

## **SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)**

ILDEFONSO MORENO CALVILLO  
ANTONIO CASTILLO MARTIN

Catedra de Hidrogeología de la Universidad de Granada.  
Departamento de Investigaciones Geológicas (C.S.I.C.).

### **RESUME**

Les caractéristiques climatiques et géologiques des sierras de Loja et Alhama (Sierra Gorda) sont exposées. On étudie la morphologie karstique de ces sierras, lesquelles sont considérées comme le meilleur exemple d'holokarst de la province de Grenade, étant donnée la variété et le nombre de formes présents; finalement, les caractéristiques hidrogeologiques et hidrogeo-chimiques sont étudiées, ainsi que les traits principaux du fonctionnement du système.

### **SUMMARY**

Climatic and geological characteristics of Loja and Alhama sierras (Sierra Gorda) are explained. The Karstic morphology is studied for both sierras, they are regarded like best holokarst example in Granada province, due to diversity and quantity amongst present formations; finally hydrogeologic and hydrogeochemical characteristics and the assential line of performance in the subterranean collecting are reported.

### **ZUSAMMENFASUNG**

Es werden die klimatischen und geologischen Kennzeichen der Gebirgsketten von Loja und Alhama (Sierra Gorda) dargestellt. Ferner wird die Karst-Morphologie der beiden Gebirgsketten untersucht, man hält sie für das beste Beispiel von Holokarst der Provinz Granada wegen ihrer Vielseitigkeit und Reichtum der Formen. Zuletzt werden die hidrogeologischen und hidrochemischen Merkmale vorgeführt so wie auch die wichtigsten Richtlinien vom Betrieb des unterirdischen Stausees.

### **I. INTRODUCCION**

Las sierras de Loja y Alhama, localmente conocidas con el nombre de Sierra Gorda-Zafarraya, se localizan en la parte occidental de la provincia de Granada, en su límite con la de Málaga. La situa-

ción, accesos y poblaciones se pueden observar en la figura 1.

Desde el punto de vista litológico, están formadas por un conjunto calizo de edad jurásica, de color frecuentemente

## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)

blanco o beige, de predominio micrítico y oolítico, con más de 800 metros de espesor. Es preciso indicar que aunque estratigráfica y tectónicamente, Sierra Gorda y Zafarraya son dos unidades diferentes, en sus aspectos hidrogeológicos y morfológicos constituyen una misma unidad.

\* De acuerdo con esto último, y para abreviar denominaciones, en adelante nos referiremos a todo el conjunto con el nombre de Sierra Gorda.

En este macizo carbonatado, se desarrolla el más completo ejemplo de holokarst de la provincia de Granada, por estar representado todo tipo de aparatos kársticos, externos e internos, y por la densidad y abundancia de los mismos.

Hidrogeológicamente es una unidad bien individualizada. El sustrato impermeable está formado, posiblemente, por materiales triásicos de facies Keuper, y toda ella está rodeada por materiales, en general de baja permeabilidad, pertenecientes al Cretáceo y Neógeno. Los principales aliviaderos naturales del embalse subterráneo se sitúan en sus bordes Norte y Sur; el río Genil y sus afluentes constituyen el nivel de drenaje más bajo del acuífero, mientras que el polje de Zafarraya se incorpora a la cuenca de alimentación.

### II. CLIMATOLOGIA

El estudio de las características climáticas fué realizado (DELGADO MOYA et al. 1974) a partir de los datos suministrados por las siete estaciones meteorológicas más próximas: Loja aforos, Loja escuela, Riofrío, Zafarraya monte, Alfarnate, Ventas de Zafarraya y Alcaicería. (figura 2).

#### 1. PLUVIOMETRIA

El mapa de isoyetas que se muestra en la figura número 2, se ha obtenido

a partir del trazado en el anéndice del Resumen de Aforos, editado por la Dirección General de Obras Hidráulicas, para el periodo comprendido entre 1943 y 1965. A partir del trazado de las isoyetas, se ha calculado la precipitación media anual, para Sierra Gorda, la cual da un valor próximo a los 500 mm., lo que supone un volumen anual precipitado de 240 Hm<sup>3</sup>, para una superficie de 300 Km<sup>2</sup>.

#### 2. TERMOMETRIA

Para el cálculo de las temperaturas medias sólo se ha dispuesto de los registros termométricos de la estación de Loja escuela, entre los años 1950 y 1970, y del coeficiente de correlación temperatura/altitud obtenido por MESSERLI y que es de 0'6°C/100 m. Con estos valores se obtiene una temperatura media anual para Sierra Gorda de 12'2°C.

#### 3. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL Y REAL

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial anual, se ha seguido la fórmula de THORNTHWAITE. El valor obtenido por este procedimiento es de 760 mm; valor excesivamente alto si se tiene en cuenta que se trata de un macizo kárstico muy fisurado, donde (salvo en algunas formas de absorción) no existe suelo, ni por tanto vegetación.

A la vista de los valores obtenidos, por el método de THORNTHWAITE, para el cálculo de la evapotranspiración potencial, la real se ha obtenido aplicando la fórmula de TURC y ha dado un valor anual de 440 mm, lo que supone una pérdida a la atmósfera de 132 Hm<sup>3</sup> /año (55 % de la precipitación).

#### 4. ESCORRENTIA

Por el marcado carácter kárstico

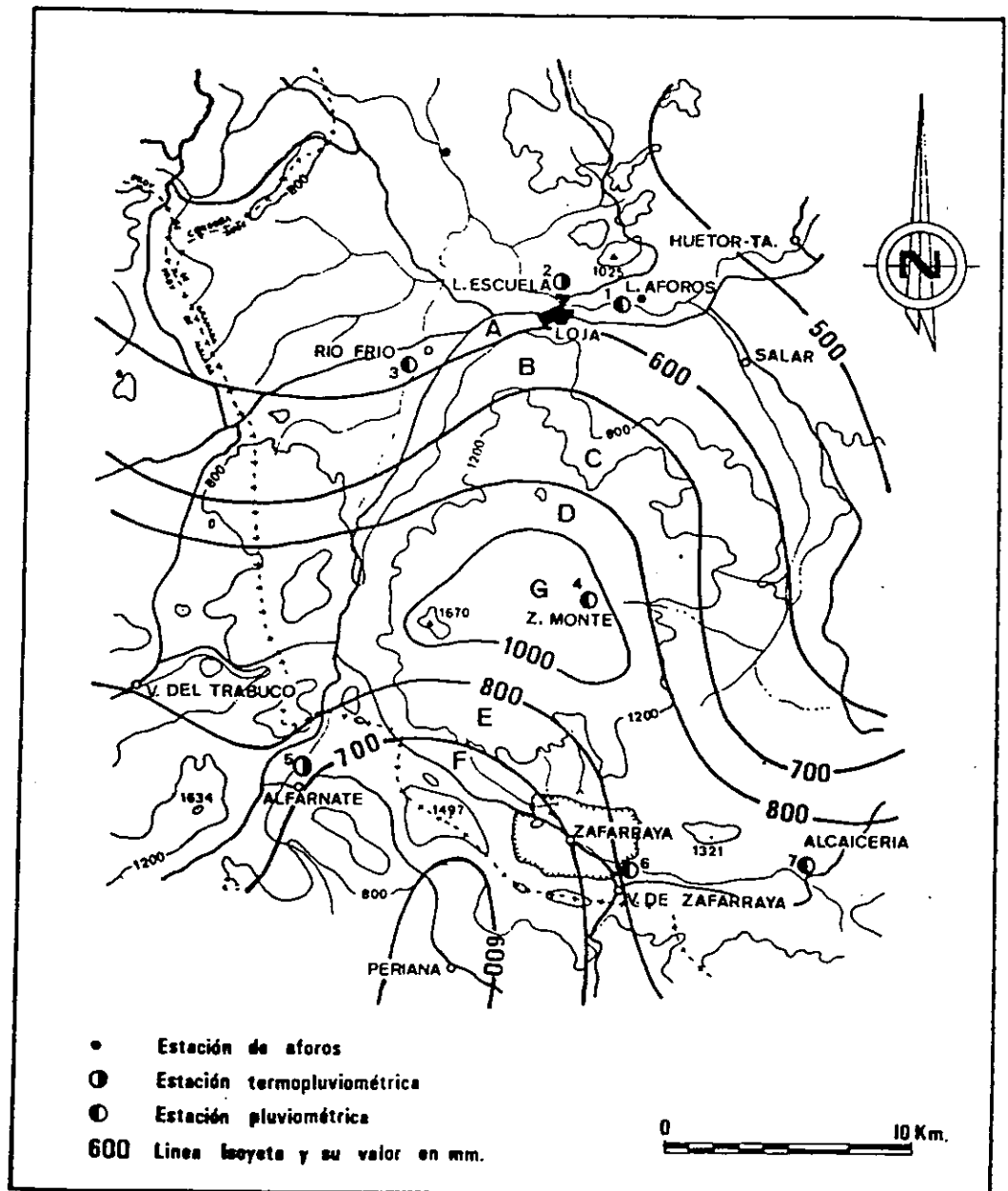


Figura 2. Plano de Isoyetas medias (periodo 1943-1965)

del macizo, la escorrentía superficial carece de importancia y puede despreciarse cuantitativamente.

El agua de lluvia se infiltra rápida-

mente y no da lugar al arroyamiento. La red de drenaje es la típica de terrenos kársticos, con pequeñas cuencas endorréicas de trazado irregular.

## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)

### 5. INFILTRACION

Es la última partida que falta por conocer del balance hídrico, y es igual, en este caso, a la precipitación total descontada la evapotranspiración real obtenida; de esta forma se tiene para Sierra Gorda una infiltración de 360 mm. (45 % de la precipitación), lo que supone unos recursos anuales regulables de 108 Hm<sup>3</sup>.

### 6. CLASIFICACION CLIMATICA

Se ha obtenido a partir de los índices de MARTONNE y de THORNTHWAITE, que son los que ofrecen una mayor claridad y comprensión de los resultados. Para ambos se obtienen una clasificación climática equivalente, en la zona próxima a Loja; se trataría de un clima árido-mesotermal, pero debido a que los datos de las estaciones pluviométricas son en algunos casos incompletos, y a la falta de registro termométrico en las cumbres de la sierra, dicha clasificación hay que aceptarla con cierta reserva.

### III. GEOLOGIA

En el ámbito general de las Cordilleras Béticas, el sector considerado está situado en el contacto entre dos grandes unidades geológicas: Zona Bética s. str. al Sur y Zona Subbética al Norte; entre ambas, y ocupando una franja desigual de terreno, se encuentran las unidades del Flysch. En el borde oriental aparecen los materiales neógenos pertenecientes a la depresión de Granada.

#### 1. ESTRATIGRAFIA

Tanto la Unidad de Sierra Gorda, como la Unidad de Zafarraya, pertenecen

a la Zona Subbética s. lat., y según la nomenclatura de GARCIA DUEÑAS (1967), al dominio Subbético Interno. Actualmente la Unidad de Zafarraya se considera incluida en las denominadas "Unidades Subbéticas Meridionales" o de tránsito al Flysch.

A continuación se describen, someramente, las características litoestratigráficas de los diferentes materiales aflorantes, cuya distribución puede observarse en el plano geológico de la figura 3, así como en los cortes geológicos.

#### UNIDAD DE SIERRA GORDA

Aflora desde Loja hasta el polje de Zafarraya, y ha sido definida por VERA (1966) y LINARES y VERA (1966). Sus principales características se resumen a continuación.

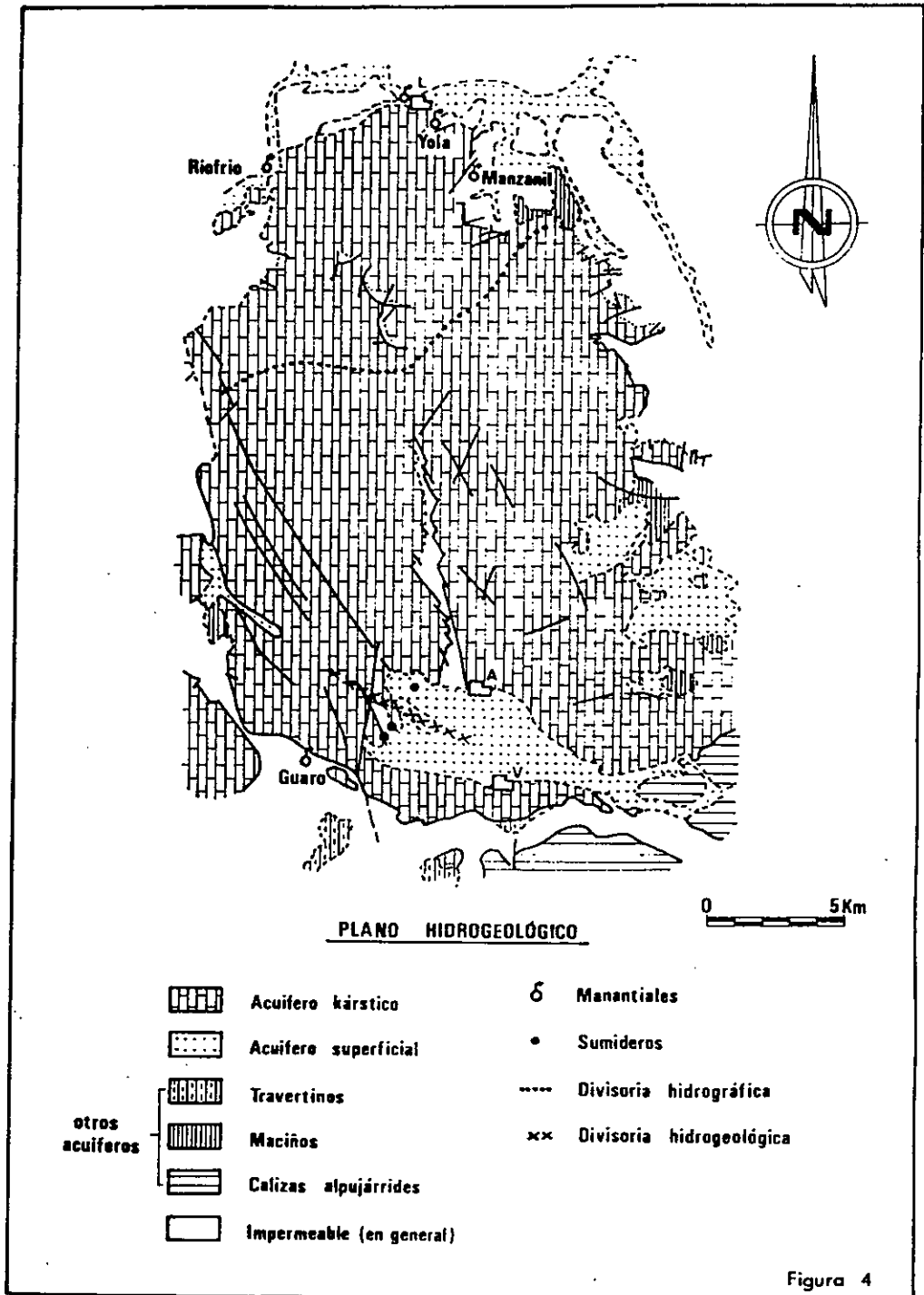
Lías inferior: calizas pisolíticas y/o seudoolíticas recristalizadas. La microfacies corresponde a intraesparita y oosparrita; la fauna presente es de gasterópodos, algas y foraminíferos arenáceos, sin valor cronoestratigráfico. Se han reconocido dos niveles, de unos dos metros de espesor, de calizas bioclásticas con abundantes crinóides y braquiópodos.

Son los niveles más bajos que afloran, y su edad se les atribuye por correlación con otras series subbéticas. La potencia mínima se estima en 800 metros.

Lías medio-superior: ausente por laguna estratigráfica (posiblemente por efecto de un bajo fondo).

Dogger-Calloviense: en acordancia con las calizas liásicas se disponen unas calizas nodulosas, de color crema a gris, de unos 20 metros de potencia. La fauna encontrada permite datar el Bathonense superior y Calloviense inferior.

Oxfordense-Titónico: calizas grises y calizas nodulosas, con unos 13 metros



## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)

de potencia, en discordancia angular sobre los materiales anteriores.

Cretáceo inferior: margas y margocalizas blancas, con fauna poco abundante y unos 200 metros de potencia.

Cretáceo medio: facies similar a la anterior.

Cretáceo superior: margocalizas rojas, con abundante microfauna (capas rojas de rosalina).

### UNIDAD DE ZAFARRAYA

Definida por VERA (1966), es una unidad que presenta ciertas analogías y diferencias con la Unidad de Sierra Gorda. A continuación se resumen sus principales características.

Lías inferior: dolomías y calizas dolomíticas de color grisáceo y aspecto brechoide. Potencia del orden de 800 metros. Parte de este tramo puede ser de edad Triásica.

Lías inferior-medio(?): calizas blancas biosfíticas y seudoolíticas. La microfacies corresponde a intraesparita con restos de algas, gasterópodos y foraminíferos.

Lías superior: calizas blancas y grisáceas con sílex, con una potencia de unos 200 metros. Sobre ellas se encuentran unos niveles de calizas margosas de color gris azulado.

Dogger-Malm: margocalizas con sílex, cuya microfacies corresponde a intra-bioesparita con pellets; y calizas nodulosas.

Neocomiense: margocalizas y calizas margosas con Aptychus.

Los términos más modernos están constituidos por un paquete de facies flyschoides (calizas, conglomerados y margas). La microfauna ha permitido datar el Aquitaniense inferior.

## 2. TECTONICA

### ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE SIERRA GORDA.

En líneas generales corresponde a un anticlinal cuyo eje es aproximadamente E-W. Los buzamientos radiales observados en ambas vertientes de la sierra, configuran sendos cierres periclinales característicos de la estructura en domo, alargado según la dirección N-S.

Esta sencilla estructura anticlinal sufre ciertas modificaciones hacia el tercio septentrional del macizo. Se trata de pliegues tumbados y fallas inversas, de vergencia SSE, puestas de manifiesto por la presencia de calizas nodulosas del Malm y margocalizas del Neocomiense. Tales estructuras son la consecuencia de esfuerzos tangenciales de componente Sur.

Dos sistemas principales de fallas normales afectan a esta unidad:

- fallas singenéticas del plegamiento, de gran desarrollo longitudinal y, superficies planas, con fuerte buzamiento (a veces verticales). Son de dirección N 20° E y N 40° W, cuya bisectriz aguda es casi ortogonal al eje del pliegue.

- fallas de descompresión. Son de dirección aproximada N 70° E, con buzamientos elevados (del orden de 70-80°) y saltos superiores, en ocasiones, a 2000 metros (borde Norte de Sierra Gorda). Existen otras fallas de la misma dirección y buzamiento, en relación con fenómenos de tensión de la bóveda. Los saltos son de menor envergadura, y presentan labios abiertos que favorecen la acción de los procesos kársticos y el desarrollo, sobre ellas, de importantes y frecuentes sinas ampliamente penetrables.

La Unidad de Sierra Gorda desaparece hacia el Este bajo el recubrimiento Neógeno y Cuaternario de la depresión de Granada. En sentido Oeste, la desaparición de la unidad es interpretada por VERA (1966) como consecuencia de la acción de fallas de gran salto, que serían el reflejo en la cobertera de una gran falla de zócalo, de dirección N-S. No se puede descartar la posibilidad de que la discontinuidad oriental se deba a un efecto similar.

Con relación a su comportamiento tectónico, VERA (1966) sugiere una posición para autóctona. Para GARCIA DUEÑAS (1969) se trata de una unidad alóctona.

#### ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE ZAFARRAYA

A grandes rasgos la estructura interna de la Unidad de Zafarraya responde a un anticlinal, cuyo eje se adapta a la forma del borde meridional de Sierra Gorda. Por esta causa la simetría del pliegue es diferente, según los sectores que se consideren, y su eje adquiere una morfología curva con la concavidad hacia el Norte.

En el sector del polje de Zafarraya la estructura responde al esquema mencionado, con la única salvedad de la presencia de una falla inversa, vergente al Norte, que pone en contacto las dolomías liásicas con las margas paleógenas. En consecuencia, el macizo carbonatado que forma la Sierra de Zafarraya, constituye una escama dispuesta sobre un anticlinal suave, con algunos repliegues, afectado por numerosas fallas normales.

La dirección de las capas es aproximadamente E-W en las proximidades del Boquete de Zafarraya, para pasar a ser NNW-SSE hacia el extremo occidental del polje, y NNE-SSW hacia el extremo oriental del mismo. Esta circunstancia evidencia

la curvatura del eje del pliegue, que está afectado, por otra parte, de frecuentes "ensilladuras".

Los sistemas de fallas normales siguen unas directrices semejantes a las de la Unidad de Sierra Gorda.

- fallas sinclinales del plegamiento. Forman diedros (60-65°), de caras planas y fuerte buzamiento, cuya bisectriz es normal a los ejes de los pliegues, que debido a su curvatura confieren una disposición en abanico de las bisectrices que son convergentes hacia el Norte.

- fallas de descompresión. Son de dirección variable, según los distintos sectores. Se disponen, en general, paralelas a los ejes, lo que determina que las direcciones varíen desde E-W a N-S, SE y NE-SW en las áreas central, occidental y oriental, respectivamente, del polje de Zafarraya.

La única falla inversa deducida ha sido la mencionada en la Sierra de Zafarraya, que se amortigua hacia los extremos del polje, y queda, en cierto modo, enmascarada por las fallas normales posteriores.

La edad de los esfuerzos principales queda acotada, con escasa precisión, entre el Eoceno y el Vindoboniense, aunque la presencia del Aquitaniense plegado, en las unidades del Flysch, definen una edad Burdigaliense para la fase orogénica principal.

#### IV. MORFOLOGIA KARSTICA

El macizo calcáreo de Sierra Gorda, junto con el polje de Zafarraya, constituyen un magnífico ejemplo de holokarst, en el que están representados todos los tipos de aparatos kársticos.

La morfología resultante viene condicionada por varios factores:

- litología. El macizo está compuesto

## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)

por calizas, con potencia superior a los 800 metros.

- estructura. La compleja estructura del gran domo, muy fracturado, condiciona una infiltración preferente, a través de la amplia charnela del pliegue. Por otra parte, de manera general, la karstificación está íntimamente ligada a la fracturación, y controlada por ella.

- clima. Debido a que la sierra se localiza a altitudes comprendidas entre los 400 y 1700 metros, existe una cierta estratificación climática en altura, que condiciona el desarrollo de los aparatos kársticos, de tal modo que se puede establecer una relación aproximada de la altitud con las formas kársticas predominantes:

ALTITUD (m)	FENOMENOS QUE SE OBSERVAN
400 - 600	Lenar incipiente. Surgencias vaclasianas, trop-pleins y gravitacionales.
600 - 800	Lenar bastante desarrollado; paisaje de aspecto ruñiforae.
800 - 1000	Lenar, dolinas y poljes.
más de 1000	Toda clase de aparatos kársticos.

La zona de absorción se extiende preferentemente a partir de los 900 metros dentro de un régimen eminentemente pluvial.

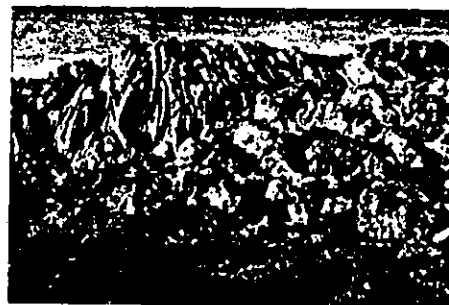
Si bien en Sierra Gorda se desarrollan formas kársticas muy variadas, nos ceñiremos a la descripción tan sólo de las más abundantes y significativas.

### FORMAS CERRADAS

Lenar. Fundamentalmente, abunda el del lenar de diaclasas, regido por leptó y tectodiadas, cuya distribución es caprichosa, si bien la más generalizada es la del lenar entrecruzado. Otro tipo, asimismo frecuente, es el lenar de planos de estratificación, desarrollados donde las capas afloran verticales o fuertemente

inclinadas.

En ambos casos son frecuentes las perforaciones o conductos embrionarios, cavitacionales, que favorecen la localización de áreas de absorción a través de campos de lenar (McGRAIN, 1948).



1.- Lapiaz de crestas agudas.

Torcas o dolinas. El tamaño que puede alcanzar la dolina es muy variable y oscila entre unos metros hasta algunas decenas y en ocasiones centenas de metros. Los diámetros más frecuentes en Sierra Gorda están comprendidos entre 15 y 30 metros.

Pero lo más significativo es que la zona estudiada puede considerarse como un vasto campo de dolinas, repartidas irregularmente, aunque controladas en su mayor parte por varios factores:

- altitud. Las dolinas se ubican, preferentemente, por encima de los 900 metros.

- litología. No se circunscriben a un nivel calizo en especial.

- topografía. Aparentemente no están relacionadas con la topografía, ya que si bien la mayoría se han formado en las zonas más o menos llanas de la sierra, se observan un gran número de dolinas ubicadas en fuertes pendientes (Cerro de las Víboras, fotografía 2).

- tectónica. Si bien habitualmente se disponen de manera caótica, sin embar-





2 .- Dolinas en el Cerro de las Viboras.

go hay alineaciones muy netas de dolinas a lo largo de fracturas.

Los tipos de dolinas presentes en Sierra Gorda, son las de artesa, embudo y ventana (CVIJIC, 1960), con casi todos los términos intermedios y presencia de dolinas disimétricas y de formas poligonales. Estas últimas, por estar íntimamente ligadas a la estructura, y regidas por juegos de fracturas, se han denominado "dolinas estructurales" (DELGADO MOYA, 1973).

Por el elevado número de dolinas en artesa -existen magníficos ejemplos a ambos lados del camino forestal que



3 .- Dolinas en artesa.

cruza la sierra de Norte a Sur, se deduce que el karst obedece a unas condiciones eminentemente pluviales.

Uvalas. Al igual que ocurre con las dolinas, existen en esta región abundantes uvalas en todos los estados de su formación. Entre ellas cabe destacar las que se alinean "en rosario" a lo largo de fallas o fracturas importantes.

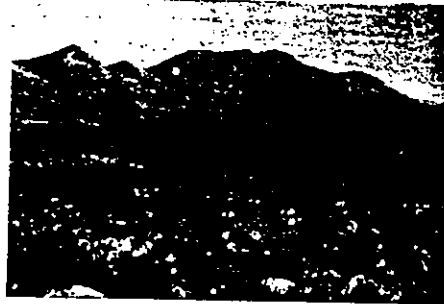
Poljes. Si se toma, desde Loja, el camino forestal que atraviesa la sierra de Norte a Sur, la primera depresión que señalaríamos está situada al pie del cerro Semilla, entre las majadas de la Nuez y la del Charco del Negro.

Se encuentra a 1.420 metros de altitud; la superficie es pseudollana y el fondo rocoso con relleno arcilloso de unos 30-40 cm. de espesor. Como cabía esperar, dada su altitud, se trata de una depresión seca, drenada en profundidad. Su origen parece estar ligado al fenómeno de conjunción de dolinas y uvalas, que justificaría su contorno irregular y la falta de fracturas importantes en las proximidades.

La segunda depresión se ubica en los alrededores de la majada del Cañón, en el paraje significativamente denominado "Hoyo Grande" (fotografía 4). Resalta características parecidas a la anterior; su altitud es de 1.300 metros, la superficie es pseudollana y el fondo rocoso, con un relleno de reducido espesor. La génesis no ofrece dudas en este caso, se trata de una depresión formada por karstificación, a favor de una zona tectonizada, ligada a una gran falla gravitacional de dirección N 30° E.

Actualmente se observan fenómenos de unión de dolinas y uvalas. Existe otro pequeño polje, alejado del camino, situado en las cercanías del de Zalazaya, entre el Alto de los Morrillos y el Cerro de la Mina.

## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)



4. -- Polje de "Hoyo Grande".

Es una depresión alargada según la dirección N 50° W, situada a 980 metros de altitud. Su origen es discutible, puesto que no se ve una neta relación con la tectónica. Por otra parte su morfología y contorno no sugieren admitir la teoría de la conjunción de dolinas y uvalas. Parece que la génesis está ligada a la tectónica debido a su forma alargada, un tanto sospechosa, y a que la dirección longitudinal concuerda con uno de los juegos de fracturas de este macizo.

Interés especial merece el polje de Zafarraya, uno de los mejores ejemplos del karst español, situado a la cota de 900 metros. Se localiza en una zona montañosa, de estructura compleja, donde se superponen anormalmente dos unidades correspondientes a la Zona Bética s. str., circunstancia muy favorable para la acción de procesos kársticos en los materiales carbonatados.

Su génesis, pues, está directamente ligada a la karstificación de una zona tectónica, puesta de manifiesto por su emplazamiento en un ámbito de estructura compleja, y a la existencia de grandes fallas, que en algunos casos corresponden a superficies de cabalgamiento.

Según se deduce de los sondeos realizados por el SGOP, y de las investigaciones geofísicas, que se han efectuado,

el fondo es muy irregular, por lo que la potencia de relleno varía entre límites muy amplios. Los materiales de relleno -arcillas de descalcificación y productos detríticos aportados por las aguas superficiales- forman en la actualidad una superficie plana y subhorizontal, ligeramente inclinada hacia el Oeste, donde se localizan varios grupos de sumideros, a los que confluyen las aguas que llegan al polje, especialmente las del arroyo de la Madre, que lo recorren en sentido longitudinal. Este polje, normalmente seco, sufre inundaciones temporales, y los sumideros llegan a funcionar como conductos de emisión.

El funcionamiento de estos poljes, y su proceso de karstificación, debió iniciarse y desarrollarse en gran escala antes del Tortonense, como lo atestiguan los materiales marinos de relleno.

### FORMAS ABIERTAS

Las formas de absorción abiertas difieren, fundamentalmente, de las cerradas, en los volúmenes de agua que son capaces de absorber. En ellas la entrada de agua se realiza en masa.

Simas. Existen en Sierra Gorda gran número de ellas, (Rica-Redil, Conejo, Carrero, Hoyancos... etc.).

Se trata de cavidades, en la mayoría de los casos, que responden al tipo de "simas tectónicas" en el concepto de GEZE (1968), y que se alinean a lo largo de importantes fallas.

En conjunto, predominan los procesos clásticos más que los de disolución, pero son importantes también las formas de reconstrucción y especialmente las parietales.

La génesis hay que relacionarla con el proceso estructural de hundimiento de bloques a favor de fallas, de tal

manera que, al producirse el despegue de los labios de falla, por un efecto rotacional típico del desplazamiento según el perfil en cuchara de estas fallas, se produce la apertura de las simas (fotografía 5).



5 .- Entrada a Sima Rica en una dolina en artesa.

De todas las formas hipogeas existentes, las más importantes son las clásicas, con predominio del caos de bloques. Existen además magníficos ejemplos de formas de reconstrucción, aunque su abundancia relativa es mucho menor. Se pueden señalar estalagmitas, estalactitas, columnas, banderas, coladas, anemolites, "piel de leopardo", etc.

Sumideros. Los sumideros más importantes de este aparato kárstico se sitúan en el polje de Zafarraya. Están localizados en el extremo occidental del mismo, relacionados con accidentes tectónicos importantes (superficie de cabalgamiento de la Unidad de Zafarraya sobre la de Sierra Gorda, o fallas normales posteriores al cabalgamiento).

Las formas que predominan son las embudiformes y cilíndricas, que sugieren procesos de erosión remontante o erosión inversa (HIDALGO RUIZ, 1974).

#### FORMAS DE CONDUCCION

Desde el punto de vista hidrogeológico su importancia radica en que son los conductos que unen las zonas de absorción con las de emisión (surgencias y resurgencias). Si bien en el proceso evolutivo del karst es natural el paso de formas impenetrables a formas penetrables, dada la progresiva disolución y erosión, no obstante, por el momento, sólo se ha conseguido penetración, a través de los sumideros de Zafarraya.

Tal vez el mejor conocimiento espeleológico de Sierra Gorda permita algún día alcanzar estos conductos.

#### FORMAS DE EMISION

La mayor parte de los manantiales kársticos se caracteriza por tener grandes caudales y fuertes variaciones estacionales, función de la elevada velocidad de circulación en el karst.

Las surgencias más importantes de este gran aparato kárstico se localizan en la parte septentrional de la sierra. En la zona Sur solo cabe destacar el conjunto de manantiales, muy próximos entre sí, de Guaro. En los bordes tanto oriental como occidental, sólo existen pequeñas surgencias estacionales, ligadas a los materiales, no calizos, de mayor permeabilidad. De acuerdo con la clasificación de LLOPIS (1970), los manantiales observados corresponden a los siguientes tipos:

- descendentes. El agua circula por gravedad. Incluye a los manantiales de Guaro, Manzanil, Loja y Terciado.

- ascendentes. La circulación es a presión (vauclasianos). Se incluyen en este grupo los manantiales de Borbollote y las Cadenas.

- trop-plein. La surgencia se produce a través de varios puntos situados a diferente altura. A este grupo pertenece

## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)

el conjunto de manantiales de Riofrio.

Todos los manantiales están controlados por factores estructurales ya sean fallas, zonas de brechas, o contacto entre la masa caliza y materiales de muy baja permeabilidad.

### V. HIDROGEOLOGIA

#### 1. CARACTERISTICAS Y LIMITES DEL ACUIFERO DE SIERRA GORDA

Los materiales carbonatados jurásicos de la Unidad de Sierra Gorda, de unos 300 km<sup>2</sup> de extensión, constituyen un importante embalse subterráneo bien individualizado, con unos recursos medios anuales del orden de 110 Hm<sup>3</sup>. En la figura 4 se muestra el plano hidrogeológico del sector.

La morfología, a grandes rasgos, corresponde a un domo alargado según la dirección N-S, con un contorno aproximadamente elíptico de 25 x 15 km. y rodeado en su mayor parte por materiales de baja permeabilidad.

El acuífero se localiza, más exactamente, en calizas y dolomías liásicas de gran potencia (más de 800 metros), intensamente fracturadas y karstificadas.

La posición y profundidad del sustrato impermeable está sin determinar en la actualidad.

Los aliviaderos naturales del sistema están situados en sus bordes septentrional y meridional, a cota aproximada de 500 y 700 metros respectivamente.

La divisoria hidrogeológica (cuenca Atlántica-Mediterránea), se sitúa, dentro de este macizo, en diferente posición, en función de los aportes pluviométricos, pero siempre en las proximidades de Zafarraya, a unos 20 km. del límite septentrional y a 5 km. del meridional.

#### 2. CIRCULACION KARSTICA Y FUNCIONAMIENTO

En el karst de Sierra Gorda, el zócalo impermeable está posiblemente constituido por materiales triásicos, de facies Keuper, pero su posición, por el momento, queda indeterminada. Sin embargo, consideraciones de tipo estratigráfico e hidroquímico, fundamentalmente, inducen a atribuirle una profundidad elevada.

El drenaje natural del macizo kárstico se efectúa por varios puntos dispersos, situados en su periferia y, probablemente, de forma difusa a través de los materiales cuaternarios, hacia los cursos superficiales que discurren por el Norte (rio Genil y sus tributarios); el nivel de base del macizo está en relación con el de las aguas de estos ríos, y se sitúa a cota 450 m.

Las surgencias más importantes se localizan en el borde septentrional a una cota próxima a los 530 metros y supone el 95 % de la descarga conocida del sistema. En el borde meridional la surgencia de más entidad está situada a 700 metros.

La circulación subterránea, en el interior del macizo, se efectúa principalmente a través de fracturas y conductos kársticos de trazado irregular, los cuales son responsables de la acusada anisotropía y heterogeneidad presentes en el acuífero. El estudio de niveles piezométricos, ensayos con trazadores y los análisis hidroquímicos (DELGADO MOYA, 1973 e HIDALGO RUIZ, 1974), han evidenciado circulaciones preferenciales según las directrices que marcan los sistemas de fracturas N 20° E - N 40° W.

Los estudios de piezometría (Agosto de 1969; recogidos por HIDALGO RUIZ, 1974), demuestran que a partir de la zona de alimentación que supone el polje de Zafarraya, la circulación se produce

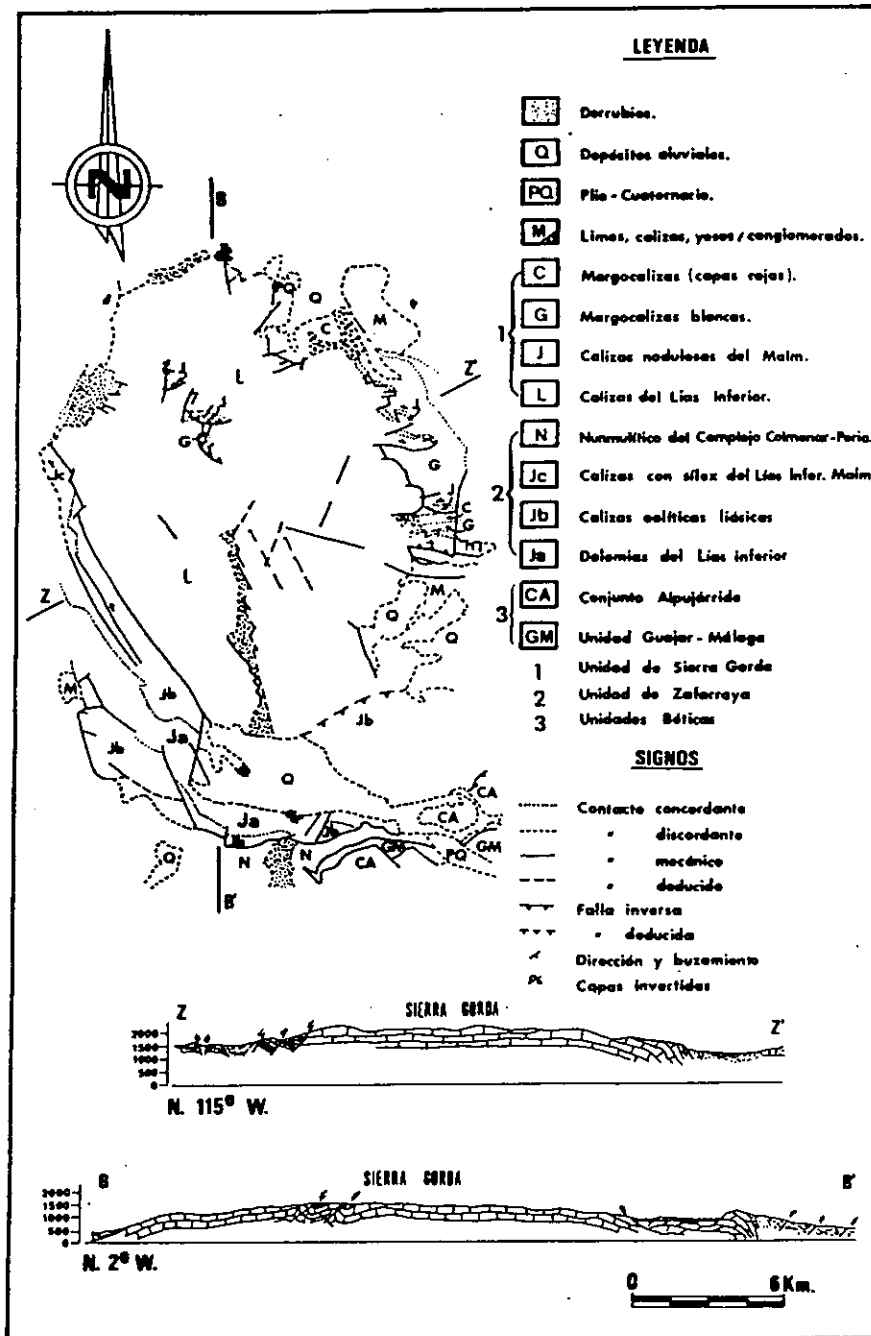


Figura 3. Plano y cortes geológicos

## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)

fundamentalmente hacia el Norte (área de Riofrío, situada a 20 km), con un gradiente hidráulico del 1'65%; mientras que la circulación hacia el Sur (manantial del río Guaro, a 5 km) es bastante menor, produciéndose con un gradiente hidráulico del 3'40%.

zados.

A continuación, y a partir del inventario de los autores antes mencionados, definimos los seis grupos principales de manantiales existentes, cuyas aportaciones totalizan más del 90% de las salidas conocidas.

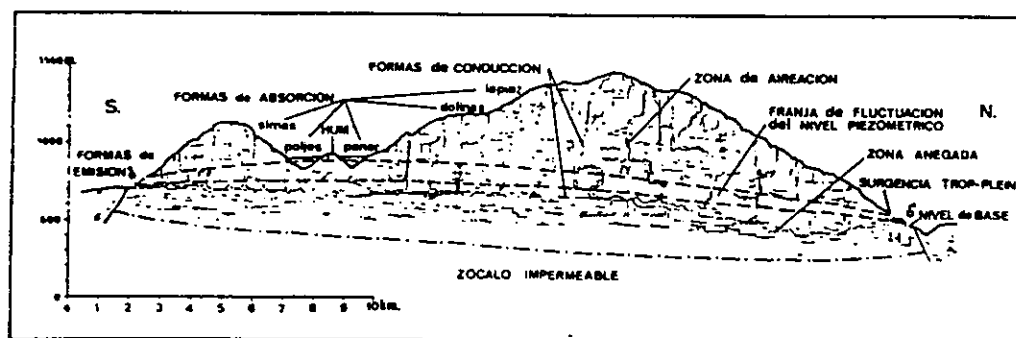


Figura 5. Esquema resumen de las características morfológicas e hidrogeológicas del embalse subterráneo de Sierra Gorda

La divisoria hidrogeológica, deducida de la piezometría, es la que se señala en la figura 4.

Es necesario señalar que no existe relación alguna entre la divisoria hidrográfica (situada en el tercio septentrional de Sierra Gorda), y la hidrogeológica, que delimita, en este caso, el flujo de las aguas subterráneas hacia dos grandes cuencas (cuenca Atlántica al Norte y cuenca Mediterránea al Sur), y que se sitúa en el polje de Zafarraya.

En la figura 5 se presenta un esquema hidrogeológico del acuífero de Sierra Gorda, donde puede observarse, en un corte N-S, la situación de ambas divisorias.

### 3. PRINCIPALES SALIDAS

DELGADO MOYA *et al.* (1974), realizaron un inventario de las principales surgencias del acuífero de Sierra Gorda (figura 4) y cuantificaron las salidas, en 111 Hm<sup>3</sup>/año, a partir de los aforos reali-

Grupo de Riofrío. Las surgencias son varias y próximas entre sí; todas ellas están controladas por fracturas, en algunas de las cuales el agua sale a presión (río Espuma), y en muchos casos es posible observar fenómenos de "trop-plein". En época de estiaje decrece el caudal y ciertas grietas (las más altas) quedan secas. En este grupo estarían incluidos también los manantiales de Loja.

Grupo de manantiales Vauciasianos. Al igual que en el caso anterior, las surgencias están controladas por fracturas, aunque en este caso los manantiales sólo guardan relación con las calizas jurásicas. Se han inventariado dos manantiales de este tipo: Cadenas y Borbollote.

Grupo de Manzaniil. El agua surge en el contacto de calizas con materiales postorogénicos, generalmente a favor de fracturas. Junto al grupo de Riofrío es el más importante, en cuanto a descarga, de los existentes.

Grupo del Terciado. La surgencia se localiza en el contacto, por falla, de las

calizas del Jurásico superior con las arcillas del Mioceno.

Fuente del cortijo de Pitas Dedil. Está situada al ESE de Sierra Gorda y aparece en el contacto de calcarenitas del Mioceno con materiales jurásicos y cretácicos.

Grupo del Guaro. Son los manantiales situados en la vertiente Sur (cuena Mediterránea). Las surgencias se localizan en el contacto de las calizas jurásicas con los materiales flyschoides del Complejo Colmenar-Periana.

#### 4. HIDROGRAMAS

Con los datos de aforos, correspondientes a medidas mensuales de caudal, en las principales surgencias de Sierra Gorda, se ha trazado el "hidrograma" suma de ambas vertientes (DELGADO MOYA et al., 1974. Figura 6). Sobre la misma figura, se muestra la pluviometría registrada en dos estaciones, una situada

en el borde Norte de la sierra y otra cercana del límite meridional. El contraste de ambos registros evidencia una respuesta rápida del acuífero ante el estímulo pluviométrico, como cabía esperarse de un acuífero kárstico.

En el periodo comprendido entre octubre de 1968 y 1972, se obtuvo un valor de descarga total máxima equivalente a 10 m<sup>3</sup>/s., para el mes de enero de 1970 y un valor mínimo de 1 m<sup>3</sup>/s., para noviembre de 1968. La integración de los valores obtenidos para el "hidrograma" da un valor de salidas totales para Sierra Gorda 111 Hm<sup>3</sup>/año.

#### 5. CARACTERISTICAS HIDROGEOQUIMICAS

Las aguas del acuífero de Sierra Gorda poseen facies, en general, bicarbonatada cálcica, aunque pueden surgir modificaciones de carácter local, y llegar a ser sulfatada cálcica, como consecuencia

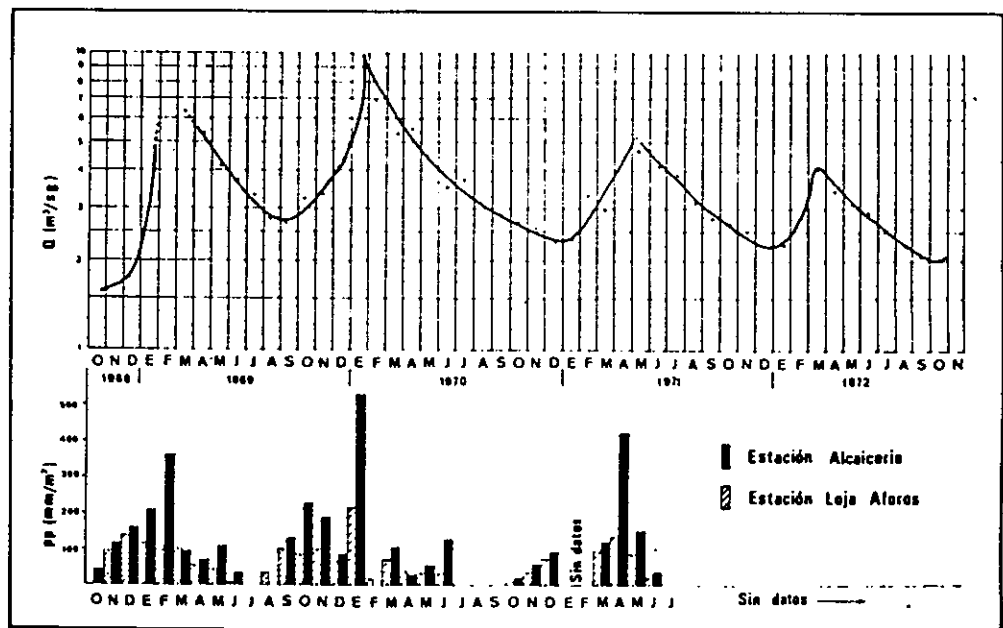


Figura 6. Hidrograma total, suma de las principales surgencias de Sierra Gorda.

## SINTESIS HIDROGEOLOGICA DE SIERRA GORDA (GRANADA)

de la influencia del Trias de facies Keuper (salidas del río Salado, en Riofrío).

El residuo seco oscila, normalmente, entre 200 y 400 mg/l.; mientras que la conductividad eléctrica, a 25° C, varía entre 300 y 700 micromhos/cm.

### 6. BALANCE HIDRICO

Si la unidad hidrogeológica está individualizada, es decir, no cede ni recibe aportaciones de otras unidades vecinas (como es el caso del acuífero de Sierra Gorda), la expresión del balance deberá ajustar, equilibradamente, la recarga por pluviometría, con la descarga por los manantiales y obras de captación.

Los componentes del balance, en este caso, son:

Entradas (E): Infiltración eficaz ( $I_e$ ) = precipitación (P = 240 Hm<sup>3</sup>/año) - evapotranspiración ( $E_v$  = 132 Hm<sup>3</sup>/año) = 108 Hm<sup>3</sup>/año.

Salidas (S): Descarga por manantiales (D) = 111 Hm<sup>3</sup>/año.

### 7. CONCLUSIONES

- Sierra Gorda constituye una unidad hidrogeológica individualizada, cuyo material acuífero lo forman fundamental-

mente calizas jurásicas intensamente fracturadas y karstificadas.

- Los principales puntos de drenaje se ubican en el borde septentrional, donde el nivel de base lo imponen los ríos Genil y afluentes. También se drena este acuífero por la vertiente Sur de la sierra, aunque la importancia de los caudales es menor, en virtud de su más elevada cota topográfica.

- La dirección preferencial del flujo subterráneo se efectúa, en consecuencia, hacia el Norte, con un gradiente del 1'65%. El gradiente hacia el Sur está próximo al 3'40%.

- La divisoria hidrogeológica se localiza en el polje de Zafarraya, o en sus inmediaciones, mientras que la divisoria hidrográfica está situada en el tercio septentrional de la sierra.

- La escorrentía superficial es prácticamente nula.

- El balance hídrico aproximado es el siguiente:

Precipitación	P = 240 Hm <sup>3</sup> /año
Evapotranspiración real E	= 132 Hm <sup>3</sup> /año
Infiltración	I = 108 Hm <sup>3</sup> /año
Salidas por surgencias V	= 111 Hm <sup>3</sup> /año

Así pues:

$$P - E = V \pm C$$

donde C representa las salidas (+) o las entradas (-) no controladas.

### BIBLIOGRAFIA

Gvižic, J. (1960). La géographie des terrains calcaires. Acad. Serbe Sciences Arts. CCCXLI, 212 p. Belgrado.

Delgado Moya, S. (1973). Estudio hidrogeológico del karst de Sierra Gorda (Granada). Tesis de Licenciatura Univ. Granada. Mem. inéd. 99 p.

Delgado Moya, S.; Hidalgo Ruiz, J.; Fernandez-Rubio, R. y Del Valle Cardenete, M. (1974). Características hidrogeo-

lógicas del embalse subterráneo de Sierra Gorda (Granada). V. Coloquio de Investigaciones sobre el Agua. San Sebastián.

García Dueñas, V. (1967). Unidades paleogeográficas en el sector central de la Zona Subbética. Not. Com. Inst. Geol. Min. España. I. 101-102. pp.73-100.



ILDEFONSO MORENO CALVILLO Y ANTONIO CASTILLO MARTIN

- García Dueñas, V. (1969). Consideraciones sobre las series del Subbético Interno que rodean la depresión de Granada (Zona Subbética). Acta. Geol. Hisp. IV nº I pp. 9-13.
- Göze, B. (1968). La espeleología científica. Edt. Martínez Roca. 192 p. Barcelona.
- Hidalgo Ruiz, J. (1974). Estudio hidrogeológico del polje de Zafarcaya, y áreas adyacentes (Granada y Málaga). Tesis de Licenciatura Univ. Granada. Mem. Inédita. 165 p.
- Linares, A.; Vera, J.A. (1966). Precisiones estratigráficas sobre la serie mesozóica de Sierra Gorda. Cordilleras Béticas (Granada). Est. Geol. XXI: pp. 65-69. Madrid.
- Llopis Llado, N. (1970). Fundamentos de hidrogeología kárstica. Edit. Blume 269 p. Barcelona.
- McGrain, P. (1948). An example of lapie in the Indiana karst region. Acad. Scienc. 57. pp. 148-152. Indiana.
- Vera, J.A. (1966). Estudio geológico de la Zona Subbética en la transversa de Loja y sectores adyacentes. Tesis Doctoral Univ. Granada. (In Memoria Inst. Geol. y Min. de España. LXXI (1969). Madrid).