9.100	6.120
Moguer (Mazagón)	2.000(2)	6.300
Niebla	3.941	1.000(3)
→ Palmadelp Condado (La)	9.252	2.500
Palos de la Frontera	6.406	4.284
Pilas	10.173	3.336
Rociana	6.153	3.000
→ Villalbadel Alcor	3.770	3.060
Villamanrique de la Condesa	3.423	1.120
Villarrasa	<u>2.264</u>	<u>670(3)</u>
TOTAL	103.179	55.819

(1) En verano unos 80.000 habitantes

(2) En verano unos 50.000 habitantes

(3) Se vierten en el vertedero de Huelva

## LEYENDA

- ▲ Nucleo de población abastecido con aguas subterráneas
- ▽ Nucleo de población abastecido con aguas superficiales y subterráneas
- ◇ Sondeo de abastecimiento urbano
- Pozo de abastecimiento urbano
- Potencia aproximada en metros de la formación permeable no saturada
- Dirección del flujo subterráneo
- Vertedero de residuos sólidos
- Vertedero de aguas residuales
- ▨ Principales explotaciones agrícolas. Numero de ha
- ♂ Desagüe agrícola
- ▲ Depuradora de aguas residuales
- △ Depuradora de aguas residuales fuera de servicio
- └─ Muro de encauzamiento



ESCALA GRAFICA

## PRINCIPALES FOCOS CONTAMINANTES

POTENCIA APROXIMADA DE LA FORMACION PERMEABLE NO SATURADA



**INSTITUTO GEOLOGICO  
Y MINERO DE ESPAÑA**

PLANO Nº 14

Se producen, por tanto, algo más de 55.000 t/año de residuos sólidos urbanos, que, prácticamente todos, se vierten en una serie de basureros incontrolados distribuidos por el área de estudio; la situación puede verse en el plano nº 14. Los lixiviados producidos, al infiltrarse en las formaciones permeables, pueden originar contaminaciones puntuales del acuífero en el entorno del vertedero.

b) Vertidos líquidos urbanos e industriales.

La localización de éstos puede verse igualmente en el plano nº 14. Prácticamente en ninguno existe depuración y el vertido se realiza en algún arroyo próximo. Como en el caso anterior pueden originar la degradación local de la calidad de las aguas subterráneas, cuando la infiltración contaminada que producen alcance el nivel saturado.

El volumen anual se estima en un orden 7 hm<sup>3</sup>, cifra que coincide con el 85 por ciento del consumo de agua de abastecimiento. La distribución por municipios y los tipos de residuos se resumen en la tabla nº 7.

c) Contaminación agrícola.

La contaminación de aguas subterráneas por actividades agrícolas suele ser casi siempre de tipo extensivo, siendo el ión nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) el agente contaminante más abundante.

El empleo de fertilizantes nitrogenados en las zonas de regadíos origina que una parte del N que contienen se infiltre hacia el acuífero, disuelto en las aguas de riego.

TABLA Nº 7.-

RESIDUOS LIQUIDOS URBANOS  
GENERADOS

MUNICIPIO	Urbanos	Mataderos	Cooperativas vitivinícolas	Industrias vitivinícolas	Almazaras	Industrias alcoholeras	Ind. P. I. Huelva	Cosmética	Varios	Consumo de agua (según facturación de 1986) - en m <sup>3</sup> /año	Volúmen de vertidos líquidos en hm <sup>3</sup> /año
Almonte	1	1	3		5				37	396.000(1)	0,337
Azualcazar	1								10	49.629	0,422
Bollullos Par del Condado	1	1	1	16	2	2			9	453.600	0,385
Bonares	1	1							3	173.600	0,148
Chucena	1	1	2		1				5	73.000	0,620
Hinojos	1	1	1				1		2	205.312	0,174
Huevar	1								3	260.000	0,221
Lucena del Puerto	1	1							2	83.038	0,706
Manzanilla	1	1	1		1				2	115.474	0,981
Moguer	1	1					1		3	511.000(2)	0,434
Niebla	1	1							5	292.000	0,248
Palma del Condado (La)	1		2						5	273.600	0,233
Palos de la Frontera	1						5		5	580.000	0,493
Pilas	1	1		5	2				7	588.560	0,500
Rociana	1		2			1			3	263.000	0,223
Villalba del Alcor	1		1						2	168.446	0,143
Villamanrique de la Condesa	1								1	157.529	0,134
Villarrasa	1		1		1				1	116.800	0,993
											<u>7,395</u>
									TOTAL .....		7,395

(1) No incluye el consumo de El Rocio y Matalascañas

(2) No incluye el consumo de Mazagón

Si bien la presencia del  $\text{NO}_3$  en las aguas subterráneas se debe generalmente a esta causa, también contribuyen los vertidos de aguas residuales urbanas y en menor proporción, los vertederos de basuras.

Durante los meses de octubre y noviembre de 1982 se analizó el contenido en nitratos de 104 muestras, resultando que las concentraciones máximas, (ver mapa nº 15), se encuentran fundamentalmente en la zona de Palos de la Frontera y Moguer, y de forma más localizada alrededor de Hinojos y al sur y este de Villamanrique de la Condesa. En todas estas zonas se superan las 100 p.p.m.

Contenidos entre 50 y 100 p.p.m. se localizan alrededor de las anteriores, y en las proximidades de Bollullos Par del Condado, Rociana, Almonte, Pilas y Aznalcázar. Estas últimas contaminaciones probablemente tienen su origen en los vertidos líquidos residuales de dichas poblaciones y en el uso de abonos para la agricultura.

En el resto de la subunidad las aguas presentan contenidos en nitratos generalmente por debajo de las 25 p.p.m. en las zonas de acuífero libre. En el acuífero en carga prácticamente no se han detectado.

Dentro del sector del Parque Nacional de Doñana, los análisis realizados en los puntos de agua más significativos no han detectado concentraciones altas en nitratos, siendo éstas siempre inferiores a 25 p.p.m.

En lo que respecta a los pesticidas, que siempre en las aguas de superficie pueden ser considerados como contaminantes importantes, en el caso de las aguas subterráneas suelen ocasionar contaminaciones mucho

Plano N° 15.

(Coincide con el 17 del informe anterior)

menores, ya que son retenidos por el suelo vegetal y zona no saturada, y los que alcanzan el acuífero lo hacen en magnitudes prácticamente inapreciables.

d) Intrusión de agua salada.

El acuífero Almonte-Marismas es un acuífero costero; por otra parte, ya se ha indicado que existe una zona de aguas subterráneas salinas bajo la marisma. El acuífero se encuentra pues, sometido a un peligro potencial de intrusión de aguas saladas si la explotación por bombeo superase unos límites determinados.

En el sector costero, en Palos de la Frontera, Mazagón y Matalascañas se ha producido, en los últimos años un significativo aumento del volumen anual bombeo destinado, en el primer caso a regadío y, en los otros a satisfacer la demanda urbana generada por el turismo. Dichos incrementos en la explotación, con un carácter marcadamente puntual y estacional, no está suficientemente controlado pudiendo llegar a ocasionar, de persistir el actual ritmo de crecimiento en los volúmenes extraídos, problemas puntuales o zonales de sobreexplotación que tendrían como consecuencia la aparición de zonas con agua subterránea salada. ↗

En la zona del acuífero semiconfinado, la progresiva eliminación de las explotaciones situadas al oeste de la interfase, prácticamente eliminan el peligro de un avance hacia el oeste de esas aguas con elevada concentración salada.

### 3.10. MODELO MATEMATICO

En 1982, el IGME (hoy ITGE) elaboró, en base al programa bidimensional de Trescott, Prinder y Larson modificado y mejorado, un modelo digital del acuífero Almonte-Marismas. La discretización del acuífero se hizo mediante un mallado de dimensión variable, más densa en las zonas de explotación del acuífero.

La aplicación del modelo se ha llevado a cabo en tres fases. La primera, en 1982 en la que se caló en régimen permanente y transitorio con los datos existentes. La segunda en 1986 en la que se consideraron las lluvias caídas en el periodo 1982 a 1986 y las explotaciones correspondientes y se obtuvieron las evoluciones que proporcionaba el modelo empleado, comparándose estos resultados con las evoluciones piezométricas reales. Por último, la tercera se llevó a cabo en 1987 y consistió en determinar las evoluciones del nivel de las aguas subterráneas, previstas por el modelo para los 25 próximos años en función de unas extracciones y precipitaciones determinadas.

En síntesis, los resultados obtenidos en cada etapa han sido los siguientes: El modelo se caló, en 1982 con suficiente precisión y con el siguiente balance para un año medio: unos recursos hídricos del orden de  $250 \text{ hm}^3$ , de los que 200 se infiltran y 50 escurren superficialmente, tal como se indica en el siguiente cuadro:

	3 hm/a
<b>Entradas:</b>	
- Lluvia útil	<u>250</u>
	TOTAL 250
<b>Salidas:</b>	
- Escorrentía superficial .....	50
- Bombeos .....	44*
- Pérdidas por transpiración en zonas de eucapiltus .....	48
- Drenaje del acuífero al oceano .....	38
- Drenaje del acuífero a ríos, arroyos, etc. ....	30
- Pérdidas por evapotranspiración en zonas con nivel piezométrico muy superficial .....	25
- Drenaje del acuífero semiconfinado a través de las marismas .....	<u>15</u>
	TOTAL 250

\* Los bombeos se estimaron en 54 hm<sup>3</sup>/a, de los que 44 se pierden a la atmosfera o se incorporan a seres vivos, etc. y 10 retornan al acuífero.

Para el conjunto del acuífero, el modelo evidenció que los recursos que se exploten en cada zona del acuífero libre deben generarse en su entorno, es decir, no deben programarse grandes extracciones más o menos puntuales, que para satisfacerlas fuera preciso afectar a zonas alojadas, ya que no es posible conseguirlo.

En 1986 se aplicó el modelo para contrastar las evoluciones piezométricas reales con las que proporcionaba la simulación, en función de las precipitaciones y extracciones producidas cada año. La coincidencia entre ambas evoluciones fueron muy aceptables para la mayoría de los piezómetros, salvo en algunas áreas localizadas en el entorno meridional de Almonte y en áreas aisladas sin explotación es de importancia.

A la vista de estos resultados, en 1987 se llevó a cabo una simulación de la evolución de los niveles del agua subterránea hasta el año 2.010, suponiendo:

- que la piezometría se encontraba en 1984 según lo previsto mediante la aplicación del modelo.
- que desde 1985 hasta el año 2005 la precipitación es constante e igual a 576 mm, siendo igualmente invariable la infiltración y la explotación de las aguas subterráneas.
- que durante el periodo 2005 a 2010 la precipitación disminuye un 29% y, por tanto, la lluvia útil e infiltración también desciende, manteniendose constantes las extracciones, todo ello con el objetivo de agudizar los resultados obtenidos con el modelo.

Con estas hipótesis de partida se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1.- En el año 2005, tras veinte años de explotación, suponiendo una superficie regada de 5.500 ha (correspondiente a 1.984) y una lluvia constante e igual a 576 mm anuales, se producen descensos superiores a

los 20 metros en pequeñas zonas localizadas al norte en El Rocío. Descensos superiores al metro se detectan en tres áreas, dos tangentes al arroyo de la Rocina y una tercera al noroeste de la Marisma, con una superficie total del orden de 500 km<sup>2</sup>.

2.- En el año 2005, tras veinte años de explotación, con una superficie regada de 6.935 ha, y con una lluvia constante e igual a 576 mm anuales, los resultados son similares a los obtenidos en la pasada anterior, aunque con descensos más acusados. Existen pequeñas zonas, al norte de El Rocío en donde los descensos superan los 20 metros. Las tres áreas en las que se localizan descensos superiores al metro alcanzan ahora una extensión del orden de 650 km<sup>2</sup>.

3.- En el año 2010, tras veinticinco años de explotación con extracciones equivalentes a las indicadas en el punto anterior y lluvias constantes de 576 mm anuales hasta el 2.005 y 409 mm anuales desde esa fecha hasta el 2010, los resultados que se obtienen evidencian una generalización de los descensos superiores al metro a toda la parte central del acuífero, desde la costa al límite oriental. Los máximos descensos son del orden de 20 m y se localizan al norte de El Rocío. Los que superan los 10 metros se distribuyen en tres áreas, que se encuentran al norte y sur de El Rocío y al este de Villamanrique, con una extensión total del orden de 100 km<sup>2</sup>.

Con esta última hipótesis se producen unos descensos que son debidos, y en parte, a las extracciones en parte a las desfavorables condiciones climáticas simuladas. Los debidos a estos últimos se evidencian incluso en sectores de la zona de dunas no influenciados por los bombeos.



En el acuífero en carga existe una interfase agua dulce-agua salada cuya posición actual se encuentra al ESE de la zona estudiada. El sector situado al Noroeste de la interfase se ha podido analizar en muy pocos puntos. Al parecer tiene una calidad de agua muy similar a la del acuífero libre, con concentraciones bajas y medias de cloruros, sulfatos y total de sólidos disueltos. Por el contrario, en el sector situado al Sur de la interfase se alcanzan concentraciones de varios gramos/l de cloruros y total de sólidos disueltos.

En la zona de lentejones permeables incluidos en la formación semiconfinante de las Marismas, o en las margas azules infrayacentes al acuífero principal, las aguas presentan contenidos en cloruros y en total de sólidos disueltos parecidos a

## LEYENDA

-  Nucleo de población abastecido con aguas subterráneas
-  Nucleo de población abastecido con aguas superficiales y subterráneas
-  Sondeo de abastecimiento urbano
-  Pozo de abastecimiento urbano
-  Potencia aproximada en metros de la formación permeable no saturada
-  Dirección del flujo subterráneo
-  Vertedero de residuos sólidos
-  Vertedero de aguas residuales
-  Principales explotaciones agrícolas. Numero de ha
-  Desagüe agrícola
-  Depuradora de aguas residuales
-  Depuradora de aguas residuales fuera de servicio
-  Muro de encauzamiento



## PRINCIPALES FOCOS CONTAMINANTES

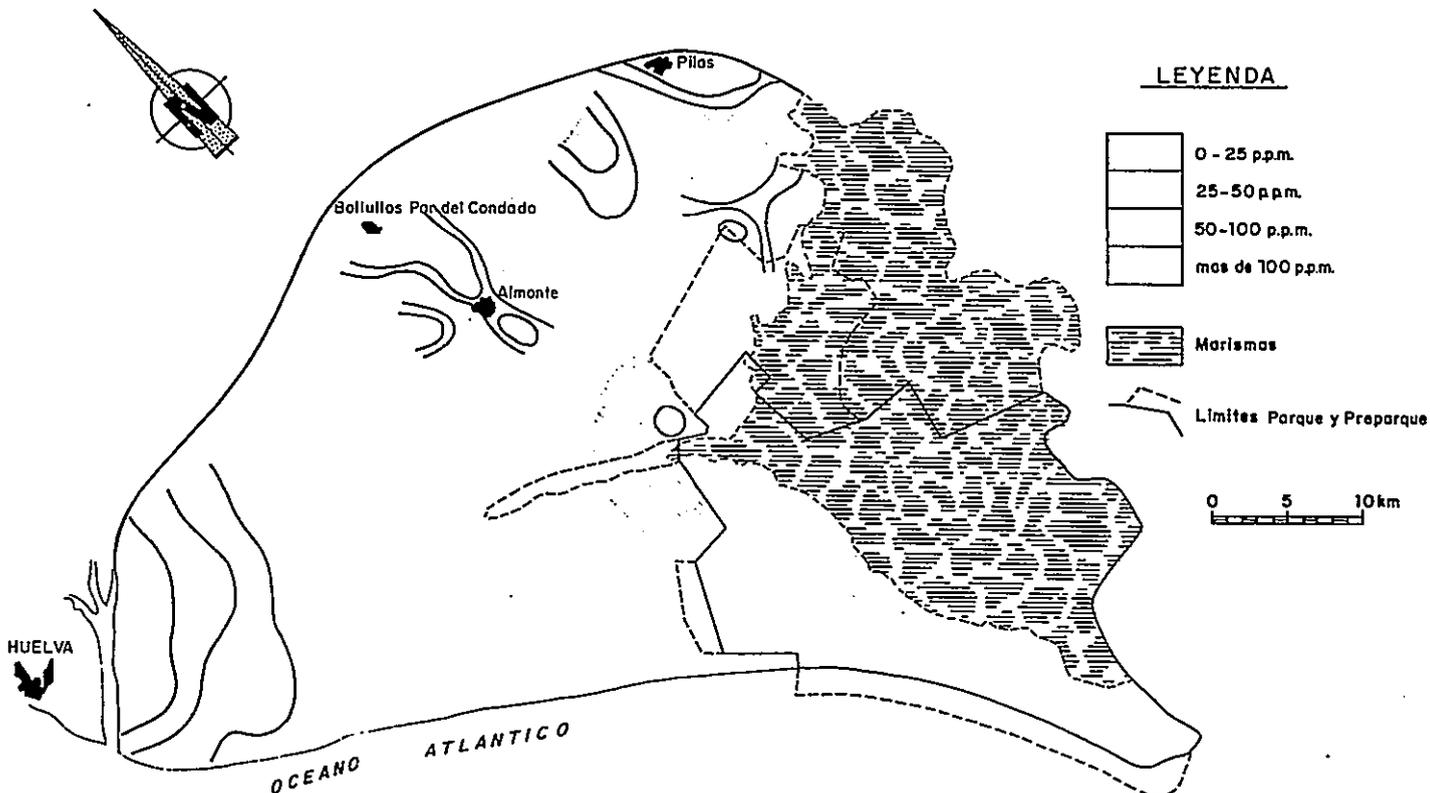
## POTENCIA APROXIMADA DE LA FORMACION PERMEABLE NO SATURADA



INSTITUTO GEOLOGICO  
Y MINERO DE ESPAÑA

PLANO Nº 1141

Si bien la presencia del  $\text{NO}_3^-$  en las aguas subterráneas se debe generalmente a esta causa, también contribuyen los vertidos de aguas residuales urbanas y en menor proporción, los vertederos de basuras, como se comprueba en el mapa núm. 15.



 INSTITUTO GEOLOGICO  
Y MINERO DE ESPAÑA

PLANO nº 15 13  
CONTENIDO EN NITRATOS

Si se supone que el "retorno de riego" es del orden del 20 por ciento del agua utilizada, la infiltración en los alrededores del Parque sería del orden de  $5 \text{ hm}^3$  anuales. Estas aguas tienen, presumiblemente, una elevada concentración en compuestos nitrogenados. Cabe esperar por tanto un aumento progresivo de la concentración de este ión en las aguas del acuífero. Este efecto puede ser relativamente rápido ya que la mayoría de los cultivos se sitúan en las zonas más vulnerables.

Estos resultados deben considerarse, exclusivamente como indicativos, ya que corresponden a unas hipótesis de partida muy rígidas e improbables (veinte años con lluvias de 576 mm anuales y las cinco siguientes con 409 mm anuales).

### **3.11. PROTECCION DEL ACUIFERO DE LA SUBUNIDAD ALMONTE-MARISMAS**

La protección de un acuífero debe plantearse atendiendo a la conservación de la calidad de las aguas que contiene y limitando la explotación por debajo de determinados niveles.

En relación con la protección de la calidad, ya se ha indicado cuales son sus causas y deben paliarse en lo posible, evitando los vertidos incontrolados urbanos e industriales y controlando al máximo el uso de abonos, fertilizantes, etc. en la agricultura, ya que prevenir las causas de la contaminación es relativamente fácil, pero corregir la originada, prácticamente imposible.

En cuanto a la explotación de las aguas subterráneas, el planteamiento es más complejo, ya que su cuantía depende de la recarga natural, reservas, características hidrodinámicas, etc., del acuífero y de las demandas generales. La determinación de las demandas tiene, a su vez, una clara componente social. Así, hasta el inicio de la década de los setenta, en la unidad AlmonteMarismas, la demanda fundamental era la agrícola, y en función de ella se estimó que la explotación del acuífero podría ser del orden de 145 hm<sup>3</sup>/año.

A partir de esas fechas la evolución de la sociedad española genera una nueva demanda: la satisfacción de las necesidades hídricas del Parque Nacional de Doñana, de importancia creciente y que, incluso, llega a desplazar a la anterior, de modo que los caudales aplicados en regadío han quedado muy por debajo de la cifra inicial prevista.

La importancia de esta nueva demanda incide, además, en el planteamiento de la estrategia del ITGE, ya que no solo solicita caudales de agua, sino conocimientos adicionales sobre el comportamiento del acuífero, conocimientos que en cualquier otro acuífero serían superfluos.

Así, para protegerlo adecuadamente en el entorno del Parque, el ITGE continúa la realización de estudios hidrogeológicos cada vez más detallados. Actualmente se investiga el comportamiento hidrogeológico de la zona no saturada del acuífero libre en las proximidades de las marismas.

En un futuro inmediato se eliminarán algunas simplificaciones que asume el modelo matemático actual, con el fin de aproximarse más a la realidad; se estudiará con mayor detalle, incluso con modelos matemáticos individualizados, las zonas más conflictivas del acuífero, se estudiará con mayor profundidad la geometría del mismo por debajo de la barra costera, entre Matalascañas y la desembocadura del Guadalquivir, etc. Todos estos estudios, y los que en cada momento se consideran de interés, quedarán perfilados e integrados dentro de la estrategia del Patronato del Parque Nacional de Doñana, organismo encargado de volar de la conservación de esa importante reserva, y del que el ITGE forma parte como

#### 4.- AGRADECIMIENTOS

El ITGE agradece la colaboración prestada para la realización de este Informe a todos los Organismos y Personas, públicos y privados y en especial a los siguientes:

- Instituto Andaluz de Reforma Agraria (IARA) : Juan Coronas y José Garrido.
- Instituto Nacional de Conservación de la Naturaleza (ICONA): Germán García y Ramón Coronado.
- Comisaría de Aguas del Guadalquivir: Diego Fidalgo y Antonio Silgado.
- Loic Ménanteau.

## 5.- BIBLIOGRAFIA

CAUCE 2000.- "Doñana, con el agua al cuello". Revista cultural, técnica y profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos. Número 16 enero-- febrero 1986.

COMISARIA DE AGUAS DEL GUADALQUIVIR (1982).- "Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional y zona de influencia".

ELIAS CASTILLO, F. y JIMENEZ ORTIZ, R.- "Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España". Ministerio de Agricultura. Madrid, 1965.

ELIAS CASTILLO; F. y RUIZ BELTRAN, L. (1977).- "Agroclimatología de España". INIA. Cuaderno número 7.

GRAN ENCICLOPEDIA DE ANDALUCIA

ITGE (1971).- "Programa Nacional de Investigación Minera. Mapa Hidrogeológico Nacional y programa previo de investigación de aguas subterráneas".

ITGE (1974).- "Memoria del Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares".

ITGE (1975).- "Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS):

- "Primer informe sobre el modelo matemático del acuífero de Almonte-marismas".

- "Informe hidrogeológico de Mazagón (Huelva)".

- "Informe hidrogeológico abastecimiento a la Palma del Condado (Huelva)".

ITGE (1976).- "Evolución de niveles piezométricos en los sistemas acuíferos. Cuenca del Guadalquivir. Serv. Publ. del Ministerio de Industria y Energía.

- "Informe preliminar sobre la realización y resultados del modelo matemático de Almonte-Marismas".
- "Modelo matemático del sistema acuífero de Almonte-Marismas".
- "Mapa hidrogeológico de Sevilla-Carmona".
- "Sondeo abastecimiento Mazagón I (Huelva)".
- "Informe técnico sondeo abastecimiento a Chuceña (Huelva).
- "Aforos sondeos fina Marismillas T.M. La Puebla del Río".
- "Manto acuífero Almonte-Marismas".

ITGE (1977).- "Estudio hidrogeológico Mazagón (Huelva)".

ITGE (1978).- "Contaminación de las aguas subterráneas en la región andaluza. Aspectos generales".

- "Informe técnico sondeo abastecimiento de Mazagón V (Huelva)".

ITGE (1969).- "Informe técnico sondeo abastecimiento a Pilas (Sevilla)"

ITGE (1980).- "Estudio gráfico del grado de cobertura por estudios hidrogeológicos en la cuenca del Guadalquivir".

- "Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca del Sur de España". Programa Nacional de Gestión y Conservación de los Acuíferos. Colección Informe. Serv. de Publ. del Ministerio de Industria y Energía.
- "Informe técnico sondeo finca El Zancarrón. La Palma del Condado (Huelva)".
- "Informe técnico abastecimiento a Lucena del Puerto (Huelva)".
- "Informe técnico pozo abastecimiento a Lucena del Puerto (Huelva)".
- "Estado de los trabajos. Cuenca del Guadalquivir".

ITGE (1982).- "Estudio hidrogeológico actualizado del sistema acuífero nº 27: Unidad Almonte-Marismas".

- "Modelo matemático bidimensional del sistema nº 27: Unidad Almonte-Marismas".
- "Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca baja del Guadalquivir".
- Evolución piezométrica de los acuíferos de la cuenca baja del Guadalquivir hasta 1980-81".
- "Síntesis hidrogeológica del Guadalquivir".

- "Calidad de las aguas subterráneas en Andalucía: Situación actual y focos potenciales de contaminación".
- "Hoja hidrogeológica de Sevilla. Escala 1:200.000".
- "Hoja hidrogeológica de Huelva. Escala 1:200.000.
- "Informe sobre Planificación Hidrológica del Guadalquivir".
- "Estudio hidrogeológico del acuífero Palos-Moguer (Huelva).

ITGE (1982).- "Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno". Colección Informe.

ITGE (1983).- "Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio Geofísico de la interfase agua dulce-agua salada".

ITGE (1986).- "Actualización de los datos hidrogeológicos de Almonte-Marismas. Aplicación del modelo matemático bidimensional del sistema acuífero nº 27. Procesamiento de datos de ordenador".

ITGE (1987).- "Simulación de la evolución piezométrica del acuífero Almonte-Marismas. Horizonte año 2.010".

ITGE (1987).- "Mapas de Normas de explotación de acuíferos". Escala 1:50.000. 982 (La Palma del Condado), 983 (San Lúcar La Mayor), 999 (Huelva), 1000

(Moguer), 1001 (Almonte), 1017 (El Abalarío), 1018 (El Rocío), 1033 (Palacio de Doñana), 1047 (Sanlúcar de Barrameda).

ITGE.- "Mapa Geológico de España". Escala 1:50.000 Segunda serie (MAGNA), 1000 (Moguer), 1001 (Almonte), 1017 (El Abalarío), 1018 (El Rocío), 1019 (Palacios y Villafranca), 1033 (Palacio de Doñana). IGME Serv. de Publ. del Ministerio de Industria y Energía.

ICONA (1967).- "Las Marismas del Guadalquivir" y su rescate". Estudios. Vol. V, nº 29. Madrid.

ICONA.- "Parque Nacional de Doñana". Mapa ecológico.

IRYDA (1976).- "Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica".

IRYDA (1978).- "Informe sobre el control y vigilancia del acuífero Almonte-Marismas durante los años 1975 a 1977".

IRYDA (1978).- "El Estuario del Guadalquivir y su problemática agro-social. IRYDA información. Número extraordinario 8. Madrid.

J.A. CONSEJERIA DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTES (1987).- "Plan Director territorial de coordinación de Doñana y su entorno".

LUCENA, C. y GARCIA, E. (1978).- "El modelo matemático del sistema acuífero de Almonte-Marismas". Bol. Geol. y Min. T. LXXXIX-II. Madrid.

MAPA DE CULTIVOS Y APROVECHAMIENTO.- Escala 1:50.000  
IRYDA. Serv. Públ. del Ministerio de Agricultura.

JUNTA DE ANDALUCIA (1982).- "Publicaciones de las Jornadas Andaluzas para el estudio de la problemática de las zonas húmedas".

LOIC MENANTEAU (1980).- "Les Marismas del Guadalquivir. Exemple de transformación d'un paysage alluvial au cours du quaternaire récent". Tesis doctoral.

MOPU (1979), DIRECCION GENERAL DE OBRAS HIDRAULICAS.- "Informe hidrogeológico y de recursos hidráulicos, desagües y vertidos, y posibles incidencias de los mismos en el parque Nacional de Doñana".

MOPU (1984).- "Las zonas húmedas en Andalucía". Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente.

PROYECTO DEL GUADALQUIVIR. IGME-FAO (1964).- "Requete du Gouvernement de l'Espagne au Fond Special des Nations Unies. Etude des ressources en eaux souterraines du bassin du Guadalquivir".

PROYECTO DEL GUADALQUIVIR. IGME-FAO (1967).- "Informe hidrogeológico sobre la región del Bajo Guadalquivir y la región de Huelva". Informe técnico.

- "Rapport sur les resultats de la prospection Geophysique" por STIER; J.L. Roma. Informe interno.

- "Recherches hydrogeologiques dans le bassin du Guadalquivir. Note sur l'ecoulement des pluies" por DE CAZENEUVE, E. Informe interno.

- "Finca piloto Las Marismas". FAO. Roma. "Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir".

PROYECTO DEL GUADALQUIVIR. IGME-FAO (1975).- "Proyecto de transformación de la zona regable Almonte--Marismas". Informe técnico. J. PNUD-FAO. Roma.

RODRIGUEZ AREVALO, F. JAVIER (1984).- "Estudio hidrogeológico de la zona de contacto entre los depósitos eólicos y de marisma en el área de Doñana (La Vera-La Retuerta): Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.

SCOPE (1987).- "La cantidad y calidad del agua disponible en el Coto de Doñana". Informe final reunión de trabajo. Sevilla.

TENAJAS LOPEZ, JESUS, L. (1984).- "Contribución a la hidrogeología e hidroquímica de las marismas del parque Nacional de Doñana con aplicación del análisis de imágenes Landsat". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid.

VELA GUZMAN, ANTONIO, L. (1984).- "Estudio preliminar de la hidrogeología e hidroquímica del sistema de dunas móviles y flecha litoral del Parque Nacional de Doñana". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.