Esta Tesis Doctoral fué defendida en la Universidad de Granada, el día 27 de Julio de 1984, obteniendo la calificación de sobresaliente "cum laude", ante el siguiente Tribunal:

Presidente: Prof. Dr. D. CARLOS ROMARIZ
Catedrático de la Universidad de Lisboa

Vocales: Prof. Dr. D. JOSEPH TRILLA ARRUFAT
Catedrático de la Universidad Autónoma de Barcelona

Prof. Dr. D. JUAN GRANDE GIL
Catedrático de la Universidad de Sevilla

Prof. Dr. D. RAFAEL FERNANDEZ RUBIO
Director. Catedrático de la Universidad de Granada

Secretario: Prof. Dr. D. ANTONIO PULIDO BOSCH
Codirector. Profesor Titular de la Universidad de Granada

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS — SECCION DE GEOLOGIA

HIDROGEOLOGIA DE LA REGION SUROCCIDENTAL DE LA PROVINCIA DE HUELVA

Tesis que presenta
ARSENIO J. GONZALEZ MARTINEZ
para optar al Grado de Doctor en Ciencias (Sección de Geología)

El Director:

Prof. Dr. D. Rafael Fernández Rubio

El Codirector:

Prof. Dr. D. Antonio Pulido Bosch

Arsenio J. González Martínez
Granada, Junio de 1984

NOTA DEL AUTOR

El presente trabajo corresponde íntegramente a mi Tesis Doctoral, que fué defendida públicamente en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada el día 27 de Julio de 1984.

Como podrá observarse, se hace frecuente alusión en el texto a una serie de láminas y planos, que no se han incluído en esta edición debido al tamaño de los mismos. No obstante, las personas interesadas pueden consultarlos en el Departamento de Geología de la Escuela Universitaria Politécnica de La Rábida (Universidad de Sevilla), en Palos de la Frontera, provincia de Huelva.

A mi esposa Conchi.
A mis hijas Conchita y Sara.
A mis padres.

INDICE

	páginas
Resumen	1
Conclusiones	5
Introducción	30
Antecedentes	40
Climatología	56
Geología	97
Hidrogeología	148
Calidad de las aguas subterráneas	324
Balance hidráulico. Problemática en los acuíferos estudiados	373
Anejos	394
Bibliografía	475
Indice de figuras	494
Indice de cuadros	500
Indice de tablas	503
Indice de láminas	505
Indice de planos	506
Indice general	507

RESUMEN

En esta Tesis D'octoral abordo el estudio hidrogeológico regional del sector suroccidental de la provincia de Huelva.

El área investigada, de 972 km^2 de extensión, disfruta de clima privilegiado (mediterráneo marítimo), que favorece el desarrollo agrícola intensivo, apoyado en producción de cultivos tempranos. Actualmente, el citado desarrollo está condicionado por la disponibilidad de agua, y, en este sentido, existe gran demanda.

La región es rica en agua subterránea, aunque ciertas limitaciones, principalmente de tipo legal y técnico (existen síntomas de sobreexplotación), impiden que, en los planteamientos actuales, se pueda aumentar la extracción.

No obstante, creo que el conocimiento, y adecuada gestión, de recursos, con la, lógica, integración de aguas subterráneas y superficiales, es el primer paso para paliar el déficit existente, y atender la demanda futura.

En la línea del conocimiento hidrogeológico, presento este trabajo, que constituye una monografía sobre acuíferos en rocas sedimentarias (principalmente detríticas)

de facies marina.

He tratado de encadenar las fases del estudio, de forma lógica.

En primer lugar, defino los objetivos del trabajo, y los métodos que he utilizado para su realización.

Después de analizar, críticamente, los trabajos, geológicos e hidrogeológicos, realizados con anterioridad en la región, estudio datos climáticos (de precipitación y temperatura, principalmente) con métodos estadísticos, y evalúo la evapotranspiración potencial y real.

A continuación, y sobre las bases del estudio estratigráfico y tectónico previo, examino el comportamiento hidrogeológico de las diferentes unidades litoestratigráficas, y defino los tipos de acuíferos y su geometría. El cálculo de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento, lo realizo basándome en datos de varios ensayos hidráulicos, a caudal constante. Propongo, además, el modelo de comportamiento hidrodinámico de los acuíferos, y establezco su funcionamiento hidráulico.

Más adelante, describo aspectos físico-químicos en relación con la calidad del agua subterránea, e interpreto el incremento de salinidad en los acuíferos (mayor en el acuífero superficial) con la proximidad al mar.

Finalmente, considero la problemática para establecer el balance en los acuíferos estudiados, debida, sobre todo, a falta de datos (aforos en ríos, infiltración, y pérdidas al mar), y a escasez e imprecisión de otros

(bombeos netos, principalmente), aunque evalúo determinados componentes del mismo, basándome en datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración real, obtenidos en el estudio climatológico.

CONCLUSIONES

De este trabajo de investigación hidrogeológica se desprenden las siguientes conclusiones principales, que, por razón de metodología, expongo en el mismo orden que el de los capítulos que integran la Memoria:

CLIMATOLOGIA

1. Para el cálculo de la precipitación media, en el área estudiada, he utilizado 37 estaciones pluviométricas, de las que 21 se encuentran fuera de ella (en los bordes).

2. Los valores de precipitación media, obtenidos por el método de isoyetas y por el método de THIESSEN, son equivalentes.

3. La precipitación media en el área, para el período 1949/50 a 1978/79, es de 540 milímetros (525 hectómetros cúbicos).

4. El área estudiada tiene clima mediterráneo marítimo, aunque cerca del límite septentrional (en Alosno) tiene lugar la transición hacia clima mediterráneo continental. La temperatura media anual varía entre 17ºC y 18,9ºC, con oscilación media mensual superior a 12ºC.

5. La evapotranspiración real media, obtenida por varios métodos, es de 437 mm (THORNTHWAITE), 456 mm (COUTAGNE) y 503 mm (TURC), y representa, respectivamente, 81 por 100, 84 por 100, y 93 por 100 de la pluviometría media en el área estudiada.

6. Considero que el valor de evapotranspiración real media obtenido por el método de THORNTHWAITE, debe de aproximarse más al valor medio común para el área atlántica, mientras que los métodos de COUTAGNE y TURC proporcionan valores más elevados, por lo que sus resultados no son satisfactorios para la región estudiada.

GEOLOGIA

1. Para el estudio de materiales, presentes en el área, he delimitado unidades litoestratigráficas, pues éstas condicionan el comportamiento hidrogeológico de los mismos.

2. La mayoría de los materiales son de facies marina; facies continental se presenta en materiales cuaternarios, que afloran ámpliamente en el área estudiada.

3. Los materiales son de edad comprendida entre Carbonífero inferior (Viseense) y Cuaternario reciente (Holoceno superior).

En la serie existe una discordancia regional, intramiocénica, cuya laguna estratigráfica abarca desde el Jurásico (Lías ?) al Mioceno superior (Tortoniense). Además de esta importante discordancia, existen otras dos: una, de tipo angular y erosiva, que afecta a materiales posteriores al Carbonífero inferior (Viseense) y anteriores al Triásico (Buntsandstein ?), y otra, erosiva, entre materiales del Plioceno inferior (Plaisanciense inferior) y del Pleistoceno inferior (Villafranquiense).

4. Las litofacies detríticas y carbonatadas son las más abundantes, aunque existen, también, rocas volcánicas (depósitos vulcano-clásticos en el Triásico), yeso (principalmente en el Triásico), y sales (sobre todo en el Andaluciense y en el Holoceno superior).

5. Las unidades más abundantes en fósiles son del Neógeno, mientras que

la ausencia de fósiles es una constante en unidades del Mesozoico.

6. Los materiales de la serie estratigráfica afloran en superficie, a excepción del Tortoniense. El afloramiento más reducido corresponde al Mesozoico, mientras que el resto de materiales tienen afloramientos ámplios; la mayor extensión es la de afloramiento de depósitos neógenos y villafranquienses.

7. Cada unidad litoestratigráfica diferenciada se deposita, de forma discordante, sobre la infrayacente.

8. Desde el punto de vista tectónico, los materiales del área estudiada pertenecen a tres unidades estructurales de la Península Ibérica (JULIVERT et al., 1972):

- Herciniano del Macizo Ibérico (materiales carboníferos).

- Orla Atlántica Mesozoica del Macizo Ibérico (materiales triásicos y jurásicos).

- Cuenca del Guadalquivir (materiales neógenos y villafranquienses).

9. En el área estudiada existen dos domínios tectónicos, netamente diferentes, separados por la línea de contacto entre zócalo paleozoico y materiales más modernos:

- Domínio herciniano (al norte y noroeste), o de terrenos paleozoicos, afectados por deformaciones hercinianas. Representa el zócalo hercínico.

- Domínio de plataforma (el resto del área), con una cobertera mesozoica y cenozoica poco deformada, que se apoya sobre el zócalo herciniano.

10. Las características geomecánicas de ambos domínios son, netamente, diferentes, por lo que su reacción, a esfuerzos tectónicos, es distinta.

El zócalo, rígido, tiende a romperse, mientras la cobertera, incompetente, se adapta a deformaciones del zócalo.

La tónica estructural de la región responde, por tanto, al tipo de tectónica zócalo-cobertera, en la que la cobertera constituye un monoclinal, afectado por la red de fracturas y fallas del zócalo paleozoico.

11. El estilo zócalo-cobertera se hace patente, sobre todo, en el sector meridional del área estudiada, mediante el juego de numerosas fallas normales de origen hercínico, muchas de las cuales han sido "rejuvenecidas" en la orogenia alpina, durante la formación de la Cordillera Bética.

A ésto se debe el hundimiento progresivo del zócalo paleozoico, hacia el sur, y la sucesión de horst y graben, en dirección este-oeste, que existen en este sector occidental de la cuenca del Guadalquivir.

12. Entre los factores que, por tanto, han contribuído a dar forma definitiva a la estructura del área estudiada, están:

- El plegamiento herciniano, de edad astúrica (intra y finiwestfaliense).

- La fracturación, tanto singenética a este plegamiento, como posterior (de edad alpina).

13. La estructura tectónica del dominio herciniano, se caracteriza por presencia de pliegues y fracturas.

Los pliegues pertenecen a dos generaciones distintas:

- Los de la primera generación, de dirección NW-SE a WNW-ESE y vergencia S, son ámplios pliegues asimétricos, generalmente volcados, y acompañados de apretada esquistosidad de plano axial. Se trata del plegamiento principal, de edad intrawestfaliense (JULIVERT et al., 1972).

- Los pliegues de la segunda generación son muy atenuados; su dirección es NE-SW, y la esquistosidad de plano axial está menos desarrollada. Esta segunda fase de deformación es de edad finiwestfaliense (JULIVERT et al., op. cit.).

Posteriormente al plegamiento, se formaron grandes fallas y fracturas, de dirección NNE-SSW y NNW-SSE.

14. Los materiales del dominio herciniano están afectados de metamorfismo regional de bajo grado (JULIVERT et al., op. cit.).

15.- El estilo estructural del dominio de plataforma es de tipo zócalo-cobertera, y se caracteriza por fallas y fracturas pertenecientes a dos familias principales:

- La primera, de dirección ENE-WSW (fallas de Lepe, La Redondela y Ayamonte), con juegos normales en sentido S. Son de edad alpina, y originan una estructura compuesta por varios elementos sintéticos, que constituyen la terminación, hacia el oeste, de la falla-flexura del borde de Sierra Morena (polémica "falla del Guadalquivir"; VIGUIER, 1974).

- La segunda familia, de dirección N-S, o de componente principal en esta dirección; a ella pertenecen las fallas del río Odiel y de Aljaraque, y las fracturas de los ríos Tinto, Piedras y Guadiana (en la desembocadura). Son alineaciones estructurales que datan del límite Plio-Villafranquiense (VIGUIER, op. cit.), y se deben a "rejuvenecimiento", por movimientos alpinos tarditectónicos, de accidentes del zócalo herciniano (OVTRACHT y TAMAIN, 1970).

16. El basculamiento que presentan los materiales de cobertera, hacia el sur, se interpreta por el juego normal, aunque complejo, de ambas familias de fallas, que origina una fenomenología de subsidencia continua, principalmente puesta de manifiesto en el cuadrante suroriental del área (bloque de Huelva, elevado respecto a los demás).

HIDROGEOLOGIA

1. En el área estudiada distingo una unidad hidrogeológica, que denomino sistema acuífero superficial; sus límites geográficos y geológicos están perfectamente definidos.

2. Considero integrado el sistema acuífero superficial, por dos formaciones hidrogeológicas de carácter detrítico, con diferente comportamiento hidrogeológico e interés acuífero:

- Formación hidrogeológica inferior (M_3-Pl), de facies marina y edad terciaria (Andaluciense-Plaisanciense inferior), que comprende intercalaciones de materiales permeables y semipermeables. En ella se localiza el principal acuífero de este sistema hidrogeológico.

- Formación hidrogeológica superior (Q), de facies continental y edad cuaternaria (Pleistoceno inferior-Holoceno superior), con materiales de muy distinto grado de permeabilidad. En ella se encuentran pequeños acuíferos, generalmente colgados, de escaso, o nulo, interés hidrogeológico.

3. De 326 puntos acuíferos inventariados, en esta unidad hidrogeológica, 62 por 100 son pozos, 35 por 100 sondeos, y 3 por 100 son manantiales. El 81 por 100 de los sondeos tienen profundidades inferiores a 200 metros, y muchos de ellos son sondeos de investigación, aunque algunos se han equipado para ser utiiizados como pozos de extracción.

4. El afloramiento de materiales que constituyen el sistema acuífero es de forma irregular, y ocupa 676 km^2 de extensión.

5. He establecido los límites geológicos e hidrodinámicos del acuífero principal, y he definido las condiciones (de flujo y potencial) en dichos límites. Estas condiciones son las siguientes:

- Límite a flujo impuesto, con caudal nulo, representado principalmente por

el contacto septentrional entre materiales acuíferos y materiales impermeables, subyacentes.

- Límite a flujo impuesto, con caudal saliente, definido por el contacto occidental entre materiales acuíferos y materiales permeables, subyacentes. En profundidad, este límite puede ser con caudal entrante o saliente, dependiendo de la diferencia de potencial hidráulico entre los dos acuíferos (superficial y profundo) superpuestos.

- Límite a potencial impuesto, marcado por superficies de agua libre (Océano Atlántico, río Odiel y río Guadiana), que limitan el acuífero en los sectores meridional, oriental y occidental.

6. La estructura del acuífero presenta características claras, en cuanto a combinación de formaciones hidrogeológicas permeables y semipermeables, que responden al modelo multicapa. No obstante, en el sector suroccidental del área, principalmente, su estructura es relativamente simple (predominio de formaciones hidrogeológicas permeables), por lo que podría ser asimilado, en este sector, a un acuífero monocapa equivalente, heterogéneo y/o anisótropo.

7. El análisis detallado de la superficie piezométrica (que he establecido en noviembre de 1981, con datos de nivel de 71 puntos) me ha permitido conocer las funciones receptiva y transmisora del acuífero, aspectos muy importantes para valorar el comportamiento hidrodinámico del mismo.

Las principales conclusiones de este análisis son las siguientes:

-a) La superficie piezométrica es irregular, y su morfología es compleja.

-b) La profundidad hasta el agua disminuye del norte hacia el sur (73 metros en el macizo de Cebollar, 10 metros en Cartaya, y 0,5 metros en Lepe).

-c) El sentido general del flujo en el acuífero es de norte a sur, condicionado, principalmente, por el drenaje al Océano Atlántico.

-d) El grado de coincidencia entre líneas divisorias de aguas superficiales y subterráneas, permite indicar que, en líneas generales, en el área estudiada existe concordancia entre cuencas vertientes y cuencas subterráneas. He delimitado tres cuencas hidrogeológicas: central (cuenca del Piedras), oriental (cuenca del Odiel), y occidental (cuenca del Guadiana); la primera constituye una unidad hidrogeológica completa, y las otras dos son unidades parciales (incompletas), en el área investigada.

-e) La forma de la superficie piezométrica es cónica, abombada o deprimida, con perfiles de depresión parabólicos o hiperbólicos; el flujo en el acuífero no es uniforme, con sistemas radiales, convergentes y divergentes.

Las protuberancias y depresiones de la superficie piezométrica, se deben a varios efectos: disminución de sección de flujo; impluvium del acuífero por agua de lluvia; alimentación retardada (goteo) hacia el acuífero, a partir de formaciones hidrogeológicas cuaternarias superpuestas al mismo; drenaje del acuífero hacia ríos; disminución de permeabilidad; y, en menor grado, extracciones locales.

-f) Las principales áreas de alimentación regional del acuífero, por infiltración de agua de lluvia, quedan definidas por grandes abombamientos de la superficie piezométrica (el situado al norte del área es el más importante), y por presencia de sistemas radiales divergentes (áreas de Villablanca, Ayamonte, Lepe, El Rompído, y Aljaraque).

El drenaje regional del acuífero tiene lugar hacia los valles de ríos principales (Odiel, Piedras y Guadiana), y de sus afluentes, marcándose por depresiones en la superficie piezométrica, debidas a presencia de sistemas radiales convergentes, y hacia el Océano Atlántico, que marca el nivel de base del flujo subterráneo en el área estudiada.

-g) El estudio del gradiente hidráulico, deducido del mapa de isopiezas, me ha permitido distinguir dos sectores diferentes, situados al norte y al sur de la línea, de dirección E-W, que pasa por Aljaraque, Cartaya y Ayamonte.

El sector norte se caracteriza por valores medios elevados del gradiente hidráulico, del orden de $1,05.10^{-2}$; del estudio de perfiles de depresión (cortes hidrogeológicos II a IX), y de datos sobre permeabilidad de formaciones acuíferas, obtenidos de pruebas de bombeo, deduzco que la transmisividad no es el factor determinante de este elevado gradiente hidráulico, sino que se debe a un caudal importante, con elevada velocidad de flujo (áreas de drenaje superficial y en profundidad), o con débil velocidad de flujo (áreas de alimentación directa a partir de agua de lluvia).

El sector sur tiene gradientes hidráulicos más bajos (valor medio del orden de $3,6.10^{-3}$), que en este caso vienen determinados por aumento de transmisividad y permeabilidad con el espesor saturado, según se deduce de pruebas de bombeo realizadas en el mismo.

-h) En cuanto a la fluctuación y evolución de niveles de agua, los datos disponibles, de una red de 9 piezómetros y de 6 estaciones pluviométricas próximas a ellos, con control mensual durante 8 años (1975 a 1982), me permiten precisar los siguientes aspectos:

- La amplitud de fluctuación del nivel piezométrico del acuífero es importante, con valores máximos comprendidos entre 0,4 y 3,1 metros, para el año hidrológico medio (1975/82).

- En régimen natural (sin bombeos), la fluctuación está regida, de forma primordial, por cantidad y distribución de las precipitaciones.

- Puntualmente, los bombeos pueden afectar, de forma notable, a la fluctuación, como sucede en el pozo número 103 de la hoja 999 (escala 1/50.000).

- La fluctuación del nivel piezométrico es más importante en áreas de recarga, que en áreas de descarga natural.

- La respuesta del acuífero a las precipitaciones es evidente, a lo sumo con dos meses de desfase, debido, principalmente, a que los niveles son bastante superficiales (la profundidad media hasta el agua, en el área, es de 13 metros), y a bajo coeficiente de almacenamiento medio del acuífero (del orden de 10^{-3} a 10^{-4}).

- Aunque el período de observación (8 años) es insuficiente, como para poner de manifiesto la tendencia general de niveles, la impresión de conjunto es tendencia a mantenerse constantes, lo que implicaría equilibrio de la relación recarga/descarga; no obstante, creo que esta conclusión no debe ser extrapolada a todo el acuífero, mientras no se disponga de mayor período de control y red de observación más ámplia, pues, de hecho, en algunos puntos parece existir tendencia a disminuir el nivel, y en otros, ligera tendencia al ascenso.

8. No existe relación clara entre caudales obtenidos en captaciones, profundidad total de la obra, y espesor de acuífero captado, lo que pone de manifiesto gran heterogeneidad del acuífero. Casi el 93 por 100 de las captaciones existentes, en esta unidad hidrogeológica, registran caudales específicos inferiores a 10 l/s/m.

9. Con finalidad de obtener valores fiables de parámetros hidráulicos, he interpretado cuatro ensayos hidráulicos (epígrafe 3.7.2.2), con diversas hipótesis: como acuífero semiconfinado, considerando o no el almacenamiento en el acuitardo; acuífero libre con drenaje diferido; acuífero libre anisótropo; y, acuífero cautivo, con flujo radial (horizontal).

Al aplicar estas hipótesis, he obtenido, en general, resultados dispares entre sí, aunque para algunas (fórmulas de HANTUSH, STALLMAN y BOULTON) son similares, o del mismo orden de magnitud. Conceptualmente, creo que la hipótesis que se adapta más a la realidad, es la de acuífero semi-

confinado, considerando el almacenamiento en el acuitardo (fórmula de HANTUSH, modificada; in LOHMAN, 1977), y aunque, provisionalmente, acepto los resultados obtenidos al aplicar esta fórmula, el problema del análisis y valoración correcta de ensayos hidráulicos, en este acuífero, no lo considero concluído, sino, más bien, apenas iniciado, y como tema abierto, para proseguir su investigación.

La transmisividad del acuífero varía de 30 a 1200 m^2/día, en sentido este a oeste; el coeficiente de almacenamiento es del orden de 10^{-3} a 10^{-4}, o sea, propio de acuífero semiconfinado.

10. Propongo un modelo, simplificado, de comportamiento hidráulico del acuífero multicapa que, en primera aproximación, es de acuífero semiconfinado complejo, en el que juega importante papel el almacenamiento en los acuitardos semiconfinantes, que es drenado por los niveles permeables.

Al bombear un pozo, la aportación del acuífero es, principalmente, vertical, como lo muestra la forma del cono de bombeo, profundo y no muy extenso; esta aportación al nivel acuífero bombeado, se produce por los fenómenos de compactación ("squeeze"), o variación de almacenamiento en el acuitardo superpuesto, y filtración vertical o goteo ("leakage") de los niveles acuíferos suprayacentes.

No obstante, este tema debe ser objeto de estudio más detallado, ya que lo que he realizado es simple aproximación al problema real, en el que, además, debe tenerse en cuenta la mayor complejidad de este acuífero semiconfinado (combinación de varias capas permeables y semipermeables), y el hecho de que los pozos de captación son incompletos, con rejilla sólo en los tramos más permeables.

11. Respecto al funcionamiento hidrodinámico, propongo un esquema cualitativo de flujo, según el modelo conceptual de acuífero multicapa, que se adapta a las directrices del modelo propuesto por LLAMAS (1975), para el terciario detrítico de la cuenca del río Tajo, y a las ideas generales de

FREEZE y WITHERSPOON (1966-67), sobre influencia de la anisotropía, o de existencia de capas extensas de distintas permeabilidades.

En síntesis, el funcionamiento hidráulico, que propongo, es el siguiente:

- La recarga del acuífero se debe, fundamentalmente, a infiltración eficaz de precipitaciones que caen sobre afloramientos terciarios y cuaternarios.

- La descarga principal de las aguas subterráneas, tiene lugar en valles de ríos y arroyos de la región, sobre todo a través de rezumes subfluviales, y por drenaje hacia el Océano Atlántico; también se produce cierta descarga natural por evapotranspiración en áreas llanas deprimidas, y en fondos de valles, donde la franja saturada está próxima a superficie, máxime si están cubiertas de eucaliptales, como frecuentemente sucede.

- En el esquema hidrodinámico propuesto, destaca la incidencia de la geomorfología, en el flujo regional, de sentido norte a sur, responsable de la descarga al Océano Atlántico, aunque también resaltan los componentes local e intermedio de dicho flujo, de los que depende, en gran parte, el drenaje del acuífero a través de ríos y arroyos de la región.

12. Bajo la denominación de sistema acuífero profundo, he definido, en el área investigada, una unidad hidrogeológica, cuyos límites geográficos y geológicos son netos en muchos puntos.

13. Considero que el sistema acuífero profundo está integrado por dos formaciones hidrogeológicas, de carácter sedimentario, con litología diferente y comportamiento hidráulico de naturaleza distinta, aunque equivalente:

- Formación hidrogeológica inferior (J), caliza, de facies marina y eadad mesozoica (Jurásico, Lías ?), que comprende calizas y calizas dolomíticas muy fisuradas (microfisuras), con fenómenos visibles de disolución, a nivel de afloramiento, pero con karstificación nula. Ocasionalmente, pequeños niveles de arcillas y margas con yeso se encuentran interestratificados

en las rocas calizas, con la, consiguiente, disminución local de permeabilidad de la unidad, y el riesgo de empeoramiento de calidad de las aguas procedentes de las áreas profundas del acuífero, ya que la presencia de yeso, en margas, es mayor en ellas.

Su espesor es variable, según los puntos, pero, en general, supera 50 metros. El espesor medio, en el área estudiada, es de 100 metros.

- Formación hidrogeológica superior (M_1), detrítica, de facies marina transgresiva, y edad terciaria (Mioceno superior, Tortoniense), con materiales permeables por porosidad (gravas, arenas, conglomerados y areniscas), y espesor medio de 8 metros, en el área estudiada.

14. Las dos formaciones hidrogeológicas dan origen a un acuífero único, confinado por materiales impermeables, y de geometría particular, ya que, ambas, están presentes en el 23 por 100 del área (sector meridional, en donde las dos formaciones hidrogeológicas aparecen yuxtapuestas) y sólamente una (la detrítica) lo está en el 77 por 100 restante.

15. El acuífero tiene forma geométrica en planta comparable a un trapecio, de lados irregulares, y ocupa 613 km^2 de superficie, de los que, tan sólo, 1,6 km^2 corresponden a área de afloramiento (calizas de Ayamonte), y el resto se encuentra bajo recubrimiento terciario y cuaternario.

16. Los límites del acuífero son de dos tipos:

-a) Límites verticales

Están constituídos por el substrato impermeable paleozoico (H) y mesozoico (T), y por el recubrimiento impermeable terciario (M_2-Pl).

El comportamiento hidrogeológico de estos límites determina que el acuífero se encuentre en carga.

-b) Límites laterales

La forma geométrica, peculiar, del acuífero implica dos límites muy netos:

- el septentrional, definido como la isopaca de espesor cero de la formación hidrogeológica detrítica (M_1) del Mioceno superior (límite norte de estos materiales), y

- el meridional, definido por la interfase agua dulce-agua salada, impuesta por la presencia del Océano Atlántico.

Los límites oriental y occidental del acuífero, quedan fuera del área investigada, ya que hay continuidad de las formaciones hidrogeológicas, hacia el este y el oeste; los límites que, a este respecto, figuran en el mapa hidrogeológico del acuífero, son límites de área investigada, y no de unidad hidrogeológica.

17. He definido las condiciones en los límites del acuífero, que son las siguientes:

- Hacia el norte, límite a flujo impuesto, con caudal nulo. Queda representado por el contacto lateral con materiales impermeables subyacentes, por acuñamiento estratigráfico de las formaciones hidrogeológicas.

- Hacia el sur, límite a potencial impuesto (Océano Atlántico).

- Hacia el este, límite a flujo impuesto con caudal entrante (aportes al acuífero, procedentes de alimentación de la formación hidrogeológica detrítica, en el área de afloramiento del arroyo del Puerco, entre Gibraleón y Trigueros), y límite a flujo impuesto con caudal saliente (drenaje del acuífero, hacia la cuenca de Niebla-San Juan del Puerto).

- Hacia el oeste, límite a potencial impuesto (río Guadiana, que es probable que alimente, por infiltración, al acuífero), y área de recarga del

afloramiento calizo de Ayamonte (límite a potencial y flujo impuestos, con caudal entrante).

- En los límites verticales (substrato y recubrimiento impermeables), considero que el flujo es nulo, aunque tengo que especificar que, en lo que respecta al recubrimiento, no siempre se debe de cumplir, estrictamente, esta condición, pues es probable que, localmente, aparezcan efectos de filtración vertical, si la permeabilidad del medio es adecuada.

18. Aunque existen dos formaciones hidrogeológicas, la estructura del acuífero responde a la de un sistema monocapa equivalente, heterogéneo y anisótropo.

19. De los puntos acuíferos que figuran en el inventario de esta unidad hidrogeológica (83, Anejo 5), el 20 por 100 son pozos y el 80 por 100 sondeos. El 76 por 100 de los sondeos tienen profundidades superiores a 50 metros, y el 67 por 100 son sondeos de investigación.

El 70 por 100 de los puntos, aún alcanzando el substrato impermeable, sólo cortan la formación hidrogeológica detrítica del Mioceno superior (M_1); la causa de este elevado porcentaje es la ausencia de la formación hidrogeológica caliza del Jurásico (J), en la mayor parte del área ocupada por el acuífero confinado.

20. He trazado la superficie piezométrica del acuífero, correspondiente a octubre de 1981, con datos de nivel de 26 puntos, situados, principalmente, en el sector medio y bajo del sistema acuífero.

21. El análisis del mapa de isopiezas, me ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

-a) La superficie piezométrica es irregular, y su morfología es relativamente sencilla.

-b) Aunque el sentido generalizado de circulación del agua subterránea es del norte hacia el sur, condicionado por el drenaje al Océano Atlántico, distingo dos sectores con direcciones de flujo diferentes:

- el sector oriental del sistema, con dirección principal de flujo orientada hacia el SSE, y

- el sector centro-occidental del sistema, con dirección principal de flujo orientada hacia el SSW.

-c) Del trazado de líneas divisorias de aguas subterráneas, deduzco que existe una cuenca hidrogeológica incompleta, con dos sectores diferentes, separados por la línea de dirección NW-SE que pasa por Aljaraque:

- el sector oriental, que se extiende entre Aljaraque y Huelva, conectado hidráulicamente con la cuenca San Juan del Puerto-Trigueros, y

- el sector occidental, que abarca desde Aljaraque hasta Ayamonte; es el más extenso, y se prolonga hacia Portugal por el extremo oriental del Algarve, lo que concuerda, en parte, con cortes hidrogeológicos que, para ese área (Vila Real de Santo Antonio), ha establecido Van BEERS (Van BEERS et al., 1981).

-d) El gradiente hidráulico, aunque variable de unos puntos a otros, sigue pautas distintas en los dos sectores diferenciados. Así, en el sector oriental, crece en el sentido del flujo, como consecuencia de que la permeabilidad disminuye en ese mismo sentido, y por la presencia del umbral hidráulico próximo a Corrales; su valor medio, en este sector, es del 0,7 por 100. En el sector centro-occidental, por el contrario, el gradiente hidráulico disminuye, de forma generalizada, en el sentido del flujo, debido al aumento de transmisividad; el valor medio es, sensiblemente, más bajo que en el sector oriental, y es del 0,3 por 100.

-e) Existe artesianismo en diversos puntos del acuífero, pero principalmen-

te en el área situada al este de la línea, de dirección NNE-SSW, que pasa por Gibraleón y Aljaraque.

-f) La principal área de alimentación regional del acuífero es la franja septentrional, próxima al contacto con el substrato impermeable aflorante, y se extiende entre Ayamonte, Gibraleón y Trigueros. Esta franja incluye el reducido afloramiento calizo (J) de Ayamonte (1,6 km^2 de extensión), único en el área estudiada, y el afloramiento detrítico (M_1) del arroyo del Puerco, situado fuera del área (5,5 km al ENE de Gibraleón), entre Gibraleón y Trigueros.

El drenaje regional del acuífero tiene lugar, sobre todo, a través de la franja meridional del sistema, hacia el Océano Atlántico.

-g) He establecido la fluctuación y evolución de niveles piezométricos, para un período de 8 años (1975 a 1982), en base a medidas mensuales en una red de 8 piezómetros, y la he contrastado con datos de precipitación de 5 estaciones próximas, lo que me ha permitido deducir sus características principales, que resumo a continuación:

- La amplitud de la fluctuación del nivel piezométrico, referida a sondeos que sólo cortan la formación hidrogeológica detrítica (M_1), es importante, y alcanza valores máximos entre 0,2 y 3,2 metros, para el año hidrológico medio (1975/82).

- La respuesta de la piezometría, frente a lluvias superiores a 50 milímetros, es acusada en aquellos puntos donde el recubrimiento impermeable del acuífero es poco potente (981, número 1) o no existe (998, número 11).

- La fluctuación del nivel es más importante en áreas de recarga que en áreas de drenaje. Valores bajos del coeficiente de almacenamiento, y fuertes extracciones por bombeo, aumentan, localmente, la fluctuación del nivel piezométrico.

- De forma generalizada, para el período de estudio (1975 a 1982), observo ligera tendencia al descenso del nivel piezométrico, en el tiempo, lo que es indicio de que la descarga del acuífero es superior a su recarga.

22. De los datos de caudal y descenso disponibles (41 y 16 puntos, respectivamente), deduzco que el 83 por 100 de los puntos tienen caudales inferiores a 40 l/s, y que el 75 por 100 de las captaciones registran caudales específicos inferiores a 3 l/s/m.

23. Ante la necesidad de conocer valores fiables de los parámetros hidráulicos del acuífero, he interpretado (epígrafe 4.6.2.2) dos ensayos hidráulicos (con control de descenso y recuperación), realizados en un grupo de seis pozos, que se sitúan en un sector muy próximo al límite oriental del área estudiada. La hipótesis de partida (acuífero cautivo con flujo radial), basada en criterios geológicos, he podido confirmarla, al aplicar el método de THEIS y el de JACOB, obteniendo, en ambos, resultados similares de los parámetros hidráulicos.

La transmisividad media del acuífero, en el sector abarcado por estos ensayos, es de 112 m^2/día; la permeabilidad media es buena ($1,5.10^{-2}$ cm/s); el valor medio del coeficiente de almacenamiento está muy próximo a 10^{-4}, o sea es propio de acuífero confinado, lo que confirma la hipótesis de partida.

24. Respecto al funcionamiento hidráulico, propongo el esquema, simplificado, de flujo del acuífero, según el modelo conceptual de acuífero confinado, en el que merece resaltar el predominio del flujo lateral.

En síntesis, el funcionamiento hidráulico del acuífero es el siguiente:

- La recarga se debe, fundamentalmente, a infiltración eficaz, procedente, por una parte, del agua de lluvia que cae en la franja septentrional del sistema, y, por otra, de la escorrentía superficial en materiales del subs-

trato impermeable, aflorante un poco más al norte.

En el área de recarga el flujo es subvertical descendente.

- La descarga principal se debe a drenaje natural hacia el Océano Atlántico. La posición de la franja de descarga viene definida por la de la interfase agua dulce-agua salada, poco conocida en la actualidad.

En el área de descarga el flujo es ascendente.

- El sector comprendido entre ambas áreas (recarga y descarga), se caracteriza porque predomina el flujo lateral. Es el sector de transición entre las áreas de alimentación y las de drenaje. En él tiene lugar la circulación activa del agua subterránea, y, también, pueden tener lugar efectos de filtración vertical (cuya importancia no conozco), que originen intercambios entre el acuífero superficial y el profundo, en los sectores en que ambos entran en contacto, o que se traduzcan en un goteo ("leakage"), procedente del recubrimiento impermeable, que contribuya a una alimentación local, muy lenta, del acuífero en sectores próximos a las obras de captación, si la permeabilidad del medio es adecuada.

CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

1. Sólo existen medidas ocasionales de temperatura de las aguas, y esta oscila alrededor de 18ºC para aguas del acuífero superficial, y de 19,5ºC para aguas del acuífero profundo.

2. La relación entre conductividad y total de sólidos disueltos es mejor para aguas del acuífero superficial (coeficiente de correlación=0,97) que para aguas del acuífero profundo (coeficiente de correlación=0,93).

3. La concentración salina de aguas del acuífero superficial oscila, en general, da baja a media; frecuentemente es inferior a 700 mg/l, y sólo excep-

cionalmente supera 1500 mg/l. Las aguas del acuífero profundo tienen concentración salina de tipo medio, que no suele superar 1500 mg/l, aunque con frecuencia es inferior a 1000 mg/l.

4. En los dos acuíferos, la salinidad de las aguas se incrementa con la proximidad al mar, lo que interpreto como debido a un fenómeno de afección marina, más acusado en el acuífero superficial.

5. El contenido iónico de las aguas de ambos acuíferos es bastante variable, tanto en el espacio como en el tiempo.

6. Las aguas del acuífero superficial presentan facies bicarbonatadas cloruradas cálcico-sódicas, y las del acuífero profundo son de facies cloruradas bicarbonatadas sódico-cálcicas.

7. En lo que respecta al acuífero superficial, he puesto de manifiesto la existencia de afección marina, principalmente en el sector Lepe-La Antilla-La Redondela, mediante el establecimiento de mapas de isocontenido en cloruros, de isorelación magnesio/calcio, y de isorelación cloruros/bicarbonatos.

Para el acuífero profundo, detecto la presencia de posible afección marina en los puntos números 15/998 y 27/999, aunque el elevado contenido salino de los mismos podría deberse a que se emplazan en áreas de descarga, y a presencia de yesos en los materiales acuíferos calizos.

8. Las aguas del acuífero superficial son potables, de acuerdo con su composición química; localmente, el exceso de sales (puntos números 43 y 169) o la contaminación (NO_3^-, puntos números 8, 17, 43 y 163) pueden hacerlas no tolerables.

Las aguas del acuífero profundo también son potables, y sólo excepcionalmente son no tolerables, bien por contaminación (NO_3^-, punto número 237), o bien por exceso de sales (punto número 27).

9. En el acuífero profundo, las aguas de mejor calidad, para el consumo humano, casi todas ellas aceptables, son las que se captan de materiales detríticos (M_1).

10. La mezcla de aguas de los dos acuíferos mejora la calidad de ambas.

11. Las aguas de ambos acuíferos son utilizables para riego, pero son más aptas las del acuífero superficial, pues se pueden emplear en la mayoría de los casos sin prácticas especiales. Para el acuífero profundo, las aguas de mejor calidad son las que se extraen de materiales detríticos (M_1).

12. La calidad del agua para riego del acuífero profundo puede mejorarse bastante mezclándola con agua del acuífero superficial.

13. Respecto a la contaminación actual de las aguas, sólo conozco datos referentes a contaminación por cloruros (afección marina) y por nitratos (abonos).

14. El acuífero superficial es vulnerable a la contaminación en los niveles permeables más superficiales, si estos no se encuentran protegidos por materiales impermeables o semipermeables. El agente contaminante podría propagarse ámpliamente en ellos, si los niveles piezométricos están a poca profundidad, y transmitirse, por drenaje lento durante la explotación del acuífero, a niveles más profundos, con lo que afectaría, así, a gran parte del acuífero, en un cierto sector. En áreas de marismas, el grado de vulnerabilidad se incrementa (fuentes de contaminación inducible). La vulnerabilidad es menor en áreas de descarga subfluviales, que en áreas de recarga.

15. El acuífero profundo es, a nivel global de la unidad, poco vulnerable a la acción de los agentes contaminantes, aunque localmente puede serlo en el área de afloramiento de los materiales calizos, por acceso del contaminante a través de fisuras y grietas.

BALANCE HIDRAULICO. PROBLEMATICA EN LOS ACUIFEROS ESTUDIADOS

1. La falta de datos, principalmente aforos en ríos, infiltración de agua de lluvia, y salidas directas al mar, así como la escasez, e imprecisión, de otros, sobre todo bombeos, no permite establecer el balance de aguas subterráneas de los acuíferos, y aconseja cierta cautela a la hora de tratar cuestiones de detalle relativas al mismo.

2. Con los datos que se poseen, actualmente, se pueden evaluar mayor mayor número de elementos del balance en el acuífero superficial (semiconfinado) que en el acuífero profundo (confinado), en el cual casi ningún término es cuantificable.

3. No he tratado de cerrar el balance, sino sólo de aportar los datos disponibles, e indicar el grado actual de conocimiento de sus distintos elementos, lo que, creo, puede ser una base real para el cálculo de futuros balances, en ambas unidades acuíferas.

4. El principal elemento de la recarga del acuífero superficial es la infiltración de agua de lluvia, y la descarga más importante debe ser el drenaje superficial a ríos y arroyos, que, forzosamente, tiene que producirse a través de áreas de rezume subfluviales.

5. Para la infiltración eficaz de agua de lluvia, estimo un valor medio (podría ser el máximo) de 66 Hm^3/año, calculado a partir de la infiltración del año seco (1957/1958) y del año húmedo (1955/1956), al aplicar a las precipitaciones de ambos años un valor de coeficiente de infiltración del 17 por 100, porcentaje deducido de los excedentes en agua obtenidos por el método del balance hídrico del suelo (THORNTHWAITE), y por comparación con áreas similares, y próximas (LUCENA y GARCIA, 1978).

Para balances a muy largo plazo (plurianuales), hay que tener en cuenta que el agua almacenada en los acuitardos semiconfinantes, pasa a consti-

tuir una reserva de agua, pero sólo movilizable muy lentamente.

6. No puedo valorar el retorno de regadíos, aunque creo que es pequeño, en comparación con el resto de los elementos del balance.

7. No puedo cuantificar las entradas subterráneas a la unidad, procedentes del acuífero profundo, aunque considero que, para balances plurianuales, quedarán equilibradas por las pérdidas subterráneas (hacia el acuífero profundo).

8. La descarga más importante del acuífero, debe de producirse por pérdidas superficiales (drenaje a ríos y arroyos de la región). No he podido cuantificarla, por falta de datos de aforo, pero en un intento, muy poco preciso, he tratado de cerrar el balance, para estimarla por diferencia, obteniendo un valor de 11 Hm^3/año, lo que representaría el 20 por 100 de las salidas totales de la unidad. El resultado podría estar sobrevalorado, pero creo que no debe de alejarse mucho del valor real.

9. Los bombeos netos se cifran en 24 Hm^3/año (MARTIN-SOSA, 1981), valor que, creo, es inferior al real, por falta de control preciso de los mismos, a nivel mensual. Aún así, el dato es significativo, pues indica que el 89 por 100 de la demanda en agua, del área, se satisface con aguas procedentes del acuífero superficial, y esto viene a demostrar la gran incidencia de las aguas subterráneas, en el contexto socioeconómico de la región.

10. Las pérdidas del acuífero por evapotranspiración (ET), en sectores donde el nivel piezométrico es muy superficial (menos de 2 metros de profundidad), son considerables en la franja meridional de la unidad (área de Lepe, principalmente, pero de forma general en toda la superficie ocupada por marismas), y en sectores cubiertos de eucaliptales, y pueden llegar a representar unos 22 Hm^3/año (el 40 por 100 de las pérdidas totales del acuífero), calculados, sobre la base de la recarga por infiltración, aplicando coeficientes correctores (del 19 al 50 por 100) a la misma, simi-

lares a los empleados en estudios en áreas próximas (LUCENA y GARCIA, 1978).

11. De las pérdidas subterráneas, las más importantes son las salidas directas al mar, que he evaluado en 9 Hm^3/año (valor que considero mínimo) por métodos hidrodinámicos (ley de DARCY), aplicando valores de transmisividad y gradiente hidráulico, en la franja costera.

12. Las pérdidas subterráneas hacia el acuífero profundo, en los sectores de contacto de ambos, deben de ser poco importantes, y se pueden despreciar, en balances a tiempos largos (plurianuales), pues considero que quedarían equilibradas con los aportes, en sentido contrario, por este mismo concepto.

13. La tendencia del nivel piezométrico del acuífero a mantenerse constante, en períodos amplios, indica equilibrio de la relación recarga/descarga, para esta unidad hidrogeológica. Por ello, he intentado cerrar el balance, para calcular las pérdidas por drenaje subfluvial, que , con las imprecisiones que conlleva, he estimado (por exceso) en 11 Hm^3/año (20 por 100 de las pérdidas totales de la unidad).

14. En lo que respecta al acuífero profundo, sólo puedo indicar que existe una falta de conocimiento, total, sobre el valor de los diferentes elementos del balance.

De forma cualitativa, los aportes principales al acuífero deben proceder de la infiltración a partir de la escorrentía superficial, sobre el substrato impermeable aflorante, en la franja septentrional de la unidad, próxima al contacto con dicho substrato.

Las entradas procedentes de otros acuíferos, por el límite nororiental, son poco significativas, y por métodos hidrodinámicos (ley de DARCY) las he estimado en un valor, máximo, de 0,7 Hm^3/año; posiblemente, estos aportes no quedan equilibrados (en plazos largos) con las pérdidas la-

terales ocultas a otros acuíferos, a través del límite suroriental de la unidad, salidas que deben de ser bastante mayores, por la propia geometría del acuífero.

Este elemento (pérdidas laterales ocultas), unido al bombeo incontrolado y, quizás por ello, excesivo, constituyen el grueso de las pérdidas de agua de la unidad, pérdidas que deben de ser mayores que las entradas, lo que justificaría la tendencia al descenso del nivel, observada para el período 1975 a 1982, y que es indicativa de que la descarga de la unidad supera a la recarga. Este hecho explicaría, también, que el flujo subterráneo, de sentido generalizado norte-sur e impuesto por la presencia del Océano Atlántico, tenga dos componentes principales, en dirección SSE y en dirección SSW; la primera, orientada hacia el sector de mayores pérdidas a otras cuencas, y la segunda, orientada hacia el sector del área en el que las extracciones (bombeos) son mayores.

INTRODUCCION

1. OBJETIVOS

La finalidad que he pretendido, con la investigación objeto de esta Tesis Doctoral, es llegar a conocer las características hidrogeológicas de los sistemas acuíferos existentes en el sector suroccidental de la provincia de Huelva.

Con esta óptica he enfocado el estudio, pero, por la amplitud del tema, éste no puede ser exhaustivo, aunque sí pretende establecer las bases sobre las que se puedan continuar futuros trabajos, con objetivos más concretos.

Un estudio hidrogeológico regional, de las características del que aquí presento, implica muchos problemas de índole geológica e hidrogeológica. Ante la imposibilidad de abordarlos todos, he tratado de solucionar aquéllos que están directamente relacionados con el objetivo final de este trabajo.

Así, he intentado, principalmente, determinar el comportamiento hidrogeológico de los diferentes materiales, definir los sistemas acuíferos, estudiar su geometría, cuantificar sus parámetros hidráulicos y establecer el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos.

Completo la investigación con datos sobre calidad de las aguas subterráneas y con algunas consideraciones sobre el balance hidráulico, de las unidades definidas, al tiempo que expongo los problemas que presenta su establecimiento.

2. METODOLOGIA

Para cubrir los objetivos mencionados he realizado trabajos de campo y gabinete.

Previamente he tratado de obtener y revisar los datos geológicos e hidrogeológicos existentes.

En campo he levantado la cartografía hidrogeológica, a escala 1/50.000, con el auxilio de fotogramas, a escala aproximada 1/33.000; para ello he realizado varias campañas de campo, desde el comienzo de la investigación, en noviembre de 1979. El inventario de puntos de agua, medidas de niveles piezométricos, bombeos de ensayo y recogida de muestras de agua, completan el trabajo de campo.

Simultáneamente, he llevado a cabo el trabajo de gabinete, que ha consistido en la realización de planos y cortes hidrogeológicos, a escala 1/50.000, estudio e interpretación de las muestras de rocas recogidas en el campo, para solucionar problemas geológicos e hidrogeológicos, planteados en la fase previa de cartografía hidrogeológica, y estudiar e interpretar la información derivada de los puntos acuíferos inventariados, y de los análisis hidroquímicos.

La recopilación de la información bibliográfica, el análisis y corrección de datos climatológicos, y la realización de gráficos y cuadros, completan el trabajo de gabinete.

Por último, el análisis de toda la información disponible y la síntesis de los resultados obtenidos, me ha permitido redactar los diversos capítulos que integran esta Memoria.

3. LOCALIZACION GEOGRAFICA Y GEOLOGICA

3.1. LOCALIZACION GEOGRAFICA

El área estudiada, con una superficie de 972 km^2, se sitúa al suroeste de la provincia de Huelva (figura 1), y queda enmarcada por la línea Gibraleón-San Bartolomé de la Torre-San Silvestre de Guzmán-Monte Gordo (límite septentrional), la orla costera atlántica (límite meridional), el río Odiel (límite oriental) y el río Guadiana (límite occidental).

Ocupa la comarca natural de la "Tierra Llana", que se sitúa entre las del "Andévalo" (al norte), "El Condado" (al este), y "El Algarve" (al oeste, en Portugal).

El área queda encuadrada dentro de las siguientes coordenadas geográficas:

- latitud: 37º 9' 30'' N 37º 27' 10'' N

- longitud: 03º 14' 00'' W 03º 44' 50'' W

Comprende la totalidad de la hoja a escala 1/50.000 de Ayamonte (998; 8-41), y parte de las de San Silvestre de Guzmán (980; 8-40), Gibraleón (981; 9-40), Huelva (999; 9-41), y Los Caños (1016; 9-42), editadas por el Servicio Geográfico del Ejército.

En la figura 1 se indican las principales vías de comunicación, y las poblaciones más importantes del área estudiada.

La región es de topografía suave (figura 2); la altitud media es de 60 metros, con cotas mínimas inferiores a 10 metros, en el sector meridional, y máximas algo superiores a 150 metros, en el límite noroccidental (Monte Gordo 156 metros, y San Silvestre de Guzmán 154 metros).

Por ella discurren los cursos de los ríos Odiel, Piedras y Guadiana (este

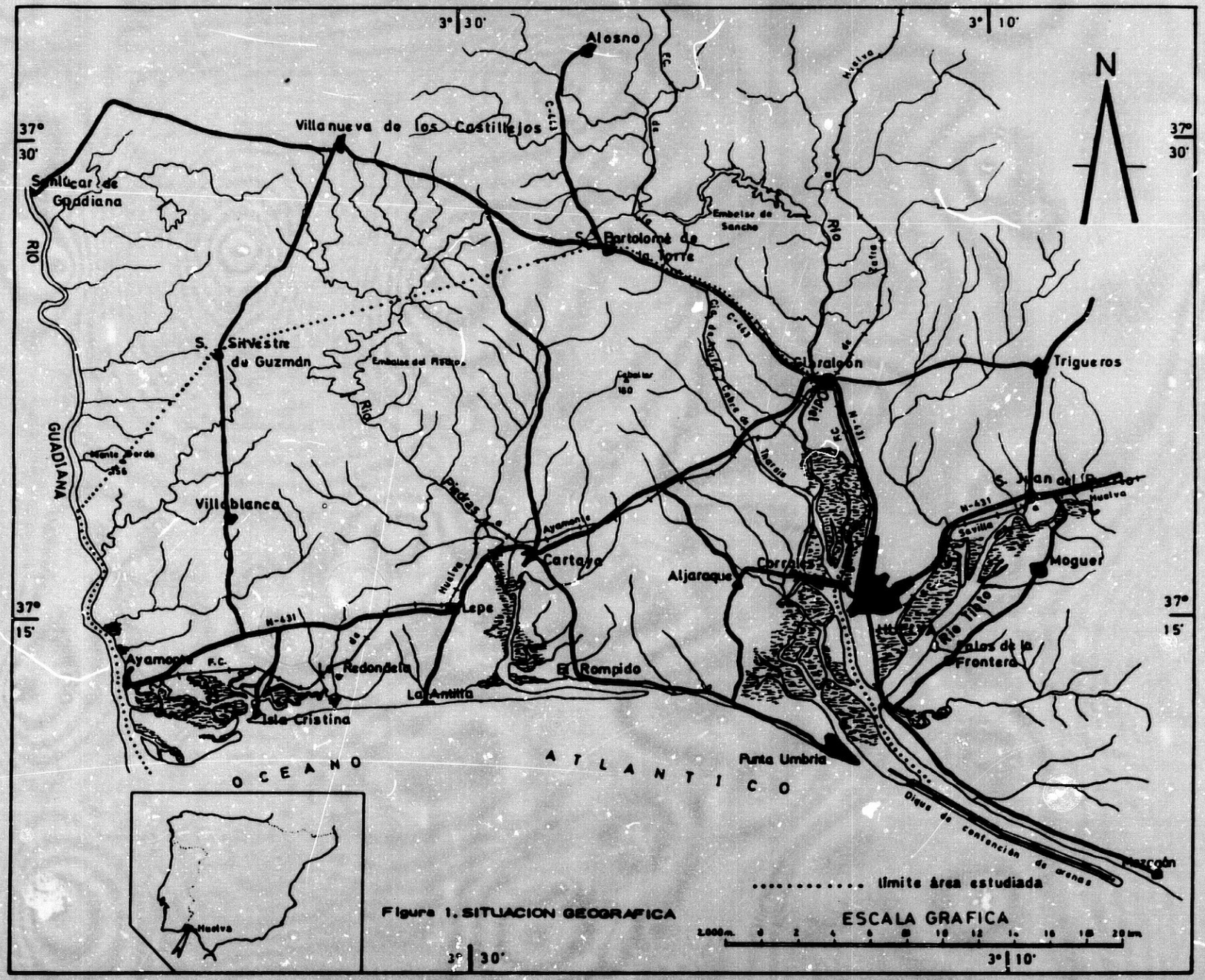


Figura 1. SITUACION GEOGRAFICA

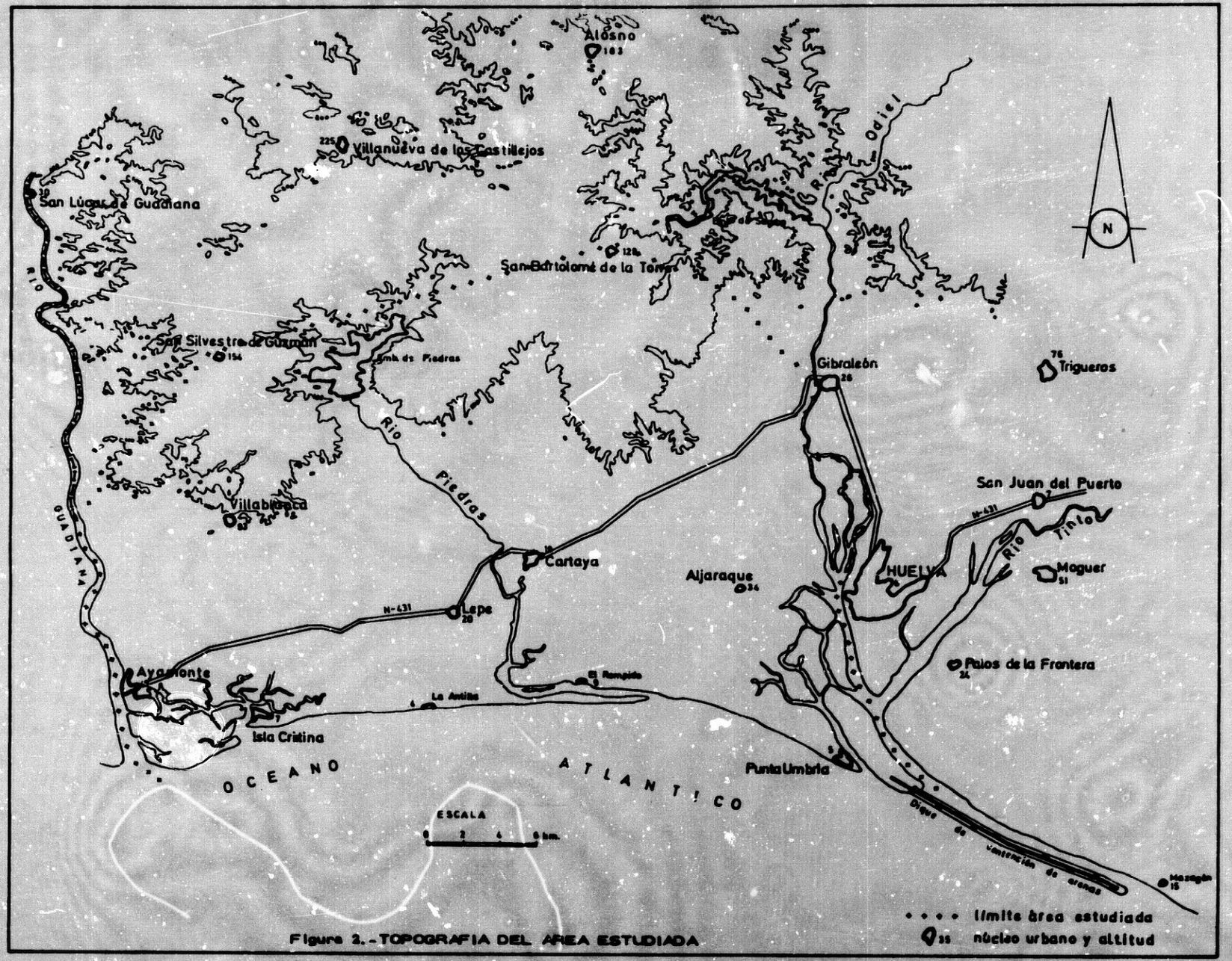


Figure 2.- TOPOGRAFIA DEL AREA ESTUDIADA

último el más caudaloso), que siguen, prácticamente, dirección N-S y drenan la región, hacia el Océano Atlántico, a través de una red de pequeños arroyos (figura 3), de carácter eminentemente torrencial.

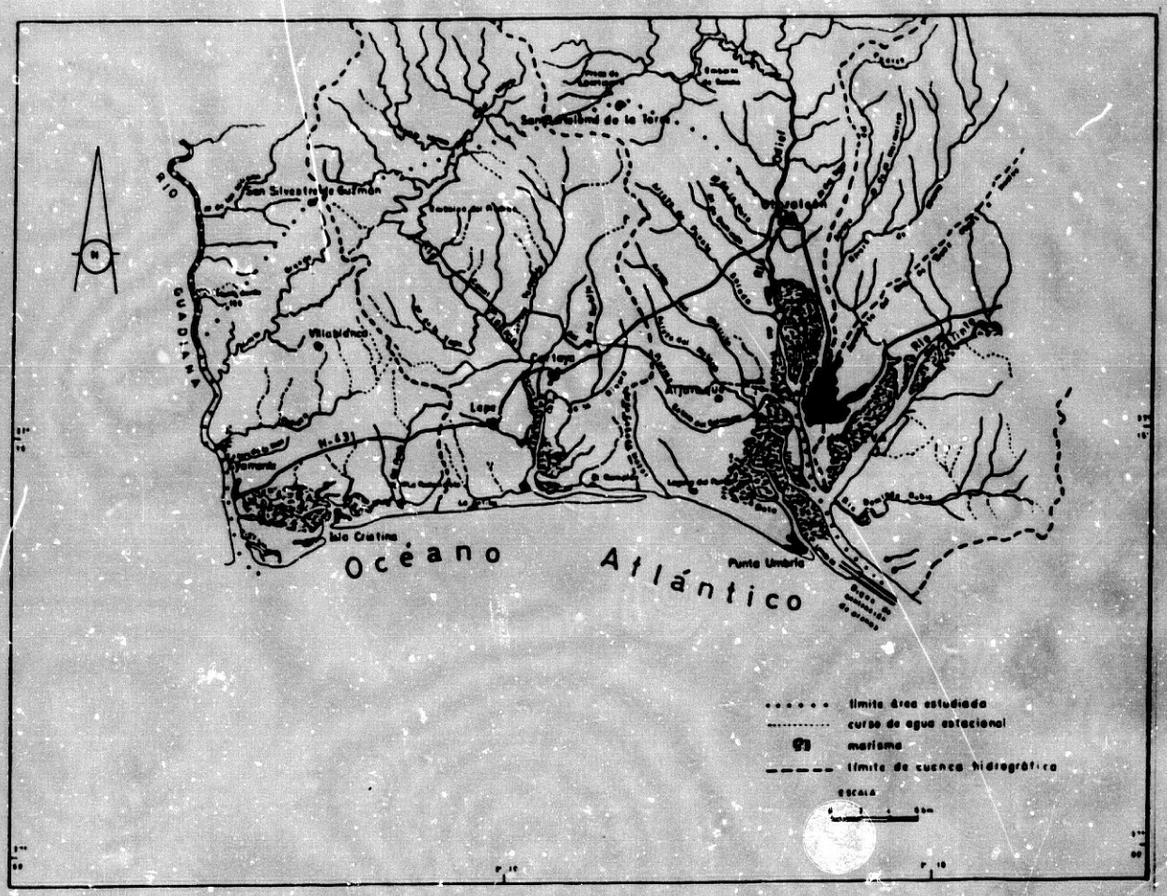


Figura 3.- Red Hidrográfica

Se asientan en esta región siete municipios, que cubren una superficie de 125.891 hectáreas, con una población de 75.619 habitantes.

Las actividades principales de la población son las industriales, agrícolas, ganaderas y servicios, destacando en este sentido las industriales (sobre todo construcción y pesca) que llegan a ocupar un 62 por 100 de la población activa (19.265 habitantes). La agricultura afecta a cultivos de secano (123.362 hectáreas) y regadío (2.509 hectáreas). El excelente microclima de la región hace interesantes los cultivos de regadío, principalmente horto-frutícolas y forrageros.

3. 2. LOCALIZACION GEOLOGICA

La casi totalidad del área estudiada se sitúa en la parte suroccidental de la Cuenca del Guadalquivir (figura 4), unidad estructural de forma alarga-

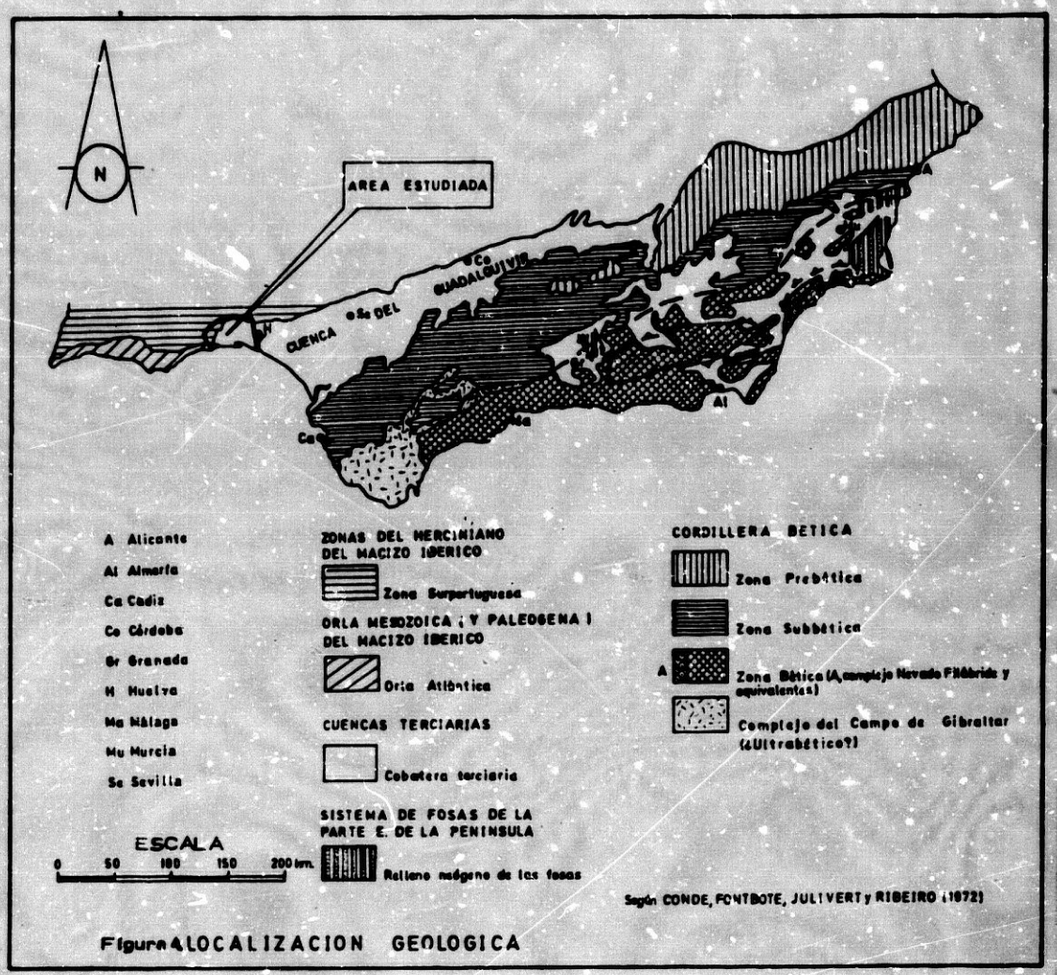


Figura 4 LOCALIZACION GEOLOGICA

da, rellena de materiales terciarios y cuaternarios, cabalgada en su borde meridional por el Subbético, y transgresiva en su límite septentrional sobre materiales pertenecientes al Paleozoico inferior, de la Submeseta meridional, de los que forma parte el resto del área.

Sus características geológicas las describo ampliamente en el capítulo de Geología.

4. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento, en estas líneas, a todas las personas y

organismos que han contribuído, de alguna manera, a que sea posible la realización de este trabajo.

Al Profesor Dr. R. FERNANDEZ-RUBIO, quien me inició en la Hidrogeología, en el año 1973, deseo expresar mi más sincero agradecimiento por brindarse a dirigir, incondicionalmente y sin regatear esfuerzo alguno, las investigaciones hidrogeológicas que he llevado a cabo, con motivo de esta Tesis Doctoral; me prestó su ayuda en todos los momentos que la solicité, discutió los problemas y revisó minuciosamente todas y cada una de las páginas de esta Memoria.

Al Profesor Dr. A. PULIDO-BOSCH, codirector de la Tesis Doctoral, por el ánimo que desde un principio me infundió; con él he discutido problemas hidrogeológicos concretos, en numerosas ocasiones, tanto en campo como en gabinete, y con su enorme capacidad siempre me ha sabido orientar con la idea o respuesta exactas.

Al Profesor Dr. J. A. VERA-TORRES, que tuvo la gentileza de revisar el capítulo de Geología, por las sugerencias e ideas que ha aportado, y que me han sido de gran utilidad.

A M. MARTIN-MACHUCA, Ingeniero Jefe de la División Regional del IGME de Sevilla, por su aliento desde el momento en que inicié la investigación, y por las facilidades prestadas para la utilización de los datos del Proyecto de Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir; sin su inestimable ayuda difícilmente podría haber llevado a buen término este trabajo.

A R. GRANDE-COVIAN, Inspector Regional Del IRYDA, por su amabilidad y las facilidades que me prestó para poder utilizar la información del estudio sobre exploración de aguas subterráneas de la provincia de Huelva, realizado por el INC.

Al Jefe del Departamento de Hidrogeología de la Compañía General de Son-

deos, S. NIÑEROLA-PLA, que con su sólida formación técnica supo aconsejarme en cuantas cuestiones le planteé, así como facilitarme cuanto estuvo a su alcance.

A D. MARTIN-SOSA, Ingeniero Técnico de Minas de la Compañía General de Sondeos, amigo y persona que ha vivido de cerca muchos problemas científicos y humanos de este trabajo; no sólo me facilitó siempre todos los datos a su alcance, sino que juntos hemos pasado jornadas completas en el campo, discutiendo problemas hidrogeológicos, controlando la realización de sondeos, realizando pacientes medidas de niveles piezométricos y caudales, efectuando nivelaciones topográficas de puntos acuíferos, etc..

A los organismos y entidades que, con su colaboración económica, han contribuído a sufragar parte de los gastos de esta investigación: Caja Provincial de Ahorros de Huelva, Excma. Diputación Provincial de Huelva y Escuela Universitaria Politécnica de La Rábida de la Universidad de Sevilla.

A los organismos que me han brindado desinteresadamente datos, en ocasiones numerosos, o me han permitido consultar sus archivos: Comisaría de Aguas del Guadiana, Instituto Nacional de Meteorología (Centro Meteorológico de Badajoz y Sevilla), Sección de Hidrología del Centro de Estudios Hidrográficos (Madrid), Ayuntamientos de Lepe y San Silvestre de Guzmán, y Empresa Municipal de Aguas de Huelva.

Al delineante del MOPU, amigo y compañero en el Instituto Politécnico de La Rábida, F. LUBIAN-REGALADO, por su inestimable y desinteresada ayuda material, al dedicar muchas horas de su tiempo a realizar algunos planos y figuras que ilustran este trabajo.

Al Director del Instituto Politécnico de La Rábida, Dr. C. VILCHEZ-MARTIN, y al Director de la Escuela Universitaria Politécnica de La Rábida, Dr. J. GRANDE-GIL, ambos amigos y compañeros en las tareas docentes, por su contínuo aliento y la ayuda moral y material que me han prestado, en todo instante.

A mis compañeros y amigos de la Escuela Universitaria Politécnica de La Rábida, y principalmente a M. RIQUELME-CASTAÑO y S. ROMERO-SANCHEZ, que siempre me han dado su aliento para culminar este trabajo.

Finalmente, y de manera muy especial, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a CONCHI, mi mujer, que pacientemente ha sabido soportar la soledad de años, en aras de este trabajo, y que es quien mejor conoce las tristezas y alegrías que el mismo nos ha reportado. Su colaboración en determinadas ocasiones ha sido valiosa, pero su aliento, día tras día, es el que me ha permitido finalizar la investigación.

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES GEOLOGICOS

La proximidad del área estudiada respecto a la faja pirítica hispano-portuguesa, permite poner de manifiesto un notable contraste entre el número de trabajos realizados, relativos a la geología de ambos sectores.

La razón estriba en la importancia que, desde tiempos históricos, tienen los yacimientos ubicados en esta región minera, lo que ha llamado poderosamente la atención de numerosos autores, nacionales y extranjeros, y les ha motivado para la publicación de los resultados de sus investigaciones.

No pretendo hacer una recopilación de los numerosos trabajos que se refieren a la minería onubense, ni que el comienzo de este epígrafe sirva de justificante para una escasa relación de autores cuyas publicaciones versen sobre la geología del sector estudiado. Sólo quiero poner de relieve el hecho apuntado al principio, que resalta en cuanto se conoce algo la geología regional del suroeste de la Península Ibérica, e indicar que todos los trabajos, aunque con enfoques diferentes, han tenido como objetivo común el contribuir a conocer mejor la complicada geología de la región onubense.

Respecto al área investigada, hay algunos estudios de detalle, de ciertos aspectos, principalmente en la serie flyschoide del Carbonífero inferior (materiales de facies Culm) y en la serie terciaria, y varias obras de tipo general, pero que son básicas para cualquier investigación que se desee iniciar en el sector.

La publicación más antigua, que debemos mencionar, data de la segunda mitad del siglo XIX y su autor, GONZALO-TARIN (1887), refleja, en el primer tomo, un trabajo geológico que es, sin duda alguna, el mejor de los publicados sobre la región en el siglo pasado. Se trata de una memoria minuciosa, en la que describe con detalle las distintas unidades geológicas de la provincia de Huelva, desde el punto de vista petrológico y estratigráfico.

A la serie de pizarras y grauvacas carboníferas las denomina "tramo del Culm", y su datación la efectúa en base a la presencia de Posidonomya Becheri, principalmente en la cuenca alta del río Piedras (en donde su descripción del yacimiento fosilífero es encomiable), en las cercanías de San Bartolomé de la Torre, y en Castromarín, "pueblo del vecino reino de Portugal".

En la serie secundaria distingue sólo el Triásico, y a él atribuye las calizas dolomíticas, arcillas margosas y ofitas presentes en el afloramiento de Ayamonte, aunque reconoce a pie de página que al entrar en prensa su investigación recibió una comunicación de la Comisión de Trabajos Geológicos de Portugal (Lisboa, 1877) donde, bajo el título "Interés sobre los Terrenos Secundarios", el geólogo M. P. CHOFFAT atribuye las calizas del Algarve portugués, a las que asimila los depósitos de los alrededores de Ayamonte, al sistema Liásico, opinión que dicho autor defiende en base a la presencia de fósiles en esos materiales.

Dentro de la serie terciaria distingue el siguiente corte tipo, esquemático, del Neógeno de la provincia de Huelva:

- En la base, un nivel de caliza cavernosa, fosilífera, que reposa en discordancia angular sobre terrenos de edad primaria de Sierra Morena. Le atribuye edad Mioceno, por comparación con la caliza descrita en Lora y Villanueva del Río (Sevilla) por LAN, veinte años antes.

- Encima, un conjunto de arcilla azul, localmente arenosa y fosilífera,

que data como Plioceno.

- Por último, una marga de arena fina fosilífera corona el conjunto, y para ella propone edad Plioceno (posible) o post-Plioceno.

Finalmente, dentro de la serie cuaternaria, distingue un sistema Diluvial, con un conglomerado de cantos rodados, englobados en cemento arcilloso rojo, al que atribuye origen marino, por la presencia de algunas especies fósiles de gasterópodos y lamelibranquios, y un sistema Aluvial integrado por materiales recientes a base de arcillas, más o menos arenosas, y con algunas sales, fangos y arenas sueltas, correspondientes a lo que denomina depósitos costeros, marinos y fluviomarinos, estudiando incluso el origen y evolución de las barras de arena localizadas en la desembocadura de los principales ríos atlánticos.

PEREIRA DE SOUSA (1919) atribuye el Carbonífero inferior del Algarve (Portugal) al Dinantiense superior (Viseense), en base a la presencia de Posidonomya Becheri, Goniatites striatus y Goniatites subcircularis DE MILLER (para el que propone un género nuevo al que denomina Lusitanóceras). Tratando de establecer una correspondencia entre la geología a ambos lados del río Guadiana, indica que sólo pudo hacer un rápido reconocimiento en la ribera española pero que, sin embargo, dado que Ayamonte y sus alrededores tienen calizas dolomíticas, que parecen pertenecer al Lías inferior (Sinemuriense), y que los aluviones del estero de La Nao (al norte de Ayamonte) cubren parte del Triásico, las colinas situadas al norte de dicho estero deben pertenecer también al Viseense, puesto que sus materiales tienen semejanzas petrológicas, muy patentes, respecto a los que, de esta edad, afloran en la región del Algarve portugués.

El trabajo de FLEURY (1924) es exclusivamente paleontológico y trata de demostrar, describiendo con todo detalle la fauna de las calizas viseanas portuguesas, la correspondencia de dichos materiales con el Dinantiense y nó con la facies Culm, denominación que hasta 1919 se mantuvo, probablemente, bajo la influencia de una antigua publicación de ROEMER y otros

geólogos alemanes, tales como ROSENBUSCH, HACKMANN, etc., fechada en el año 1872.

HERNANDEZ-PACHECO (1926) presenta la estratigrafía del Neógeno onubense con ocasión del Congreso Geológico Internacional de Madrid. En ella estudia el corte de "Los Cabezos" de Huelva, y por comparación con las conclusiones de Calderón, en la región sevillana, asigna edad Plaisanciense a las arcillas azules, y edad Astiense a la marga de arena fina suprayacente. No indica nada en contra de que la arenisca calcárea, del Mioceno de base, sea de edad Burdigaliense, como la de la depresión del Guadalquivir.

PRIETO (1944) aporta algunos retoques a las ideas de autores anteriores, sobre la edad de los materiales post-jurásicos onubenses. Piensa que las areniscas calizas de base pertenecen al Helvetiense, y que las arcillas azules y la parte inferior de la marga de arena fina suprayacente son de edad Plaisanciense. El Astiense podría estar representado por arenas blanquecinas de la parte superior de la marga, a menos que no correspondiesen al Pleistoceno, edad que asigna al conglomerado superior con arcilla rojiza.

SOLE-SABARIS (1958) estudia el corte estratigráfico de Moguer, y asigna a las arcillas azules y a la marga de arena fina edad Plaisanciense y Astiense, respectivamente.

PEREZ-MATEOS y RIBA (1961), en una comunicación presentada al II Congreso de Sedimentología, con el título "Estudio de los sedimentos pliocenos y cuaternarios de Huelva", establecen que el conglomerado rojo, que reposa sobre el Plioceno superior, es de edad Villafranquiense.

PERCONIG (1960 a 1973) realiza estudios, principalmente estratigráficos, sobre la geología de Andalucía occidental, en particular de la Cuenca del Guadalquivir, y muchas de sus conclusiones son aplicables al área estudiada en esta Tesis, en especial las que se refieren al estratotipo Andaluciense, término propuesto por este autor en 1966, en la serie Carmona-Dos Hermanas, para indicar la fase terminal regresiva del Mioceno de facies marina.

En 1961, en un artículo dedicado a la constitución geológica de la Cuenca del Guadalquivir, PERCONIG interpreta, entre otros, el perfil estratigráfico del sondeo de investigación petrolífera denominado "Moguer" y, después de citar la serie margo-arenosa del Plioceno y Mioceno, atribuye a la unidad de calizas dolomíticas, calizas detríticas y dolomías, situada entre 742 y 1890 metros de profundidad, edad Lías inferior por determinaciones paleontológicas (aunque, cita, la rareza de fósiles es notable), y por correlación con la columna del sondeo "El Asperillo", situado a 18 km al SSE del primero. Indica el autor, también, que el conjunto cortado entre 1890 y 2417 metros, que comprende principalmente anhidrita, niveles de sales y dolomías con arcillas rojizas, así como un conglomerado de base, pertenece al Trías, y que posee facies muy diferente a la del Trías andaluz y analogías con la de los sondeos de Cerro Gordo (Cádiz), situados en el límite de las zonas Bética y Subbética. En este mismo artículo afirma, de acuerdo con las alusiones de GAVALA (1959), que, en realidad, la gran falla o flexura del Guadalquivir, importante dislocación que pone en contacto brusco el Neógeno con el Paleozoico del bloque elevado de la Meseta, no existe, y que este contacto se debe a un hundimiento gradual hacia el sur del zócalo Paleozoico, con lo que al ser el Mioceno transgresivo sobre dicho zócalo la línea de contacto con la Meseta, que ahora observamos, corresponde, a groso modo, a la antigua orilla del mar Mioceno, precisando, incluso, que la transgresión es de edad Helvetiense y que sus facies corresponden a depósitos litorales, constituídos por areniscas y brechas fosilíferas con Heterostegina costata, extendiéndose desde Huelva hasta el norte de Córdoba.

GEA et al. (1965) incluyen un estudio geológico del área en el marco del Plan General de Exploración de Aguas Subterráneas en España, realizado para el INC. El trabajo abarca unos 1200 km^2 y, aunque discutible en algunos aspectos, constituye la investigación de geología de subsuelo más completa, hasta dicha fecha. Numerosos datos de sondeos mecánicos y de geofísica eléctrica y sísmica son utilizados por un equipo multidisciplinar de investigadores, para tratar de aclarar los muchos interrogantes que se plantean en la interpretación geológica del sector. En las conclusiones finales agrupan, desde el punto de vista litológico, en tres grandes unidades a los diversos

materiales existentes:

- El zócalo Paleozoico, formado por pizarras y grauvacas plegadas según directrices hercínicas, NW-SE.

- Sobre el zócalo, discordante, el Mesozoico, que comprende dolomías alternantes con intercalaciones volcánicas. Hacia la base, los autores destacan la presencia de margas y areniscas rojas, de grano fino, con yeso. Indican, también, la distribución irregular de estos materiales, bajo sedimentos neógenos, y que se encuentran, en general, al sur de la, que denominan, "falla de Lepe".

- Por último, la unidad Cenozoica (Micceno-Plioceno-Cuaternario), en la que incluyen gravas y arenas, ocasionalmente cementadas, arcillas margosas (Mioceno) con capas de arenas, y en la base molasas que afloran entre Gibraleón y Trigueros y que sólo existen en el sector centrooriental del área.

En general, las conclusiones de este trabajo son aceptables en muchos puntos, pero incompletas en lo que respecta al Mesozoico (no distinguen el Triásico) y al Mioceno (pues todo lo que no sea arcilla azul o conglomerado basal no lo consideran de esta edad).

El MOP (1965) encarga a la Compañía Hidroiberia de Ingenieros Consultores la elaboración del proyecto de construcción de la presa del río Piedras, según la normativa del Anteproyecto de Abastecimiento de Agua a la Zona Industrial de Huelva, regulada por O.M. de 25 de Octubre de 1965. La investigación geológica se centra en un sector de la comarca del Andévalo, para el estudio del Carbonífero inferior (serie de pizarras y grauvacas). Aunque, como es usual en este tipo de proyectos, las determinaciones de edad no son precisas, el estudio litológico, morfológico, tectónico y geotécnico aporta numerosos datos de gran interés, para un mejor conocimiento de los materiales carboníferos de la cuenca alta del río Piedras.

SUAREZ-BORES (1970), en un trabajo inédito, expone sus ideas sobre la constitución geológica del occidente andaluz y distingue, desde el punto de vista estructural, cuatro "formaciones" claramente diferenciadas:

- La "formación antigua", paleozoica ó herciniana, constituída por los terrenos primarios, plegados principalmente por la orogenia hercínica.

- La "formación media" ó alpina, formada por los depósitos posthercinianos plegados por la orogenia alpina.

- La "formación moderna" ó pliopleistocena, integrada por los depósitos pliocénicos y pleistocénicos, modificados por la erosión derivada de las alternancias del nivel de base, durante las glaciaciones cuaternarias.

- La "formación contemporánea", actual u holocena, originada por los procesos fluviomarinos actuantes, durante y desde la transgresión Flandriense, sobre la formación pliopleistocénica, parcialmente arrasada por la erosión subaérea Wurmiense.

Con dicho trabajo, el autor muestra poseer buenos conocimientos de Geología Histórica, pero descuída bastante los aspectos estratigráficos.

BARD (1971), en un estudio sobre la alternancia de zonas metamórficas y graníticas en el segmento hercínico del suroeste de la Península Ibérica, indica que el Culm grauváquico de Huelva presenta un metamorfismo regional de grado muy bajo, basándose en la presencia de la paragénesis pumpellita-stilpnomelana. Demuestra también, el autor, que las características metamórficas y magmáticas de dicho segmento hercínico son petrológicamente variables desde el norte hacia el sur, variabilidad que encaja en el modelo orogénico "ortotectónico" de DEWEY (1969), por lo que establece la hipótesis de que la parte sur de la región estudiada ha podido ser un margen continental, en donde funcionaba un "plano de BENIOFF" en la vertical de Huelva durante el Paleozoico medio y superior, mientras que la parte norte estaba atravesada por grandes fallas normales, que afectaban la corteza siálica

y la parte alta del manto superior. Termina su estudio con una discusión general, en la cual el autor intenta integrar el posible "ortotectógeno" del SW peninsular con las características "paratectónicas" de las Varíscidas de Europa Occidental.

DRAIN et al. (1971), en un artículo sobre la geografía de la Cuenca del Guadalquivir, acompañan un plano estructural de la parte occidental de la llanura andaluza, a escala 1/1.000.000, basado en el mapa geológico de LOPEZ y SUAREZ (1965) y PERCONIG (1960, 62). Después de analizar los materiales de la orla miocena de Sierra Morena, depositados por el mar transgresivo Helvetiense, indican que la llanura del Guadalquivir es un ejemplo claro de sillón de piedemonte, entre una cadena de plegamiento reciente (las Cordilleras Béticas) y un zócalo antiguo (la Meseta) del que Sierra Morena no es mas que la orla meridional.

FERNANDEZ-ALONSO (1972) realiza un corte geológico norte-sur, que pasa por Trigueros, Moguer y Mazagón; el corte es el resultado de investigaciones geoeléctricas (SEV) y gravimétricas, confirmadas con datos de sondeos mecánicos. Al interpretar el corte, el autor llega a la conclusión de que el perfil del Paleozoico se asemeja mucho al del margen continental de un fondo submarino típico y es el resultado del contínuo y gradual hundimiento de la parte sur del zócalo, en toda la región, y que al norte del río Tinto la pendiente del Paleozoico es suave y sobre él reposan directamente depósitos de la transgresión helvetiense que comienza con un nivel detrítico de base y sigue con margas y arcillas con intercalaciones arenosas. Entre el río Tinto y Moguer se produce un cambio brusco de la pendiente del Paleozoico, y sobre él se depositaron materiales triásicos de facies germano-andaluza. El autor cita que, según PERCONIG y otros, sobre el Triásico se depositaron calizas y dolomías del Lías inferior y, a su vez, sobre estos materiales calizas del Jurásico superior transgresivo; la serie termina con sedimentos margosos del Mioceno, similares a los que reconoce en la parte norte del corte geológico.

Por la proximidad de este perfil geológico al área estudiada, algunas de

sus conclusiones resultan bastante orientativas para la interpretación de la geología de subsuelo.

En el año 1972 el IGME edita las memorias de las hojas geológicas de Puebla de Guzmán (núm. 74), Sevilla (núm. 75) y Ayamonte-Huelva (núm. 80-81), a las que acompañan planos geológicos a escala 1/200.000. En su realización colaboran el IGME, ENADIMSA y diversos autores, como FONTBOTE, FEBREL, VAZQUEZ-GUZMAN, etc.. En ellas se sintetiza, a grandes rasgos, la geología del área, pero se ignora el afloramiento calizo-dolomítico de Ayamonte.

En el año 1974 se dá por concluído, como tal, el Proyecto de Investigaciones Hidrogeológicas de la Cuenca del Guadalquivir, iniciado en el año 1965 y llevado a cabo a cabo por el IGME, con la participación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Aunque discutibles muchas de sus puntualizaciones geológicas, lo cierto es que este ambicioso proyecto hidrogeológico perfila la geología y estructura de conjunto de la Cuenca del Guadalquivir a escala 1/50.000.

VIGUIER (1974) estudia el Neógeno de Andalucía noroccidental, en una detallada investigación estratigráfico-sedimentológica, en la que establece la historia geológica reciente de la región y ofrece una base sólida en la que deben apoyarse trabajos posteriores, de detalle, sobre el Neógeno andaluz.

Los primeros resultados del ambicioso Plan MAGNA, respecto al área estudiada, tienen lugar en el año 1975 con la publicación por el IGME (en colaboración con ENADIMSA) de la memoria de la hoja Huelva-Los Caños (número 999-1016), a la que acompaña un plano geológico a escala 1/50.000. En ella se matizan aspectos muy importantes sobre el Terciario del sector suroriental del área estudiada, pero la geología de subsuelo está insuficientemente tratada.

En el año 1977, el MOPU, a través de la Dirección General de Puertos y Señales Marítimas, publica un estudio realizado por INTECSA sobre el

Plan Indicativo de Usos de Dominio Público Litoral. En lo que respecta al tramo de costa de la provincia de Huelva, el estudio incluye un mapa geológico a escala 1/100.000 poco afortunado, pero, sin embargo, refleja una acertada interpretación de la historia geológica reciente, de la costa atlántica, bajo la óptica de la tectónica de placas, apoyada en datos de diferentes autores, principalmente de BIJU-DUVAL et al. (1973), DIETZ y HOLDEN (1970) y DIDON et al. (1973).

RAMBAUD (1978) estudia la distribución de focos volcánicos y yacimientos en la faja pirítica onubense en relación con alineaciones estructurales, deducidas de la interpretación de imágenes de satélite. En el estudio incluye un esquema de alineaciones del SW peninsular, a escala 1/1.000.000, realizado por BEICIP (Bureau d'Etudes Industrielles et de Coopèration de L'Institut Français du Pètrole) en 1976, dentro del "Proyecto Ibersat", y financiado, entre otras entidades, por la empresa Unión Explosivos Rio Tinto. Por lo que respecta al área estudiada destaca la alineación estructural N 70-80º E, que representa la polémica "falla del Guadalquivir", y la alineación N 10-15º W, bien visible en el tramo final del río Guadiana. Ambas, según el autor, corresponden a estructuras conjugadas de fallas profundas del macizo hercínico. Se observan, también, muchas más alineaciones aunque de menor importancia, pero son notables los sistemas N 50-60º W y su conjugado, N 30-40º E, correspondiendo, el primero de ellos, a fracturas paralelas a ejes principales de pliegues hercínicos. Entre otras conclusiones, el autor indica que las alineaciones estructurales, presentes en el conjunto hercínico, podrían haber controlado los movimientos alpinos, fuera de áreas con materiales paleozoicos aflorantes, lo que supondría que el alpino sólo ha jugado sobre estructuras de fondo hercínicas.

Tengo que resaltar que muchas de las fracturas observadas modernamente, vía satélite, fueron ya detectadas, en el estudio realizado por GEA et al. (1965), mediante geofísica eléctrica y sísmica.

DABRIO et al. (1980) exponen los resultados previos de un estudio sobre dinámica litoral y sedimentación costera, en el Golfo de Cádiz, en el que ana-

lizan, entre otros, la dinámica sedimentaria de la costa onubense y diferencian cuatro ambientes sedimentarios: de playa, mareales, eólicos y terrestres.

MORENO (1982) realiza un estudio detallado sobre la estratigrafía, paleogeografía, génesis y modelo sedimentario de la serie carbonífera de facies Culm, en un sector situado a unos 12 km al norte del área de Tesis, basándose en la columna del sondeo "Las Marías 1" (37º 29' 30'' N, 3º 37' 30'' W; 538,3 metros de profundidad), muy próximo a Villanueva de los Castillejos, y en los numerosos datos de cortes estratigráficos que la autora establece. Respecto a la edad de los materiales de facies Culm recopila los datos previos sobre esta facies en la región, y los compara con los de otras zonas de España (Cantábrica, Ossa-Morena y Baleares) indicando que, en el sector estudiado, son de edad Viseense superior. Entre las principales conclusiones de su estudio destacan las referentes al medio sedimentario en el que se formó la serie turbidítica (abanico submarino progradante desde el NW hacia el SE, ubicado cerca del talud continental), y la localización del área fuente de los aportes (hacia el NW, en Portugal).

Con posterioridad a la finalización del Proyecto de Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir, el IGME, a través de su División en Sevilla, ha seguido, y continúa, una labor de perfeccionamiento, en el sentido de completar y ampliar los conocimientos de geología de subsuelo, en el área estudiada, lo que se ha plasmado en la realización de numerosos sondeos mecánicos, cuyos datos inéditos me han sido generosamente brindados para la realización del presente estudio, colaboración que agradezco en todo su valor.

2. ANTECEDENTES HIDROGEOLOGICOS

Dentro de este epígrafe pretendo dar una visión de los trabajos existentes, que hacen alusión a algunos aspectos de la hidrogeología del área estudiada, en cuanto que puedan tener incidencia en los objetivos del estudio.

Las primeras observaciones localizadas, en relación con las aguas subterráneas, se deben a GONZALO-TARIN (1887) quien cita la "fuente de Huelva" en Gibraleón, que relaciona con el drenaje de los materiales cuaternarios, en su contacto con pizarras arcillosas impermeables del Carbonífero, las aguas alumbradas por pozos ordinarios o galerías, en los terrenos paleozoicos, terciarios y cuaternarios, y las aguas artesianas "existentes en una caliza grosera y fosilífera situada bajo arcillas azules, que se apoya sobre las pizarras del Culm y que asoma en Niebla y otros parajes", puestas de manifiesto en tres pozos, ejecutados entre 1880 y 1884 por la compañía minera de Rio Tinto, la empresa minera de Tharsis y Los Silos de Calañas, en la margen derecha e izquierda de la ría de Huelva, uno de los cuales alcanzó 214,30 metros de profundidad.

PRIETO (1944) realiza estudios parciales, en el sector suroriental de la provincia de Huelva, en general inéditos, en los que pone de manifiesto su interés por investigar la relación entre aguas superficiales y aguas freáticas.

GEA et al. (1965) realizan el primer trabajo de exploración y evaluación de los recursos de aguas subterráneas en la parte sur de la provincia de Huelva. El estudio, efectuado para el INC dentro del Plan General de Exploración de Aguas Subterráneas en España, cubrió una superficie de unos 1200 km^2 sobre las hojas (MTN, escala 1/50.000) números 980, 981, 982, 998, 999, 1000, 1016 y 1017.

El objeto de esta exploración hidrogeológica fué determinar las condiciones de yacimiento de las aguas subterráneas, y evaluar los recursos hídricos subterráneos del sector.

La prospección geológica, geofísica e hidrogeológica probó la existencia de varios horizontes acuíferos, en materiales terciarios, de interés para el desarrollo de riegos con aguas subterráneas. Por debajo de éstos, y sobre el substrato paleozoico, se señalan otros acuíferos de distribución irregular, en molasas y conglomerados de la base del Mioceno y en dolomías triá-

sicas, que por su profundidad, localización y dificultades en la perforación y construcción de pozos serían de interés económico sólo para fines de abastecimiento urbano o industrial.

Al oeste del río Odiel se indica que estos horizontes acuíferos están distribuídos en dos cuencas hidrogeológicas: Aljaraque-Cartaya y La Redondela. La distribución de los acuíferos es poco uniforme, en ambas cuencas, por las complejas condiciones litológicas y tectónicas del subsuelo. El agua se encuentra en régimen libre en la cuenca de La Redondela y confinada en la cuenca de Aljaraque-Cartaya, lo que puede justificar la surgencia de pozos observada en la parte norte del sector.

El estudio finaliza estableciendo el régimen de funcionamiento y la potencialidad de estos horizontes acuíferos. Se invoca una recarga principal, por infiltración de las precipitaciones, en sedimentos permeables de las áreas planas, y por escorrentía desde las montañas del norte del sector, e infiltración a través de los sedimentos de piedemonte y materiales permeables del subsuelo; el drenaje viene impuesto por el nivel de base (Océano Atlántico), en el límite sur del área de estudio. La potencialidad de los horizontes acuíferos de la cuenca Aljaraque-Cartaya se estima en 32 Hm^3/año y en 19 Hm^3/año para la cuenca de La Redondela.

El trabajo realizado por GEA et al. es, por tanto, el primer estudio hidrogeológico sobre el área, y representa el primer intento por parte de la Administración, de realizar investigaciones sistemáticas de las aguas subterráneas en Huelva. El estudio aporta gran profusión de informes técnicos pero, desafortunadamente, ha permanecido inédito.

Los estudios sistemáticos del área comienzan en 1966 con la aprobación, por parte del Fondo Especial de las Naciones Unidas (FAO), del proyecto AGL: SF/SPA 9, denominado "Investigaciones Hidrogeológicas en la Cuenca del río Guadalquivir". Este proyecto se lleva a cabo, bajo la dirección del IGME, durante el trienio 1966-1969 y su objetivo esencial es la identificación de recursos de aguas subterráneas, que puedan utilizarse para el riego en

el Valle del Guadalquivir, en los sectores en que no existen disponibilidades suficientes de aguas superficiales.

Cabe destacar, en el marco de esta investigación, el denominado "Proyecto PRAKLA", en el que se llevó a cabo la prospección eléctrica de una área de 35.000 km^2 dividida en diez zonas, de las que la primera engloba a la mayor parte de la provincia de Huelva.

Este proyecto permitió adquirir un mejor conocimiento de los niveles acuíferos presentes en el área y de su potencial hidráulico, quedando definidos en él el acuífero freático y el acuífero profundo de la región de Huelva.

En el año 1970 comienza, a iniciativa del IGME, el Plan Nacional de Aguas Subterráneas (PIAS), cuya misión se centra en la investigación y evaluación de los recursos subterráneos, y en 1971 publica el Mapa Hidrogeológico Nacional. En este mapa España queda dividida en sistemas acuíferos, correspondiendo al área de Tesis el "sistema acuífero número 25" denominado "Plio-cuaternario costero de Huelva" que, si bien geográficamente pertenece a la cuenca hidrográfica del Guadiana, para su descripción se incluye en la del Guadalquivir por su similitud con los otros sistemas costeros de esta cuenca, hecho que se sigue manteniendo en la actualidad. En el PIAS se estudian exclusivamente las capas freáticas de este sistema acuífero y, paradójicamente, se ignora la existencia del acuífero profundo (Mioceno superior de base y Jurásico). No obstante, en el estudio se indica ya algo muy importante como es la necesidad de un control preciso de la interfase salina, tendente a evitar los problemas de intrusión marina al acuífero.

A partir de esta fecha, el IGME inicia el Proyecto de Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir, y los trabajos relativos al sistema acuífero número 25 se controlan, hasta la actualidad, desde la División de este Organismo en Sevilla, siendo sus fines primordiales evaluar los recursos hidráulicos existentes y colaborar en la gestión y conservación de los acuíferos de dicho sistema.

El IGME (1973) expone el grado de vulnerabilidad de los acuíferos del área de Tesis, frente a los posibles agentes contaminantes, tratando con ello de llamar la atención sobre este importante problema, lo que constituye un aspecto fundamental desde el punto de vista de su prevención.

En la memoria de la hoja Huelva-Los Caños, del Mapa Geológico de España a escala 1/50. 000 (DE TORRES et al., 1975), se hace una referencia hidrogeológica del sector suroriental del área de Tesis; en ella se alude a la dificultad del estudio hidrogeológico del sector, en relación con el complejo dispositivo tectónico del substrato paleozoico, que hace que, más que una cuenca unitaria, aparezcan cuencas hidrogeológicas menores, de comportamientos muy diferentes entre sí. De forma general, se hace referencia ya, de manera clara, a dos formaciones hidrogeológicas situadas a diferente profundidad y, por primera vez, se alude al carácter hidrogeológico del Mesozoico, indicando que las dolomías detríticas triásicas, al karstificarse, dan buenos acuíferos, aunque con caudal modesto; estos materiales sólo podrían servir para abastecimiento de poblaciones, si se encuentran a una profundidad razonable, aunque un aprovechamiento como almacén de aguas residuales pudiera parecer de interés.

MARTIN-SOSA (1981), indica que el subsuelo de la región suroccidental de la provincia de Huelva es rico en aguas subterráneas; no obstante, limitaciones de índole legal y técnicas (existen síntomas de sobreexplotación), impiden que en los planteamientos actuales se pueda aumentar el consumo de los recursos. Después de analizar los problemas de las aguas subterráneas en esta región, afirma que la adecuada gestión, la lógica integración de aguas superficiales y subterráneas, y la aplicación de medidas y técnicas especiales, pueden paliar el déficit existente, atendiendo de esta forma la demanda futura.

En el año 1982 el IGME publica la hoja Ayamonte-Huelva del Mapa Hidrogeológico Nacional a escala 1/200. 000, a cuya elaboración he contribuído con un avance hidrogeológico del sector, con el doble objetivo de mostrar una síntesis de las características hidrogeológicas de los acuíferos y ofrecer la

información básica, que permita la realización de estudios de mayor detalle, en el área meridional de la región suroccidental de la provincia de Huelva.

CLIMATOLOGIA

1. CONSIDERACIONES GENERALES

Cuando se realiza una investigación hidrogeológica que pretenda establecer el balance hídrico, con conocimiento de recursos, funcionamiento hidráulico de los sistemas, régimen de los ríos, etc., es preciso conocer, de forma cualitativa y cuantitativa, los principales elementos climáticos, tales como precipitaciones, temperaturas, etc..

El estudio se inicia con datos pertenecientes a observaciones puntuales realizadas en estaciones meteorológicas. Las series a utilizar no siempre son completas, siendo frecuente la ausencia de datos en determinados años y la presencia de errores en los existentes. Esto hace que la utilización de los valores disponibles ofrezca poca garantía, si lo que se pretende es obtener resultados fiables.

Por esto, es necesario elaborar previamente los datos disponibles, según métodos estadísticos, con la finalidad de detectar y corregir los errores presentes en ellos, así como para completar las series en las que faltan algunos de estos datos. Para ello, se pueden utilizar diversos métodos, desde el simple cálculo manual hasta los modernos equipos de ordenador.

El tratamiento de datos lo he hecho ayudado por un microordenador TRS-80, RADIO SHACK, modelo III, del Departamento de Matemáticas de la Escuela Universitaria Politécnica de La Rábida (Huelva).

Para ello, he utilizado el programa elaborado, en lenguaje BASIC, por S. RO-

MERO (1) en 1981 para esta Tesis.

```
10 REM PROGRAMA PARA EL CALCULO DE REGRESION DE ORDEN"N"
15 CLS:CLEAR 6000
20 DIM A(9),R(9,4),T(4)
30 DEFDBL A-Z:DEFSNG I,J,K
40 INPUT"MAXIMO GRADO DE LA ECUACION";D
50 INPUT"NUMERO DE PUNTOS CONOCIDOS";N
100 A(1)=N
104 REM INTRODUCCION DE COORDENADAS DE LOS PUNTOS
110 FOR I=1 TO N
120 PRINT"X,Y DE PUNTO";I;
130 INPUT X,Y
134 REM SISTEMA DE ECUACIONES RELLENANDO MATRICES DESDE LA
137 REM LINEA 140 A 220
140 FOR J=2 TO 2*D+1
150 A(J)=A(J)+X^(J-1)
160 NEXT J
170 FOR K=1 TO D+1
180 R(K,D+2)=T(K)+Y*X^(K-1)
190 T(K)=T(K)+Y*X^(K-1)
200 NEXT K
210 T(D+2)=T(D+2)+Y^2
220 NEXT I
225 REM SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES MATRICIAL DESDE
226 REM LA LINEA 230 A 560
230 FOR J=1 TO D+1
240 FOR K=1 TO D+1
250 R(J,K)=A(J+K-1)
260 NEXT K
270 NEXT J
280 FOR J=1 TO D+1
290 K=J
300 IF R(K,J)<>0 THEN 340
310 K=K+1
315 IF K<=D+1 THEN 300
320 PRINT "VARIAS SOLUCIONES"
330 GOTO 830
340 FOR I=1 TO D+2
350 S=R(J,I)
360 R(J,I)=R(K,I)
370 R(K,I)=S
380 NEXT I
390 Z=1/R(J,J)
400 FOR I=1 TO D+2
410 R(J,I)=Z*R(J,I)
420 NEXT I
430 FOR K=1 TO D+1
440 IF K=J THEN 490
450 Z=-R(K,J)
460 FOR I=1 TO D+2
470 R(K,I)=R(K,I)+Z*R(J,I)
480 NEXT I
490 NEXT K
500 NEXT J
510 PRINT
520 LPRINT"CONSTANTE=";CSNG(R(1,D+2))
525 REM ESCRIBIR COEFICIENTES DE LA ECUACION
530 FOR J=1 TO D
540 LPRINT J;"GRADO DEL COEFICIENTE=";CSNG(R(J+1,D+2))
550 NEXT J
560 PRINT
568 REM ANALISIS DE LA REGRESION
570 P=0
580 FOR J=2 TO D+1
590 P=P+R(J,D+2)*(T(J)-A(J)*T(1)/N)
600 NEXT J
610 DEFDBL I,J
620 Q=T(D+2)-T(1)^2/N
630 Z=Q-P
640 I=N-D-1
650 PRINT
670 J=P/Q
670 LPRINT "COEFICIENTE DE DETERMINACION (R^2)=";CSNG(J)
680 LPRINT "COEFICIENTE DE CORRELACION=";SQR(J)
690 LPRINT"ERROR ESTANDARD DE ESTIMACION=";SQR(Z/I)
700 END
```

Programa para regresión lineal de orden n (según ROMERO, 1981; modificado de POOLE, 1981)

2. PRECIPITACIONES

2.1. DATOS EXISTENTES Y SU TRATAMIENTO

2.1.1. Datos de base

Las estaciones meteorológicas que he utilizado en el presente estudio se reflejan en la figura 5.

(1) Profesor Agregado de Matemáticas de la EUP de La Rábida.

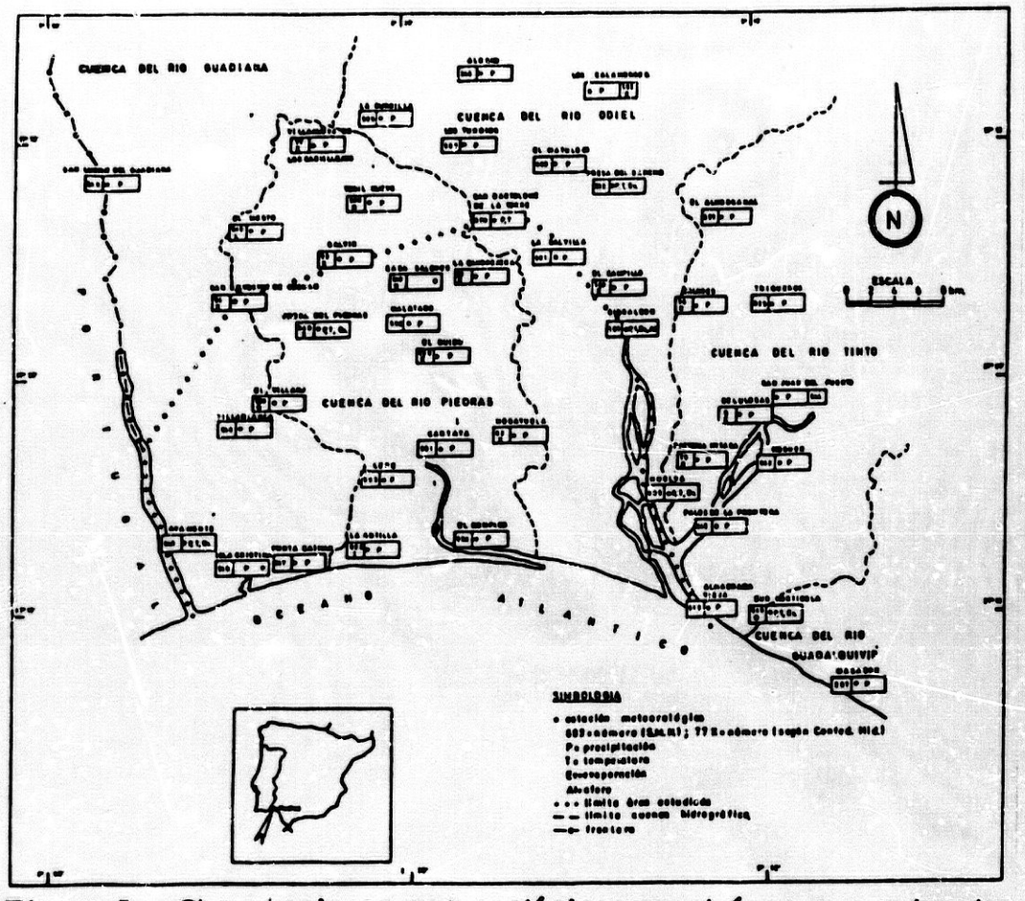


Figura 5.- Observaciones meteorológicas en el área y sus bordes

Aunque el estudio hidrogeológico se centra en el área de Tesis, para el análisis de los elementos climáticos se amplía a un sector de borde de gran utilidad en el caso de la variable precipitación, que tiene gran dependencia de las características espaciales.

Los datos básicos de la serie original los he recopilado en los ficheros de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Centro de Estudios Hidrográficos y Anuarios Meteorológicos Nacionales (Servicio Meteorológico Nacional).

He realizado el inventario de 43 estaciones pluviométricas, que pertenecen a la Cuenca Hidrográfica del Guadiana, a excepción de dos (Sur Hortícola y Mazagón), que se ubican en la del Guadalquivir. En el cuadro 1 reflejo sus características geográficas, período de observación (hasta 1979) y número de orden (según el Servicio Meteorológico Nacional y los Centros Hidrográficos

Nº S.M.N.	Nombre	Coordenadas longitud-latitud	Cota m.s.n.m.	Período de observación
*643	Almadraba Vieja	3°12'50"W -- 37°10'00"N	15	1967/79
*246	Alosno	3°25'30"W -- 37°33'00"N	173	1949/79
549	Ayamonte	3°43'20"W -- 37°13'10"N	10	1945/79
* 36 X	Calores	3°13'10"W -- 37°23'00"N	35	1963/66,67/78
549 U	Casa Salones	3°27'43"W -- 37°24'05"N	110	1968/79
551	Cartaya	3°28'00"W -- 37°17'00"N	19	1953/60,68/79
* 8 X	Celulosas	3°11'00"W -- 37°18'20"N	7	1963/67,68/76
*637	El Almorranal	3°11'40"W -- 37°26'40"N	119	1963/79
*569 E	El Campillo	3°18'05"W -- 37°23'42"N	60	1963/79
*600	El Matuloso	3°21'30"W -- 37°29'00"N	129	1964/79
*549 L	El Mesto	3°38'35"W -- 37°26'10"N	195	1968/77
554	El Rompído	3°26'20"W -- 37°13'00"N	11	1963/79
550 E	El Ruído	3°28'10"W -- 37°21'00"N	82	1968/79
550 O	El Villano	3°37'15"W -- 37°19'00"N	108	1968/79
* 79 X	Factoría Hytasa	3°13'30"W -- 37°16'20"N	12	1962/67,68/76
* 92 X	Galvín	3°33'20"W -- 37°24'55"N	112	1968/76
603	Gibraleón	3°17'20"W -- 37°22'40"N	26	1967/79
*605	Huelva	3°15'00"W -- 37°15'00"N	0,5	1930/79
548	Isla Cristina	3°38'15"W -- 37°12'00"N	7	1945/79
553 I	La Antilla	3°31'50"W -- 37°12'45"N	37	1970/79
*595	La Burrilla	3°30'38"W -- 37°31'10"N	360	1960/66,67/79
601	La Calvilla	3°21'30"W -- 37°25'00"N	168	1945/51,63/79
89 X	La Cangrejera	3°26'00"W -- 37°24'15"N	160	1968/79
553	Lepe	3°31'15"W -- 37°15'40"N	20	1963/79
*592 E	Los Calamorros	3°19'05"W -- 37°32'15"N	140	1973/79
597	Los Turbios	3°26'35"W -- 37°29'50"N	145	1930/34,61/65,67/79
550	Malatado	3°29'45"W -- 37°22'25"N	85	1963/79
*257	Mazagón	3°04'50"W -- 37°06'50"N	51	1967/79
82 X	Mogayuela	3°24'00"W -- 37°17'35"N	62	1968/76
*642	Moguer	3°08'50"W -- 37°16'20"N	51	1963/79
*645	Palos de la Frontera	3°12'20"W -- 37°13'40"N	24	1953/79
549 S	Presa del Piedras	3°34'40"W -- 37°22'00"N	80	1968/79
*602	Presa del Sancho	3°17'50"W -- 37°27'32"N	70	1960/66,67/79
547	Punta Caimán	3°36'10"W -- 37°12'10"N	7	1960/78
599	San Bartolomé de la Torre	3°25'00"W -- 37°26'40"N	125	1945/47,50/79
*543	San Lúcar del Guadiana	3°46'40"W -- 37°28'20"N	30	1944/79
*544	San Juan del Puerto	3°09'00"W -- 37°13'00"N	7	1945/57,62/65,66/77
94 X	San Silvestre de Guzmán	3°39'30"W -- 37°23'15"N	154	1968/76
* 86 X	Sur Hortícola	3°09'30"W -- 37°09'55"N	20	1968/79
*549 O	Toril Nuevo	3°32'00"W -- 37°27'25"N	141	1968/79
*638	Trigueros	3°09'00"W -- 37°23'00"N	75	1945/57,63/66,67/79
546	Villablanca	3°39'10"W -- 37°18'00"N	93	1963/66,67/79
* 77 X	Villanueva de los Castillejos	3°35'00"W -- 37°30'00"N	220	1945/47,59/60,68/76

Cuadro 1.- Estaciones meteorológicas en el área estudiada y sus bordes (Fuente: Servicio Meteorológico Nacional)

* Estación situada fuera del área estudiada (en sus bordes)

correspondientes).

Las estaciones con corto período de observación (hasta 9 años) son inutilizables para el fin perseguido (El Mesto, Galvín, La Antilla, Los Calamorros, Mogayuela y San Silvestre de Guzmán). Para el estudio de las precipitaciones en el área he retenido 37 estaciones, 14 de las cuales tendrán tan sólo valor orientativo, ya que la serie original tiene menos de quince años. Las restantes 23 estaciones son básicas para el estudio y de ellas 10 se encuentran en el interior del área investigada y el resto en los bordes.

Al objeto de obtener una precipitación media suficientemente representativa he elegido un período de 30 años, según aconseja la Organización Meteorológica Mundial (CASTANY, 1971). Este período comprende el intervalo entre los años hidrológicos 1949/50 a 1978/79.

2.1.2. Tratamiento de los datos

En este epígrafe sintetizo el tratamiento al que he sometido los datos existentes para depurar, corregir y completar las series, con el fin de realizar un plano de isoyetas que refleje al máximo la realidad, y de obtener valores fiables en todos aquellos factores en cuyo cálculo interviene la precipitación (evapotranspiración real, escorrentía superficial, infiltración, etc.).

2.1.2.1. Metodología empleada

Hay gran variedad de métodos para completar y corregir series pluviométricas, afectadas de errores o con datos insuficientes; unos manuales, desarrollados bajo ciertas hipótesis de la ecuación de regresión lineal múltiple que permiten obtener valores de la lluvia "teórica" mensual (TRENDEL et al., 1973), otros, la mayoría, automatizados mediante ordenador (HERAS, 1976).

El proceso que he seguido en esta investigación se adapta mucho al que expone HERAS (1976), que es similar al empleado por NIETO (1973), PORTERO y FERNANDEZ-RUBIO (1975) y PULIDO-BOSCH (1979).

El proceso seguido ha sido el siguiente:

- 1) Recopilación de valores mensuales de precipitación en las estaciones seleccionadas.

- 2) Análisis de sus datos, con el fin de desechar aquellas que se han estimado anómalas, poco representativas, o que presentan una serie de datos muy incompleta. Debido a ésto he eliminado 6 estaciones, correspondientes a series originales con menos de nueve datos.

- 3) Las estaciones en cuyas series originales faltan datos de tres meses, o menos, las he completado aplicando el método del U. S. Weather Bureau (BENITEZ, 1972), consistente en completar los datos ausentes por atribución de la media aritmética de tres estaciones próximas, de características similares, aproximadamente equidistantes. Para valores mensuales el método es preciso, siempre y cuando se cumplan los requisitos de proximidad, cotas similares, igual orientación y situadas en la misma vertiente (PULIDO-BOSCH, 1979). Por este método he completado datos mensuales en 31 estaciones.

En los años sin ningún o muy pocos datos mensuales he completado las series por correlación, según el proceso siguiente:

- a) Localización de las estaciones sobre un plano a escala 1/100.000 con el valor de la precipitación media aproximada (PULIDO-BOSCH, 1979) y cota.

Con estos datos he trazado curvas isoyetas medias estimativas, tomando como base para ello las estaciones que tienen series con un mínimo de datos del 50 por 100 del período de treinta años considerado para el presente estudio (HERAS, 1976).

- b) Análisis del mapa de isoyetas medias estimativas, lo que me permite agrupar las estaciones por sectores con las siguientes características similares (HERAS, op. cit.):

- El número de estaciones debe ser de 3 a 10.

- La media de las estaciones del grupo ha de ser similar.

- Cada grupo ha de tener, al menos, una estación con serie original suficientemente extensa (más de veinte años).

- La cota absoluta de las estaciones del grupo debe ser similar (menos de

300 metros de diferencia de unas a otras).

- Las estaciones del grupo deben estar relativamente próximas entre sí (a menos de 50 kilómetros).

- c) Con estos criterios he formado 5 grupos de estaciones (cuadro 2).

GRUPO I	GRUPO II	GRUPO III
San Lúcar del Guadiana (&)	Ayamonte (&)	Gibraleón (x)
Presa del Piedras (x)	Isla Cristina (&)	Factoría Hytasa (x)
El Villano (x)	El Rompído	Huelva (&)
Villablanca (x)	El Ruído (x)	Palos de la Frontera (&)
Lepe	Malatado	Moguer (x)
Cartaya	La Cangrejera (x)	San Juan del Puerto
Punta Caimán	Casa Salones (x)	Almadraba Vieja (x)
	Torí Nuevo (x)	Sur Hortícola (x)
		Mazagón (x)

GRUPO IV	GRUPO V
Alosno (&)	Presa del Sancho
La Burrilla	El Almorranal (x)
Villanueva de los Castillejos (x)	San Bartolomé de la Torre (&)
Los Turbios	Calores (x)
El Matuloso (x)	Trigueros
La Calvilla	Celulosas (x)
El Campillo	

Cuadro 2.- Grupos de estaciones para tratamiento de la precipitación
(x) estación con menos de quince años de serie
(&) estación con más de veinte años de serie

De todas estas estaciones, 21 se encuentran fuera del área estudiada, pero las he utilizado para poder observar la evolución de las precipitaciones hacia los bordes. Además, 18 tienen series inferiores a quince años, por lo que sólo aportarán un valor orientativo en el trazado de las curvas isoye-

tas.

- d) Cada una de las estaciones la he correlacionado con las restantes del grupo, mediante el cálculo de la recta de regresión lineal, por el método de ajuste por mínimos cuadrados. Las estaciones incompletas las he completado con aquellas que presentan el coeficiente de correlación más próximo a la unidad.

- e) Posteriormente, y con el fin de detectar los posibles errores sistemáticos y accidentales, cada estación es comparada con la "estación tipo" de su grupo. La "estación tipo" es una estación ficticia, cuya serie es la media de las que componen el grupo.

2.1.2.2. Método de correlación estadística de datos

Con el fin de completar las series en que faltaban datos he comparado cada estación con las restantes, dentro de su grupo, mediante el cálculo de la recta de regresión lineal, por el método de ajuste por mínimos cuadrados, y el coeficiente de correlación en cada una de ellas.

Los resultados obtenidos se expresan en los cuadros 3 a 7 (Anejo 1), y en el cuadro 8 reflejo los principales resultados de esta correlación.

En las ecuaciones de la recta de regresión, la variable independiente corresponde a las precipitaciones de la estación con mayor número de datos (NIETO, 1973).

He realizado 121 correlaciones (Anejo 1) y he completado las series en aquellos casos en que el coeficiente de correlación es superior a 0,7, tratando de utilizar siempre el más próximo a la unidad (cuadro 8).

Los resultados obtenidos los presento en los cuadros 9 a 13 (Anejo 2).

De esta manera dispongo de 37 estaciones con los valores anuales comple-

ESTACION PLUVIOMETRICA				Nº de años concurrentes	GRUPO	r coeficiente de correlación	m pendiente	b ordenada en el origen	Ecuación de la recta de regresión utilizada para el completado de datos
Nº	Nº de años de la serie original	Nº	Nº de años de la serie original						
543	26	549 B	11	8	I	0,9596	0,8623	133,3683	y=0,3623x+133,3683
543	26	550 D	10	7	I	0,9371	0,8347	17,01	y=0,8347x+17,01
543	26	551	15	11	I	0,9129	0,8433	47,01	y=0,8433x+47,01
543	26	547	18	16	I	0,9867	0,7976	95,93	y=0,7976x+95,93
5495	11	547	18	10	I	0,9207	1,1218	65,6804	y=1,1218x+65,6804
5500	10	546	12	10	I	0,9718	0,9758	-25,8012	y=0,9758x-25,8012
5500	10	553	16	10	I	0,9349	0,8894	-23,4143	y=0,8894x-23,4143
5500	10	551	15	10	I	0,9402	0,8930	24,8178	y=0,8930x+24,8178
546	12	551	15	10	I	0,9271	0,8587	76,9561	y=0,8587x+76,9561
546	12	547	18	11	I	0,8648	1,0842	2,2158	y=1,0842x+2,2158
549	27	548	28	25	II	0,7824	0,6230	204,3482	y=0,6230x+204,3482
548	28	554	16	16	II	0,8439	0,5982	219,45	y=0,5982x+219,45
548	28	550 E	10	10	II	0,9009	1,05	34,53	y=1,05x+34,53
548	28	550	16	16	II	0,9191	0,9511	130	y=0,9511x+130
554	16	549 D	10	10	II	0,9167	1,6571	-252,364	y=1,6571x-252,364
550E	10	550	16	10	II	0,9606	0,8720	5,0524	y=0,8720x+5,0524
550	16	89 X	10	10	II	0,9879	0,9139	84,9129	y=0,9139x+84,9129
550	16	549 U	10	10	II	0,9878	0,8495	45,66	y=0,8495x+45,66
89X	10	549 U	10	10	II	0,9865	1,0249	-34,16	y=1,0249x-34,16
603	12	645	23	12	III	0,9486	1,2391	-65,3311	y=1,2391x-65,3311
79X	30	605	30	10	III	0,8764	1,1308	-45,4175	y=1,1308x-45,4175
605	30	645	23	22	III	0,8136	0,8535	108,1594	y=0,8535x+108,1594
605	30	544	18	18	III	0,8188	0,8580	121,5012	y=0,8580x+121,5012
605	30	643	11	11	III	0,9149	0,8512	-5,2230	y=0,8512x-5,2230
605	30	80 X	9	9	III	0,9353	0,6826	123,7057	y=0,6826x+123,7057
642	19	544	18	8	III	0,9547	1,0873	-53,5028	y=1,0873x-53,5028
642	19	257	11	11	III	0,8330	0,7641	170,9099	y=0,7641x+170,9099
544	18	80 X	9	8	III	0,9772	0,7373	92,2392	y=0,7373x+92,2392
544	18	257	11	8	III	0,8686	0,8471	105,2107	y=0,8471x+105,2107
248	30	595	16	14	IV	0,8656	0,9958	36,9284	y=0,9958x+36,9284
248	30	77 X	7	7	IV	0,9354	0,7892	62,3828	y=0,7892x+62,3828
248	30	597	16	14	IV	0,8628	1,0647	-237,921	y=1,0647x-237,921
248	30	601	15	15	IV	0,8700	0,9558	15,7775	y=0,9558x+15,7775
597	16	600	14	13	IV	0,9301	0,4971	229,0708	y=0,4971x+229,0708
602	25	569 E	16	14	IV	0,9210	0,8907	17,0773	y=0,8907x+17,0773
602	16	637	13	13	IV	0,8370	0,9201	88,6842	y=0,9201x+88,6842
602	16	599	29	16	V	0,8620	0,5818	249,0866	y=0,5818x+249,0866
602	16	0 X	11	9	V	0,9240	0,9955	-34,7915	y=0,9955x-34,7915
637	13	0 X	11	8	V	0,9477	1,0525	-60,6517	y=1,0525x-60,6517
599	29	0 X	11	11	V	0,9321	0,9116	-24,8883	y=0,9116x-24,8883
75X	11	638	19	11	V	0,8861	1,0802	-79,7227	y=1,0802x-79,7227
638	19	0 X	11	8	V	0,9389	1,0922	-108,726	y=1,0922x-108,726

Cuadro 8.- Principales resultados de la correlación estadística utilizados para el completado de series. (x, precipitación de la estación con mayor número de datos)

tos. No he obtenido los valores mensuales por correlación, dado que los errores que se pueden cometer en este caso son muy grandes (PULIDO-BOSCH, 1979); lo que he hecho ha sido repartir el valor anual entre los distintos meses incompletos, según la misma distribución proporcional de la estación que sirvió para completar. Los valores así obtenidos no son totalmente reales, pero sí bastante aproximados.

2.1.2.3. Detección y corrección de posibles errores en las series

Con el fin de detectar errores tanto sistemáticos como accidentales, he utilizado el método de "doble acumulación" (BENITEZ, 1972; HERAS, 1976).

El proceso seguido consiste en representar en abscisas los valores sucesivos anuales acumulados de la estación que se quiere comprobar, y en ordenadas los valores anuales acumulados de la "estación tipo". Como "estación tipo" he tomado la media de las que forman cada uno de los grupos. La "estación tipo" así obtenida está menos afectada por los errores que puedan existir en alguna de las estaciones del grupo.

En los cuadros 14 a 18 (Anejo 3) incluyo los datos pluviométricos anuales y anuales acumulados, para las estaciones de cada uno de los grupos, así como la acumulación de los datos para la "estación tipo". El proceso de acumulación lo he realizado partiendo de los datos más antiguos para así poder acumular datos modernos en futuros estudios.

Los errores sistemáticos se manifiestan por un cambio en la pendiente de la recta. Los cambios de pendiente formados por menos de cinco puntos no se consideran como representativos (HERAS, 1976). Los errores accidentales se traducen en un desplazamiento paralelo de la recta a partir del punto anómalo.

La corrección de errores se puede hacer gráfica o aritméticamente (DE WIEST, 1965). En el caso de error sistemático se corrige el valor anómalo al multiplicar por la relación de pendientes de ambos tramos de recta. Como tramo anómalo he considerado siempre el más antiguo (HERAS, 1976) o el que afecta a menor número de años. La corrección también se puede hacer gráficamente, mediante un giro de la recta anómala, con centro en la intersección de ambos tramos, hasta hacer coincidir a ambas.

La magnitud del error accidental es el desplazamiento horizontal de la recta y su signo será positivo o negativo según que el desplazamiento sea ha-

cia la derecha o hacia la izquierda, respectivamente. Dicho valor se resta o suma al año anómalo para que el error quede corregido (BENITEZ, 1972).

En la representación gráfica de las estaciones tratadas (figuras 6 y 7; láminas 1 y 2) expreso cualitativa y cuantitativamente los errores que he detectado.

Mediante el proceso descrito he detectado errores sistemáticos en dieciseis estaciones, y accidentales en otras catorce, aunque en general he tendido a corregir el menor número de datos posible (HERAS, 1976).

Los errores detectados no los he corregido posteriormente a nivel mensual, dada la incertidumbre que supondría atribuirlos a esta escala.

Las series completas y corregidas las expreso en los cuadros 9 a 13 (Anejo 2).

2.1.3. Análisis de las precipitaciones

Con el objeto de determinar la ley de variación de la cantidad precipitada con el aumento de la altitud, he establecido la correlación entre los valores medios anuales de pluviometría y la altitud de cada estación, reflejados en el cuadro 19.

La ecuación de la recta de regresión que relaciona la precipitación P (mm) con la altura h (m), para el total del área, es $h=0,55P-245,77$, con un coeficiente de correlación de 0,50. El diagrama de dispersión (figura 8) muestra que la causa de que el coeficiente de correlación sea tan bajo se debe a la existencia de varias estaciones anómalas; sin considerar estas estaciones (nueve en total), el coeficiente de correlación pasa a ser de 0,83, y la ecuación de la recta $h=1,30P-678,77$, lo que permite indicar que la altitud afecta a la cantidad de agua caída, aunque nó de forma considerable.

También he determinado la ley de variación entre cantidad precipitada y dis-

DENOMINACION	ALTITUD (m.s.n.m)	PLUVIOMETRIA MEDIA ANUAL (mm)	PLUVIOMETRIA DEL AÑO HUMEDO (mm)	PLUVIOMETRIA DEL AÑO SECO (mm)
Almadraba Vieja	15	449	483	180
Alosno	173	646	681	318
Ayamonte	10	523	717	355
Calores	35	680	2179	292
Casa Salones	110	631	981	443
Cartaya	19	472	817	243
Celulosas	7	671	2.294	255
El Almerranal	119	630	749	232
El Campillo	60	588	617	228
El Matuloso	129	551	573	327
El Rompido	11	525	760	400
El Ruido	82	559	984	351
El Villano	108	451	754	242
Factoria Hytasa	12	549	588	194
Gibraleón	26	621	822	333
Huelva	0,5	538	560	212
Isla Cristina	7	511	904	301
La Burrilla	360	692	715	354
La Calvilla	168	633	867	320
La Cangrejera	160	649	990	466
Lepe	20	503	874	298
Los Turbios	145	645	691	196
Malatado	85	617	990	417
Mazagón	51	597	804	382
Moguer	51	565	844	276
Palas de la Frontera	24	557	713	330
Presa del Piedras	80	570	921	386
Presa del Sancho	70	816	726	428
Punta Calmán	7	476	788	315
San Bartolomé de la Torre	125	638	820	307
San Lúcar del Guadiana	30	513	913	293
San Juan del Puerto	7	573	825	303
Sur Herrera	20	502	701	269
Terii Nuevo	141	618	1007	411
Trigueros	75	695	2.018	335
Villablanca	83	512	778	286
Villanueva de los Castillejos	220	572	600	313

CUADRO 19.- Pluviometria media anual, del año húmedo (1955/56) y del año seco (1957/58) de las estaciones consideradas (PERIODO 1.949/50-1.978/79).

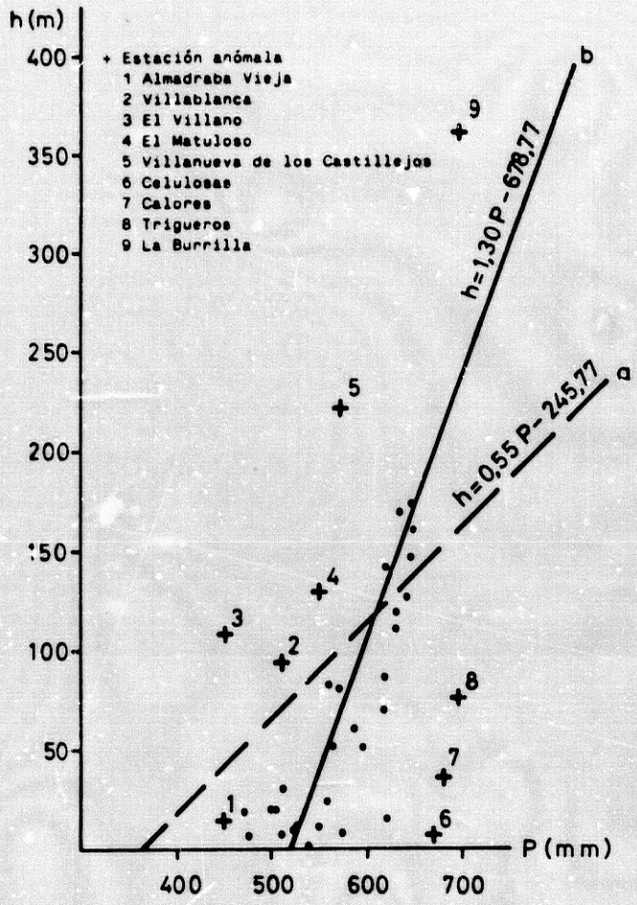


Figura 8.- Relación precipitación-altura en el área estudiada. a) Total estaciones. b) Sin considerar estaciones anómalas.

tancia al mar, según dos perfiles paralelos de dirección NE (sentido del movimiento de las masas nubosas).

El primer perfil lo he establecido con los siguientes valores:

Estación	Precipitación media anual P(mm)	Distancia al mar d(km)
Punta Caimán	476	2,4
Lepe	503	11,8
Cartaya	472	14
Gibraleón	621	27
El Almorranal	630	39,4

El coeficiente de correlación es de 0,91, y la ecuación de la recta de re-

gresión P=4,98d ↓ 446,02.

Para el segundo perfil los datos de partida son:

Estación	Precipitación media anual P(mm)	Distancia al mar d(km)
Isla Cristina	511	3,6
El Rufdo	559	28,2
La Calvilla	633	39,6
Presa del Sancho	616	47,8

El coeficiente de correlación vale 0,93 y la ecuación de la recta de regresión es P=2,71d ↓ 498,90.

Los resultados de ambos perfiles indican que existe un marcado incremento de la cantidad precipitada con la distancia al mar, según la dirección NE.

Para el total del área, la ecuación de la recta de regresión es P=3,34d ↓ 506,97, con un coeficiente de correlación de 0,70, lo que indica mayor dispersión, debida a la presencia de estaciones anómalas en el sector noroccidental, en las que la distancia (según la dirección NE) queda referida a Portugal. Sin considerar estas estaciones, para el resto del área la ecuación de la recta de regresión vale P=3,68d ↓ 470,46, con un coeficiente de correlación de 0,89.

La distribución anual de las precipitaciones en el área estudiada es variable, tanto en el tiempo como en el espacio, para el período considerado, 1949/50 a 1978/79 (figura 9; lámina 3). En la figura 10 represento los hietogramas de 9 estaciones de las 23 estudiadas, que cubren los sectores más representativos del área y sus bordes.

Con el fin de tener una visión espacial de la repartición de las precipitaciones he realizado tres planos de isoyetas: medias, año húmedo y año seco, a escala 1/100.000. Las isoyetas medias, aunque no tienen ningún significado real, dado que probablemente nunca se produzca esta distribución, permiten detectar aquellos sectores en que las precipitaciones adquieren valores más

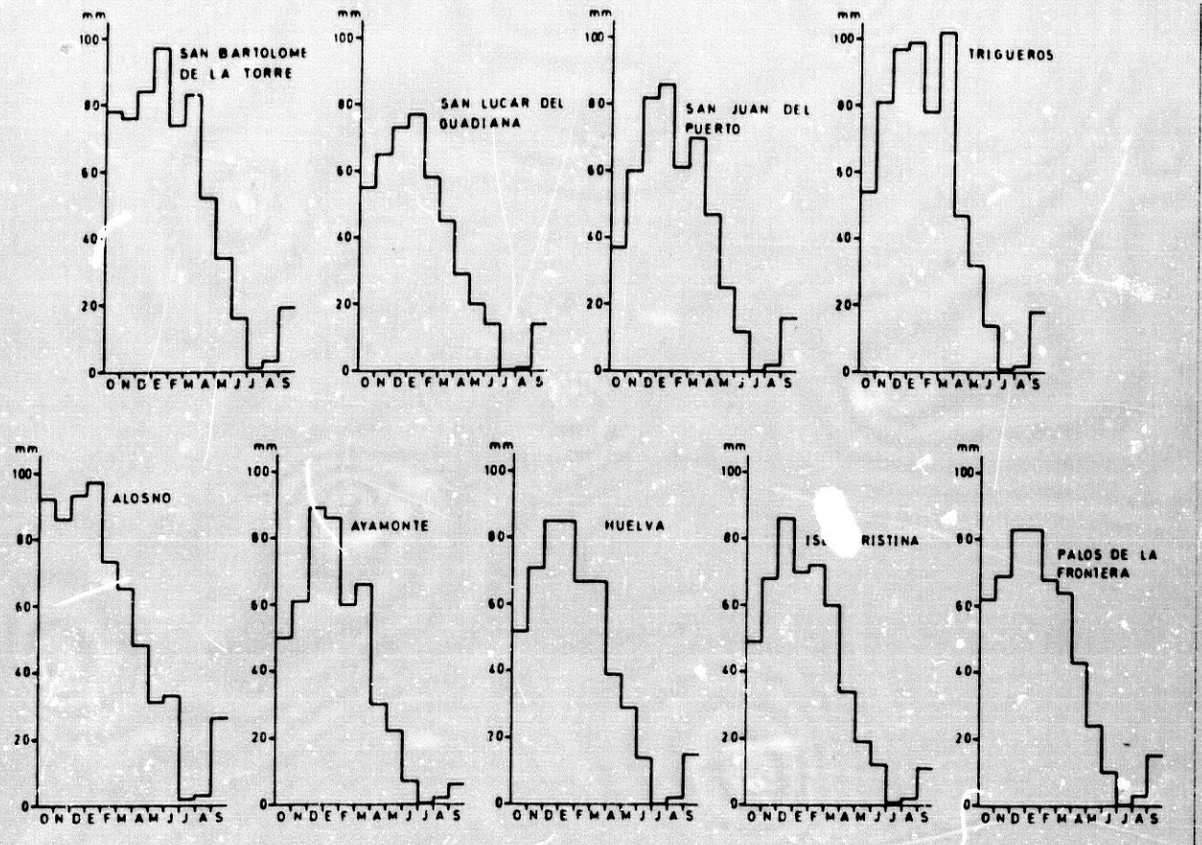


Figura 10.-Histogramas de 9 estaciones representativas (Período 1949/50-1978/79)

elevados o mínimos, interanuales.

Del mapa de isoyetas medias (plano 1) deduzco que las precipitaciones son menos intensas hacia el sur, al no presentar el relieve obstáculos a los frentes lluviosos, por lo que la pluviosidad es escasa. Su distribución espacial, aunque variable, presenta una marcada uniformidad, fiel reflejo del relieve topográfico con pocas diferencias altimétricas (cotas extremas: Huelva, 0,5 metros y La Burrilla, 260 metros); las elevaciones montañosas son, pues, poco significativas, por lo que el efecto "föen" (HERAS, 1976) pasa desapercibido.

El año húmedo (1) de la serie considerada corresponde al 1955/56. En el

(1) Como año húmedo (seco) he considerado aquel en que coincidía el valor más elevado (pequeño) de la precipitación en el mayor número de estaciones.

plano de isoyetas del año húmedo (plano 2) se detectan dos sectores con valores superiores a 900 mm (uno en las proximidades de Trigueros y otro en los alrededores del embalse del río Piedras) y, a partir de ellos, las precipitaciones disminuyen hacia el norte y sur.

Las isoyetas del año seco (1) (plano 3), 1957/58, reflejan una disminución de la precipitación hacia el este y un aumento hacia el norte y sur desde el sector Villablanca-Huelva-Moguer. Los valores máximos (superiores a 400 mm) se detectan cerca de los embalses del Piedras y del Sancho y en las proximidades de El Rompído, y los mínimos (inferiores a 200 mm) en los alrededores de Factoría Hytasa y de Almadraba Vieja.

La precipitación media caída en un sector viene dada por la expresión (MARTIN-ARNAIZ, 1976):

$$P_m = \frac{\frac{P_1 + P_2}{2} S_1 + \frac{P_2 + P_3}{2} S_2 + \ldots\ldots\ldots + \frac{P_{n-1} + P_n}{2} S_{n-1}}{S_1 + S_2 + \ldots\ldots\ldots + S_{n-1}}$$

siendo:

P_1, P_2, ..., P_n, valores, en mm, asignados a cada isoyeta.

S_1, S_2, ..., S_{n-1}, áreas, en km^2, entre las isoyetas P_1-P_2, P_2-P_3, ..., P_{n-1}-P_n.

P_m, lluvia media en el área, en mm.

La duda en la lluvia que corresponde al área situada entre las isoyetas extremas y el límite del sector, la he resuelto tomando como valor el de esas isoyetas (MARTIN-ARNAIZ, op. cit.).

En el cuadro 20 expreso los resultados que he obtenido para el año medio, seco, y húmedo, en el período 1949/59 a 1978/79.

Signatura del sector	Superficie km.^{2}	PRECIPITACION					
		Año medio		Año seco		Año húmedo	
		mm	Hm^3	mm	Hm^3	mm	Hm^3
I	368	500	184				
II	458	550	252				
III	146	600	88				
I	349			300	105		
II	540			350	189		
III	83			400	33		
I	27					700	19
II	412					750	309
III	355					850	302
IV	178					900	160
TOTAL	972		524		327		790
Precipitación media		539		336		813	

Cuadro 20.-Precipitación media (ISOYETAS) en el área para el período 1949/50 a 1978/79

La precipitación media caída en toda el área estudiada es de 524 Hm^3 (539 mm). En el año seco la precipitación media calculada es de 336 mm, al que corresponde un volumen de 327 Hm^3, y de 813 mm en el año húmedo, con un volumen caído de 790 Hm^3.

El método de THIESSEN (plano 4) lo he aplicado en el área, por sus características de uniformidad topográfica y distribución homogénea de la precipitación (MARTIN-ARNAIZ, 1976). En este método la precipitación media se obtiene por la expresión:

$$P_m = \frac{P_1S_1 + P_2S_2 + \ldots\ldots\ldots + P_nS_n}{S_1 + S_2 + \ldots\ldots + S_n}$$

en donde:

P_1, P_2, ..., P_n es la precipitación (mm) medida por el pluviómetro en

el intervalo de tiempo considerado.

S_1, S_2, ..., S_n representa el área (km^2) del dominio poligonal asignado a cada pluviómetro.

P_m es la lluvia media, en mm.

En el cuadro 21 indico los resultados que he obtenido, para el período 1949/50 a 1978/79.

Signatura del polígono	Superficie km^2	Precipitación	
		mm	Hm^3
A	50,7	523	27
B	36,6	511	18,7
C	35,8	476	17
D	78	503	39,3
E	81,9	472	38,6
F	76,7	525	40,3
G	80	538	43
H	14,7	449	6,6
I	7,8	549	4,3
J	59,8	621	37,1
K	7,7	588	4,6
L	35,1	633	22,2
M	12,5	638	8
N	35,2	649	22,8
O	67,7	559	37,8
P	25,2	631	15,9
Q	4,8	618	3
R	36,4	617	22,4
S	77,4	570	44,1
T	60,2	451	27,2
U	88	512	45,1
TOTAL	972,2		525
Precipitación media		540	

Cuadro 21.-Precipitación media (THIESSEN) en el área para el período 1949/50 a 1978/79

La precipitación media en el área, según el método de THIESSEN, es de 540 mm y supone un volumen de 525 Hm^3.

Comparando los resultados obtenidos por ambos métodos se observa un alto grado de equivalencia, por lo que para los cálculos del balance hídrico considero que la precipitación media en el área de estudio es de 540 mm, lo que supone un volumen de 525 Hm^3.

En lo concerniente a la distribución anual de las precipitaciones (figura 10), se tiene un máximo absoluto en toda el área estudiada durante los meses de invierno (diciembre y enero), y otro máximo relativo en primavera (generalmente marzo), aunque el sector septentrional presenta otro máximo relativo, menos importante que el invernal, en el otoño (octubre).

Los valores mínimos se registran en verano, con el mínimo absoluto en el mes de julio, cuyo valor medio rara vez supera 1 mm en los observatorios estudiados. En el mes de agosto son frecuentes las precipitaciones de carácter tormentoso.

La precipitación tiene lugar en forma de lluvia; las heladas son poco frecuentes, las granizadas muy esporádicas y la nieve es prácticamente desconocida.

Respecto al número de días de lluvia, he calculado los días medios de lluvia, mensuales y anuales, de 7 estaciones significativas en el área estudiada y sus bordes, para el período 1949/50 a 1978/79. Los resultados los expreso en el cuadro 22.

El número más elevado de días de lluvia se registra en el observatorio de Huelva, aunque muchas veces con valores inapreciables.

El número de días de lluvia es escaso en relación con los valores de las precipitaciones, lo que indica que éstas son, generalmente, intensas.

3. TEMPERATURAS

Tan sólo 7 observatorios realizan control de temperaturas en todo el área

ESTACION	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Año
Ayamonte	8,0	5,7	7,2	9,9	8,0	6,3	4,5	2,5	3,3	0,0	0,0	2,8	57,5
Cartaya	2,8	6,3	7,1	5,7	4,0	6,3	4,5	3,2	0,8	0,0	0,3	1,2	42,5
Huelva	9,2	10,3	7,7	13,4	12,4	10,1	8,4	6,7	4,5	0,7	0,8	3,7	87,9
Isla Cristina	6,6	8,8	6,7	8,6	8,7	7,9	4,2	3,8	3,1	0,1	0,5	2,5	62,0
Palos de la Frontera	5,4	5,7	5,7	8,3	5,6	7,7	3,5	2,7	1,1	0,1	0,1	1,4	45,9
San Juan del Puerto	3,7	8,5	8,6	8,6	8,7	9,1	4,5	2,8	1,0	0,0	0,1	1,6	57,6
Trigueros	5,2	7,8	5,5	7,3	7,4	8,6	4,4	3,0	1,4	0,0	0,1	1,6	52,7

Cuadro 22.-Valores medios del número de días de lluvia en siete estaciones representativas

estudiada y sus bordes, pero de forma irregular y con lagunas.

Controlan la temperatura máxima y mínima. Se considera como temperatura media la media aritmética de ambas, método usual pero que no siempre es correcto.

En el plano 5 he situado los 7 centros de control, y en el cuadro 23 refle-

Estación	Período de control	Temperatura media ºC
Ayamonte	1962/63 a 1973/74	17,6
Gibraleón	1969/70 a 1978/79	18,9
Huelva	1949/50 a 1978/79	18,1
Presa del Piedras	1969/70 a 1978/79	17,6
Presa del Sancho (&)	1969/70 a 1978/79	17,0
San Bartolomé de la Torre	1970/71 a 1978/79	18,3
Sur Hortícola (&)	1968/69 a 1978/79	18,9

(&) Estación situada fuera del área estudiada (en sus bordes)

Cuadro 23.-Estaciones termométricas en el área de estudio y sus bordes

jo las estaciones con el período de control considerado y la temperatura media anual para dicho período. En el plano 5 he dibujado las curvas isotermas, indicativas de la distribución aproximada de la temperatura media anual en el área estudiada. Estas isotermas sólo pueden tener valor orientativo, dado la desigualdad de períodos considerados para su trazado.

No he intentado completar los datos que faltan por dos motivos: el dato que obtendría no es real, y los valores medios de las temperaturas no presentan oscilaciones tan grandes, como sucede con las precipitaciones.

Todo el área estudiada se encuentra comprendida entre las isotermas medias anuales de 17ºC y 19ºC (18,9ºC, en Gibraleón), con temperaturas descendentes hacia el interior (en dirección N). La oscilación térmica se hace más acusada hacia el interior, pues las temperaturas máximas son más elevadas y las mínimas más bajas. En el cuadro 24 indico los valores de

ESTACION	PERIODO DE CONTROL	MES	TEMPERATURA MAXIMA MEDIA (ºC)	TEMPERATURA MINIMA MEDIA (ºC)	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (ºC)
AYAMONTE (T. media anual: 17,6 ºC)	1.963/63-1972/73	O	26,3	14,1	20,2
		N	21,3	9,5	15,4
		D	17,3	7,4	12,3
		E	17,4	6,2	11,8
		F	16,9	7,0	11,7
		M	19,0	8,2	13,6
		A	22,1	10,3	16,2
		M	25,6	13,4	19,5
		J	27,7	15,8	21,7
		J	31,4	18,5	25,0
		A	31,1	19,2	25,2
		S	28,6	17,0	22,8
HUELVA (T. media anual: 18,1 ºC)	1.948/50-1978/79	O	24,8	14,4	19,6
		N	20,1	10,4	15,2
		D	16,8	7,7	12,2
		E	16,3	7,3	11,8
		F	17,4	7,8	12,6
		M	19,3	9,3	14,3
		A	21,8	11,1	16,4
		M	24,9	13,7	19,3
		J	28,3	16,9	22,6
		J	31,3	19,3	25,3
		A	31,0	19,3	25,4
		S	29,0	17,6	23,3
PRESA DEL JARRUCHO (T. media anual: 17,0 ºC)	1.969/70-1978/79	O	25,2	12,0	18,6
		N	19,4	7,8	13,6
		D	15,3	5,0	10,1
		E	14,5	4,6	9,5
		F	15,8	5,9	10,8
		M	17,5	6,3	11,9
		A	20,4	8,7	14,5
		M	24,4	11,4	17,9
		J	29,0	14,9	21,9
		J	34,3	18,5	26,4
		A	34,1	18,0	26,0
		S	31,2	15,8	23,5
SUR HORTICOLA (T. media anual: 18,1 ºC)	1.968/69-1978/79	O	24,3	13,1	18,7
		N	21,9	9,1	15,5
		D	17,5	8,0	12,7
		E	16,7	7,7	12,2
		F	17,4	8,7	13,0
		M	19,9	8,3	14,1
		A	21,3	11,4	16,3
		M	24,2	13,7	18,9
		J	26,3	16,6	21,4
		J	29,3	20,1	24,7
		A	31,5	18,4	24,9
		S	28,0	17,3	22,6

ESTACION	PERIODO DE CONTROL	MES	TEMPERATURA MAXIMA MEDIA (ºC)	TEMPERATURA MINIMA MEDIA (ºC)	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (ºC)
GIBRALEON (T. media anual: 18,9 ºC)	1965/70-1973/74	O	26,3	13,9	20,1
		N	21,1	9,6	15,3
		D	16,5	7,2	11,9
		E	17,0	6,7	11,8
		F	18,0	7,6	12,8
		M	20,0	8,0	14,0
		A	23,3	10,5	16,8
		M	26,9	12,8	19,8
		J	30,8	16,7	23,7
		J	36,0	20,2	28,1
		A	36,0	19,8	27,9
		S	32,0	17,9	24,8
PRESA DEL PIEDRAS (T. media anual: 17,6 ºC)	1.969/70-1978/79	O	24,3	14,3	19,3
		N	19,4	10,1	14,7
		D	15,3	7,6	11,4
		E	14,4	7,6	10,9
		F	15,4	8,4	11,9
		M	17,4	8,6	13,0
		A	20,2	10,9	15,5
		M	23,9	13,9	18,9
		J	28,0	17,2	22,6
		J	33,5	20,7	27,0
		A	33,1	19,1	26,1
		S	29,9	17,4	23,6
SAN BARTOLOME DE LA TORRE (T. media anual: 18,3 ºC)	1970/71-1978/79	O	24,7	15,6	20,1
		N	19,7	11,0	15,3
		D	15,3	8,4	11,8
		E	14,8	8,0	11,4
		F	16,4	8,4	12,4
		M	18,8	8,6	13,7
		A	21,8	10,8	16,3
		M	23,4	13,2	18,3
		J	27,7	17,1	22,4
		J	33,9	21,7	27,8
		A	32,6	20,5	26,7
		S	28,9	18,6	23,7

CUADRO 24.- Temperaturas máximas medias, mínimas medias y medias mensuales en 7 estaciones.
(* Estación situada en los bordes del área estudiada)

las temperaturas máximas medias, mínimas medias y medias mensuales de las estaciones situadas en el área estudiada o muy próximas a sus bordes, y

en la figura 11 represento gráficamente dichos valores.

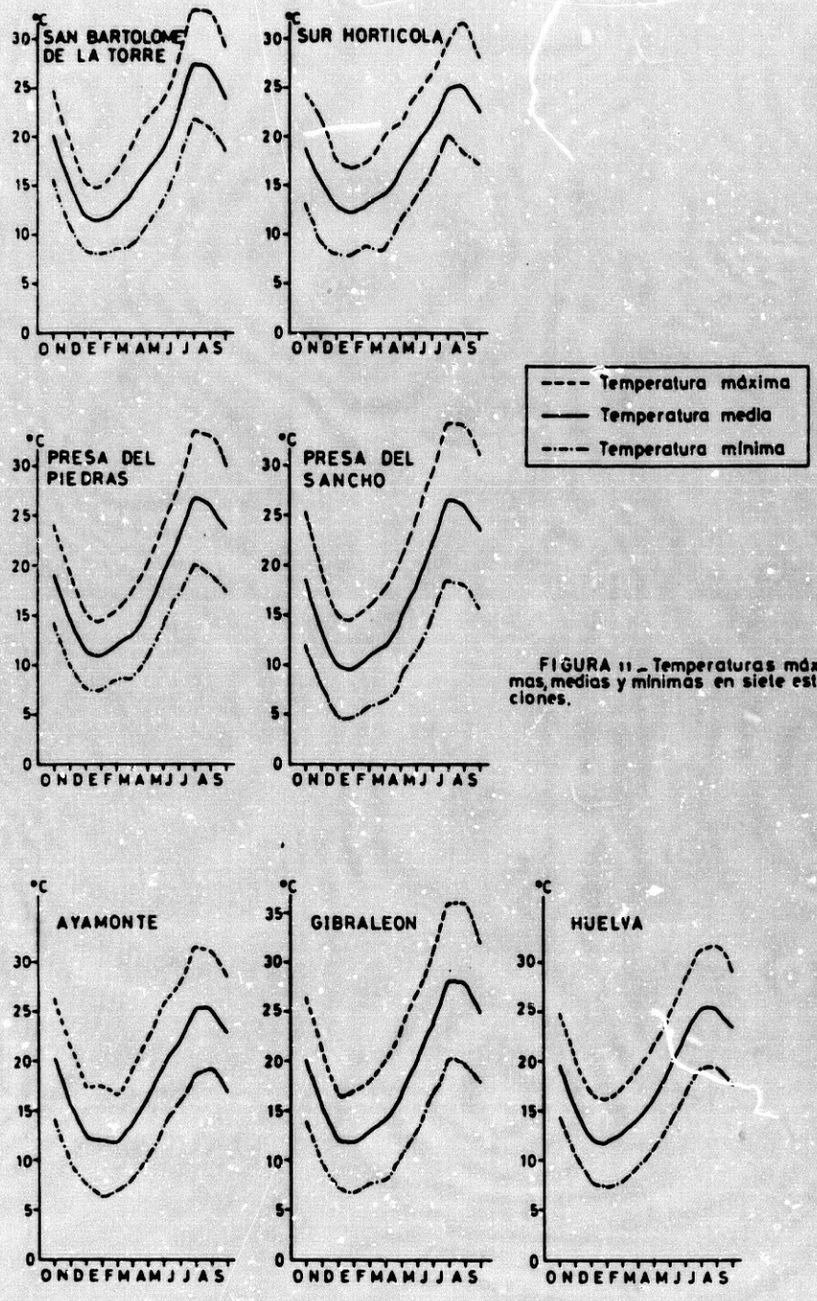


FIGURA 11.- Temperaturas máximas, medias y mínimas en siete estaciones.

Las temperaturas máximas medias se registran en los meses de verano, con un máximo medio absoluto generalizado en el mes de julio, excepción hecha de Huelva y Sur Hortícola, que lo tienen en agosto. El mínimo medio corresponde a los meses de invierno, con un mínimo medio absoluto generalizado en el mes de enero.

Las temperaturas máximas y mínimas extremas las reflejo en el cuadro 25.

		TEMPEPATURA EXTREMA (°C)						TEMPERATURA EXTREMA (°C)			
ESTACION	AÑO	MAXIMA	MES	MINIMA	MES	ESTACION	AÑO	MAXIMA	MES	MINIMA	MES
AYAMONTE	1962-63	38.0	Jun.	1.0	Dic.	HUELVA	1967-68	38.6	Jul.y Sep.	0.0	Dic.
	1963-64	42.0	Jul.	0.0	Dic.y Ene.		1968-69	37.8	Jul.	2.0	Ene.
	1964-65	42.0	Ago.	1.0	Ene.y Feb.		1969-70	37.6	Sep.	1.8	Feb.
	1965-66	39.0	Ago.	5.0	Dic.y Mar.		1970-71	38.6	Jul.	-0.8	Ene.
	1966-67	39.0	Jul.	-4.0	Nov.		1971-72	37.6	Jul.	1.2	Ene.
	1967-68	40.0	Ago.	1.0	Dic.		1972-73	41.0	Jul.	3.2	Feb.
	1968-69	42.0	Ago.	-1.0	Nov.		1973-74	41.6	Ago.	2.0	Ene.
	1969-70	38.0	Jul.	-2.5	Nov.		1974-75	42.6	Jul.	3.0	Ene.
	1970-71	37.0	Ago.	1.0	Ene.		1975-76	41.4	Ago.	0.0	Ene.
	1971-72	36.0	Jul.y Ago.	2.0	Dic.y Ene.		1976-77	35.6	Jun.	3.4	Ene.
	1972-73	40.0	Jul.	4.0	Feb.		1977-78	41.0	Jul.	1.2	Ene.
	1973-74	36.0	Jul.	3.0	Ene.		1978-79	41.0	Jul.	1.6	Feb.
GIBRALEON	1969-70	43.0	Jul.	0.0	Dic.	PRESA DEL PIEDRAS	1969-70	40.0	Jul.y Sep.	0.0	Dic.
	1970-71	40.0	Jul.y Ago.	-2.0	Dic.		1970-71	39.0	Sep.	-4.0	Ene.
	1971-72	41.0	Jul.	0.0	Ene.		1971-72	41.0	Ago.	3.0	Nov.y Ene.
	1972-73	43.0	Jul.	2.0	Ene.y Feb.		1972-73	42.0	Jul.	2.0	Dic.
	1973-74	46.0	Ago.	2.0	Dic.		1973-74	42.0	Ago.	3.0	Dic.y Mar.
	1974-75	43.0	Jul.	1.0	Ene.		1974-75	44.0	Jul.	2.0	Dic.y Ene.
	1975-76	44.0	Ago.	0.0	Ene.		1975-76	42.0	Ago.	2.0	Dic.y Ene.
	1976-77	40.0	Jun.	2.0	Ene.y Feb.		1976-77	38.0	Jun.	2.0	Ene.
	1977-78	45.0	Jul.	0.0	Ene.		1977-78	43.0	Jul.	1.0	Ene.
	1978-79	45.0	Jul.	0.0	Dic.y Feb.		1978-79	42.0	Jul.	2.0	Feb.
SUR HORTICOLA	1968-69	39.5	Jul.	1.4	Ene.	PPESA DEL SANCHO	1969-70	44.0	Sep.	-1.0	Dic.
	1969-70	39.7	Jul.	-2.5	Dic.		1970-71	41.0	Sep.	-4.0	Dic.y Ene.
	1970-71	39.5	Jul.	0.5	Ene.		1971-72	38.0	Jul.	-3.0	Ene.
	1971-72	39.0	Ago.	3.0	Ene.		1972-73	42.0	Jul.y Ago.	-1.0	Feb.
	1972-73	41.6	Jul.	5.0	Ene.y Feb.		1973-74	43.0	Jul.y Ago.	0.0	Dic.y Mar.
	1973-74	39.0	Jul.	1.5	Ene.		1974-75	43.0	Jul.y Ago.	-3.0	Ene.
	1974-75	42.0	Jul.	-2.0	Ene.		1975-76	42.0	Jul.y Ago.	-5.0	Ene.
	1975-76	35.0	Ago.	-6.0	Ene.		1976-77	40.0	Sep.	0.0	Nov.
	1976-77	34.0	Jun.Jul.y Ag	0.0	No.En.y Mr.		1977-78	44.0	Jul.	0.0	Feb.
	1977-78	38.0	Ago.	-1.0	Feb.		1978-79	43.0	Jul.	-3.0	Dic.
	1978-79	37.0	Jul.	1.0	Dic.y Feb.						
SAN BARTOLOME DE LA TORRE.	1970-71	37.0	Jn. Jl.y Sp.	0.0	Dic.y Ene.						
	1971-72	36.0	Jul.	3.0	Ene.						
	1972-73	41.0	Jul.	3.0	Ene.						
	1973-74	40.0	Jul.y Ago.	4.0	Dic.						
	1974-75	41.0	Jul.	4.0	Ene.						
	1975-76	40.0	Ago.	3.0	Ene.						
	1976-77	35.0	Jul.y Sep.	5.0	Ene.y Feb.						
	1977-78	38.0	Jul.	3.0	Ene.y Feb.						
	1978-79	36.0	Ago.	4.0	Dic.y Feb.						

CUADRO 25.- Temperaturas máximas y mínimas extremas en 7 estaciones.

La frecuencia de las temperaturas máximas y mínimas extremas para el área estudiada, en el período 1962 a 1979, la indico en el cuadro 26.

TEMPERATURA EXTREMA ºC (Período 1962 a 1979)			
MAXIMA	Número de observaciones	MINIMA	Número de observaciones
34	1	-9,0	1
35	3	-6,0	1
36	4	-5,0	1
37	4	-4,0	3
38	8	-3,0	2
39	9	-2,0	4
40	9	-1,0	5
41	8	0,0	14
42	13	1	11
43	8	2	14
44	4	3	11
45	2	4	4
46	1	5	3

Cuadro 26.-Frecuencia de temperaturas máximas y mínimas extremas en el área estudiada

Las temperaturas máximas extremas excepcionalmente alcanzan 46ºC (agos-

to 1974, en Gibraleón), y lo normal es que estén comprendidas entre 36ºC y 43ºC. En la franja litoral raramente se superan los 41ºC, mientras que hacia el interior del área se sobrepasa esta temperatura con cierta frecuencia. Las temperaturas máximas extremas se registran durante los meses de verano, más frecuentemente durante el mes de julio.

Las temperaturas mínimas extremas alcanzan los valores más bajos en el interior durante los meses de invierno (diciembre de 1978 registró un valor mínimo extremo excepcional de -9ºC en Presa del Sancho). Se registran con relativa frecuencia valores de -1ºC, y lo normal es que estén comprendidos entre 0ºC y 3ºC. En la franja costera las mínimas extremas raramente bajan de -2ºC, y más frecuentemente no descienden de 0ºC. Las temperaturas mínimas extremas se registran con mayor frecuencia durante el mes de enero.

4. OTROS FACTORES CLIMATICOS

Determinados factores climáticos sólo se miden en observatorios completos, por lo que he utilizado el de Huelva, que cumple esta condición, para estimar aquellos elementos del clima que, si bien no son habitualmente empleados en los estudios hidrogeológicos, sí que sirven para ayudar a definir con más exactitud la climatología de una región.

El "historial meteorológico" del Observatorio de Huelva es lo suficientemente ámplio como para permitir obtener valores medios fiables de estos factores climáticos, durante el período 1949/50 a 1978/79.

Cierto es que si se intentase extrapolar estos valores puntuales a todo el área estudiada se cometerían errores importantes, pero no se trata de eso sino de conocer el orden de magnitud de los mismos. Para situarlos en el contexto de los obtenidos en la franja litoral del sur de la Península, remito al lector al trabajo de INTECSA (1977).

4.1. INSOLACION

Por la baja latitud del área estudiada, el número de horas de sol sobre el horizonte, a lo largo del año, es pequeño; pese a ello, el número de horas de sol efectivo, a causa de la bajísima nubosidad, es elevado, con cerca de dos mil novecientas horas de sol anuales, como valor medio, quedando comprendida la zona entre las isohelias (isolínea que une puntos de igual número de horas medias de sol eficaz) anuales de 2700 y 3000 horas de sol efectivo (INTECSA, op. cit.).

Estos valores se pueden considerar como muy elevados, si los comparamos con los mayores de España, que se sitúan alrededor de la bahía de Cádiz (3119 horas de sol eficaz al año).

La causa de valores tan elevados hay que buscarla en la escasa nubosidad, debida a la presencia del Estrecho de Gibraltar (a unos 150 km al SE del área estudiada), el cual "canaliza" a los frentes nubosos que, procedentes del Atlántico, se dirigen al Mediterráneo.

La insolación será, por tanto, uno de los factores determinativos de la tasa de evapotranspiración en este área.

4.2. HUMEDAD RELATIVA

Los valores medios anuales de las humedades relativas indican que el área estudiada se encuentra comprendida entre las isolíneas de humedad del 65 por 100 y del 67 por 100 (INTECSA, op. cit.), correspondiendo el valor más elevado al tramo de costa y decreciendo hacia el norte.

Las humedades relativas medias de los meses de julio y agosto expresan algo similar, presentándose los valores más altos (próximos al 55 por 100) en el litoral, y los más bajos (50 por 100) hacia el norte.

También es característica en el área la oscilación diaria de humedad relativa,

que hace que hasta en la estación seca se produzcan rociadas intensas durante la noche.

La humedad relativa está muy influenciada por los vientos, y presenta grandes oscilaciones según domine el de Poniente, viento muy húmedo, o el de Levante, viento muy seco, al que van asociadas humedades relativas de hasta el 25 por 100.

4.3. NUBOSIDAD

Con los valores de nubosidad disponibles he determinado el número medio de días despejados, nubosos y cubiertos, mensuales y anuales. También he calculado la nubosidad media, mensual y anual, a las trece horas, en octavas partes de cielo.

A este respecto hay que indicar que la nubosidad se aprecia a estima del observador y se expresa en octavas partes de cielo, según el siguiente criterio:

- día despejado $\leq 1,6$ octavas partes de cielo están cubiertas de nubes.

- día nuboso $> 1,6 < 6,4$ octavas partes de cielo están cubiertas de nubes.

- día cubierto $\geq 6,4$ octavas partes de cielo están cubiertas de nubes.

En el cuadro 27 expreso los resultados que he obtenido.

Los meses con menos días nubosos son julio y agosto; los valores medios más bajos, un día como máximo, del número de días cubiertos corresponden al mes de julio, y los meses con mayor número de días despejados son julio y agosto, generalmente por ese orden.

OBSERVATORIO DE HUELVA	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	AÑO
VALORES MEDIOS DEL NUMERO DE DIAS NUBOSOS	15,9	16,0	14,8	14,7	13,4	16,1	16,7	17,1	15,0	7,6	7,6	16,5	171,4
VALORES MEDIOS DEL NUMERO DE DIAS CUBIERTOS	7,4	7,8	5,6	10,0	8,5	8,6	7,7	5,2	3,2	0,6	1,1	3,2	68,9
VALORES MEDIOS DEL NUMERO DE DIAS DESPEJADOS	7,7	6,2	10,6	6,1	6,3	6,3	5,6	8,7	11,8	22,8	22,3	10,3	124,7
NUBOSIDAD MEDIA A LAS 13 HORAS (en octavas partes de cielo)	4,3	4,3	3,7	4,7	4,6	4,5	4,5	3,6	2,8	1,0	1,2	2,7	3,5

Cuadro 27.- Valores medios de nubosidad, mensuales y anuales, en la estación de Huelva durante el período 1949/50 a 1978/79

4.4. VIENTOS

He estudiado las frecuencias medias (en tanto por 100) de los vientos y las velocidades medias (km/h) del viento en cada dirección, mensuales y anuales (figura 12). También he analizado las frecuencias medias de las veloci-

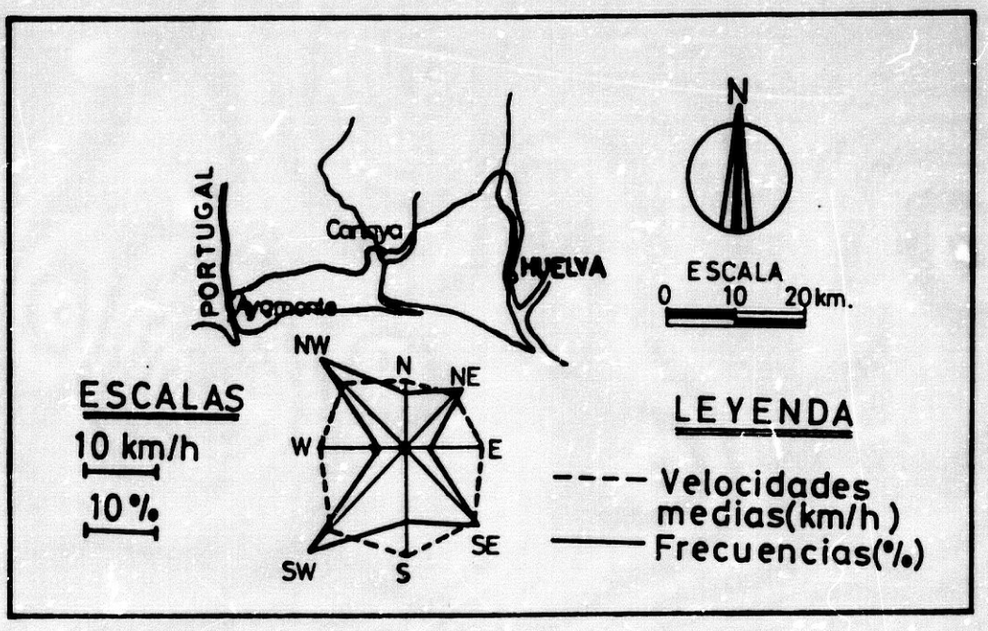


Figura 12.- Vientos. Rosa de frecuencias y de velocidades medias anuales

dades del viento en intervalos determinados, los valores medios del número de días con velocidad del viento igual o mayor que 36, 55 y 91 km/h, y las velocidades medias, mensuales y anuales (cuadro 28).

Estación: HUELVA													
Frecuencias medias(%) de las velocidades del viento en intervalos determinados, mensuales y anuales													
Intervalos	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	AÑO
0-5 km/h	26,0	32,1	33,8	30,0	18,2	20,0	17,3	15,8	14,6	13,7	16,1	21,4	21,2
6-28 km/h	71,1	65,2	64,4	64,2	73,6	73,2	79,3	78,7	73,2	85,5	82,8	76,6	74,0
29-61 km/h	2,8	2,7	1,8	5,2	8,6	6,7	3,4	5,4	12,2	0,8	1,1	2,0	4,4
más de 61 km/h	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Valores medios del número de días con velocidad del viento igual o mayor que 36, 55 y 91 km/h, mensuales y anuales													
Velocidad ≥	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	AÑO
36 km/h	15,3	7,0	8,6	12,0	15,0	19,5	21,0	22,6	22,0	19,3	16,0	18,6	196,8
55 km/h	4,0	1,3	3,6	4,0	7,0	6,0	6,0	5,0	3,0	1,3	0,6	1,6	43,2
91 km/h	0,0	0,0	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Velocidades medias del viento(km/h), mensuales y anuales													
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	AÑO
Velocidad media del viento(km/h)	10,6	9,5	8,8	10,7	12,9	11,9	12,6	13,9	14,2	12,4	12,1	11,3	11,7

Cuadro 28.- Frecuencias medias (%) y velocidades medias del viento (km/h) en el observatorio de Huelva. (Periodo 1949/50 a 1978/79).

A grandes rasgos puedo indicar que, por lo menos en la franja litoral del área estudiada, reinan los vientos del SW (tercer cuadrante); los vientos más frecuentes son los de velocidades comprendidas entre 6 km/h y 28 km/h, alcanzando su máxima frecuencia (85,5 por 100) durante el mes de julio; la velocidad media anual es de 11,7 km/h, alcanzándose la máxima velocidad media (14,2 km/h) durante el mes de junio. Los vientos con velocidades superiores a los 90 km/h prácticamente están ausentes.

Al efecto del viento del SW, en la costa de Huelva, se debe el avance hacia el NE de los complejos dunares de la franja costera, y la evolución semejante de las temperaturas. Una de las situaciones típicas del tiempo meteorológico en Andalucía es la del suroeste (MEDINA, 1980), que esquema-

tizo en la figura 13 (A); esta situación, determinada por una borrasca so-

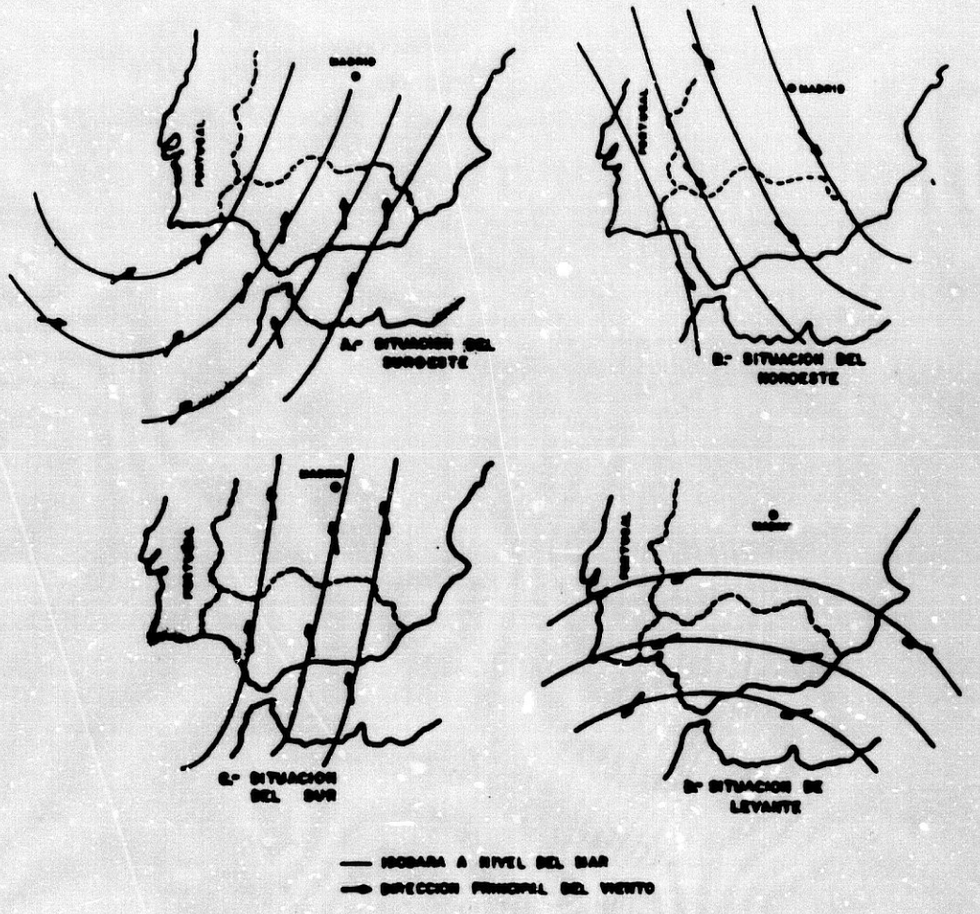


Figura 13.-Situaciones del tiempo meteorológico típicas para Andalucía.
Según LOPEZ-VERA, 1981 (modificado de MEDINA, 1980)

bre el Atlántico al SW de la Península, impulsa aire húmedo y templado que provoca lluvias abundantes que caen en la mayor parte del área (y de Andalucía).

5. CLASIFICACION CLIMATICA

VIGUIER (1974) clasifica el clima del área como de tipo mediterráneo, modificado por la proximidad del Océano Atlántico.

Según AYALA et al. (1980), el clima de los términos municipales de Huelva y Punta Umbría es árido, templado-cálido con inviernos suaves.

Son muchas las clasificaciones climáticas existentes, en cuya discusión no voy a entrar (al respecto, remito al lector al trabajo de LOPEZ-BERMUDEZ, 1973). Una de las más aceptadas es la de KÖPPEN, que caracteriza los distintos climas mediante letras mayúsculas y/o minúsculas, correspondientes a datos meteorológicos concretos.

Los hermanos LOPEZ-GOMEZ (1959) analizaron el clima de España, según la clasificación de KÖPPEN, e incluyen todo el área estudiada dentro del grupo Csa, es decir, clima templado (C, mes más frío entre 18 y -3ºC), con verano seco (s) y temperatura media del mes más cálido superior a 22ºC (a). Los mismos autores introducen algunas modificaciones a dicha clasificación, para hacer resaltar más la variedad climática existente. De esta manera el área estudiada queda incluída dentro del grupo Csa_1 (clima mediterráneo con ningún mes inferior a 10ºC).

En el cuadro 29 reflejo el grupo a que pertenece cada una de las estaciones con datos termométricos, en el área estudiada y sus bordes, según la

ESTACION	CLASIFICACION CLIMATICA
Alcaro	$Cs''a_2s'$
Ayamonte	$Cs''a_1s'$
Huelva	Csa_1
Isla Cristina	Csa_1
Palos de la Frontera	Csa_1
San Bartolomé de la Torre	$Cs''a_1s'$
San Lúcar del Guadiana	Csa_1
San Juan del Puerto	$Cs''a_1s'$
Trigueros	$Cs''a_1x$

Cuadro 29.-Clasificación climática (KÖPPEN, modificada por LOPEZ-GOMEZ, 1959)

a....un máximo invernal.
s''... dos máximos pluviométricos, uno en otoño-invierno y otro en primavera.
s'... es superior el máximo pluviométrico de otoño-invierno.
x ...es superior el máximo pluviométrico de primavera.
1 ...ningún mes inferior a 10ºC (clima marítimo).
2 ...el mes más frío oscila entre 10ºC y 6ºC (clima marítimo de transición al continental).

clasificación de KÖPPEN, y de acuerdo con las modificaciones introducidas por LOPEZ-GOMEZ (1959).

Se pone de manifiesto que todo el área estudiada tiene clima mediterráneo (Cs), con uno o dos máximos pluviométricos (en invierno, o en otoño-invierno y primavera) de los que el más importante es el máximo de otoño-invierno (excepto en Trigueros). Todas las estaciones se engloban en el clima mediterráneo marítimo. Alosno, fuera del área estudiada, tiene clima mediterráneo marítimo, de transición al mediterráneo continental.

6. EVAPORACION

Dentro del área estudiada y sus bordes he localizado 6 estaciones, controladas por la Comisaría de Aguas del Guadiana, que controlan la evaporación, mediante un evaporímetro Piché.

Las series de datos son muy completas, aunque en ocasiones he observado algunas ausencias. La amplitud del período de control es pequeña (unos 11 años), a excepción de las estaciones de Huelva (30 años) y Ayamonte (5 años).

En el cuadro 30 reflejo los valores anuales y medios de cada estación para el período de control.

Se observa que los valores son muy dispares, con un máximo de 1928 mm en Presa del Sancho y un mínimo de 655 mm en Ayamonte. Esta gran diferencia pone de manifiesto una posible diversidad de criterios en el observador, así como eventuales influencias del lugar en donde el evaporímetro esté instalado (orientación, entorno, mayor o menor protección de la vegetación, humedad ambiental, etc.).

Los valores de la evaporación, obtenidos mediante evaporímetro Piché, y los de evaporación en superficies libres de agua con estanque flotante, son diferentes, lo que obliga a multiplicar las medidas Piché por diferentes factores para igualar las del estanque; estos factores varían según auto-

ESTACION	PERIODO DE CONTROL	EVAPORACION anual (mm)	EVAPORACION media anual (mm)
Gibraleón	1969-70	1.283	1.411
	1970-71	1.449	
	1971-72	1.575	
	1972-73	1.385	
	1973-74	1.440	
	1974-75	1.449	
	1975-76	1.399	
	1976-77	1.344	
	1977-78	1.385	
	1978-79	1.687	
Presa del Sancho	1968-69	2.307	1.928
	1969-70	1.920	
	1970-71	1.785	
	1971-72	1.695	
	1972-73	1.563	
	1973-74	1.821	
	1974-75	2.046	
	1975-76	1.938	
	1976-77	732	
	1977-78	1.083	
	1978-79	3.711	
Huelva	1949-50	1.092	1.379
	1950-51	1.071	
	1951-52	1.011	
	1952-53	1.150	
	1953-54	1.269	
	1954-55	1.155	
	1955-56	1.178	
	1956-57	1.041	
	1957-58	1.092	
	1958-59	1.098	
	1959-60	1.389	
	1960-61	1.368	
	1961-62	1.599	
	1962-63	1.470	
	1963-64	1.509	
	1964-65	1.629	
	1965-66	1.560	
	1966-67	1.497	
	1967-68	1.422	
	1968-69	1.263	
	1969-70	1.368	
	1970-71	1.359	
	1971-72	1.404	
	1972-73	1.389	
	1973-74	1.458	
	1974-75	1.263	
	1975-76	1.725	
	1976-77	1.900	
	1977-78	1.713	
	1978-79	1.917	

ESTACION	PERIODO DE CONTROL	EVAPORACION anual (mm)	EVAPORACION media anual (mm)
Presa del Piedras	1969-70	1.701	1.345
	1970-71	1.455	
	1971-72	1.416	
	1972-73	1.206	
	1973-74	1.443	
	1974-75	1.566	
	1975-76	1.518	
	1976-77	1.152	
	1977-78	993	
	1978-79	999	
Sur Hortícola	1968-69	1.515	1.652
	1969-70	1.386	
	1970-71	1.164	
	1971-72	1.374	
	1972-73	1.398	
	1973-74	1.290	
	1974-75	2.046	
	1975-76	1.362	
	1976-77	1.197	
	1977-78	2.127	
	1978-79	3.993	
Ayamonte	1969-70	878	655
	1970-71	786	
	1971-72	597	
	1972-73	468	
	1973-74	594	

Cuadro 30.- EVAPORACION ANUAL Y MEDIA EN 6 ESTACIONES (mm.)
(VALORES PICHE)

res: 0,8 (MARTIN-ARNAIZ, 1976) y 0,45 a 0,60 (REMENIERAS, 1960; in MARTIN-ARNAIZ, op. cit.).

Lo que realmente hay que admitir es que el evaporímetro Piché da grandes errores, pero que cuando no se dispone de otros datos hay que analizar los obtenidos con este método.

Analizando los datos de las diferentes estaciones, estimo una evaporación media de 1395 mm/año, durante el período 1949/50 a 1978/79; si, de acuerdo con REMENIERAS (op. cit.), se utiliza un coeficiente corrector de 0,5, la evaporación potencial media sería de 697,5 mm/año, lo que supone una pérdida de 678 Hm^3/año en el área estudiada.

7. EVAPOTRANSPIRACION

7.1. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL

El término evapotranspiración potencial fué introducido en 1948 por THORNTHWAITE para designar la combinación de la evaporación y la transpiración del agua por las plantas, y se define como "la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo, si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas" (ELIAS y GIMENEZ, 1965).

En las obras de CASTANY (1971), ELIAS y GIMENEZ (op. cit.), MARTIN-ARNAIZ (1976) y PLAUD (1967), entre otras, se pueden encontrar interesantes discusiones sobre el tema y sobre sus métodos de cálculo.

Dado que no conozco la existencia de ningún lisímetro en el área estudiada, el método que he seguido para calcular la evapotranspiración potencial ha sido el ideado por THORNTHWAITE (1948; in MARTIN-ARNAIZ, op. cit.), ya que permite calcular su valor a partir de datos meteorológicos fáciles de obtener.

Con esta metodología he calculado los valores de la evapotranspiración potencial para las siete estaciones que disponen de datos de temperaturas (cuadro 31). En base a estos valores, he realizado el plano 6, en el que se pone de manifiesto que, desde el núcleo San Juan del Puerto-Gibraleón, los valores de evapotranspiración potencial disminuyen hacia el norte, sur y oeste, y quedan comprendidos entre 898 mm (Presa del Sancho) y 997 mm (Gibraleón).

La evapotranspiración potencial media es de 941 mm, valor obtenido por la media ponderada, y el volumen total evapotranspirado sería de 915 Hm^3/año.

7.2. EVAPOTRANSPIRACION REAL

La evapotranspiración potencial no tiene en cuenta el agua que existe o cae en el suelo. Por este motivo el valor de la evapotranspiración potencial es un

AYAMONTE (PERIODO 1962/63 - 1973/74)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	TOTAL
Temperaturas medias mensuales en °C	20,2	15,4	12,3	11,8	11,7	13,6	16,3	19,5	21,9	25,0	25,7	22,0	
Indice de calor (I) en °C	8,26	5,48	3,90	3,66	3,63	4,55	5,93	7,95	9,22	11,44	11,97	9,04	83,43
E.T.P. media diaria sin ajustar en mm	2,7	1,7	1,1	1,0	0,9	1,3	1,8	2,6	3,1	4,0	4,1	2,8	
E.T.P. media mensual ajustada en mm	80,1	43,9	29,0	24,9	20,6	41,6	55,3	80,7	114,5	154,5	148,8	111,9	925,8

GIBRALEON (PERIODO 1969/70 - 1.978/79)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	TOTAL
Temperaturas medias mensuales en °C	20,1	15,3	11,9	11,0	12,0	14,0	16,8	18,9	23,7	28,1	27,9	24,0	
Indice de calor (I) en °C	8,22	5,44	3,71	3,65	4,13	4,75	6,26	8,09	10,54	13,05	13,00	11,37	88,34
E.T.P. media diaria sin ajustar en mm	2,6	1,5	0,9	0,9	1,0	1,2	1,8	2,5	3,5	4,9	4,9	4,0	
E.T.P. media mensual ajustada en mm	79,2	38,2	23,1	22,4	23,1	36,3	59,3	84,6	133,0	198,7	177,0	136,3	991,2

HUELVA (PERIODO 1949/50 - 1.978/79)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	TOTAL
Temperaturas medias mensuales en °C	19,6	15,2	12,2	11,6	12,6	14,3	16,4	19,3	22,6	25,3	25,4	22,3	
Indice de calor (I) en °C	7,86	5,30	3,85	3,66	4,05	4,90	6,04	7,73	9,81	11,64	11,71	10,27	86,9
E.T.P. media diaria sin ajustar en mm	2,6	1,6	1,0	1,0	1,1	1,3	1,9	2,6	3,4	4,2	4,2	3,7	
E.T.P. media mensual ajustada en mm	77,9	40,7	25,6	24,9	23,5	47,8	62,6	86,4	123,6	161,8	151,7	115,0	957,5

PRESA DEL PIEDRAS (PERIODO 1969/70 - 1.978/79)

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	TOTAL
Temperaturas medias mensuales en °C	19,2	14,7	11,4	10,9	11,9	13,0	15,1	18,9	22,6	26,8	26,1	23,5	
Indice de calor (I) en °C	7,67	5,11	3,48	3,25	3,71	4,25	5,35	7,49	9,81	12,70	12,20	10,41	85,6
E.T.P. media diaria sin ajustar en mm	2,5	1,5	0,9	0,9	1,0	1,2	1,7	2,5	3,4	4,6	4,4	3,7	
E.T.P. media mensual ajustada en mm	74,9	38,7	23,1	22,4	23,1	36,3	56,0	84,6	125,6	177,2	158,9	113,0	947,3

PRESA DEL SANCHO (PERIODO 1969/70 - 1.978/79)

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	TOTAL
Temperaturas medias mensuales en °C	18,6	13,6	10,1	9,5	10,8	11,9	14,5	17,9	20,6	24,4	24,0	22,5	
Indice de calor (I) en °C	7,21	4,55	2,90	2,64	3,21	3,71	5,01	6,88	8,53	12,41	12,13	10,41	79,7
E.T.P. media diaria sin ajustar en mm	2,4	1,4	0,8	0,7	1,0	1,1	1,6	2,3	2,9	4,5	4,4	3,7	
E.T.P. media mensual ajustada en mm	71,9	35,8	20,5	17,4	23,4	35,1	52,7	87,0	107,1	173,3	151,9	115,0	897,9

SAN BARTOLOME DE LA TORRE (PERIODO 1970/71 - 1.978/79)

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	TOTAL
Temperaturas medias mensuales en °C	20,1	15,3	11,8	11,4	12,4	13,7	16,3	18,9	23,4	27,3	26,7	23,7	
Indice de calor (I) en °C	8,22	5,44	3,66	3,46	3,95	4,60	5,98	7,13	9,66	13,86	12,80	10,54	88,34
E.T.P. media diaria sin ajustar en mm	2,6	1,6	0,9	0,9	1,0	1,2	1,8	2,2	3,3	4,9	4,5	3,8	
E.T.P. media mensual ajustada en mm	77,9	40,7	23,1	22,4	23,4	36,3	55,3	83,3	121,3	184,9	162,6	111,9	949,1

SUR HORTICOLA (PERIODO 1968/69 - 1.978/79)

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	TOTAL
Temperaturas medias mensuales en °C	18,7	13,5	12,7	12,2	13,0	14,1	16,3	18,9	21,4	24,7	24,9	22,6	
Indice de calor (I) en °C	7,37	4,55	4,35	3,85	4,25	4,80	5,98	7,49	9,03	11,23	11,27	9,81	85,88
E.T.P. media diaria sin ajustar en mm	2,4	1,7	1,1	1,0	1,2	1,4	1,9	2,5	3,1	3,9	4,0	3,4	
E.T.P. media mensual ajustada en mm	71,9	42,3	28,2	24,9	28,0	44,7	62,6	94,6	114,5	150,2	144,9	103,7	913,1

CUADRO 31.- EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (THORNTHWAITE).

valor límite, que es real tan sólo en el caso de existir agua suficiente en el suelo. La evapotranspiración real contempla este aspecto.

He empleado tres métodos de cálculo, basados en fórmulas empíricas: THORNTHWAITE (1948), COUTAGNE (1954) y TURC (1955).

7.2.1. Método de THORNTHWAITE

El método de THORNTHWAITE (in MARTIN-ARNAIZ, 1976) parte de un balance hídrico del suelo, en el que se estima la reserva de agua utilizable por las plantas, la precipitación caída y la evapotranspiración potencial.

La expresión de este balance, para un determinado intervalo, puede indicarse así:

$$P = ETR + EX + \Delta R$$

donde:

P, precipitación en mm.

ETR, evapotranspiración real en mm.

EX, excedentes de agua (escorrentía + infiltración) en mm.

ΔR, incremento en la reserva de agua utilizable por las plantas en mm.

y con la condición de que ETR $\leq$ ETP, siendo ETP la evapotranspiración potencial.

Las reservas en agua del suelo no son constantes, pues varían con la naturaleza de los materiales que constituyen el área. Según HALLAIRE (in CASTANY, 1975) los valores extremos en Europa varían entre algunos milímetros hasta más de 300 milímetros. De acuerdo con THORNTHWAITE (in CASTANY, op. cit.), considero, para la reserva en agua del suelo en el área estudiada, el valor de 100 mm, pero teniendo en cuenta que no sería más que una media general aproximada.

En los cuadros 32 a 38 (Anejo 4) indico los resultados del balance, para cada una de las estaciones en que he podido calcular la evapotranspiración potencial, y en el cuadro 39 un resumen de los valores que he obtenido.

La expresión gráfica de este balance para las diferentes estaciones la reflejo en la figura 14 (lámina 4).

En el plano 7 represento las curvas aproximadas que unirían los puntos de igual valor de evapotranspiración real, para la reserva de agua utilizable por las plantas de 100 mm.

El valor medio de la evapotranspiración real sería de 437 mm, y el volumen anual evapotranspirado de 425 Hm^3.

ESTACION	ETR
Ayamonte	406
Gibraleón	438
Huelva	441
Presa del Piedras	445
Presa del Sancho (&)	426
San Bartolomé de la Torre	451
Sur Hortícola (&)	452

Reserva de agua utilizable: 100 mm

(&) Estación situada fuera del área estudiada (en sus bordes).

Cuadro 39.-Evapotranspiración real(mm) (Método de THORNTHWAITE)

7.2.2. Método de COUTAGNE

COUTAGNE (1954; in MARTIN-ARNAIZ, 1976) establece la siguiente fórmula para el cálculo de la evapotranspiración real:

$$ETR = P - \lambda P^2$$

en la que:

ETR, evapotranspiración real en metros/año.

P, precipitación anual en metros.

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14t}$$

t, temperatura media anual en ºC.

Dicha fórmula es válida para valores de P comprendidos entre $\frac{1}{8\lambda}$ y $\frac{1}{2\lambda}$.

En el cuadro 40 reflejo los valores de P y t que he utilizado para el cálculo. Todos cumplen la condición impuesta, por lo que se puede aplicar

ESTACION	PERIODO DE CONTROL	PRECIPITACION ANUAL (mm)	TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)
AYAMONTE	1962/63-1973/74	524	17,6
GIBRALEON	1969/70-1978/79	547	18,9
HUELVA	1949/50-1978/79	538	18,1
PRESA DEL PIEDRAS	1969/70-1978/79	534	17,6
PRESA DEL SANCHO	1969/70-1978/79	504	17,0
SAN BARTOLOME DE LA TORRE	1970/71-1978/79	581	18,3
SUR HORTICOLA	1968/69-1978/79	498	18,1

CUADRO ' -Valores de precipitación y temperatura utilizadc en el cálculo de la evapotranspiración real (método de COUTAGNE).

la fórmula en este área.

De esta manera he calculado los valores de la evapotranspiración real que represento en el cuadro 41.

En el plano 8 he trazado las curvas de igual evapotranspiración real media, en base a los valores puntuales calculados.

La evapotranspiración real media, en el área estudiada, sería de 456 mm, y el volumen total evapotranspirado de 443 Hm^3.

ESTACION	ETR
Ayamonte	440
Gibraleón	460
Huelva	451
Presa del Piedras	446
Presa del Sancho (&)	489
San Bartolomé de la Torre	480
Sur Hortícola (&)	423

(&) Estación situada fuera del área estudiada (en sus bordes)

Cuadro 41.-Evapotranspiración real (mm)
(Método de COUTAGNE)

7.2.3. Método de TURC

TURC (1955; in MARTIN-ARNAIZ, 1976), en su Tesis Doctoral, llega a una fórmula, experimentada en numerosas cuencas en todo el mundo, que tiene la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

donde:

P, precipitación anual en mm.

T, temperatura media anual en ºC.

Con este método he calculado la evapotranspiración real en aquéllas estaciones con datos suficientes (cuadro 42).

ESTACION	ETR
Ayamonte	485
Gibraleón	512
Huelva	499
Presa del Piedras	492
Presa del Sancho (&)	532
San Bartolomé de la Torre	531
Sur Hortícola (&)	469

(&) Estación situada fuera del área estudiada (en sus bordes)

Cuadro 42.-Evapotranspiración real (mm) (Método de TURC)

En el plano 9 represento las curvas de igual evapotranspiración real, que presentan un trazado similar a las curvas obtenidas según la fórmula de COUTAGNE, con valores decrecientes hacia el borde litoral.

La evapotranspiración real media, en el área estudiada, sería de 503 mm, y el volumen total evapotranspirado ascendería a 489 Hm^3.

7.2.4. Análisis crítico de los métodos empleados

CASTANY (1971) indica que el método de THORNTHWAITE es "criticable por su complejidad y por la abundancia de coeficientes numéricos con numerosos decimales de una precisión a menudo ilusoria". Las tabulaciones de estos coeficientes (in MARTIN-ARNAIZ, 1976; GARCIA y GONZALEZ, 1964; ELIAS y GIMENEZ, 1965; PLAUD, 1967) simplifican notablemente

los cálculos. PLAUD (op. cit.) encuentra que con este método (evapotranspiración potencial) se obtienen valores demasiado altos en verano y demasiado bajos en los meses de invierno.

MARTIN-ARNAIZ (op. cit.) opina con respecto a los métodos empíricos en general: "los valores que con ellos se obtienen tendrán escasa validez si no están contrastados con medidas directas..... Sin este requisito será muy aventurado darles un significado ni siquiera orientativo". Indica que la fórmula de TURC da valores inferiores a los obtenidos con medidas directas, al contrario que sucede con la fórmula de THORNTHWAITE.

Sin perder de vista todas estas opiniones, y ante la imposibilidad de disponer de medios in situ, no hay más remedio que analizar los datos de que se dispone.

El valor de la evapotranspiración real media, obtenido por cada uno de los métodos, es de 437 mm (THORNTHWAITE), 456 mm (COUTAGNE) y 503 mm (TURC), que representan, respectivamente, el 81 por 100, 84 por 100 y 93 por 100 de la pluviometría media en el área estudiada; se puede observar la disparidad entre las cifras obtenidas, especialmente entre la de TURC con respecto a las de los otros dos métodos, diferencia que se acerca, e incluso supera los 50 mm.

De la misma definición de evapotranspiración, dada por THORNTHWAITE, se puede deducir que la aplicación de éste método para el caso de materiales pizarrosos y calizos puede dar resultados satisfactorios, ya que hay suelo suficientemente desarrollado en ellos. Cabe indicar que, en el área estudiada, los afloramientos de pizarras, grauvacas y calizas suponen, aproximadamente, un 15 por 100 del total; el resto corresponde a materiales detríticos, con gran desarrollo de suelos y vegetación.

La muy baja o nula permeabilidad de las pizarras y grauvacas produce gran escorrentía superficial; la infiltración únicamente se podría producir a favor de fracturas, pero la mayoría son diaclasas cerradas, por lo que no

se presentan pasos fáciles de agua. Ante la débil infiltración, el agua de lluvia que escapa a la escorrentía superficial se perderá por adsorción permanente del terreno y por evapotranspiración.

Las calizas son permeables por fisuras y karstificación incipiente; la escorrentía superficial es prácticamente nula, por lo que la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración real correspondería a la infiltración en profundidad.

En los materiales detríticos, la infiltración ocurre de forma muy diferente a los anteriores; los valores normales varían entre el 5 por 100 al 15 por 100 de la precipitación, y en arenas y gravas pueden llegar al 40 por 100 (CASTANY, 1971; MARTIN-ARNAIZ y VILARO, 1968). Dado que la escorrentía superficial no suele ser mayor del 20 por 100 de la precipitación, las pérdidas por retención del terreno y evapotranspiración han de ser elevadas.

Puesto que tanto los suelos como la vegetación están muy desarrollados, en la mayor parte del área estudiada, considero que los valores de evapotranspiración real obtenidos con el método de THORNTHWAITE deben aproximarse más a los valores medios comunes para estas áreas, mientras que los métodos de COUTAGNE y TURC proporcionan valores más elevados al despreciar la influencia de estos dos factores, lo que se traduce en una lluvia útil (escorrentía superficial más infiltración) muy baja, que contrasta notablemente con la realidad observable y medible en los cauces de los ríos. Este hecho también ha sido puesto de manifiesto en determinados sectores del área mediterránea (YAGUE y FERNANDEZ-RUBIO, 1976; PULIDO-BOSCH, 1979).

Se podría concluir indicando que los métodos de cálculo de la evapotranspiración real, según TURC y COUTAGNE, no dan resultados satisfactorios en este área atlántica.

GEOLOGIA

1. GENERALIDADES

El sector de la provincia de Huelva, cubierto en este estudio, se encuentra en un área de rasgos generales estratigráficos y tectónicos relativamente sencillos, pero complicados en detalle, cuando el estudio geológico tiene que utilizarse en la investigación hidrogeológica de la misma, lo que constituye mi objetivo principal.

Por ello, debo dejar bien aclarado que, en momento alguno, he pretendido profundizar en el conocimiento petrológico, estratigráfico o estructural de los materiales del área, por lo que mi estudio sobre estos aspectos se presenta de forma resumida y haciendo referencia a otros autores que han investigado en detalle los mismos.

La mayor parte de mis observaciones de campo han ido encaminadas a delimitar conjuntos litoestratigráficos, puesto que son los que, entre otros, van a condicionar el comportamiento hidrogeológico de los materiales.

La definición de los mismos no se ajusta, en todo momento, a la normativa de la actual Nomenclatura Estratigráfica (in CORRALES et al., 1977), basada en las publicaciones del Congreso Internacional de Montreal (1972) y en la Guía Estratigráfica Internacional (HEDBERG edit., 1980), y en las que se establecen las características que le dan el rango de unidades litoestratigráficas "formales", pues esto no siempre ha sido posible debido a varias causas, principalmente la gran variabilidad de litofacies existentes en el área, sus cambios laterales y verticales, y la ausencia de cortes "tipo" en

afloramientos y en sondeos, por lo que se precisaría de un estudio de geología regional más ámplio para definirlas.

He cartografiado la distribución de afloramientos a escala 1/50.000 (plano 10). Para la realización de este mapa he seguido la metodología expuesta en el epígrafe 2 del capítulo de introducción, aunque he utilizado datos de los planos geológicos a escala 1/50.000 de diversos autores (GEA et al., 1965; IGME-FAO, 1974; DE TORRES et al., 1975) y de la geología a escala 1/250.000 de VIGUIER (1974).

La serie estratigráfica sintética, resultado de la interpretación geológica, la represento en la figura 15.

El aspecto cronoestratigráfico lo he resuelto, en la mayoría de los casos, en base a estudios efectuados por otros autores, principalmente PEREIRA DE SOUSA (1919), FLEURY (1924), PERCONIG (1960-73), VIGUIER (1974), y las memorias de las hojas geológicas del IGME, de diversos autores.

Para más detalle sobre la Estratigrafía y Tectónica del área, remito al lector a la importante bibliografía existente.

De forma resumida, los materiales presentes son de edad comprendida entre el Carbonífero inferior y el Cuaternario reciente, aunque con una ámplia laguna estratigráfica (Lías? - Tortoniense), y, a excepción del Mioceno superior de base, todos afloran en superficie.

La tónica estructural de la región responde a la tectónica clásica de zócalo y cobertera, en la que ésta última constituye un monoclinal afectado por la red de fracturas y fallas que ha fragmentado en bloques el zócalo paleozoico.

2. ESTRATIGRAFIA

Según expuse en el capítulo inicial, el área estudiada se sitúa en el SW de

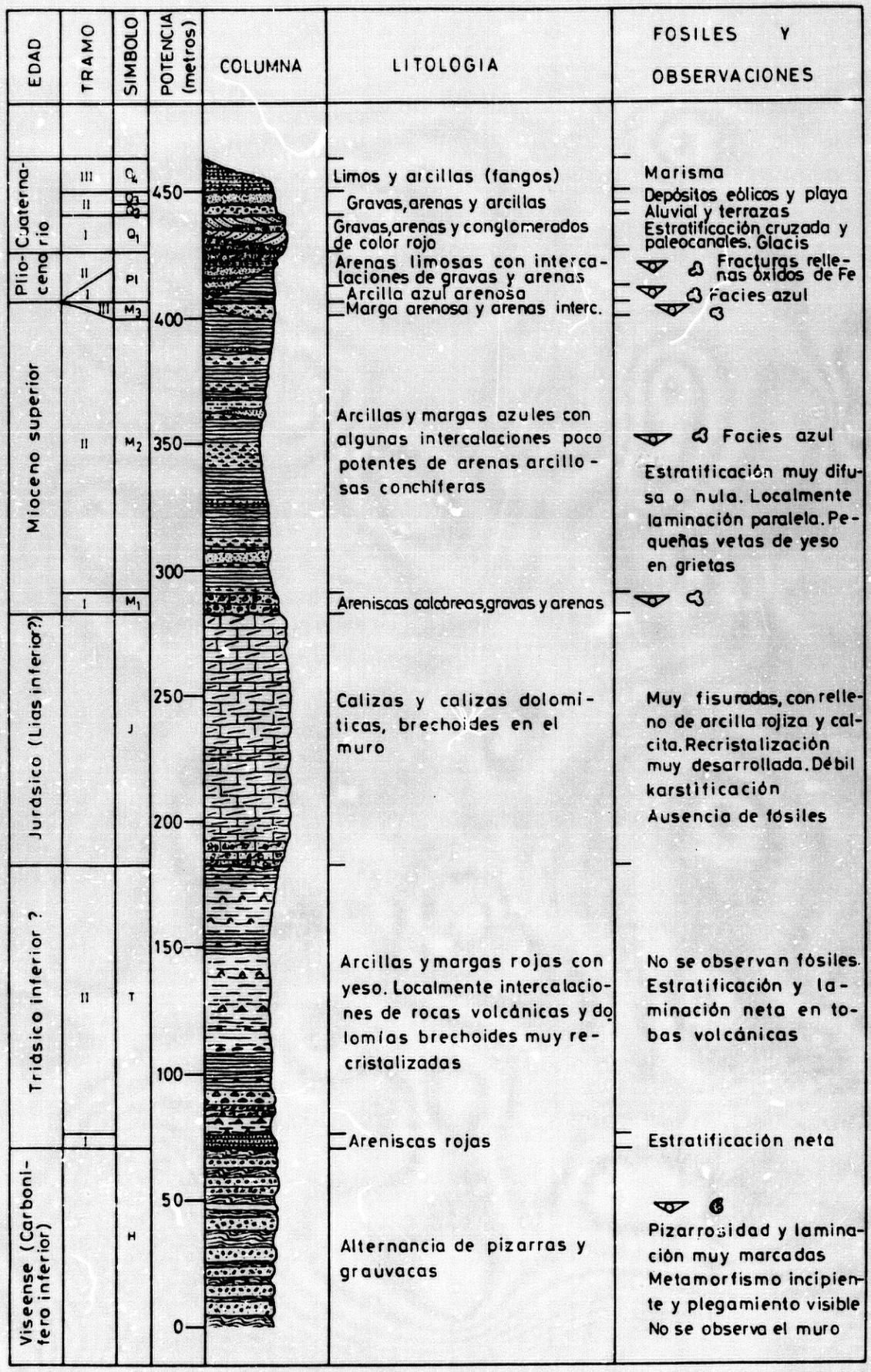


FIGURA 15.- Columna estratigráfica

la Península Ibérica, dentro de la provincia de Huelva.

La mayoría de los materiales aflorantes (plano 10) corresponden al relleno del sector suroccidental de la Depresión del Guadalquivir; el resto pertenecen al dominio del Paleozoico inferior de la submeseta meridional (FONTBOTE, 1972), y ocupan la parte septentrional del área, a modo de orla que bordea los materiales más recientes.

Como puede apreciarse en la figura 15, existe una laguna en la serie estratigráfica, que abarca desde los materiales calizo-dolomíticos liásicos? hasta el Mioceno superior (Tortoniense).

Para la descripción litológica, de los terrenos representados en el área estudiada, los agrupo en dos grandes conjuntos separados por la discordancia regional intramiocena:

- materiales preorogénicos.

- materiales postorogénicos.

El adjetivo "preorogénico" lo empleo para los materiales depositados antes de la fase alpina (límite Helvetiense-Tortoniense; VIGUIER, 1974) de la tectogénesis Bética, por lo que van a estar afectados por ésta, y por una actividad tectónica más reciente (neotectónica).

Dentro del primer conjunto diferencio dos unidades, separadas por la discordancia intracarbonífera, debida a la fase tectónica principal del plegamiento herciniano (fase Astúrica; ENADIMSA-IGME, 1972):

- Paleozoico (Carbonífero inferior).

- Mesozoico (Triásico y Jurásico).

En el segundo conjunto incluyo dos unidades:

- Terciario (Mioceno superior y Plioceno).

- Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno).

Cada unidad se deposita de forma discordante sobre la infrayacente.

A continuación describo los principales aspectos litoestratigráficos de las diferentes unidades, en orden cronológico de antigua a moderna.

2.1. MATERIALES PREOROGENICOS

2.1.1. Paleozoico

Los materiales paleozoicos presentes en el área estudiada pertenecen al Carbonífero inferior.

No he observado el muro de la unidad en geología de superficie, ni hay datos de sondeos mecánicos en este área que lo pongan de manifiesto.

En cambio, más al norte, en la faja pirítica, se sabe que dichos materiales reposan sobre los materiales volcánicos responsables de las mineralizaciones.

2.1.1.1. Carbonífero inferior

2.1.1.1.1. Distribución de afloramientos y antecedentes

Aflora en la parte septentrional del área estudiada y, a modo de orla, bordea materiales más recientes, los cuales se están desmantelando por erosión, principalmente en la cuenca alta del río Piedras, lo que da lugar a un afloramiento carbonífero que se alarga en dirección SE (plano 10).

La litofacies típica de esta unidad es una alternancia (ritmita, JULIVERT et al., 1972; MORENO, 1982) de pizarras y grauvacas que constituyen una serie monótona, cuya potencia aproximada es de 300-400 metros (FONTBOTE-IGME,

1972; MORENO, op. cit.).

Esta unidad tiene amplitud regional, por lo que los aspectos litológicos, cronoestratigráficos y genéticos de sus materiales han sido estudiados, minuciosamente, por diferentes autores fuera del área, destacando, entre otros, GONZALO y TARIN (1887), PEREIRA DE SOUSA (1919, 22, 23, 24), FLEURY (1924), PRIETO (1944), FEIO (1949), FEBREL (1965, 66), RAMBAUD (1969), STRAUSS (1970), SCHERMERHORN (1971), BARD (1971) y MORENO (1982).

Dentro del área, destacan los trabajos de GONZALO y TARIN (1887) e HIDROIBERIA (1966), que realizan un estudio litológico detallado, aunque cualitativo, de estos materiales.

A todos estos trabajos me remito y sólo realizo aquí una breve descripción de las principales características que presenta la litofacies de esta unidad, que es similar a la descrita por otros autores.

2.1.1.1.2. Litología

Las pizarras, en general arcillosas, son de color gris oscuro, incluso negro cuando el contenido en materia orgánica es grande. Se trata de una roca detrítica, de grano muy fino, anguloso o subanguloso, con bajo contenido en feldespato y mica, pero alto contenido en cuarzo. La matriz fundamental es una trama de sericita, que ocupa un volumen de más del 50 por 100 en las muestras observadas, con componentes detríticos aislados; granos de cuarzo, láminas de mica, alguna clorita detrítica y materiales opacos, completan la composición de la roca.

El contenido en cemento arcilloso y materia orgánica debilita la roca frente a la acción de los agentes erosivos, en cambio el alto contenido en granos de cuarzo contribuye a darle resistencia mecánica más alta de la normal en otras rocas pizarrosas.

Se presentan claros planos de pizarrosidad y de deslizamiento, dentro de

la roca o en su contacto con la arenisca.

Por tratarse de rocas detríticas, están relacionadas por una serie ininterrumpida de tránsitos con las areniscas, pasándose a éstas al aumentar la fracción detrítica gruesa y disminuir la intergranular. No obstante, y aunque en algunos afloramientos resulta difícil de apreciar, la coloración, ligeramente más oscura, y su patente pizarrosidad, son rasgos que permiten distinguir estas rocas de las areniscas interestratificadas con ellas.

Las grauvacas, término que empleo específicamente según la clasificación de PETTIJOHN (1976), son areniscas compactas, de grano fino y color variable entre marrón o pardo y gris claro o azulado. Son rocas mineralógicamente poco seleccionadas, constituídas por materiales detríticos que proceden de alteración de materiales preexistentes. Están compuestas por material cristalino de cuarzo, plagioclasa, moscovita y biotita cloritizada, todo él con formas angulosas indicadoras del poco transporte que ha sufrido. El cuarzo presenta las formas bipiramidadas del cuarzo de las riolitas y rocas afines. El feldespato es albita maclada, análoga a los fenocristales que aparecen en las riolitas y secciones tabulares de doleritas. Las micas detríticas son moscovita y biotita cloritizada. Todo este material cristalino tiene diámetros medios comprendidos entre 0,05 y 1,5 mm.

Las grauvacas contienen, también, fragmentos de rocas, sobre todo de pizarras arcillosas, areniscas y de riolitas, espilitas, doleritas y tobas de los materiales volcánicos infrayacentes.

El cemento de las grauvacas es arcilloso, compuesto por finas láminas de sericita autígena, producto de una recristalización incipiente.

Los análisis petrológicos efectuados por HIDROIBERIA (1966), en la cuenca alta del río Piedras, demuestran la presencia, en ese sector, de areniscas que, por su composición, se clasifican como subgrauvacas (PETTIJOHN, 1976). Se trata de areniscas con inclusiones de trozos de pizarra o diabasa, de grano fino, anguloso o subanguloso, con bajo contenido en feldespa-

tos (menor del 10 por 100) y mica, pero alto contenido en cuarzo. La matriz está constituída por cemento arcilloso-hematítico. La estratificación se pone de manifiesto por bandeado de color claro y oscuro alternante. Presentan fisuración microscópica, puesta en evidencia por indicios de calcedonia y cristales de pirita.

Tanto grauvacas como subgrauvacas aparecen intercaladas con pizarras, con las que se relacionan estrechamente.

La mayor potencia de los bancos, la débil alteración y la ausencia de pizarrosidad, son los principales rasgos que permiten distinguir las areniscas de las pizarras en los casos, frecuentes, en que su coloración es idéntica.

Los materiales del Carbonífero inferior constituyen una serie flysch (RAMBAUD, 1969; SCHERMERHORN, 1971, y MORENO, 1980, entre otros), formada por alternancia de pizarras y grauvacas, depositada por corrientes de turbidez (BOOGARD, 1967) en un abanico submarino progradante desde el NW hacia el SE, ubicado cerca del talud continental (MORENO, op. cit.).

Las capas tienen espesores variables entre 0,1 y 2 metros y forman bancos de varios metros de espesor, con predominio de pizarras o grauvacas, según su posición en la serie estratigráfica. En general, he observado mayor desarrollo de grauvacas hacia los niveles superiores de la unidad.

Aunque no he estudiado las características sedimentológicas de los materiales, he observado principalmente laminación paralela de lechos de diferente grano y color y, en un sólo caso, una estructura de muro fosilizada en grauvacas que, casi con total seguridad, es un "flute cast", de 30 centímetros de longitud.

La estratificación del conjunto ha sido borrada por la pizarrosidad (muy patente en las pizarras), asociada a pliegues hercínicos, y sólo es observable por la laminación de diferente color en las capas de grauvaca, y micros-

cópicamente por la frecuente alternancia de fajas arenosas y arcillosas en las pizarras. Es muy frecuente la presencia de vetas y diques de cuarzo, con estructuras sigmoidales, que rellenan fracturas más o menos normales a la estratificación.

No he observado en el área estudiada el muro de esta unidad, por lo que cualquier cifra sobre su potencia sería hipotética, pero los datos de geología regional le asignan una potencia de 500 metros al este de Rio Tinto (RAMBAUD, 1969) y de 388 metros en las proximidades de Villanueva de los Castillejos (MORENO, 1982).

En cuanto al metamorfismo de estos materiales, ya GONZALO y TARIN (1887) indica que, fuera de la región minera onubense, las rocas apenas han experimentado ninguna alteración notable. El límite de dicha región lo sitúa al norte de San Bartolomé de la Torre y de Villanueva de los Castillejos y, por tanto, próximo a la parte septentrional del área estudiada. La unidad presenta, en el sector estudiado, un ligero metamorfismo, caracterizado por la paragénesis pumpellita-stilpnomelana (BARD, 1971). Esta paragénesis, cuando se presenta en metasedimentos tales como grauvacas (sin fragmentos de rocas máficas y con componentes pelíticos junto a cuarzo y feldespato) y pizarras arcillosas, define un metamorfismo regional de grado muy bajo (FREY, 1973; in WINKLER, 1978). JULIVERT et al. (1972) atribuyen a estos materiales un metamorfismo regional hercíniano de bajo grado, que no llega a alcanzar la isograda de la biotita.

Multitud de canteras, principalmente en los términos municipales de Gibraleón y Cartaya (arroyo de Tariquejo), me han permitido observar secciones parciales de los materiales, pero no hay ningún punto en que se pueda establecer el corte "tipo", dadas las grandes variaciones laterales y verticales en la composición de las pizarras y grauvacas, principalmente en las últimas.

2.1.1.1.3. Edad

A los materiales descritos se les atribuye, de forma sistemática, edad Carbonífero inferior. Aunque sólo puedo aportar como datos algunos ejemplares de Lamelibranquios fósiles (Posydonomia Becheri), recogidos en una capa de pizarras en las canteras del arroyo de Tariquejo (término municipal de Cartaya), mantengo dicha edad para el conjunto, de acuerdo con los datos de geología regional, pero matizando, en lo que respecta a su inclusión en el tramo del Culm o en el Viseense, que si bien diferentes autores, principalmente GONZALO y TARIN (1887), atribuyen los materiales de esta edad al tramo del Culm, la asociación faunística Posydonomia Becheri y Goniatites Striatus, estudiada principalmente por PEREIRA DE SOUSA (1919, 24) en el Algarve portugués (Carbonífero de Castro Marín, muy próximo al sector occidental del área estudiada), que es característica en toda Europa y pertenece a las subzonas P-1 de Inglaterra y III-B de Alemania y Silesia, define edad Viseense superior (Dinantiense).

FLEURY (1924) ratifica los resultados obtenidos por PEREIRA DE SOUSA, en unos estudios sobre pequeños Goniatites, Foraminíferos y Crinoides, presentes en calizas viseanas del Bajo Alentejo (Portugal).

McGILLAVRY (1961) y SCHERMERHORN (1971), mediante estudio de fósiles, atribuyen edad Viseense superior a la unidad flysch situada al NE de la zona surportuguesa (in JULIVERT et al., 1972).

Autores más recientes asignan también edad Viseense (DE TORRES et al., 1975) y Viseense superior (MORENO, 1982) a esta unidad.

Aunque hay autores que aceptan la denominación tradicional de Culm para expresar la edad de estos materiales, discrepo de ellos pues el término Culm debe utilizarse para designar facies muy particulares, y nó con implicaciones cronológicas, y admito, por todo lo expuesto, edad Viseense (posiblemente superior) para la unidad Carbonífero inferior presente en el área estudiada.

2. 1. 2. Mesozoico

2. 1. 2. 1. Antecedentes

En el área estudiada el Mesozoico está representado por materiales triásicos y jurásicos, aflorantes en las proximidades de Ayamonte.

En ambas unidades he observado el muro, aunque en ocasiones con dificultad debido a la alteración de los materiales. En cambio, datos de los sondeos mecánicos más profundos, realizados en el área, ponen de manifiesto un tránsito muy neto entre ambos materiales y de éstos con los materiales de la unidad carbonífera.

Estos materiales, descritos por primera vez por GONZALO y TARIN (1887), han sido estudiados posteriormente por escasos autores, pues la interpretación sobre el Mesozoico de la Depresión del Guadalquivir se ha centrado en el estudio de las columnas de sondeos petrolíferos (RIOS, 1952, 55, 56, 58 y 60; GAVALA, 1955; PERCONIG, 1960-62), situados fuera del área.

GONZALO y TARIN (1887) estudia meticulosamente el afloramiento de Ayamonte, e indica la presencia de calizas dolomíticas, arcillas margosas multicolores y rocas piroxénicas (ofitas según MACPHERSON), y atribuye todos los materiales al sistema Triásico aunque expresa, a pie de página, que, según los estudios paleontológicos de CHOFFAT sobre las calizas y margas del Algarve portugués, a que asimila éstos depósitos, pueden ser liásicas. La descripción litológica que este autor hace del afloramiento es envidiable, aunque confunda los materiales de alteración de la roca volcánica, de colores variados, con arcillas margosas, y no distinga el Jurásico; sin embargo, reconoce la presencia de caliza dolomítica recristalizada, intercalada entre las ofitas.

Hasta 1964 no se vuelven a estudiar los materiales de este afloramiento. En este caso, GEA et al. se encargan del mismo. Apoyándose en datos de sondeos mecánicos y geofísicos, realizan una excelente descripción de los ma-

teriales, en la que relacionan el carácter brechoide de algunos estratos de calizas dolomíticas con un vulcanismo, centrado posiblemente en Ayamonte, y admiten su continuidad lateral hacia el S y SE extendiéndose al sur de la "falla de Lepe", y los incluyen en el Mesozoico al asignarles edad triásica (posiblemente Buntsandstein).

En la hoja número 80-81 del Mapa Geológico Nacional a escala 1/200.000 (FONTBOTE-IGME, 1972), se incluyen las tobas volcánicas y diabasas de este afloramiento, que se describen como tales, pero se ignora por completo la presencia del Mesozoico en el entorno de Ayamonte.

Más adelante, es la cartografía geológica a escala 1/50.000 del Proyecto de Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir (IGME-FAO, 1974) la que, en la hoja número 998, diferencia dolomías jurásicas y doleritas y arcillas triásicas, en el afloramiento de Ayamonte, posiblemente bajo la influencia de la visión regional que un estudio de tal magnitud dió a sus autores. Es evidente que el trabajo de PERCONIG (1960-62), sobre la constitución geológica de Andalucía Occidental, debió influir considerablemente en esta distinción de materiales, aunque, curiosamente, en la Memoria de dicho Proyecto (AGL: SF/SPA 9, Informe Técnico 1) no se citan estos materiales.

2.1.2.2. Triásico

2.1.2.2.1. Distribución de afloramientos

Los materiales que atribuyo a esta edad afloran en un área muy reducida (aproximadamente 2 km^2) al NE de Ayamonte, en las vertientes septentrional y meridional del Estero de La Nao, prolongándose en dirección SSE en una franja estrecha, que termina en las proximidades del kilómetro 42 de la carretera N-431 (plano 10).

El límite septentrional del afloramiento representa el contacto con el Carbonífero infrayacente, contacto que en algunos puntos se oculta bajo sedi-

mentos de marisma del Cuaternario reciente.

Hacia el sur y el este la unidad triásica queda recubierta por un conglomerado rojo de edad pleistocena, y el límite occidental supone el contacto con los materiales jurásicos suprayacentes.

La dirección preferente de los materiales es ENE-WSW, y su buzamiento medio unos 35º al SSE, deducidos de la estratificación visible en las tobas volcánicas intercaladas y en las areniscas rojas basales.

No obstante lo reducido del afloramiento descrito, los datos de sondeos mecánicos existentes me han permitido establecer la figura 16, en la que indico el límite septentrional de los materiales triásicos tanto en el afloramiento como en el subsuelo.

El espesor de la unidad es variable, de unos sondeos a otros, pero según la interpretación de los datos disponibles, estimo una potencia media en el área estudiada de 120 metros y un aumento gradual de la misma, en forma de "abanico", hacia el SW, S y SE.

2.1.2.2.2. Litología

Para definir la litofacies de los materiales me baso, principalmente, en mis observaciones de campo y en los datos suministrados por los numerosos sondeos mecánicos que la cortan (figura 16).

He distinguido dos tramos (figura 15), que de muro a techo son los siguientes:

- a) 6 metros observables de materiales muy detríticos (posible Buntsandstein de GEA et al., 1965), constituídos por areniscas rojas y blanquecinas muy silíceas, arcillas rojas compactas, tobas volcánicas de poco espesor, y un conglomerado basal de grano fino, muy arcilloso y de color rojo, con escasa potencia (0,8 metros?), en el que existen intercalaciones de granos

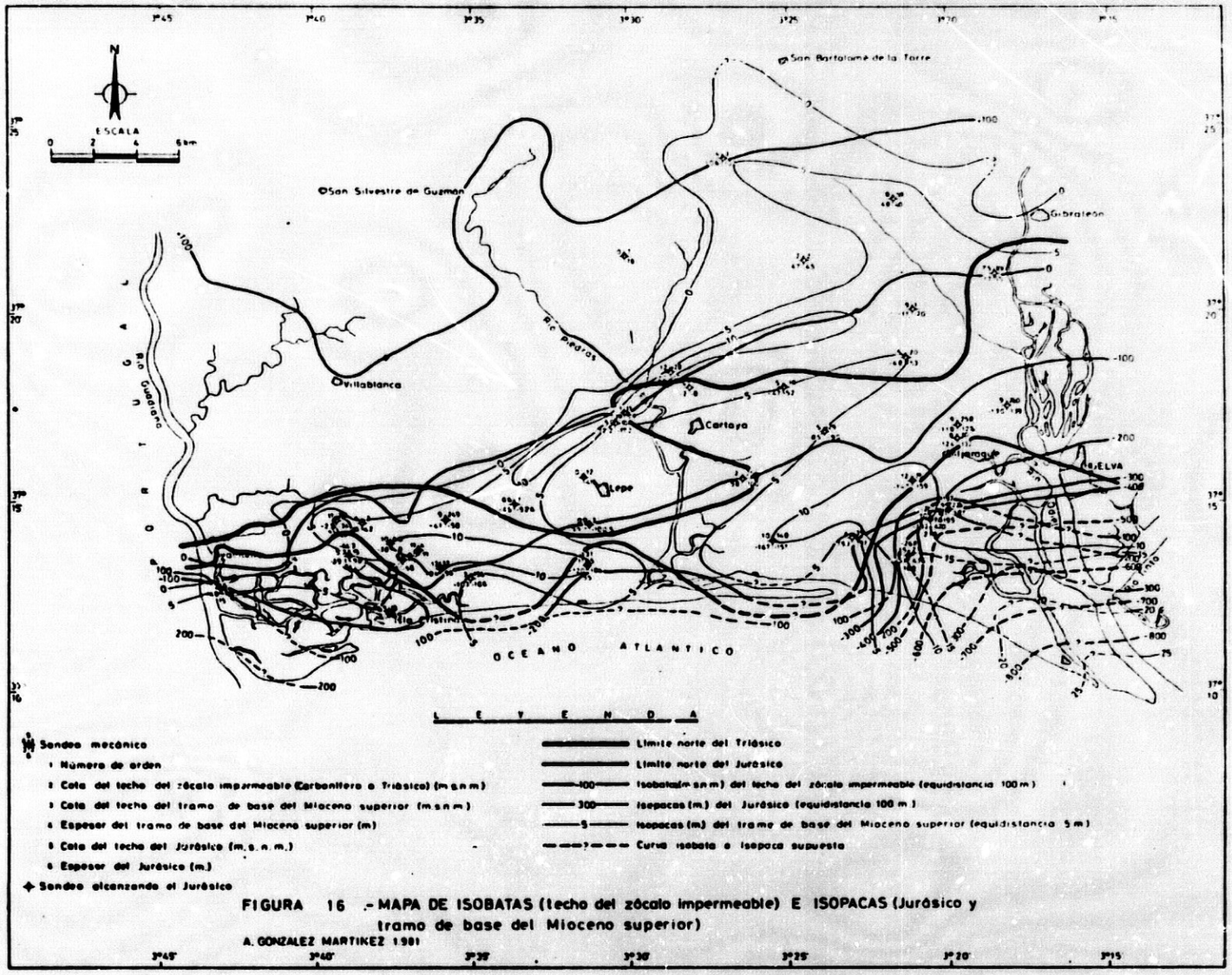


FIGURA 16 .- MAPA DE ISOBATAS (techo del zócalo impermeable) E ISOPACAS (Jurásico y tramo de base del Mioceno superior)

A. GONZALEZ MARTINEZ 1981

gruesos, alineados según la dirección del buzamiento, de algunos centímetros de espesor.

Este tramo tiene estratificación muy neta y un buzamiento entre 40 y 50º hacia el SSE.

- b) Una monótona serie de 105 metros de potencia media integrada por arcillas y margas rojizas con yesos, que eventualmente contienen intercalaciones de rocas volcánicas (tobas, piroclastos) y subvolcánicas (doleritas), y dolomías, localmente brechoides y recristalizadas por metamorfismo de contacto. Dichas intercalaciones se encuentran, principalmente, en los primeros 40 metros de este tramo.

En el afloramiento sólo he observado tobas y piroclastos volcánicos (2 capas?), dolomías brechoides muy recristalizadas y un pequeño asomo de arcillas y margas rojas con yesos, que se encuentran cubiertas por materiales del Pleistoceno.

Los depósitos vulcano-clásticos son de granulometría variable, en general muy fina. ROMARIZ y OLIVEIRA-SILVA et al. (1976), en su estudio sobre los episodios vulcano-sedimentarios del Algarve portugués, los clasifican como cineritas y arenitas vulcano-clásticas. Aparecen alterados, con coloración verdosa a rojiza muy llamativa, que les da un aspecto abigarrado, y muestran una estratificación y laminación muy nítida. En esta laminación he observado pequeños pliegues en slumping, prueba patente de su origen vulcano-sedimentario.

Los estratos tienen espesores variables entre algunos centímetros y 0,5 metros, y forman bancos de más de 6 metros de potencia, que es el máximo observable. Su buzamiento más frecuente es de unos 30º al SSE. Los bancos están atravesados por diques de cuarzo de color claro, que rellenan fracturas normales a su dirección.

Las dolomías brechoides son de color gris oscuro y presentan recristaliza-

ción muy avanzada, en el contacto con los estratos volcánicos. La continuidad lateral de sus afloramientos es pequeña, y hay grandes bloques de esta roca entre los materiales volcánicos, que interpreto como resultantes de la acción de un episodio volcánico submarino, post-sedimentario, localizado en Ayamonte, puesto que el carácter brechoide desaparece hacia el SE.

Las arcillas y margas rojas tienen yesos de color rojizo, con abundantes huecos rellenos de arcilla roja y materia volcánica. No he podido observar su estratificación, dado lo reducido del afloramiento y su gran alteración superficial.

2.1.2.2.3. Edad

La ausencia de fósiles y microfauna en las muestras de afloramientos y de sondeos, me impide la determinación exacta de la edad de los materiales de esta unidad.

GONZALO y TARIN (1887) le atribuye edad triásica, en base a la discordancia de estratificación con los materiales subyacentes del Carbonífero inferior y la perfecta correspondencia con las calizas "del otro lado del río Guadiana", consideradas por RIVEIRO y DELGADO (in GONZALO y TARIN, op. cit.) como triásicas; no obstante, admite que pueden ser liásicas, edad que CHOFFAT (1887) asigna a las margas y calizas del Algarve portugués.

GEA et al. (1965) indican que es difícil la determinación de la edad exacta de estos materiales por la ausencia de fauna y microfauna fósil. Realizan el estudio paleontológico, mediante levigado, de una muestra de detritus de perforación recogida a 257 metros de profundidad en el sondeo S-1-12 (X=3º 23' 44''; Y=37º 16' 50''; Z=60 metros), situado en el término municipal de Cartaya; no encuentran ningún resto orgánico, pero indican que "la arcilla roja es de tipo Keuper, aunque la litología de la arenisca rojiza corresponde a un Paleozoico o a un Buntsandstein" y asignan a la muestra edad Buntsandstein.

PERCONIG (1960-62) interpreta las columnas de sondeos petrolíferos realizados por VALDEBRO y ENADIMSA en Andalucía Occidental. De ellos, los sondeos Moguer (X=3º 06' 53''; Y=37º 09' 21''; Z=48 metros) y El Asperillo (X=2º 57' 40''; Y=37º 04' 38''; Z=50 metros) están próximos a la parte oriental del área estudiada.

Los materiales cortados por el sondeo Moguer entre 1890 metros y 2417 metros comprenden principalmente anhidrita, y niveles de sal y dolomía, con arcillas rojizas, areniscas y conglomerados de base (hay que resaltar que a partir de 2417 metros cortó Paleozoico). Estos materiales los atribuye a un complejo Triásico.

El Asperillo (15 kilómetros al SE del sondeo anterior) no alcanza el Paleozoico y cortó, entre 2450 metros y 3310 metros, un conjunto de arcillas, anhidrita y horizontes de sal, con algunas intercalaciones dolomíticas, y ausencia total de restos orgánicos reconocibles. Le asigna edad triásica.

En las conclusiones de este estudio sobre la geología de Andalucía Occidental, PERCONIG indica que la facies de los depósitos triásicos encontrados en estos dos sondeos es muy diferente a la del Trías germano-andaluz, que aflora en el borde sur de la Cuenca del Guadalquivir y la Zona Subbética, y en cambio presenta muchas analogías con la facies de los materiales triásicos atravesados por los sondeos de Cerro Gordo (Cádiz), en las proximidades de la Zona Bética; al mismo tiempo, vislumbra la existencia de una cuenca sedimentaria mesozoica, abierta hacia el Atlántico, en la que se depositaron estas facies triásicas que se conectan a las del extremo meridional de Portugal.

En la memoria de la hoja número 999-1016 del Mapa Geológico de España a escala 1/50.000 (DE TORRES et al., 1975), que comprende la parte suroriental del área estudiada, suponen pertenecientes al Buntsandstein los tramos fuertemente detríticos (arcillas rojizas, areniscas y conglomerados) cortados por el sondeo Moguer hacia la base del Triásico, asignando al Keuper las arcillas limoníticas, anhidrita y sal situadas entre los 1890 metros de profundidad y

este nivel de base.

MELENDEZ y FUSTER (1978) describen la paleogeografía de Europa Occidental durante el Triásico, basándose en un mapa elaborado por AUBOUIN. Aunque la escala de este mapa es pequeña, por lo que puede resultar poco significativo a nivel local, creo, sin embargo, que es indicativo del carácter general del medio sedimentario durante el Triásico. En él se marca el área de sedimentación del "Trías marginal rojo", constituído por depósitos marginales de areniscas rojas y margas salinas que bordean el continente nor-Atlántico y que marcaron la máxima transgresión triásica. Al este de esta banda marginal, sitúan el área de sedimentación del Trías germánico. Aunque con las limitaciones que antes expuse, respecto a la escala del mapa, se observa cómo el área estudiada se sitúa dentro del área de sedimentación del Trías marginal.

ROMARIZ y OLIVEIRA-SILVA et al. (1976) indican que los episodios vulcano-sedimentarios detectados en el Algarve portugués, similares en su litología a los que se presentan en el área estudiada, cortan a las calizas dolomíticas del Lías inferior, y atribuyen al vulcanismo edad Jurásico, destacando la posición uniforme de los focos volcánicos que ocupan una zona de inestabilidad tectónica, orientada, aproximadamente, E-W en el contacto del Paleozoico con el Mesozoico.

Los numerosos datos de sondeos que dispongo y mis observaciones en el afloramiento, me permiten indicar que el vulcanismo del área estudiada sólo afecta a la parte inferior del tramo II (figura 15) de la unidad triásica, y que, aunque es difícil determinar con exactitud el número de episodios volcánicos (dos como mínimo), la edad de éstos es intra-triásica y están relacionados con un posible foco volcánico localizado en Ayamonte (?).

No puedo aportar datos paleontológicos, pero, según los estudios de los autores citados, asigno edad Triásico (posiblemente Buntsandstein) a los materiales de esta unidad, aunque su facies se asemeja más a la del Trías "marginal rojo" de AUBOUIN, que a la del Trías germano-andaluz, aunque

no descarto la posibilidad de que las arcillas y margas rojas con yeso del tramo II (figura 15) puedan pertenecer a la base del Keuper, pero no tengo datos para afirmarlo.

2.1.2.3. Jurásico

2.1.2.3.1. Distribución de afloramientos

Los materiales de la unidad jurásica están representados, exclusivamente, en Ayamonte y alrededores, en un reducido afloramiento (1,6 km^2 de superficie) que, con frecuencia, conserva aún retazos sin erosionar del conglomerado rojo del Pleistoceno, que los cubrió.

Su límite septentrional (plano 10) lo constituyen los depósitos de marisma (Holoceno) del Estero de La Nao. Al NE, y algo al NW, limita con materiales volcánicos de la unidad triásica, sobre los que es discordante. Los límites E y SE son los depósitos detríticos pleistocenos y pliocenos, respectivamente, suprayacentes a la unidad. Finalmente, los límites S y W representan el contacto con el Holoceno (depósitos de marisma de la desembocadura del río Guadiana). El propio río impide ver si esta unidad tiene continuidad lateral hacia el oeste, pero numerosos trabajos (GONZALO y TARIN, 1887; PERCONIG, 1960-62; ROMARIZ y OLIVEIRA-SILVA et al., 1976, entre otros) demuestran que está perfectamente representada en el Mesozoico de la región del Algarve portugués.

Aunque hay numerosas canteras, antiguas y modernas, para extracción de caliza, en general, no se observa bien la estratificación de estos materiales.

GONZALO y TARIN (1887) le asigna rumbos comprendidos entre las direcciones ENE-WSW y E-W, y buzamientos entre 15 y 28º al SSE.

GEA et al. (1965) indican buzamientos entre 10 y 25º al S.

Las escasas medidas que he podido efectuar, dan direcciones comprendidas entre la NE-SW y la ENE-WSW, y buzamientos entre 20 y 28º al SE y al SSE.

A falta de un estudio más preciso a este respecto, considero una dirección media ENE-WSW, y un buzamiento medio de 20º en dirección SSE, para los materiales de esta unidad.

En cuanto a su potencia, es difícil estimarla, puesto que no aflora el techo. La figura 16 muestra el límite septentrional y las variaciones de potencia de esta unidad, resultados que he obtenido en base a datos de cinco sondeos mecánicos representativos. De esta figura deduzco que la potencia aumenta desde el N, y en forma de "abanico", hacia el SE, S y SW.

Con los datos de que dispongo, estimo una potencia media de 100 metros para estos materiales en el área estudiada.

2.1.2.3.2. Litología

La unidad tiene litofacies carbonatada, que consiste principalmente en calizas dolomíticas compactas, de grano fino, que hacia muro adquieren carácter brechoide, en un espesor mínimo de 10 metros, medido en afloramiento. Ocasionalmente hay pequeños niveles margocalizos y arcillosos (GEA et al., 1965, sondeo 1-3).

El estudio petrológico de estos materiales ha sido realizado, principalmente, por GEA et al. (op. cit.), sobre muestras de rocas tomadas en el afloramiento de Ayamonte y en el sondeo 1-3 (X=3º 21' 10''; Y=37º 13' 22''; Z=20 metros) entre 273 y 295 metros de profundidad, y por PERCONIG (1960-62) en muestras de los sondeos petrolíferos "Moguer" y "El Asperillo", al SE del área estudiada; a las conclusiones de ellos me remito.

Las calizas dolomíticas compactas tienen color gris claro, y aparecen en bancos de 2 a 5 metros de espesor; localmente se observan indicios de si-

licificación, y su recristalización es muy avanzada. Están muy fracturadas (microfisuras); algunas fisuras están rellenas de arcilla rojiza y calcita.

Presentan escasas oquedades, con diámetros variables pero predominando los comprendidos entre 0,5 a 1 centímetro. Algunos de estos huecos están rellenos de arcilla roja, y generalmente sus paredes están tapizadas de pequeños cristales de calcita. El grado de karstificación es débil o nulo.

Hacia el muro de la unidad, estas calizas dolomíticas adquieren marcado carácter brechoide. Posiblemente se trate de calizas detríticas (calcirruditas?), pero para confirmarlo se precisaría un estudio más completo. Presentan cantos calizos angulosos, de diámetro variable, pero en general mayor de 2 milímetros, englobados en una matriz calizo-arcillosa de color rojizo y grano fino. Por los datos de sondeos mecánicos que dispongo, deduzco que el carácter brechoide desaparece hacia el este, respecto al afloramiento. Los materiales suelen estar muy alterados, y su grado de recristalización es elevado. A nivel del afloramiento, las fracturas son escasas, de longitud centimétrica y casi siempre rellenas de calcita.

2.1.2.3.3. Edad

GONZALO y TARIN (1887), en el estudio efectuado en las canteras del afloramiento de Ayamonte, aunque no encuentra fósiles, asigna a esta unidad edad triásica, si bien admite que puede ser liásica, según las conclusiones de CHOFFAT sobre un estudio paleontológico en las calizas del Algarve portugués, y la similitud de litofacies entre las calizas dolomíticas de Ayamonte y las del Algarve.

GEA et al. (1965) realizan estudios paleontológicos, sobre láminas delgadas, en muestras del afloramiento y de sondeos, y detectan la presencia de restos que parecen ser orgánicos, pero irreconocibles a causa del grado de recristalización, por lo que asignan a los materiales edad indeterminada, pero los incluyen dentro del Mesozoico y los describen como posible Triásico.

PERCONIG (1960-62) asigna edad Lías inferior (Hettangiense, pudiendo abarcar parte del Sinemuriense), a las dolomías y calizas dolomíticas cortadas por el sondeo "El Asperillo" entre 2150 y 2450 metros de profundidad, inmediatamente por encima de los materiales triásicos. No obstante, reconoce que la escasez de fósiles es una constante en esta unidad, por lo que no permite una datación precisa, y dice que si la datación se basa en las microfacies de los afloramientos liásicos del sur de Portugal y de Andalucía, esta serie de materiales parece corresponder al Lías inferior. Al estudiar la columna del sondeo "Moguer" atribuye, también, edad Lías inferior a una serie, principalmente dolomítica, cortada entre los 742 y 1890 metros de profundidad, dentro de la cual hay algunas alternancias de calizas margosas y calizas detríticas. En el análisis paleontológico de las muestras de este sondeo, encuentra escasos restos fósiles de algunos Gasterópodos, Annélidos, Algas (Solenopora), Radiolarios y restos orgánicos recristalizados indeterminables. La edad Lías inferior la atribuye en base a las mismas causas explicadas para el sondeo anterior.

ROMARIZ y OLIVEIRA-SILVA et al. (1976) indican que la serie de calizas dolomíticas del Algarve portugués es de edad Lías inferior.

Ante la falta de restos orgánicos fosilizados, no puedo asignar edad exacta a los materiales de esta unidad. No obstante, de acuerdo con los datos anteriormente expuestos, y por su encuadre dentro de la geología regional, creo que son de edad jurásica, posiblemente Lías inferior.

2.2. MATERIALES POSTOROGENICOS

2.2.1. Terciario

2.2.1.1. Antecedentes

Los materiales terciarios presentes en el área estudiada pertenecen al Neógeno, y han sido objeto de investigación por diferentes autores: GONZALO y TARIN (1887), BARRAS DE ARAGÓN (1892), HERNANDEZ-PACHECO

(1926), PRIETO (1944), PEREZ-MATEOS y RIBA (1961), GEA et al. (1965), SUAREZ-BORES (1970), FEBREL et al. (1972), ENADIMSA-IGME (1972), FONTBOTE-IGME (1972), IGME (1974), IGME-FAO (1974), VIGUIER (1974), y DE TORRES et al. (1975).

Dada la amplitud regional de estos materiales, numerosos autores se han ocupado de su estudio fuera del área. Sería interminable citarlos a todos, pero entre ellos interesa destacar a: LAN (1857), MACPHERSON (1879), GONZALO y TARIN (1887), CALDERON y ARANA (1890, 93, 95 y 96), BARRAS DE ARAGON (1892, 1903) GENTIL (1918), GAVALA y LABORDE (1916, 27, 36, 49, 52, 59), SIMON (1942), PERCONIG (1960, 62, 64, 66, 67, 71, 73), PERCONIG y GRANADOS (1973), SAAVEDRA (1961, 64), IGME-FAO (1974), MAGNE y VIGUIER (1970, 71, 72), y VIGUIER (1969, 74).

A todos estos trabajos me remito, pero muy especialmente a la Tesis Doctoral de VIGUIER (1974), investigación que considero fundamental para comprender los aspectos estratigráficos, sedimentológicos y tectónicos del Neógeno en Andalucía noroccidental.

La serie del Neógeno comprende materiales del Mioceno superior y del Plioceno inferior (VIGUIER, 1974), y se extiende por gran parte del área estudiada, al sur de los afloramientos del substrato paleozoico, con excepción de aquéllas áreas en que aparece cubierta por sedimentos cuaternarios.

La potencia media del conjunto es de unos 140 metros, y aumenta hacia el SE.

2.2.1.2. Mioceno superior

2.2.1.2.1. Distribución de afloramientos

La unidad margo-arenosa del Mioceno superior, aflora en las cuencas de los ríos Odiel y Piedras (plano 10), y, de acuerdo con su litología, distingo tres tramos (figura 15).

El afloramiento del río Odiel pertenece a las arcillas y margas del tramo intermedio, y se extiende desde Aljaraque hasta la CC-443 de Gibraleón a San Bartolomé de la Torre. No es contínuo, y con frecuencia sus materiales desaparecen bajo otros pliocenos y cuaternarios. La erosión llevada a cabo por el río de Aljaraque y los arroyos de Fuente Salada, Domingo y La Mata, es la responsable de la existencia de este extenso afloramiento.

En la cuenca del río Piedras aflora tanto el tramo intermedio como el superior, aunque principalmente éste último. Los afloramientos de la cuenca alta del arroyo de Tariquejo y de Cartaya son los más representativos del tramo intermedio, y en cuanto al tramo superior destacan los afloramientos de Lepe (que se extiende por el NW hasta las proximidades de Villablanca) y El Rompído.

El tramo inferior (tramo de base) no aflora en el área estudiada, aunque está perfectamente representado al norte de la Depresión del Guadalquivir. El afloramiento más próximo, aunque muy reducido, se encuentra a unos 5 km al NE de Gibraleón, en torno al punto de coordenadas X=3º 14' 20'' e Y=37º 23' 50'' (hoja número 981 del MTN), a derecha e izquierda del arroyo del Puerco.

La potencia de la unidad es muy variable, de unos puntos a otros, y aumenta hacia el S y SE. Con los numerosos datos de subsuelo de que dispongo, estimo una potencia media del orden de 120 metros en el área estudiada.

La estratificación apenas es visible, por lo que cualquier dato sólo tendría validez local; en general, la dirección está próxima a la E-W y el buzamiento es de 5 a 10º hacia el SSE.

2.2.1.2.2. Litología

Aunque no aflora la base de la unidad, la serie ha podido ser reconstituída a partir de numerosos datos de sondeos mecánicos. VIGUIER (1974) estudia el corte Cartaya-El Rompído, a escala 1/50.000.

Su facies es detrítica, con cambios laterales y verticales frecuentes.

Según la litología, establezco tres tramos (figura 15) que, de muro a techo, son los siguientes:

- a) Tramo de base, con espesor medio de 8 metros pero muy variable de unos sectores a otros. Con los numerosos datos de los sondeos mecánicos que lo cortan, he trazado las curvas isopacas de la figura 16. En ella se observa el trazado irregular que sigue el límite norte de este tramo, y cómo su espesor aumenta hacia el SE, llegando a ser, probablemente, de 25 metros en la vertical de la Isla de Saltés.

Está constituído por una serie principalmente detrítica, a base de conglomerados y areniscas con cemento calizo, gravas, arenas y arenas margosas. Son frecuentes los cambios laterales de facies, pero en líneas generales puedo indicar que, entre Huelva y el río Piedras predominan arenas y gravas, con intercalaciones de areniscas y conglomerados, y desde el río Piedras hasta Ayamonte, arenas localmente arcillosas o margosas.

En el afloramiento del arroyo del Puerco (NE de Gibraleón), he podido reconocer los conglomerados y areniscas de este tramo, formados por cantos de caliza, cuarzo, fragmentos de pizarra y, ocasionalmente, gran cantidad de fósiles marinos (pectínidos, ostreidos, etc.), aglomerados por cemento calizo color blanco-amarillento a gris-amarillento, y frecuentemente cavernosos.

Este nivel representa los depósitos detríticos de la transgresión neógena sobre los terrenos del zócalo paleozoico o mesozoico, y corresponde, según VIGUIER (1974), a la arenisca cavernosa con Clypeaster altus, Ostrea longirostris y Pecten latissimus de los autores de final del siglo pasado (GONZALO y TARIN, 1887), a la "Bombezar formation" al este de Lora del Río (VERDENIUS, 1970), a la formación de Marmolejo de la región de Córdoba (TJALSMA, 1971), y, sin duda, a las "molasas" de la región de Huelva (GEA et al., 1965).

A nivel regional, la potencia del tramo aumenta de oeste hacia el este, alcanzando 20 metros en la región de Niebla y 40 metros al norte de Sevilla (IGME-FAO, 1974), y disminuye hacia el sur, siendo de tan sólo 3 metros en el sondeo "El Asperillo" (PERCONIG, 1960-62).

Los depósitos de este tramo han sido asignados a medio marino litoral, de tipo deltáico (VIGUIER, 1974), y son muy abundantes en fósiles.

- b) Tramo intermedio, que comprende arcillas y margas, ocasionalmente arenosas, de color gris azulado en corte fresco y beige-amarillento por meteorización, con intercalaciones de arenas y/o gravas de algunos centímetros hasta tres metros de espesor, y pequeñas capas de arenas arcillosas conchíferas y areniscas azules interestratificadas.

Presenta estratificación muy difusa o nula, y localmente se aprecia laminación paralela de color verde o negro y niveles más carbonatados con fractura astillosa a foliar-concoidea.

Con frecuencia, las arcillas y margas presentan pequeñas vetas de yeso en las grietas, y a veces impregnaciones de óxidos de hierro. El color beige-amarillento de alteración que presentan en afloramiento, se debe a la presencia de sales de hierro.

En general son materiales abundantes en fósiles, compactos, plásticos, y pasan a margas arenosas de un modo progresivo tanto en su parte superior como en la inferior.

Materiales más recientes hacen que sus afloramientos, en el área estudiada, sean relativamente escasos. No obstante, están ampliamente representadas en el subsuelo, y constituyen el material principal de relleno del sector occidental de la Depresión del Guadalquivir.

Los datos de que dispongo, me permiten estimar un espesor medio de 108 metros para este tramo, espesor que aumenta hacia el SE alcanzando, bajo

las marismas del Guadalquivir, unos 800 metros (VIGUIER, 1974).

Para todo lo referente al medio de depósito de estos materiales, y a su evolución paleogeográfica en función del contenido en minerales arcillosos, remito al lector al trabajo de VIGUIER (op. cit.).

Hacia la parte superior, las margas se hacen arenosas, encontrándose pequeñas indentaciones de arenas que preludian el tramo superior, ya francamente regresivo.

- c) Tramo superior, que comprende 7 metros de margas arenosas y arenas limosas de color amarillo, fosilíferas, con intercalaciones de arenas finas de espesor variable entre algunos decímetros y dos metros. Los fósiles presentes son, sobre todo, Pectínidos (Pecten, Chlamys, Amussium), y en ocasiones abundan en los niveles más limosos. Los microfósiles, al igual que en los dos tramos anteriores, son muy abundantes y están casi exclusivamente representados por foraminíferos planctónicos (Globigerínidos).

Este tramo, cuya potencia media ya he indicado anteriormente, presenta variaciones de espesor frecuentes, e incluso desaparece, en líneas generales, al este del río Piedras (figura 17; lámina 5), aunque hay algunos afloramientos al norte y sur de Cartaya y en El Rompído. Los materiales constituyen el equivalente lateral de los depósitos de arcilla azul del nivel terminal del Mioceno superior presentes hacia el este, principalmente bajo Huelva, por lo que se deduce que ambos depósitos son contemporáneos (VIGUIER, 1974).

El muro de este tramo es distinguible litológicamente, pero su techo ha sido establecido con criterios bioestratigráficos (VIGUIER, op. cit.). Por ello, en la cartografía geológica (plano 10), he trazado los contactos, entre los materiales de este tramo y los del Plioceno, suprayacentes, de forma aproximada, basándome en las conclusiones de este autor.

2.2.1.2.3. Edad

Puesto que los materiales de esta unidad contienen abundante fauna, principalmente microfósiles, su edad ha sido establecida por diferentes autores, aunque con ligeras variaciones de unos a otros, en lo que se refiere a incluir en el Mioceno o en el Plioceno el tramo de arcilla azul y el de arenas limosas suprayacentes. En todos hay unanimidad en cuanto a asignar edad Mioceno al tramo inferior.

VIGUIER (1974) establece un resumen cronológico de las opiniones de diferentes autores, desde GONZALO y TARIN (1887) hasta PEREZ-MATEOS y RIBA (1961), sobre la estratigrafía del Neógeno de la región de Huelva, y recoge también los resultados de las investigaciones llevadas a cabo en el área, y fuera de ella, por GEA et al. (1965), IGME-FAO (1974) y PERCONIG (1960-62, 73) en lo que se refiere, especialmente, a la edad de la transgresión marina terciaria en el borde meridional de la Meseta, y a la definición del piso Andaluciense.

VIGUIER adopta una escala cronoestratigráfica para el Neógeno atlántico, en correspondencia con los trabajos recientes sobre el Neógeno mediterráneo. Dicha escala está basada en la definición de zonas y subzonas bioestratigráficas mediante el estudio de foraminíferos planctónicos, principalmente Globigerínidos.

Este autor establece que, para el área estudiada, el Mioceno superior corresponde a la biozona de Globorotalia menardíi-subbiozona de Globorotalia miocénica s.l..

DE TORRES et al. (1975), en la memoria descriptiva de la hoja número 999-1016 (Huelva-Los Caños), del Mapa Geológico de España a escala 1/50.000, establecen edad Andaluciense para los tramos del Mioceno aflorantes en dicha hoja, de acuerdo con las ideas iniciales de PERCONIG (1966) para la definición del estratotipo Andaluciense.

De acuerdo con lo expuesto, pero principalmente con las conclusiones de VIGUIER (1974), los materiales de esta unidad pertenecen al Mioceno superior. Al tramo inferior (I) se le puede asignar edad Tortoniense inferior, e incluso medio, y a los tramos intermedio (II) y superior (III), edad Andaluciense.

Para el análisis detallado de la paleogeografía del área durante el Mioceno superior se puede consultar el trabajo de VIGUIER (op. cit.).

2.2.1.3. Plioceno

2.2.1.3.1. Distribución de afloramientos

Aunque en la figura 15 establezco dos tramos, dentro de esta unidad, los afloramientos, en el área estudiada, corresponden sólo al tramo superior, puesto que el inferior no aflora en superficie, o si lo hace, es indistinguible, por su litología, del tramo intermedio (II) del Mioceno superior, hecho que destaco en los cortes geológicos (planos 11, 12 y 13), marcando con una interrogación los contactos probables entre Mioceno superior y Plioceno, cuando dichos contactos tienen lugar dentro de la sedimentación contínua de arcilla azul que indica el tramo inferior (I), o dentro de la arena limosa del tramo superior (II). En líneas generales, lo primero ocurre hacia la parte suroriental del área estudiada, y lo segundo en el resto del área ocupada por materiales terciarios. El hecho ha sido estudiado principalmente por VIGUIER (1974), y a sus conclusiones me remito.

Los afloramientos de la unidad pliocénica están ampliamente representados en el área estudiada, habiendo quedado al descubierto por erosión del primitivo recubrimiento cuaternario, principalmente en la cuenca del río Piedras. Entre todos ellos, son de destacar los extensos afloramientos al sur de San Bartolomé de la Torre, nornoroeste de Cartaya, noroeste de Aljaraque y sur de Lepe-La Redondela.

En el mapa geológico (plano 10) pueden verse los afloramientos de la unidad; en él he trazado el contacto probable entre los tramos finales del Plioceno

y Mioceno superior, según las conclusiones de VIGUIER (1974).

La potencia de la unidad es variable de unos puntos del subsuelo a otros. Los numerosos datos de sondeos mecánicos de que dispongo, me permiten indicar que el tramo inferior (I) aumenta de espesor hacia el sur y al este y se extingue hacia el oeste, y que el tramo superior (II) aumenta su potencia de norte a sur y de este a oeste.

Para el conjunto de los materiales estimo una potencia media de 20 metros, de los que 3 metros corresponden al tramo inferior (arcilla azul) y 17 metros al tramo superior (arena limosa).

En general la estratificación no es visible, pero las medidas efectuadas indican dirección ENE-WSW y buzamiento menor de 10º, en dirección SSE.

2.2.1.3.2. Litología

La litofacies de esta unidad es esencialmente areno-limosa y margo-arenosa, con intercalaciones de gravas y arenas en número y espesor variables.

Según ella, he distinguido dos tramos (figura 15), que de muro a techo son:

- a) Tramo inferior (I), que comprende 3 metros de arcilla azul arenosa, de granulometría muy fina, localmente conchífera y con abundante microfauna de foraminíferos planctónicos.

Este tramo representa la continuación, durante el Plioceno inferior, del depósito de facies de arcillas azules del Mioceno superior, en el sector suroriental del área estudiada (aproximadamente desde el río Piedras hacia el este, y desde la línea Cartaya-Huelva hacia el sur). Es, por tanto, el equivalente lateral (contemporáneo) de las arenas limosas depositadas, durante este mismo período (Plioceno), en el sector occidental (aproximadamente desde el río Piedras hacia el oeste).

El techo de este tramo se distingue por criterios litológicos, en cambio el muro sólo lo es por criterios bioestratigráficos y ha sido trazado, de forma aproximada, por VIGUIER (1974), en el corte El Rompído-Trigueros.

- b) Tramo superior (II), que comprende 17 metros de arenas limosas, color amarillo claro y localmente amarillo-rojizo o blanco-amarillento en los niveles superiores, más arenosos.

Son frecuentes intercalaciones de gravas y/o arenas amarillentas de granulometría variable, aunque predominando los tamaños de grano medio y fino. El número y espesor de estas intercalaciones varía mucho en el espacio, pero se suelen presentar hasta tres en la misma vertical, con espesores de hasta 2 metros.

Frecuentemente ha habido gran aporte de óxidos de hierro descendentes, que han rellenado grietas (principalmente diaclasas de dirección N 50º W), han fosilizado restos orgánicos y han mineralizado una o dos capas de algunos metros de espesor, en el techo del tramo. Este aporte de hierro es especialmente visible al norte de Lepe y en La Redondela, en donde las diaclasas mineralizadas llegan a alcanzar 20 centímetros de potencia.

En este tramo tan sólo ocasionalmente hay restos de fauna, en general moldes mal conservados. No obstante, tiene microfauna pliocena característica.

Localmente se observan alineaciones de concreciones, centimétricas, de caliza pura o de nódulos de arenisca con cemento calizo, que resaltan, por su color blanco, entre el color amarillento, característico del tramo (afloramiento en el kilómetro 2,200 de la carretera local Cartaya-El Rompído).

Este tramo representa el depósito de la fase regresiva final del Neógeno, en el área estudiada.

Para el análisis detallado de las series estratigráficas en este tramo, en la carretera Lepe-La Antilla y Cartaya-El Rompído, puede consultarse el

trabajo de VIGUIER (1974).

2.2.1.3.3. Edad

Lo dicho al tratar de la cronología para establecer la edad del Mioceno superior, por diferentes autores, en el apartado 2.2.1.2.3., es válido aquí, aunque con mayores discrepancias.

VIGUIER (1974) recoge los puntos de vista de diferentes autores y establece que, para el área estudiada, los materiales de esta unidad se engloban en la biozona de Globorotalia margaritae, que determina el Plioceno inferior, y asigna, por comparación con las biozonas del Neógeno mediterráneo, edad Tabianiense al tramo inferior (I), y Plaisanciense inferior al tramo superior (II).

Me inclino por estas conclusiones, y para el análisis detallado de la paleogeografía de esta unidad, remito al lector al trabajo de este autor.

2.2.2. Cuaternario

2.2.2.1. Antecedentes

Los materiales cuaternarios, ampliamente representados en afloramiento, han sido objeto de estudio, más o menos detallado, por diferentes autores. Todos ellos coinciden en la descripción de sus características litológicas, en su génesis y en su división en diferentes tramos, pero discrepan bastante en lo que se refiere a la asignación de edad al tramo más antiguo, constituído por una facies roja muy característica.

GONZALO y TARIN (1887) atribuye estos materiales a la "Serie Cuaternaria", y distingue entre un sistema Diluvial, de edad post-Plioceno, en el que incluye conglomerados rojos, y un sistema Aluvial, suprayacente al anterior, en el que encuadra depósitos de marisma, playa y aluviones de ríos.

PRIETO (1944), en su estudio hidrográfico en el sector sureste de la provincia de Huelva, describe minuciosamente unos materiales formados por conglomerados con cantos de gran tamaño y cemento arcilloso rojizo, areniscas y arcillas rojas, con lechos de gravas y arenas. Indica que el conjunto es horizontal y tiene color abigarrado (rojizo y blanco-amarillento), y le atribuye edad Pleistoceno.

Sin duda, y por las características de la descripción de este autor, se trata del tramo I, al que designo como "facies roja".

PEREZ-MATEOS y RIBA (1961) estudian los sedimentos cuaternarios de Huelva y hacen hincapié en que las capas rojas con cantos rodados, del Diluvial, reposan sobre el Plioceno superior en la serie estratigráfica, y dan relieves topográficos más elevados que las terrazas fluviomarinas cuaternarias. Atribuyen estas capas rojas al Villafranquiense.

GEA et al. (1965) estudian los depósitos de la unidad cuaternaria presentes en el área, y hacen una descripción exahustiva de su litofacies. En la facies roja distinguen dos unidades litológicas, una con arenas y areniscas y otra, suprayacente, con gravas, y la incluyen en el Pliocuaternario. A las marismas y depósitos aluviales les asignan edad Cuaternario actual, pero, curiosamente, ignoran los depósitos de playa y eólicos.

SUAREZ-BORES (1970) habla de una unidad Pliopleistocena, y atribuye al Pleistoceno la serie silícea de aspecto abigarrado, mezcla de colores rojos, amarillos y blancos, e indica que se formó en ambiente nerítico, y que la denudación, que actualmente se observa en los valles, se debe a los descensos del nivel de base, ocurridos durante los períodos glaciares pleistocénicos. Asigna a esta serie un espesor de 15 metros en los cabezos de Huelva, e indica que, en términos generales, éste aumenta de norte a sur. Distingue, posteriormente, materiales holocenos, en los que incluye depósitos de marisma y playa, y hace una excelente descripción de la génesis y evolución de las flechas litorales presentes a lo largo de la costa onubense.

FONTBOTE-IGME (1972), en la memoria de la hoja número 80-81 (Ayamonte-Huelva) del Mapa Geológico de España a escala 1/200.000, utilizan, por primera vez, el término "glacis" para indicar los depósitos continentales, de color predominente rojo-naranja, que recubren, en gran parte, toda la región de Huelva. Los incluyen en el Plioceno continental y les atribuyen edad Plio-Villanfranquiense, probable. En el Cuaternario incluyen los sedimentos de playa, dunas, marismas y terrazas.

El IGME-FAO (1974) hace una descripción de los materiales cuaternarios, muy similar a la que anteriormente he citado, y establece la correspondencia del Cuaternario de la Depresión del Guadalquivir con el del río Sebou, en Marruecos, dada la simetría geográfica y geológica de ambas cuencas.

VIGUIER (1974) realiza el estudio estratigráfico-sedimentológico más completo que existe, hasta la actualidad, sobre los materiales de facies roja de la unidad cuaternaria. A sus conclusiones me remito, y muy especialmente a su asignación al Cuaternario antiguo (Villafranquiense).

DE TORRES et al. (1975), en la memoria descriptiva de la hoja número 999-1016 (Huelva-Los Caños) del Mapa Geológico Nacional a escala 1/50.000, estudian el Cuaternario en el cuadrante sureste del área. Distinguen materiales rojos (glacis), a los que asignan edad Pleistoceno inferior, y depósitos de terrazas, playas, eólicos, dunas y ríos, para los que indican edad Pleistoceno medio-superior, en el caso de las terrazas fluviales y fluvio-marinas, y Holoceno para el resto.

Muchos de los aspectos que expongo a continuación están basados, principalmente, en las conclusiones de VIGUIER (1974) sobre el "conglomerado rojo", y en las de DE TORRES et al. (1975) para el resto de los materiales de esta unidad, así como en observaciones propias en cuanto a la distribución de los afloramientos, división en tramos y litofacies de los mismos.

2.2.2.2. Litología

La unidad cuaternaria, de origen continental, está integrada por materiales detríticos, prácticamente horizontales, dispuestos en discordancia sobre los materiales infrayacentes. Su litofacies es muy variada en lo que se refiere al tamaño de grano, color y espesor.

Estos materiales ocupan una extensión superficial apreciable y son bastante potentes, en su conjunto, aunque el espesor varíe mucho de unos puntos a otros y para algún tramo sea pequeño.

En base a observaciones sobre afloramientos, y en datos de sondeos mecánicos, estimo un espesor medio de unos 36 metros para esta unidad, en el área estudiada.

En general, los materiales se distinguen en afloramiento por su carácter fuertemente detrítico, por su horizontalidad y por la presencia, en el tramo basal, de depósitos muy heterométricos que, en determinados niveles, poseen estructuras sedimentarias de ordenamiento interno, tipo estratificación cruzada en surco, y estructuras erosivas fosilizadas (paleocanales).

desde el punto de vista litológico, he distinguido tres tramos, que de muro a techo son:

- a) Tramo inferior (1): facies roja, glacis.

Se trata de depósitos continentales, constituídos por materiales detríticos de granulometría muy variada que abarca desde algunos cantos de hasta 20 centímetros de longitud a arenas finas y arcillas. No obstante, los análisis efectuados (FONTBOTE-IGME, 1972) dan una media del 70 por 100 de los granos comprendidos entre 0,3 y 0,9 milímetros. En general, el tamaño de los cantos decrece de norte a sur (VIGUIER, 1974).

Sus características sedimentarias son diversas: gravas de matriz arenosa

que alternan con arenas, areniscas rojas poco cementadas y conglomerados rojos, en general cuarcíticos, de matriz arenosa; arenas finas muy arcillosas, de color rojo intenso; gravas sueltas y mezcladas con nódulos ferroso-manganesíferos; arenas muy duras cementadas por óxidos de hierro y con escasas gravas, que forman costras ferruginosas entre 0,5 y 1 metro de espesor. Como norma general, hacia el sur disminuye el contenido en óxidos de hierro en los materiales de este tramo.

Dada la heterogeneidad de estos sedimentos, no es posible dar una columna tipo para el tramo.

El estudio sedimentológico y petrológico, muy completo, relativo a estos depósitos, ha sido realizado por VIGUIER (1974) y PASTOR et al. (1976), y a ellos me remito.

El conjunto tiene color predominante rojo, aunque con frecuencia presenta aspecto abigarrado (mezcla de rojo, amarillo y blanco).

Su potencia es muy variable, pero disminuye de norte a sur; VIGUIER (1974) indica valores mínimos de 80 metros en el corte del macizo de Cebollar (8 km al SSE de San Bartolomé de la Torre), y de 17 metros en el corte de la Isla de la Liebre (a unos 4 km al SSE de Aljaraque). De acuerdo con mis observaciones de campo, y datos de sondeos, estimo, para este tramo, una potencia media mínima de 14 metros en el área estudiada.

Presenta, en muchos afloramientos, estructuras sedimentarias primarias, tipo estratificación cruzada en surco, a veces bimodal y acuñada, paleocanales y, en ocasiones, orientación de los cantos.

Se encuentra muy rubefactado y con fuerte coraza ferruginosa en su parte superior, la cual puede desaparecer por meteorización; la superficie se presenta, entonces, bajo la forma de acumulación de cantos cuarcíticos totalmente sueltos.

Según VIGUIER (1974) su origen debe ser atribuído a glacis de depósito de mantos aluviales típicos, bajo la acción de cursos de agua divagantes, sobre grandes superficies, más bien que a coladas, más o menos densas, del tipo "sheet-floods". Sitúa Sierra Morena como área madre de los materiales que constituyen estos sedimentos, fijando, por tanto, el norte como principal dirección de llegada de los aportes detríticos.

El tramo es prácticamente horizontal, pues en su conjunto el glacis de depósito presenta pendiente menor de 5º hacia el sur.

- b) Tramo intermedio (II): depósitos aluviales, terrazas, eólicos y de playa.

Comprende materiales con características litológicas similares, aunque correspondientes a procesos genéticos distintos.

Los sedimentos de aluvial se reducen a débiles depósitos, en las márgenes de algunos ríos y arroyos. Están formados por arenas y limos, procedentes de los materiales terciarios y cuaternarios, junto con algunos cantos de pizarras y grauvacas carboníferas. Su espesor es pequeño; por término medio 0,5 metros.

Las terrazas son depósitos ligados al encajamiento progresivo de la red fluvial, que sucesivamente ha dado lugar a niveles situados a cotas distintas. DE TORRES et al. (1975) han estudiado con detalle estas terrazas, por lo que a ellos me remito. En general se trata de depósitos constituídos por alternancias de gravas y arenas, con cemento arcilloso color rojizo. El conjunto suele estar muy rubefactado. Su potencia es variable, pero no suele superar 4 metros.

Los depósitos eólicos se disponen, también, discordantes sobre materiales anteriores. Están constituídos por arenas blancas cuya potencia es muy variable (20 centímetros a 2 metros). Constituyen un cordón litoral, que se presenta como un auténtico manto eólico, toda vez que, aunque conserva en muy escasos puntos cierta morfología dunar, su degradación es prácticamen-

te total, y en algunos sectores se encuentra mezclado con gravas, igualmente provenientes de la degradación de los materiales rojos del tramo inferior.

Las playas son depósitos costeros arenosos, de color blanco, resultantes, principalmente, de la removilización de los sedimentos pliocénicos que en algunos lugares (El Rompído) forman acantilados sobre el mar. Su potencia no supera, en general, 2 metros y suelen contener cantidades importantes de ilmenita.

Todos los materiales del tramo intermedio son sensiblemente horizontales, y se disponen suprayacentes y discordantes sobre las unidades anteriores. Aunque su potencia es variable, de unos puntos a otros, estimo un espesor medio mínimo de 9 metros, para este tramo, en el área estudiada.

- c) Tramo superior (III): depósitos de marisma.

Estos sedimentos ocupan gran extensión, y están formados por depósitos limo-arcillosos, de color oscuro, con abundante materia orgánica, principalmente vegetal, e intercalaciones de gravas y arenas en número y espesor variables (8 a 20 centímetros, medidos en afloramiento, en el estero de La Nao, situado a unos 300 metros al NW del Parador Nacional de Ayamonte; 3 a 24 metros en los sondeos del canal del Burro, entre la isla de Bacuta y la de Saltés, al sur de Huelva). Es frecuente la presencia de conchas de organismos marinos en estas intercalaciones. Niveles similares a éstos, han sido interpretados como capas de aluviones fluvio-marinos, bajo las marismas del Guadalquivir, depositados en períodos de gran pluviometría, durante el Cuaternario antiguo y medio (FONTBOTE-IGME, 1972).

La presencia de sales, principalmente cloruro sódico, en estos depósitos es frecuente, ya que en su mayor parte están sometidos a los efectos periódicos de las mareas, que provocan su invasión por agua salada procedente del Océano Atlántico.

La morfología de la red de drenaje es muy característica en las marismas y constituye, junto a su horizontalidad, un carácter distintivo: los cursos de agua, generalmente estancada, se dividen y subdividen en pequeños canales de curso extraordinariamente tortuoso y largo, consecuencia de su pendiente, prácticamente nula.

La génesis de los depósitos (fangos) que forman este tramo se debe a que, en general, los ríos en la cercanía de la costa, por su escasa pendiente, no transportan más que materia en suspensión, la cual flocula y precipita por la acción de las aguas marinas.

El espesor de este tramo es muy variable de unos puntos a otros (hasta 38 metros en los sondeos de la isla de Bacuta), pero con los datos disponibles estimo una potencia media mínima de 13 metros, en el área estudiada.

2.2.2.3. Distribución de afloramientos

La unidad está extensamente representada entre los materiales que afloran en el área estudiada (plano 10).

La mayor superficie corresponde a los depós os de color rojo del tramo inferior (I), entre los que destacan los afloramientos de Monte Ceboilar (al sur de San Bartolomé de la Torre), Aljaraque-El Rompido, oeste de Lepe hasta Ayamonte, y el situado al noreste de Villablanca. Los afloramientos de este tramo son fáciles de distinguir en el terreno, porque originan amplias mesetas horizontales o subhorizontales (en general no sobrepasan los 10º de inclinación), ocupadas por bosques de pinos y eucaliptus, y cuyos contactos con los materiales infrayacentes se hacen siempre mediante un pequeño, pero abrupto, escarpe topográfico.

A continuación, en orden de importancia decreciente en cuanto a extensión de afloramientos, siguen los depósitos de marisma del tramo superior (III). Estos se localizan en la desembocadura de los grandes ríos, tales como el Odiel, Tinto, Guadiana y Piedras. Se distinguen fácilmente por su abso-

luta horizontalidad y por la morfología ramificada y tortuosa de su red de drenaje.

Aunque en la descripción litológica del tramo intermedio (II) he englobado, en el mismo, materiales de orígenes diversos, en la cartografía geológica he diferenciado dos niveles distintos: uno inferior, con depósitos aluviales y terrazas, y otro superior, que engloba los depósitos eólicos y de playa.

Los depósitos eólicos y de playa siguen a los anteriores en extensión superficial. Sus afloramientos constituyen un cordón litoral, que se extiende desde playa Canela, en Ayamonte, hasta la playa de la isla de Saltés, en Huelva, a lo largo de 66,5 kilómetros y 100 metros de anchura media (MOP, 1977).

Los depósitos aluviales y terrazas ocupan poca extensión, en el área estudiada, y se reducen a pequeños afloramientos en las márgenes de algunos ríos y arroyos, principalmente en la orilla derecha del río Odiel (terrazas de Corrales y Aljaraque), cuenca del río Piedras, y arroyo Pedreza (al norte de Ayamonte).

Los materiales de la unidad cuaternaria son discordantes sobre cualquier material más antiguo.

2.2.2.4. Edad

Ya he hecho (apartado 2.2.2.1.) una exposición cronológica de los prirci-pales datos que se poseen sobre la edad de los materiales de esta unidad, según autores antiguos y modernos.

De acuerdo con su posición en la serie estratigráfica está claro que son cuaternarios, pero remitiéndome, principalmente, a las conclusiones de VIGUIER (1974), FONTBOTE-IGME (1972), FEBREL et al. (1972), DE TORRES et al. (1975) y PASTOR et al. (1976), puedo asignar las siguientes edades:

- Pleistoceno inferior (Villafranquiense) para el tramo inferior (I) (glacis de depósito color rojo). VIGUIER (1974) especifica más y sitúa el último término de este tramo antes del Villafranquiense superior, en base a los estudios que realiza con THIBAULT (1972) sobre unos materiales recogidos al noreste de El Rompído y al oeste del camping de la carretera de Punta Umbría, y que contienen herramientas realizadas con cantos rodados que presentan tallas primitivas del tipo "Pebble-culture".

- Pleistoceno medio y superior-Holoceno para los depósitos de terrazas y aluvial, correspondientes al nivel inferior del tramo intermedio (II).

- Holoceno medio-superior para los depósitos eólicos y de playa, pertenecientes al nivel superior del tramo intermedio (II).

- Holoceno superior para los depósitos de marisma del tramo superior (III).

3. TECTONICA

3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Desde el punto de vista tectónico, el área estudiada se enmarca dentro de las siguientes unidades estructurales de la Península Ibérica (JULIVERT et al., 1972):

- Zona Surportuguesa, perteneciente al Herciniano del Macizo Ibérico.

- Orla Meridional o Algarvia, que forma parte de la Orla Atlántica Mesozoica del Macizo Ibérico.

- Cuenca del Guadalquivir, elemento estructural autónomo que, con características de antefosa, bordea la Cordillera Bética y la separa del Macizo Ibérico.

Los afloramientos neógenos y villafranquienses corresponden a la tercera

unidad estructural, y ocupan la mayor extensión; los materiales carboníferos pertenecen a la primera unidad estructural, y afloran ampliamente en la parte septentrional del área; finalmente, el reducido afloramiento Mesozoico de Ayamonte es el representante de la segunda unidad estructural.

Dentro de los límites del área estudiada distingo, claramente, dos dominios tectónicos, netamente diferentes, separados por la línea que marca el contacto entre el zócalo paleozoico y el resto de los materiales más modernos (plano 10):

- a) Dominio herciniano (al norte y noroeste), o de terrenos paleozoicos, afectados por las deformaciones hercinianas.

- b) Dominio de plataforma (el resto del área), equivalente a "áreas de plataforma" de JULIVERT et al. (1972), con una cobertera mesozoica y cenozoica poco deformada, que se apoya sobre materiales del dominio anterior (zócalo herciniano).

Por tanto, en el estudio tectónico del área, hay que tener en cuenta un factor primario de heterogeneidad estructural, que consiste en la presencia de un substrato paleozoico sobre el que, desde la orogenia hercínica, se han depositado materiales más modernos (mesozoicos y cenozoicos).

Ambos conjuntos, de características geomecánicas diferentes, han reaccionado de manera distinta a los esfuerzos tectónicos posteriores: el substrato rígido (zócalo) ha tendido a romperse, mientras que los materiales suprayacentes (cobertera), incompetentes, a deformarse.

Así, la tónica estructural de la mayor parte de la región responde al tipo de tectónica zócalo-cobertera.

De forma general, se puede decir que, aunque no se manifieste en geología de superficie, la complejidad tectónica se incrementa de norte a sur, sector, este último, en el que se hace patente el estilo zócalo-cobertera,

mediante el juego de numerosas fallas normales de origen hercínico, muchas de las cuales han sido "rejuvenecidas" en la orogenia alpina durante la formación de la Cordillera Bética. A ésto se debe el hundimiento progresivo del zócalo paleozoico, hacia el sur, y la sucesión de horst y graben, en dirección este-oeste, que pueden apreciarse en este sector occidental de la cuenca del Guadalquivir (planos 10 a 13 y figura 16).

Entre los factores que han contribuído a dar forma definitiva a la estructura del área estudiada, están el plegamiento herciniano, de edad astúrica (intra y finiwestfaliense), y la fracturación, tanto singenética a este plegamiento, como posterior (de edad alpina).

3.2. DOMINIO HERCINIANO

Está representado por afloramientos paleozoicos del Carbonífero inferior.

En el área investigada, el estilo tectónico de este dominio ha sido estudiado por algunos autores (GEA et al., 1965; HIDROIBERIA, 1966; FONTBOTE-IGME, 1972; ENADIMSA-IGME, 1972), y fuera de ella hay numerosos estudios al respecto en la faja pirítica hispano-portuguesa, entre los que destaco los de FEBREL (1965, 66 y 68) y FEBREL et al. (1972), por su mayor proximidad al área.

A continuación expongo las principales características estructurales de este dominio, basándome en citas de estos autores.

Para mayor detalle sobre el plegamiento y la fracturación, remito al lector a los diagramas estructurales de FEBREL (1966), STRAUSS (1970) y RAMBAUD (1969).

La estructura tectónica de este dominio se caracteriza, fundamentalmente por pliegues de dos generaciones distintas (FONTBOTE-IGME, 1972; ENADIMSA-IGME, 1972):

- Los de la primera generación, son ámplios pliegues asimétricos, de rumbo NW-SE a WNW-ESE, con vergencia sur; van acompañados de una apretada esquistosidad de plano axial; su escala es, generalmente, hectométrica o kilométrica, y, con frecuencia, son pliegues volcados y, en ocasiones, tumbados.

- Los pliegues de la segunda generación son muy atenuados, y presentan rumbos NE-SW y una esquistosidad de plano axial menos desarrollada.

Ambos sistemas de pliegues se cortan bajo un ángulo próximo a los 90º.

Un crucero de clivo-deslizamiento es netamente posterior, y riza a las pizarrosidades de los pliegues de las dos generaciones. Ha sido originado por movimientos posteriores, aunque simétricamente relacionados con los que originaron los pliegues mayores. En relación con estos movimientos posteros se encuentran, también, pares de planos de deslizamiento, que cortan y desplazan a la pizarrosidad de los pliegues de ambas generaciones. Posteriormente se formaron grandes fallas y fracturas con rumbo NNE-SSW y NNW-SSE.

La edad de la primera fase de deformación (plegamiento principal) es intrawestfaliense, mientras que la segunda fase de deformación es de edad finiwestfaliense (JULIVERT et al., 1972).

En los estudios geológicos previos a la construcción de la presa sobre el río Piedras (HIDROIBERIA, 1966), se detectó la existencia de un gran pliegue anticlinal asimétrico, cuyo eje se encuentra en las proximidades de la cerrada, aguas abajo de la presa. Su longitud mínima es de 1,5 kilómetros, y se encuentra tumbado hacia el sur, con un ángulo de vergencia próximo a 45º. En ambos flancos del pliegue, los estratos incompetentes (pizarras) forman pliegues de arrastre (drag-fold), mientras que los competentes (grauvacas) presentan una intensa red de diaclasas y fallas, aunque con desplazamiento poco marcado; existen, también, espejos de deslizamiento en el contacto de pizarras y grauvacas, y dentro de los estratos de pizarra.

Las diaclasas están distribuídas (diagrama de SHELDON; in HIDROIBERIA, op. cit.) según los ejes de compresión y de tracción del plegamiento hercínico (primera fase, de directriz NNW-SSE, y segunda fase, de directriz NNE-SSW).

Por el carácter, esencialmente hidrogeológico, de esta investigación, y la complicación estructural de este dominio, sólo represento, en la cartografía geológica, la posición espacial de la pizarrosidad principal. No obstante, quiero indicar que, de forma general, la intensidad de la misma, y del plegamiento, es mayor hacia el norte, y que, en este mismo sentido, aumenta la presencia de vetas de cuarzo, con estructuras sigmoidales, que ponen de manifiesto movimientos posteriores a los que originaron la estructura tectónica principal, y a los cuales van, generalmente, asociadas las fallas presentes en este dominio.

Los materiales de este dominio están afectados de un metamorfismo regional de bajo grado (JULIVERT et al., 1972), que determina la esquistosidad regional.

3.3. DOMINIO DE PLATAFORMA

Este estilo estructural equivale al de "áreas de plataforma" de JULIVERT et al. (1972), y ocupa la mayor parte del área estudiada.

Es un dominio con un tipo de tectónica zócalo-cobertera muy característica, en que la cobertera mesozoica y cenozoica, poco deformada, se apoya sobre el zócalo herciniano.

La tectónica del mismo es de directrices alpinas (béticas), pero localmente han sido "rejuvenecidas" directrices hercínicas del zócalo paleozoico, que, de esta forma, afectan a la cobertera. Se trata de una tectónica reciente (neotectónica), posterior al último episodio de corrimientos en la zona externa de la Cordillera Bética (VIGUIER, 1974).

En este cuadro, aparentemente simple, se enmarca este dominio, cuya tectónica es compleja puesto que la cobertera incluye materiales pertenecientes a dos unidades estructurales distintas: el Mesozoico, que atribuyo a la Orla Meridional o Algarvia de JULIVERT et al. (1972), y el Neógeno, que pertenece a la Cuenca del Guadalquivir.

La atribución de los materiales mesozoicos, presentes en el subsuelo del área y aflorantes en Ayamonte, a la unidad estructural de JULIVERT et al. (op. cit.), la fundamento en la interpretación de los datos de sondeos mecánicos que poseo (figura 16); en las conclusiones de PERCONIG (1960-62) sobre la existencia, en Andalucía Occidental, de una cuenca de sedimentación mesozoica (triásica y jurásica), abierta en forma de abanico hacia el Atlántico y conectada, evidentemente, con las unidades mesozoicas que afloran en el extremo meridional de Portugal, para las que su inclusión en la Orla Meridional o Algarvia está unánimemente aceptada; en la estructura tabular de los materiales y en las manifestaciones de vulcanismo básico intra-triásicas (JULIVERT et al., 1972).

Es evidente que aunque los materiales mesozoicos hayan actuado, junto a los neógenos, como cobertera, frente a los movimientos alpinos tardíos, responsables de la formación de la cuenca del Guadalquivir, también habrán sido afectados por acontecimientos anteriores de la tectogénesis alpina. No poseo datos, pues no es objetivo de este estudio, para el análisis tectónico de este aspecto, pero sí, probable, existencia de fallas subverticales que afectan al Mesozoico y no al recubrimiento Neógeno y Cuaternario, puestas de manifiesto en la interpretación de la estructura geológica del subsuelo (plano 11, corte III-III'), junto a la ámplia laguna estratigráfica presente (Lías?-Mioceno superior), me permiten afirmar la reactivación de fracturas del zócalo herciniano y/o la formación de otras nuevas, por fases de la tectogénesis alpina posteriores al liásico y anteriores a las tardi-tectónicas que originaron el extremo occidental de la cuenca del Guadalquivir.

La tectónica zócalo-cobertera de este dominio ha sido estudiada por dife-

rentes autores.

Entre los trabajos que abordan este aspecto, y que han sido realizados en el área, he de reseñar los de GEA et al. (1965), FONTBOTE-IGME (1972), ENADIMSA-IGME (1972), FEBREL et al. (1972), IGME-FAO (1974), VIGUIER (1974), DE TORRES et al. (1975) y MOP (1977).

Fuera de los límites del área hay numerosos estudios, en diferentes sectores de la Cuenca del Guadalquivir, que tratan este problema. Entre todos ellos destaco los de PERCONIG (1960-62), CHAUVE et al. (1964), CHAUVE (1968), DRAIN et al. (1971), JULIVERT et al. (1972), BOURGEOIS et al. (1972), IGME-FAO (1974) y VIGUIER (1974).

Para el análisis detallado de la evolución tectónica en el sector occidental de la Cuenca del Guadalquivir, remito al lector, principalmente, al trabajo de VIGUIER (1974).

A continuación, sólo voy a destacar los rasgos más sobresalientes de la misma, basándome en las principales conclusiones de este autor, y en mis propias observaciones.

La tectónica zócalo-cobertera, en el dominio que me ocupa, abarca sólo el pequeño sector occidental de la ámplia cuenca del Guadalquivir, elemento estructural autónomo de origen alpino, que si bien queda fuera del dominio estricto de la Cordillera Bética, tiene características, y una historia geológica, íntimamente relacionadas con las de esta cordillera, de la cual constituye la antefosa que la separa del Macizo Ibérico (JULIVERT et al., 1972).

La evolución estructural reciente de este dominio no se puede considerar como un hecho aislado sino, más bien, hay que encajarla en unos acontecimientos mayores, que no son sincrónicos sino que se encadenan en el espacio y en el tiempo.

Estos acontecimientos son (VIGUIER, 1974):

- Las deformaciones del zócalo debidas a la subsidencia acaecida en el Mioceno superior y la colocación del olitostroma de Carmona.

- Las estructuras plegadas de la Zona Subbética.

- El borde fallado de Sierra Morena.

- Las estructuras anticlinales particulares de la Bahía de Cádiz, con centros margo-yesíferos, en las cuales el Cuaternario antiguo parece implicado.

De ellos, sólo el primero y el tercero han jugado en la configuración estructural que presenta este dominio, por lo que voy a analizarlos brevemente.

- a) Deformaciones del zócalo durante la subsidencia.

Antes de la transgresión marina hacia el norte, al comienzo del Mioceno superior (límite Helvetiense-Tortoniense), el zócalo paleozoico y la cobertera mesozoica afloraban en el emplazamiento actual del sector occidental de la cuenca del Guadalquivir. La subsidencia se produce en el Mioceno superior, como consecuencia de una flexura continental, que se forma en el borde de Sierra Morena. Esto da lugar a una transgresión marina hacia el norte, sobre materiales emergidos desde el Jurásico, que alcanza unos 50 kilómetros (VIGUIER, 1974). En el área estudiada, el límite norte de esta transgresión coincide, aproximadamente, con la línea de contacto entre los materiales de la serie neógena y paleozoica. La subsidencia es debida a un movimiento epirogénico negativo, de poca amplitud y gran radio de curvatura (VIGUIER, op. cit.).

Poco después la flexura se acentúa, y el zócalo submarino sufre un gran hundimiento al sur de la misma. PERCONIG (1960-62) ha determinado pen-

dientes máximas de 8º hacia el sur, en el techo del zócalo paleozoico, al norte del sondeo "El Asperillo". Durante el Mioceno superior, el zócalo adquiere una pendiente cada vez más fuerte hacia el sur, por medio de flexuras secundarias.

Los efectos de estas deformaciones del zócalo se ponen de manifiesto, en el ámbito del dominio considerado, en que el límite Mioceno superior-Plioceno, monoclinal hacia el sur con pequeña pendiente, no es paralelo a la base del Mioceno superior, de pendiente mayor (plano 11, corte V-V').

La estructura del zócalo data, pues, del Mioceno final y determina la existencia de una fase de distensión que hunde el borde meridional de Sierra Morena.

El final de la subsidencia del zócalo coincide, en líneas generales, con el límite Mioceno superior-Plioceno, aunque con pequeñas diferencias dentro del dominio. Así, en el sector surorientai del mismo (área comprendida, aproximadamente, dentro del perímetro El Rompído-Cartaya-Aljaraque-Corrales-Huelva) la subsidencia se detiene entrado ya el Plioceno inferior, por lo que el tránsito Mioceno superior-Plioceno se hace en el seno de las arcillas azules; en cambio, en el resto del dominio el término de la subsidencia tiene lugar poco antes de finalizar el Mioceno superior, con lo que el tránsito de uno a otro piso se hace en el seno de las arenas limosas. Lo primero explicaría la presencia del tramo inferior (I) en la serie pliocena, y lo segundo la del tramo superior (III) en la serie del Mioceno superior (figura 15).

- b) Borde fallado de Sierra Morena.

Al norte de las marismas del Guadalquivir, la serie neógena está fracturada en las proximidades de Sierra Morena.

Este hecho ha sido puesto de manifiesto, en el área estudiada, por GEA et al. (1965), mediante campañas de geofísica sísmica y eléctrica que mostraron la

existencia de gran número de fallas y fracturas, que dividen el substrato y el Neógeno en un verdadero mosaico. Esta red de fracturas y fallas que, en general, no son visibles en superficie, al estar fosilizadas por sedimentos cuaternarios, son las que he reflejado, con algunas modificaciones, en el plano 10.

Estas fallas y fracturas fueron, también, puestas de manifiesto, y estudiadas, por RAMBAUD (1978), especialmente la alineación estructural N 70-80º E, que representa la polémica "falla del Guadalquivir", como ya indiqué en el epígrafe 1 del capítulo de antecedentes.

A la escala de trabajo (1/50.000) se pueden distinguir, en este dominio, dos familias principales de fallas y fracturas:

- Una familia N-S, o de componente principal en esta dirección, entre la que destacan las fallas del río Odiel y Aljaraque, y las fracturas de los ríos Tinto, Piedras y desembocadura del Guadiana. Estas alineaciones estructurales datan del límite Plio-Villafranquiense (VIGUIER, 1974), y se deben a "rejuvenecimiento", por movimientos alpinos tardi-tectónicos, de accidentes del zócalo herciniano (OVTRACHT y TAMAIN, 1970).

- Una familia de fallas y fracturas transversas, de dirección ENE-WSW, entre las que destacan las fallas de Lepe, La Redondela y Ayamonte, con juegos normales en sentido sur, y la fractura de El Rompído-Isla Cristina. Según VIGUIER (1974), son de edad alpina, aunque parecen coincidir con accidentes del zócalo de Sierra Morena, y representan una estructura compuesta por varios elementos sintéticos, que constituyen la terminación, hacia el oeste, de la falla-flexura del borde de Sierra Morena (la polémica "falla del Guadalquivir"), que se presenta como una flexura al este de la falla del Bajo Guadalquivir próximo al meridiano de Sevilla, y pasa a falla hacia el oeste (VIGUIER, op. cit.).

En conjunto, ambas familias de alineaciones estructurales, por su juego normal, dividen este dominio en una serie de compartimentos o escalones en el

sentido N-S, y en el sentido E-W en una sucesión de horst y graben. Este juego, complejo, origina una fenomenología de subsidencia contínua, principalmente puesta de manifiesto en el cuadrante suroriental del área (bloque de Huelva, elevado respecto a los demás), que inclina hacia el sur (hasta 15º) los depósitos neógenos, y configura la forma típica de la costa de esta región.

Para finalizar, puedo indicar que la tectónica zócalo-cobertera de este dominio se encuadra dentro de la historia estructural del sector occidental de la cuenca del Guadalquivir y que, por tanto, se desarrolla durante la fase de distensión de la tectogénesis Bética, desde la base del Mioceno superior (Tortoniense inferior) hasta el límite Plio-Villafranquiense. Esta fase está controlada por movimientos verticales, y se sitúa entre el hundimiento del zócalo (Mioceno superior), que origina la depresión del Guadalquivir, y su reacción, que termina con la elevación del extremo norte (Sierra Morena, cuya orogénesis tuvo lugar en el Villafranquiense) y sur (Zona interna de la Cordillera Bética, cuya orogénesis comienza en el Mioceno final y termina en el Villafranquiense) de dicha depresión (VIGUIER, 1974).

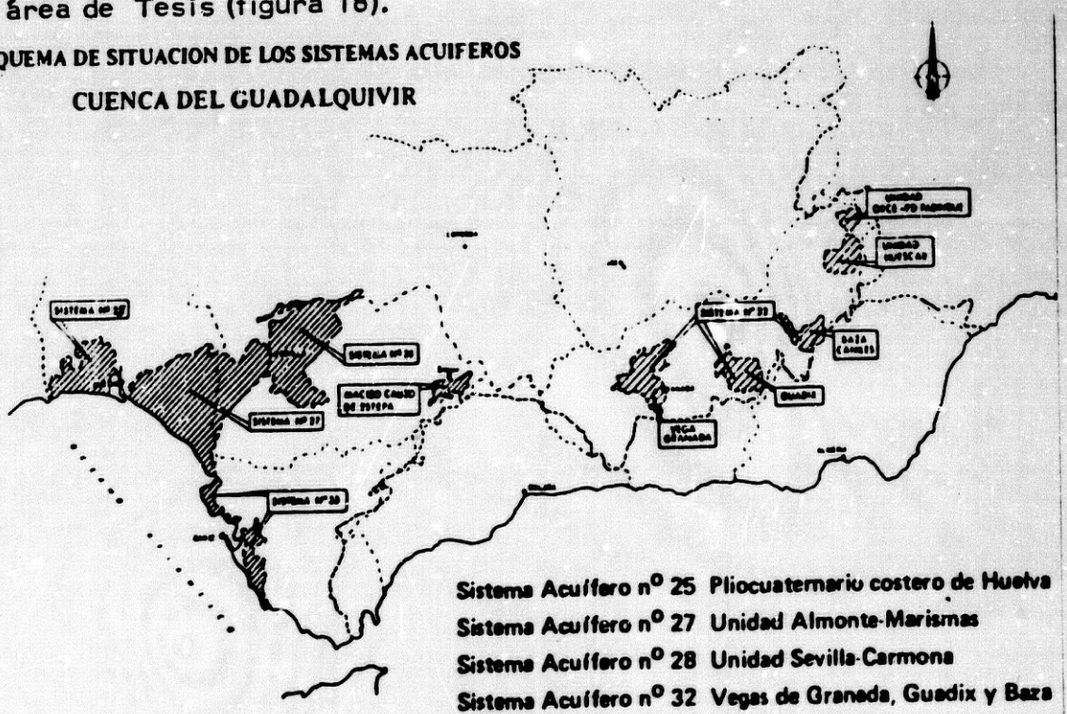
Esta tectónica encaja perfectamente en la fase tarditectónica de reajuste por megaondulación del Mediterráneo occidental (GLANGEAUD, 1968).

HIDROGEOLOGIA

1. CONSIDERACIONES GENERALES

El estudio sobre las aguas subterráneas del país, realizado en 1970 por iniciativa del IGME, dentro del marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), tuvo como eje central la investigación y evaluación de los recursos subterráneos, lo que indujo a este organismo a la publicación, en 1971, del Mapa Hidrogeológico Nacional, como contribución al Decenio Hidrológico Internacional. Este mapa representa la síntesis de los sistemas acuíferos en España, y en él se denomina "sistema acuífero número 25" al complejo hidrogeológico que se extiende entre Huelva y Ayamonte, el cual comprende el área de Tesis (figura 18).

ESQUEMA DE SITUACION DE LOS SISTEMAS ACUIFEROS
CUENCA DEL GUADALQUIVIR



Sistema Acuífero nº 25 Pliocuaternario costero de Huelva
Sistema Acuífero nº 27 Unidad Almonte-Marismas
Sistema Acuífero nº 28 Unidad Sevilla-Carmona
Sistema Acuífero nº 32 Vegas de Granada, Guadix y Baza
Sistema Acuífero nº 33 Sistemas Costeros
Macizo Calizo de Estepa
Unidades Hidrogeológicas de la Sierra de Orce y de Huéscar-Puebla de Don Fadrique
(Según I.G.M.E., 1980)

Figura 18

El sistema acuífero número 25 está limitado:

- al norte, por el contacto con el zócalo paleozoico, que sigue aproximadamente una línea que pasa por Villablanca, San Bartolomé de la Torre y Gibraleón,

- al sur, por el Océano Atlántico,

- al este, por el río Odiel, y

- al oeste, por el río Guadiana, que forma frontera con Portugal.

Bajo la óptica del PIAS, se define el "sistema acuífero" como "un dominio espacial, limitado en superficie y en profundidad, en el que existen uno o varios mantos acuíferos relacionados, o no, entre sí, pero constituyendo una unidad práctica para la investigación o explotación; los límites superficiales pueden, o no, coincidir con la traza sobre la superficie de los límites subterráneos de la unidad así definida" (GALVEZ-CAÑERO y COMA, 1971).

La denominación "sistema acuífero número 25" se refiere, exclusivamente, al "manto freático Pliocuaternario de la región de Huelva", con lo que se ignora la existencia de acuíferos profundos en esta región.

Por ello, considero necesario describir, detalladamente, las diferentes formaciones hidrogeológicas existentes en el área investigada, antes de pasar al estudio sistemático de cada uno de los acuíferos.

La descripción llevada a cabo, en el capítulo de Geología, sobre el marco litoestratigráfico y estructural, me permite definir las diferentes formaciones hidrogeológicas del área estudiada.

Las formaciones hidrogeológicas (cuadro 43) y sus características, son las siguientes:

UNIDADES CRONOESTRATIGRAFICAS		FORMACIONES HIDROGEOLOGICAS: LITOESTRATIGRAFIA	PERMEABILIDAD	SISTEMA ACUIFERO
CUATERNARIO	Q_4	Limo, cantos, arena, grava y arcilla	semipermeable	SUPERFICIAL (M_3-Pl-Q) (acuifero semiconfinado, con caracteristicas de multicapa)
	Q_3	Arena	muy permeable	
	Q_2	Grava, cantos, arena, limo y arcilla	permeable	
	Q_1	Conglomerado, arenisca, grava, arena y arcilla	semipermeable	
NEOGENO	Pl-M_3	Marga arenosa y arena limosa con intercalaciones de grava y arena	niveles permeables y semipermeables	
	Pl-M_2	Arcilla y marga azul compacta	impermeable	IMPERMEABLE
	M_1	Conglomerado, arenisca, grava, arena y marga arenosa	permeable	PROFUNDO (M_1-J) (acuifero confinado)
JURASICO	J	Caliza y caliza dolomítica fisurada (microfisuras). Grado de karstificación escaso o nulo. Niveles de marga con yeso	permeable por fisuras	
TRIASICO	T	Arena, arcilla, marga con yeso. Intercalaciones de roca volcánica	impermeable	IMPERMEABLE
CARBONIFERO	H	Pizarra y grauvaca	impermeable	

Cuadro 43.- Formaciones litoestratigráficas e hidrogeológicas presentes en la región suroccidental de la provincia de Huelva

- a) Carbonífero: H. Acuitardo.

Constituído por pizarras, grauvacas y cuarcitas, de edad Viseense, de muy baja permeabilidad, lo que origina gran escorrentía superficial.

Aunque puedan producirse infiltraciones profundas, a favor de diaclasas y fallas, como se observa en las labores mineras situadas al norte del área, en afloramiento la roca presenta diaclasas cerradas. Localmente, la escasa agua subterránea que contiene está controlada por las fracturas, o se localiza en la franja de meteorización superficial.

A escala regional, esta unidad puede ser considerada como un zócalo "impermeable" [1] y constituye, así, el nivel "impermeable" de base de todos los acuíferos.

- b) Triásico: T. Acuicludo.

Constituído por arcillas y margas rojas con yeso. Localmente existen intercalaciones de rocas volcánicas y dolomías brechoides muy recristalizadas. Areniscas rojas se presentan en la base de estos materiales.

A gran escala, la unidad presenta comportamiento impermeable, aunque puntualmente sea algo permeable por cavernas o fisuras, sobre todo en los niveles en donde existen intercalaciones de dolomías brechoides.

Generalmente la unidad constituye también el muro impermeable del acuífero confinado.

- c) Jurásico: J. Acuífero.

Constituído por calizas y calizas dolomíticas compactas, con alto grado de recristalización; hacia muro adquieren carácter brechoide, con cantos calizos y matriz arci'loso-carbonatada. Su potencia media es de unos 135 metros. En cinjunto los materiales se presentan muy fisurados (microfisuras) y sin karstificación apreciable. En el afloramiento es frecuente la presencia de arcilla roja y/o calcita, como material de relleno de pequeñas cavidades de disolución y de fisuras.

Esta unidad, junto con la de base (tramo 1) del Mioceno superior, se comporta como acuífero confinado; su permeabilidad es por fisuración (microfi-

[1] El concepto "impermeable" en estos materiales es cada día más dudoso, con la rotopercusión y los sondeos horizontales (comunicación personal de FERNANDEZ-RUBIO)

suras). Se encuentra limitada a muro por materiales impermeables del Triásico, y a techo por materiales permeables de la base del Mioceno superior.

Hacia el sureste del área estudiada, hay peligro de afección a la calidad del agua por la presencia de yesos, que acompañan a niveles de margas interestratificadas con las calizas y dolomías.

- d) Mioceno superior: M_1. Acuífero.

Se trata de una facies detrítica basal de edad Tortoniense, constituída por areniscas calizas, conglomerados, gravas, arenas de color amarillento o gris azulado, y margas muy arenosas, fosilíferas. Su potencia media es de unos 10 metros, y son frecuentes los cambios laterales hacia facies más arcillosas, por acuñamiento estratigráfico de la unidad en los límites de la transgresión marina.

El comportamiento de estos materiales, junto con los del Jurásico subyacente, es como acuífero confinado.

Está limitada a muro por materiales impermeables del Triásico y por materiales permeables del Jurásico, y a techo por la unidad impermeable de arcillas y margas azules del Neógeno. No obstante el claro confinamiento general de esta unidad, de forma local se comporta como acuífero libre en aquéllos sectores en los que se encuentra limitada a techo por materiales permeables del sistema acuífero superficial (Mioceno-Plioceno-Cuaternario), sectores en los que esta unidad entra en contacto directo con la suprayacente.

La permeabilidad por porosidad primaria es elevada, lo que permite la obtención de caudales puntuales que llegan a superar los 50 l/s.

- e) Mioceno superior-Plioceno inferior: M_2-Pl. Acuicludo.

Comprende materiales de edad Andaluciense-Tabianiense, formados por ar-

cillas y margas azules con algunas intercalaciones poco potentes de arenas arcillosas conchíferas. La fracción arena aumenta hacia el techo, presentándose el Tabianiense bajo la forma de arcilla azul arenosa.

Aunque localmente las pequeñas intercalaciones de arenas arcillosas pueden comportarse como acuíferos confinados, la potencia de estos materiales (supera los 150 metros de espesor medio) determina, de forma global, un comportamiento impermeable muy acusado.

Representa, salvo excepciones, el límite impermeable de base del sistema acuífero superficial, y el techo impermeable del acuífero confinado.

Dada la presencia de cristales de yeso, diseminados en los materiales de esta unidad, principalmente en el interior de fracturas, las aguas de la misma pueden ser selenitosas y pueden afectar a las de los acuíferos próximos si las obras de captación no están bien proyectadas.

- f) Mioceno superior-Plioceno inferior: M_3-Pl. Acuífero.

Constituído por materiales de edad Andaluciense-Plaisanciense inferior, a base de margas arenosas y arenas limosas, con intercalaciones de gravas y arenas de granulometría y espesor muy variables. Su potencia media es de unos 24 metros, aunque puntualmente puede superar los 60 metros.

Se trata de un acuífero semiconfinado complejo, con características propias, que permiten identificarlo como acuífero multicapa, dada la combinación de formaciones hidrogeológicas permeables (gravas y arenas), intercaladas entre formaciones semipermeables (margas arenosas y arenas limosas). Es, por tanto, un sistema hidrogeológico en el que cada acuífero no puede ser considerado de manera independiente (CASTANY, 1982).

En la parte norte del área estudiada el substrato impermeable comprende pizarras y grauvacas paleozoicas, y hacia el sur arcillas y margas azules del Andaluciense-Tabianiense, e incluso arcillas triásicas en las cercanías

de Ayamonte. En sectores donde no existen arcillas y margas azules, los materiales de este acuífero se superponen directamente sobre los de la base (tramo 1) del Mioceno superior, pertenecientes al acuífero confinado, y con ello se puede establecer una comunicación hidráulica entre ambos acuíferos.

En las áreas donde no aflora, el techo de esta unidad está representado por materiales permeables del Cuaternario. La estrecha conexión hisráulica entre los sedimentos permeables de edad cuaternaria y los del acuífero semiconfinado multicapa, cuando se encuentran bajo el nivel de saturación de éste, impide separar hidrogeológicamente las distintas unidades en el tratamiento que sigue; esta es la razón de que en el cuadro resumen de inventario de puntos de agua (Anejo 5) figure la nomenclatura M_3-Pl-Q (Mioceno-Plioceno-Cuaternario) para referirme a captaciones efectuadas en el acuífero multicapa.

En conjunto, la permeabilidad de estos materiales es baja, alcanzándose caudales puntuales que no suelen sobrepasar los 10 l/s.

- g) Cuaternario: Q_1. Acuitardo.

Está constituído por sedimentos detríticos, muy heterogéneos, de edad Pleistoceno inferior (Villafranquiense). Se caracteriza por la alternancia rápida de gravas y arenas, más o menos finas, con estratos de areniscas y conglomerados, e intercalaciones arcillosas; su color es rojo o rojo-amarillento, muy característico.

En conjunto se comporta como una formación hidrogeológica semipermeable, que se apoya en materiales permeables, hacia los que drena, o en materiales paleozoicos y triásicos, impermeables.

Los niveles de gravas y arenas intercalados en esta unidad son muy permeables y tienen comportamiento como acuífero cuando se encuentran en la zona saturada del acuífero multicapa, al que pertenecen en los sectores en

que esto sucede.

Globalmente, su permeabilidad por porosidad primaria es baja y sus posibilidades para la obtención de caudales significativos son escasas.

- h) Cuaternario: Q_2. Acuífero.

Comprende sedimentos aluviales y terrazas de edad Pleistoceno-Holoceno, formados por gravas, cantos, arenas, limos y arcillas, de espesor reducido, generalmente inferior a 12 metros.

En determinados sectores (centro y este del área estudiada) se apoyan en sedimentos permeables, hacia los que drenan, y en materiales impermeables del Mioceno-Plioceno (arcillas y margas azules); en otros, principalmente en el sector occidental, lo hacen sobre materiales impermeables del Paleozoico y del triásico.

Su comportamiento permeable es general; localmente existen pequeños acuíferos colgados, en lentejones de gravas y arenas, de moderada transmisividad y con nivel piezométrico próximo a superficie.

La importancia hidrogeológica de esta formación es escasa, por su carácter discontínuo y pequeña extensión.

- i) Cuaternario: Q_3. Acuífero.

Constituído por arenas de edad Holoceno medio-superior, de espesor generalmente inferior a 10 metros. Estos materiales caracterizan a los depósitos de manto eólico y de playa, que se extienden por una estrecha franja en el borde meridional del área estudiada y se apoyan en sedimentos permeables, hacia los que drenan, y en materiales impermeables del Mioceno-Plioceno (arcillas y margas azules).

Su permeabilidad es muy elevada, y existen pequeños lentejones de agua

subterránea dulce, recargados por precipitaciones locales. El nivel freático es muy superficial (entre uno y dos metros de profundidad).

- j) Cuaternario: Q_4. Acuitardo.

Comprende limos, cantos, arenas, gravas y arcillas, a veces con sal, en donde alternan niveles de origen fluvial (cantos, gravas y arenas) y marino (arcillas). De edad Holoceno superior, ocupa ámplia extensión en el sector meridional del área estudiada en forma de depósito horizontal característico (marismas), y se apoya en materiales permeables e impermeables del Mioceno-Plioceno.

Esta formación hidrogeológica tiene comportamiento semipermeable, y la presencia de agua subterránea salada actúa como posible contaminante del acuífero multicapa, cuando los niveles piezométricos están muy próximos a superficie (uno o dos metros de profundidad).

El análisis que acabo de realizar, referido a las distintas formaciones hidrogeológicas, pone de manifiesto que, en el subsuelo del área estudiada, existen dos sistemas acuíferos, bien diferenciados, tanto en lo que respecta a su potencial, como a sus características hidrogeológicas (cuadro 43).

En función de la profundidad de yacimiento del agua subterránea, distingo dos sistemas hidrogeológicos:

- Sistema acuífero superficial, en régimen semiconfinado (acuífero multicapa); lo represento con la simbología M_3-Pl-Q.

- Sistema acuífero profundo, en régimen confinado; lo represento con la simbología M_1-J.

La mayor parte de los materiales acuíferos presentes en el área investigada comprenden sedimentos detríticos (gravas y arenas); menos importancia tienen los conglomerados, las areniscas y las rocas calizas (calizas, cali-

zas dolomíticas y calizas brechoides).

De excepcional importancia para llegar a conocer la hidrogeología de los sistemas acuíferos definidos, ha sido el inventario de puntos de agua y los sondeos de investigación. A este respecto, he contado con los datos del Inventario Nacional (IGME), y los sondeos de investigación realizados en el marco del Plan General de Exploración de Aguas Subterráneas en España (INC, 1965), del Proyecto de Investigaciones Hidrogeológicas de la Cuenca del Guadalquivir (IGME-FAO, 1965 a 1974), y del Programa Nacional de Gestión y Conservación de los Acuíferos (Plan Nacional de Abastecimientos Públicos; IGME, 1975 a 1983). Los puntos acuíferos del Inventario Nacional existentes en el área superan los 700. Dado que algunos no son representativos, o tienen características similares a otros próximos, he reducido sensiblemente el número de puntos; para ello he seleccionado los más representativos y completos (Anejo 5).

He realizado la cartografía hidrogeológica procurando ajustarme a las normas establecidas en 1974 por el Grupo de Trabajo de Aguas Subterráneas del Instituto de Hidrología, basadas en las recomendaciones de la Leyenda Internacional para Mapas Hidrogeológicos (UNESCO, 1970).

He orientado los criterios de representación teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por el uso de reproducciones en blanco y negro; por ello, he simplificado la delineación, y presento una leyenda concisa y clara, que permita comprender el mapa sin acompañamiento de memoria explicativa.

2. INVENTARIO DE PUNTOS ACUIFEROS

El estudio de los puntos de agua es la herramienta básica, que permite deducir y definir las principales características de los acuíferos, y de ahí la gran importancia de un buen inventario, más que en cantidad, en calidad. Sin embargo, la precisión de los datos es muy variable por múltiples razones, que van desde la ignorancia del propietario, con respecto a las características de la obra, hasta la antigüedad de la construcción, la no realización de

las mínimas pruebas de producción, e incluso la negativa de los propietarios a facilitar datos o falsearlos.

El Inventario Nacional de puntos acuíferos, del IGME, registra, para el período 1965 a 1983, la presencia de 701 puntos acuíferos en el área estudiada, entre pozos, pozos equipados, pozos-sondeo, sondeos y manantiales. Teniendo en cuenta que los afloramientos de formaciones acuíferas ocupan unos 678 km^2, la densidad media (1,03 puntos de agua por km^2) se sitúa, prácticamente, en el límite inferior de la que puede ser considerada como normal en estudios a nivel regional, con mapas base a escala 1/50.000 (GALOFRE, 1976).

Algunos de estos puntos no son representativos, o tienen características similares a otros próximos, por lo que he procedido a una selección de los más representativos y completos; para ello, no he considerado aquéllos que son poco profundos, los que tienen escasos datos conocidos, etc.; ante un grupo de puntos acuíferos muy próximos entre sí he seleccionado el más representativo de todos.

Esta selección me ha permitido considerar 493 puntos, con los que he elaborado el mapa de inventario de puntos de agua a escala 1/50.000 (plano 14), y cuyas principales características reflejo en los cuadros resumen de inventario de puntos de agua (Anejo 5).

Los 493 puntos acuíferos considerados, se desglosan de la forma siguiente: 150 pozos, 174 pozos equipados, 160 sondeos, y 9 manantiales; 38 sondeos fueron perforados por el INC en el marco del Plan General de Exploración de Aguas Subterráneas en España (19 de ellos como sondeos de investigación, con un total de 3532 metros de perforación), y 30 lo han sido en el marco del PIAS y del Plan Nacional de Abastecimientos Públicos (IGME, en colaboración con el IRYDA y la Diputación de Huelva); de ellos, 3 fueron realizados en 1980 y en cuyo control hidrogeológico intervine. 4 sondeos han resultado negativos, 14 se anularon, 21 son sondeos surgentes, y 4 sondeos se abandonaron por salinidad (998, números 6, 7, 14 y 147);

3 pozos son surgentes, y un pozo fué abandonado por salinidad (998, número 93). 18 puntos se utilizan como piezómetros (9 sondeos y 9 pozos). Dos puntos superan los 400 metros de profundidad (uno, los 500 metros; 999, número 39); 13 están comprendidos entre 200 y 400 metros; 79 entre 50 y 200 metros, y 370 no superan los 50 metros (figura 19).

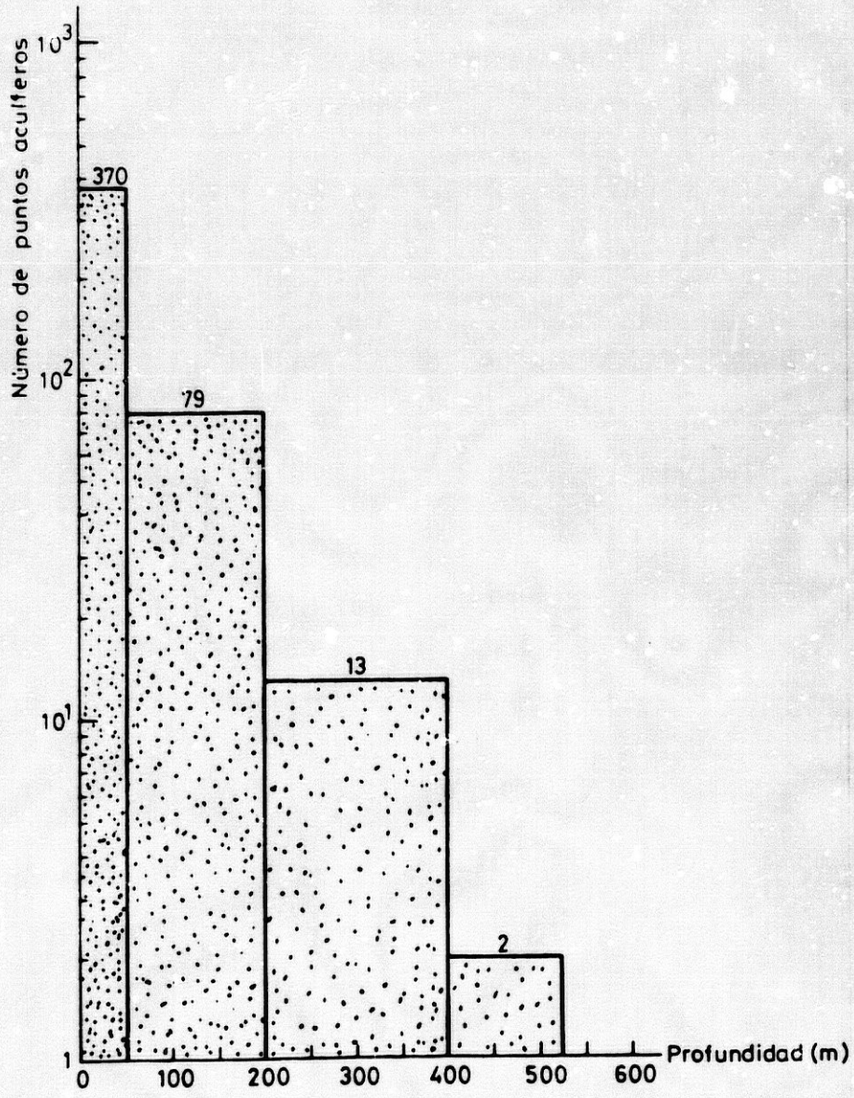


Figura 19.- Histograma del número de puntos acuíferos en relación con la profundidad de los mismos

La nivelación de puntos de agua es muy importante para conocer, con exactitud, el nivel piezométrico en cada punto. 250 puntos (50,7 por 100 del total) tienen realizada nivelación topográfica; de ellos, 206 fueron nivelados con precisión centimétrica por el INC en el año 1965, y el resto los he nivelado utilizando un altímetro Revue Thommen AG CH-4437 Waldenburg,

tipo 3B4.01.2.2500T (precisión ± 1 metro en condiciones muy favorables), propiedad de Compañía General de Sondeos, S. A.[↓]; en esta nivelación he realizado correcciones de error para cada estación, en función de la temperatura y distancia horizontal entre estaciones; como base para las correcciones tomé la cota de la estación de Gibraleón (23,43 metros), y como estaciones accesorias he utilizado la de San Juan del Puerto (5,6 metros) y Huelva (5,2 metros).

El nivel de agua en los diferentes puntos acuíferos lo he medido con un hidronivel eléctrico GEO-70, modelo H-70-224, de 200 metros, propiedad de la Cátedra de Geología de la Escuela Universitaria Politécnica de La Rábida.

3. SISTEMA ACUIFERO SUPERFICIAL

Representa el sistema hidrogeológico superior, en el área estudiada, con estructura característica de acuífero multicapa.

Su nomenclatura la expreso mediante la simbología M_3-Pl-Q.

3.1. LIMITES GEOGRAFICOS

El sistema acuífero superficial de la región de Huelva, se extiende entre Huelva, al este, y Ayamonte, al oeste, y abarca una superficie de 676 km^2.

Sus límites geográficos son (figura 20):

- al norte, la línea que se inicia cerca de Ayamonte y pasa por Villablan-

↓ Esta nivelación con altímetro de precisión la llevé a cabo con la colaboración de MARTIN-SOSA, Ingeniero Técnico de Minas (CGS, Sevilla), del 7 al 9 de octubre de 1981, en 44 puntos de agua que previamente seleccioné con la finalidad de realizar el mapa piezométrico del acuífero.

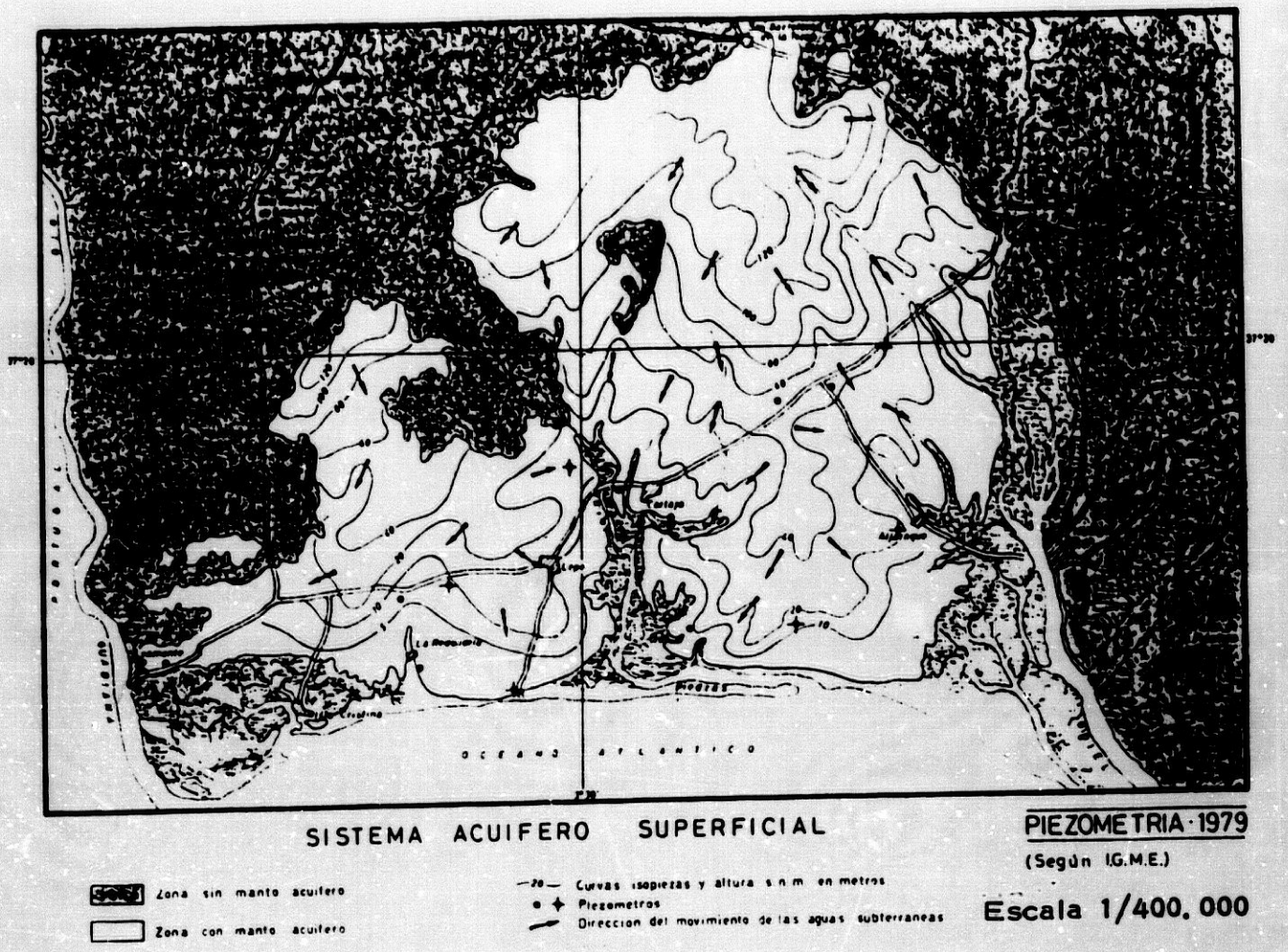


Figura 20

ca, San Bartolomé de la Torre y Gibraleón,

- al sur, el Océano Atlántico,

- al este, el río Odiel, y

- al oeste, el río Guadiana que forma frontera con Portugal.

3.2. LIMITES GEOLOGICOS

Geológicamente, el sistema acuífero está limitado por un substrato impermeable, constituído en la parte norte por pizarras y grauvacas paleozoicas (H, Viseense), y hacia el sur por arcillas y margas azules terciarias (M_2-PI, Andaluciense-Tabianiense). A unos 3 kilómetros al ENE de Ayamonte y a

5,5 kilómetros al ONO de Cartaya, faltan los materiales inferiores de la serie neógena (M_1 y M_2) y el substrato impermeable comprende arcillas y margas triásicas (T, Keuper ?). En aquellos sectores donde no existen margas azules (4 kilómetros al N de Isla Cristina y 2 kilómetros al O de Cartaya), por desmantelamiento de las mismas o por cambios laterales de facies, los materiales del sistema acuífero superficial se sitúan directamente sobre la unidad detrítica superior (M_1, Tortoniense) del sistema acuífero profundo, y también sobre materiales permeables de la unidad caliza inferior (J, Lías ?) de este acuífero en el afloramiento calizo de Ayamonte (2 kilómetros al NE del núcleo urbano); estas son las áreas de contacto de los dos sistemas acuíferos, en las que existe una conexión hidráulica entre ambos, que analizaré al hablar de la superficie piezométrica.

Respecto a los límites laterales (referidos a afloramientos), en el sector meridional los materiales del sistema acuífero superficial están limitados por el Océano Atlántico. El límite septentrional lo constituye, por una parte, el contacto sinuoso con el zócalo paleozoico aflorante, contacto que, aproximadamente, sigue la dirección principal Ayamonte-Villablanca-San Bartolomé de la Torre-Gibraleón, y por otra, el contacto con las margas azules impermeables, subyacentes, que tiene, prácticamente, forma de uve (según la dirección N-S), con vértic las cercanías de Corrales. El límite oriental está marcado por el río Odiel, y sigue una dirección N-S, casi perfecta, desde Gibraleón hasta la ría de Huelva. El límite occidental está constituído por el río Guadiana, y por el contacto con los materiales permeables jurásicos e impermeables triásicos y paleozoicos. Finalmente, el contacto con arcillas y margas azules marca el límite de los afloramientos de los materiales de este sistema acuífero en el sector central (próximo a Cartaya) del área estudiada.

De acuerdo con los límites laterales que acabo de indicar, el sistema acuífero superficial tiene un área[1] de afloramiento de 676 km^2, de los que 132

[1] Calculada por LUBIAN-REGALADO con planímetro automático Coradi.

km^2 corresponden a área de marismas, ubicadas en la desembocadura de los ríos Odiel, Piedras y Guadiana.

Determinadas fallas y cambios de facies limitan lateralmente, aunque de forma muy parcial, los materiales acuíferos en el subsuelo, en la mitad meridional del área estudiada (planos 15 a 18).

3.3. PUNTOS ACUIFEROS INVENTARIADOS

El número de puntos acuíferos inventariados, en esta unidad hidrogeológica, es de 326 (Anejo 5), todos ellos recogidos del Inventario Nacional (IGME), en el que figuran del orden de 500. He considerado los más representativos y aquéllos con datos más completos.

De los puntos seleccionados, 115 son pozos, 88 son pozos equipados, 114 son sondeos, y 9 son manantiales. Un sondeo supera los 400 metros de profundidad (999, número 39), seis tienen entre 200 y 400 metros, cincuenta y nueve entre 50 y menos de 200 metros, y treinta y tres no superan 50 metros de profundidad; en los quince sondeos restantes se desconoce la profundidad.

47 sondeos son de investigación; de ellos, 22 fueron realizados por el INC, y 25 lo han sido dentro del marco del PIAS y del Programa Nacional de Gestión y Conservación de los Acuíferos (IGME, IRYDA y Diputación de Huelva), y en tres de los cuales he colaborado en su control hidrogeológico.

31 sondeos alcanzan y captan, además, los materiales detríticos (M_1) del sistema acuífero profundo (M_1-J), y sólo un sondeo (998, número 5) capta también los materiales calizos (J) de este sistema acuífero; este sondeo, de 250 metros de profundidad, fué realizado por el INC en Noviembre de 1964 en un punto situado 3 kilómetros al sur de Lepe, y cortó horizontes acuíferos entre 20 y 28, 45 y 50, 71 y 74, 125 y 130 metros, constituídos por gravas y arenas, entre margas y arcillas del Mioceno-Plioceno; a partir del metro 171 cortó calizas muy fisuradas del Jurásico, con niveles de ye-

so a partir del metro 195, y desde el metro 226 hasta el final atravesó margas con yesos del Triásico; el sondeo fué taponado con cemento a partir del metro 195, para utilizar el acuífero existente en las calizas fisuradas; posteriormente fué abandonado, por causas que desconozco (quizás por insuficiente o mal desarrollo), y en la actualidad no se utiliza, pues está cegado por derrumbamiento.

3.4. MATERIALES ACUIFEROS Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO

Los materiales de este sistema acuífero (M_3-Pl-Q) comprenden una serie detrítica, donde se suceden sedimentos no consolidados de edad miocénica, pliocénica y cuaternaria.

He distinguido dos formaciones hidrogeológicas bien diferenciadas (cuadro 44):

- Formación hidrogeológica inferior: M_3-Pl.

- Formación hidrogeológica superior: Q.

En ambas, son frecuentes los cambios laterales y verticales de facies, y su comportamiento hidrogeológico es diferente.

3.4.1. Formación hidrogeológica inferior: M_3-Pl (Andaluciense-Plaisanciense inferior)

Los materiales de esta formación comprenden la mayor parte de la unidad hidrogeológica que representa el sistema acuífero superficial.

Está integrada por margas arenosas y arenas limo-arcillosas, de color amarillo, amarillo-rojizo y blanco-amarillento, en las que son frecuentes las intercalaciones de gravas y arenas.

UNIDADES CRONOESTRATIGRAFICAS			FORMACIONES HIDROGEOLOGICAS: LITOESTRATIGRAFIA	FORMACIONES HIDROGEOLOGICAS: PERMEABILIDAD	TIPO DE ACUIFERO
CUATERNARIO	Q_4	Superior	Limo, cantos, arena, grava y arcilla	semipermeable	SEMICONFINADO con caracteristicas de multicapa
	Q_3		Arena	muy permeable	
	Q_2		Grava, cantos, arena, limo y arcilla	permeable	
	Q_1		Conglomerado, arenisca, grava, arena, arcilla	semipermeable	
NEOGENO	$Pl-M_3$	Inferior	Marga arenosa y arena limosa con intercalaciones de grava y arena	niveles permeables y semipermeables	
	$Pl-M_2$		Arcilla y marga azul compacta	impermeable	SUBSTRATO
	M_1		Conglomerado, arenisca, grava, arena y marga arenosa	permeable	
JURASICO	J		Caliza y caliza dolomítica fisurada (microfisuras). Grado de karstificación escaso o nulo. Niveles de marga con yeso	permeable por fisuras	
TRIASICO	T		Arena, arcilla, marga con yeso. Intercalaciones de roca volcánica	impermeable	
CARBONIFERO	H		Pizarra y grauvaca	impermeable	

Cuadro 44.- Formaciones litoestratigráficas e hidrogeológicas en relación con el sistema acuífero superficial

En detalle, la formación es compleja, desde el punto de vista de su litología, ya que el número, espesor, y granulometría de las intercalaciones de gravas y arenas es muy variable en el espacio (figura 21). Respecto al número, generalmente es superior a tres, y puede llegar hasta veinte (998, sondeo número 239); el espesor está comprendido entre 50 centímetros y 30 metros (998, sondeo número 240); la granulometría varía ampliamente desde arenas muy finas (0,2 a 1 milímetro) a gravas de 5 a 10 milímetros (GEA et al., 1965). De forma general, en el área estudiada la proporción de detríticos gruesos (gravas y arenas) aumenta hacia el norte, hacia el oeste, y hacia el techo de la formación.

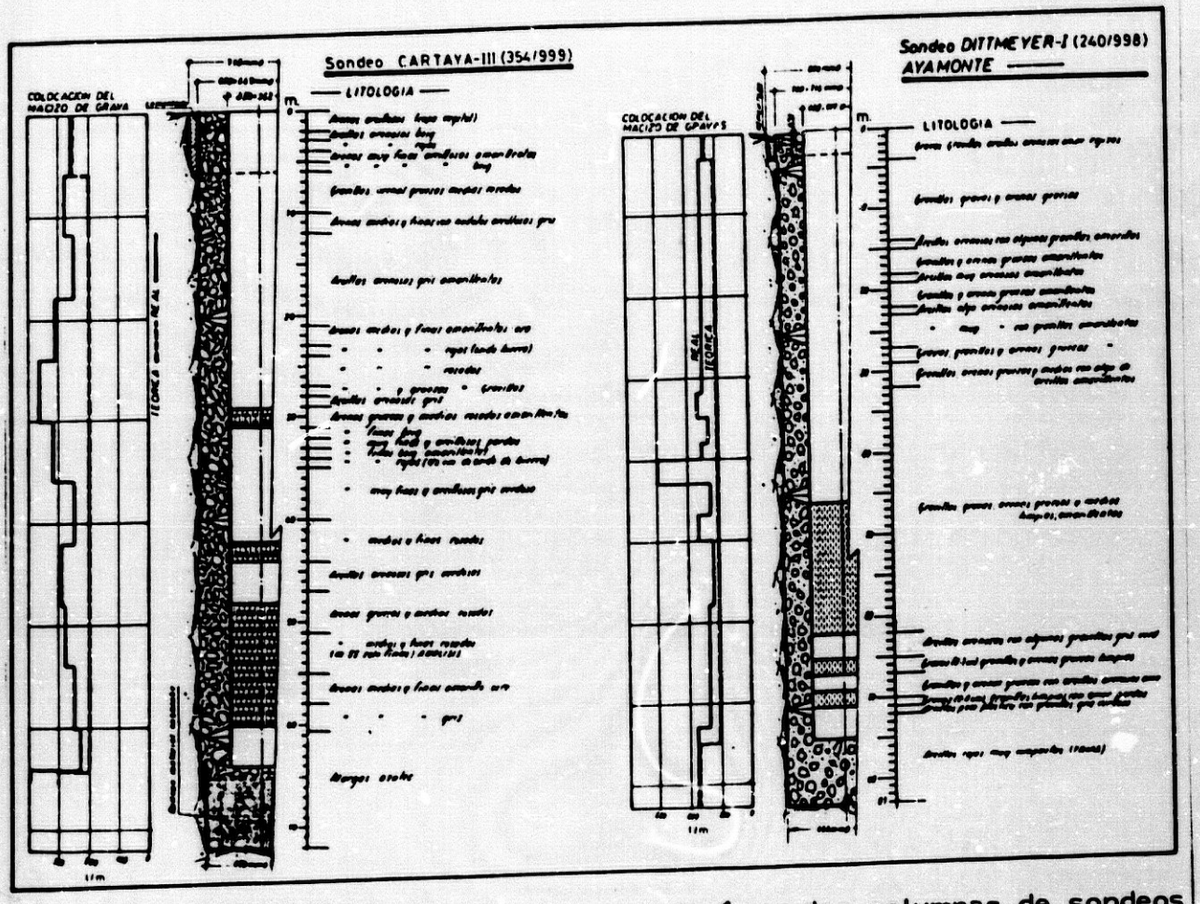


Figura 21.- Ejemplo de variación de la litología en dos columnas de sondeos que captan el sistema acuífero superficial (acuífero semiconfinado con estructura multicapa). La distancia entre los dos sondeos es de 19,2 km

El espesor de la formación varía mucho de unos puntos a otros, pero tiende a aumentar en el sentido norte-sur. El espesor medio es de 24 metros, aunque puntualmente puede superar los 60 metros (75 metros en las proximidades de Lepe, y entre 75 y 80 metros al oeste de La Redondela, en las cercanías de Pozo del Camino). Los mayores espesores se alcanzan en el sector meridional, en el área comprendida entre Lepe, La Redondela y Pozo del Camino, y en la situada al norte de El Rompído y que se extiende entre el río Piedras y las proximidades de Aljaraque.

Esta formación presenta características propias que permiten identificarla

como acuífero multicapa, debido a la combinación de materiales permeables (gravas y arenas), intercalados entre materiales semipermeables (margas arenosas y arenas limo-arcillosas). Es, por tanto, un sistema hidrogeológico en el que cada acuífero no puede ser considerado de manera independiente (CASTANY, 1982).

Los afloramientos de esta formación se extienden sobre gran parte del área no ocupada por los afloramientos de rocas paleozoicas y mesozoicas. Gran número de obras de captación, sobre todo sondeos, se emplazan en ellos, con la finalidad de explotar agua subterránea de este acuífero, principalmente en los alrededores de Pozo del Camino, La Redondela, Lepe y Aljaraque (plano 14). En las proximidades de Pozo del Camino, algunos sondeos perforados han dado caudales superiores a 60 l/s (998, número 242); en el área de La Redondela hay sondeos con caudales superiores a 40 l/s (998, números 99 y 147); al norte de Lepe se alcanzan 20 l/s (998, número 195), y en las cercanías de Aljaraque hay sondeos que superan los 15 l/s (999, número 237).

Aunque dentro de esta formación hay niveles libres y niveles en carga, globalmente el acuífero multicapa se comporta como un acuífero semiconfinado, y se sitúa a profundidades entre 20 y 70 metros. Su permeabilidad por porosidad primaria es baja (MARTIN-SOSA, 1981); valores entre 8 y 10 m/día son frecuentes (IGME-FAO, 1974) en las arenas muy finas.

3.4.2. Formación hidrogeológica superior: Q (Pleistoceno inferior-Holoceno superior

Los materiales de esta formación constituyen la parte superficial del sistema acuífero, y representan una porción pequeña de esta unidad hidrogeológica.

Está constituída por sedimentos muy heterogéneos, prácticamente horizontales, que incluyen depósitos de glacis, aluviales, terrazas, eólicos, de playa y marismas.

Su litofacies es muy variada, en lo que se refiere a la granulometría, color

y espesor.

En muchos puntos, de acuerdo con la litología, se pueden diferenciar tres tramos desde el punto de vista de su comportamiento hidrogeológico:

- a) Tramo inferior: Q_1

Comprende depósitos de glacis. Está constituído por conglomerados, con cantos de gran tamaño y cemento arcilloso rojizo, areniscas y arcillas rojas, con lechos de gravas y arenas; su color es predominantemente rojo, aunque con frecuencia presenta aspecto abigarrado (rojizo y blanco-amarillento). Su espesor es muy variable, pero aumenta hacia el norte y hacia el oeste; así, tiene 11 metros en la columna del sondeo "La Dehesilla" (999, número 27), situado 5 kilómetros al SSW de Aljaraque; en el corte del macizo de Cebollar (8 kilómetros al SSE de San Bartolomé de la Torre), alcanza valores mínimos de 80 metros (VIGUIER, 1974); y cerca de Lepe (4 kilómetros al W) llega a 40 metros. El espesor medio de este tramo, en el área estudiada, es de unos 14 metros.

Considero este tramo como un acuitardo, de pocas posibilidades acuíferas; su carácter global es semipermeable, aunque coexisten materiales de muy diverso comportamiento hidrogeológico (permeables, semipermeables e impermeables).

Puede actuar como acuífero cuando se encuentra bajo el nivel de saturación del acuífero multicapa, del que forma parte en este caso, pero en general origina niveles colgados, a favor de materiales arenosos o limo-arenosos, con dos posibilidades de drenaje:

- Mediante pequeños manantiales, que bordean el afloramiento, y cuyas aguas se infiltran en los materiales infrayacentes, alimentando de forma indirecta al acuífero multicapa.

- Por alimentación retardada (goteo) hacia el acuífero multicapa.

En la figura 22 esquematizo el comportamiento de este tramo.

Figura 22.- Comportamientos posibles del tramo Q_1 respecto al acuífero multicapa (M_3-Pl).

① Nivel colgado, con alimentación indirecta y retardada hacia el multicapa.

② Nivel en la zona de saturación del acuífero (en este sector, los materiales del tramo Q_1 se confunden hidrogeológicamente con los del acuífero multicapa).

- b) Tramo intermedio: Q_2-Q_3

Comprende depósitos de aluvión, terrazas, eólicos y de playa. Está formado por materiales muy permeables (arenas) y permeables (gravas y cantos), aunque la presencia de limos y arcillas disminuye la permeabilidad del conjunto.

Los sedimentos de aluvión y terrazas (Q_2) tienen reducido espesor, generalmente inferior a 12 metros. Sus afloramientos son poco extensos (el principal se sitúa en las inmediaciones de Corrales), y se localizan en las proximidades de los principales ríos y arroyos. En ciertos sectores (centro y este del área estudiada) se apoyan en materiales permeables del acuífero multicapa, hacia el que drenan, y en arcillas y margas azules impermeables del Mioceno-Plioceno; en otros, principalmente en el sector occidental del área, se sitúan directamente sobre materiales impermeables del paleozoico y triásico.

Su comportamiento permeable es general. Localmente existen pequeños acuí-