

# **ESTUDIO HIDROGEOLOGICO DEL SECTOR MOJA-CAYELLES-PLA DE JORBA-CASTELLET, DEL MACIZO CALCAREO DE GARRAF (BARCELONA)**

## **Resumen**

### **1. Introducción y antecedentes**

### **2. Situación y características del Sistema Acuífero**

### **3. Hidrogeoquímica**

#### **3.1. Distribución de los puntos de toma de muestras y determinaciones efectuadas**

#### **3.2. Características físico-químicas del agua**

### **4. Intrusión marina**

## **Conclusiones**

## **Bibliografía**

## TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros

Almuñécar (Granada, España). 1988

### ESTUDIO HIDROGEOLOGICO DEL SECTOR MOJA-CANYELLES-PLA DE JORBA-CASTELLET, DEL MACIZO CALCAREO DEL GARRAF (BARCELONA)

Montserrat CARBONELL (1) (2)

Magaly KOCH (1)

William TERAN (1)

Manuel PASCUAL (3) (1)

Emilio CUSTODIO (1) (4)

- (1) Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.
- (2) Centro de Estudios e Investigación del Agua. Barcelona.
- (3) Junta de Aguas de la Generalitat de Cataluña. Lérida.
- (4) Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, Puertos y Canales. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

#### RESUMEN

El sector situado en el extremo SW. del Macizo de Garraf, presenta una importante intrusión marina que afecta, en forma de digitación, a captaciones situadas hasta 8 km al interior.

Se han realizado determinaciones de temperatura y pH in situ que han permitido diferenciar entre niveles colgados y el nivel piezométrico regional.

A partir de los análisis químicos efectuados en 10 pozos, y en base a la interpretación hidroquímica establecida mediante el programa WATEQF, se analiza el comportamiento del agua de mezcla respecto a la teoría propuesta por Hanshaw y Back, a cerca del probable carácter subsaturado respecto a calcita y dolomita del agua de mezcla de dos aguas con diferente salinidad, pero ambas sobresaturadas en minerales carbonatados.

#### 1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

El Macizo de Garraf constituye una unidad estructural situada en el extremo W de la Cordillera Litoral Catalana. Formado, casi en su totalidad, por materiales jurásicos y cretácicos, comprende un complejo mosaico de bloques fracturados que pierden progresivamente altura en dirección SW, y en los que se ha instalado un importante sistema cárstico.

La zona de estudio constituye un sector de la prolongación SW del Macizo de Garraf, con un área aproximada de 150 km<sup>2</sup>.

La existencia de fuertes extracciones para el abastecimiento de las poblaciones, fundamentalmente situadas en la zona litoral, cuyo abastecimiento se realiza casi exclusivamente a

partir del acuífero en estudio, han dado lugar a una importante intrusión marina.

El objetivo fundamental del presente trabajo ha sido el estudio de la evolución espacial y temporal, así como las características de esta importante intrusión marina.

Los principales trabajos existentes son de carácter regional (2,3,5,6,7,8 y 10, entre otros), excusando los de carácter local relacionados con la zona estudiada (11,12).

Un primer inventario de captaciones y un esquema de la dinámica del acuífero se recogen en el "Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales del Pirineo Oriental. Zona Sur, Informe 1. Garraf, Penedès, Gaià" de CAPO y SGOP (1970) (10).

Posteriormente, con el estudio sobre la "Metodología y Resultados del Estudio Hidrogeológico del Macizo cárstico de Garraf" (2), se establecieron los conocimientos hidrogeológicos actuales referentes al sector NW del Macizo.

Es necesario resaltar la importancia que tiene el "Estudio Hidrogeológico del Macizo de Garraf" del Plan Hidrológico del Pirineo Oriental de 1985 (5), como actualización y síntesis de toda la información existente.

## 2. SITUACION Y CARACTERISTICAS DEL SISTEMA ACUIFERO

El sector en estudio queda comprendido entre las poblaciones de Sant Pere de Ribes y Castellet (en dirección E-W), y entre Moja y el Mar Mediterráneo (en dirección N-S).

El sistema acuífero, constituido por materiales carbonatados jurásico-cretácicos, está geológicamente limitado, en su margen septentrional, por un sistema de fracturas de dirección SW-NE que lo pone en contacto con los materiales miocenos de carácter marino (conglomerados, arcillas, margas y arenas) de la Depresión del Penedès (fig. 1).

En el extremo S, los materiales jurásico-cretácicos aparecen afectados por una fractura principal en dirección NE-SW, y por una serie de fallas de menor importancia, que limitan la Subdepresión de Sant Pere de Ribes, donde discordantemente sobre los materiales carbonatados se dispone una cobertera miocena, en su mayoría de origen marino (calcarenitas, arenas y calizas).

El sistema cárstico se ha implantado a partir de la red de fracturas originadas por la orogenia Alpina y que está constituida por un sistema de fallas alineadas en dirección NE-SW, a las que se encuentran asociadas otras perpendiculares de origen secundario.

La hidrodinámica del sistema responde a una circulación que proveniente del NE aprovecha las fracturas ortogonales para descargar al mar.

Se distinguen dos sistemas de circulación: uno rápido que se desarrolla generalmente en la zona no saturada (acuíferos colgados) y un sistema lento en la zona saturada (8).

La alimentación se realiza esencialmente por infiltración directa del agua de lluvia, estimada en  $9,5 \text{ hm}^3/\text{año}$  (considerando un área de afloramiento de  $70 \text{ km}^2$ ), dado que la entrada

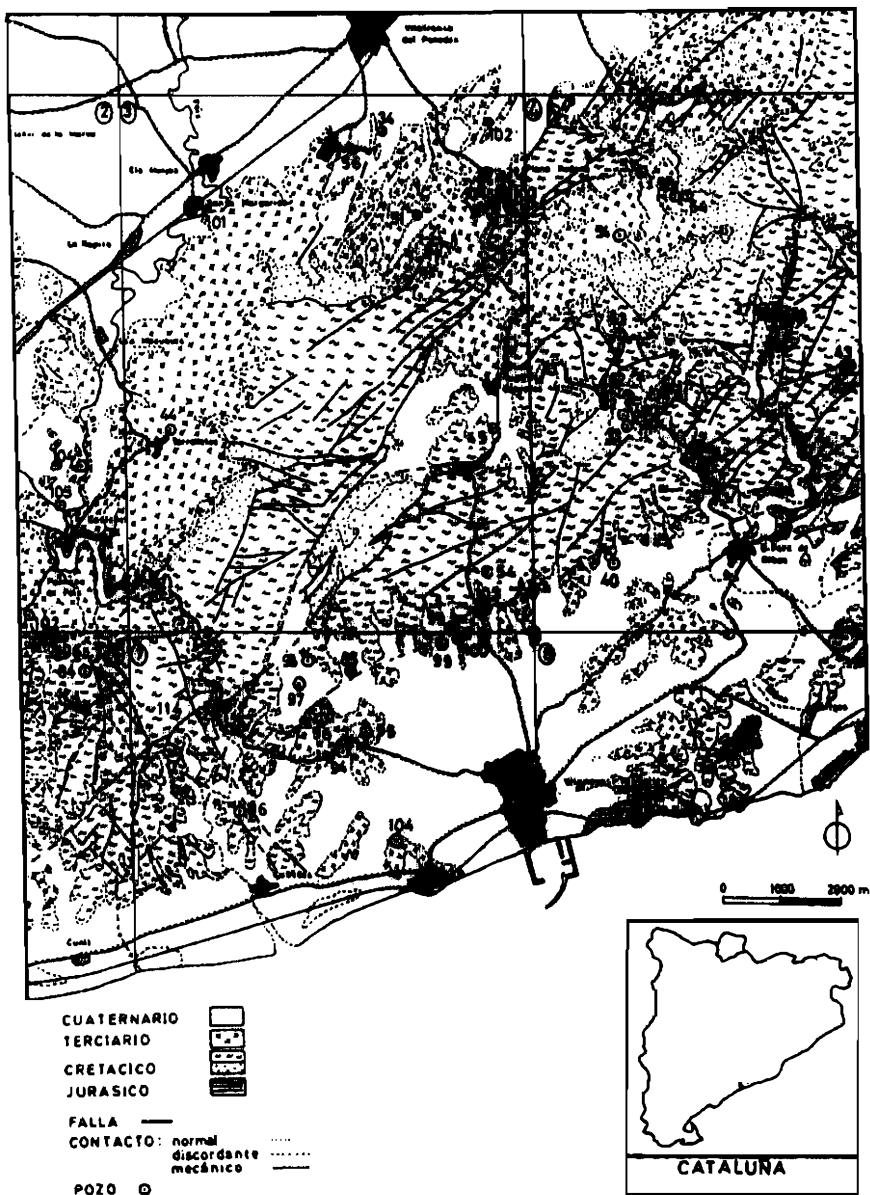


Fig. 1. Marco geológico y situación de los puntos de agua considerados.

subterránea desde la mitad N del macizo, así como desde la Depresión del Penedès, representa sólo unos 1,7 hm/año (12).

El nivel piezométrico regional es discontinuo, pudiendo variar entre unos 20 m sobre el nivel del mar y algún metro por debajo del mismo (5,7).

El drenaje natural se realiza hacia el mar, presetándose esencialmente en épocas de tormentas, cuando los acuíferos colgados, de circulación rápida, descargan por zonas preferentes hacia el mar.

Al tener el macizo esta buena conexión con el mar, está lejos de regular el importante volumen de agua que recibe, y a la hora de cuantificar las reservas, éstas son poco significativas.

La transmisividad es muy variable, estimándose entre unos 50 y 1000 m<sup>2</sup>/día, dependiendo de la zona (12).

### 3. HIDROGEOQUIMICA

#### 3.1 Distribución de los puntos de toma de muestras y determinaciones efectuadas

En el mes de junio de 1987 se realizó un muestreo cuidadoso en 10 puntos de agua, seleccionados según los siguientes objetivos:

- Conocer la variación de la salinidad a lo largo del eje principal de la intrusión, para lo cual se cogieron cuatro muestras (pozos 7-96, 7-100, 3-103 y 3-45) situadas siguiendo dicho eje.

- Determinar el avance de la intrusión marina y tratar de diferenciar posibles acuíferos colgados, para lo que se tomaron seis muestras de agua en pozos ubicados en la parte norte de la zona (pozos 3-101, 3-51, 3-102, 3-100, 3-60, y 3-37).

Por otra parte se disponía de una serie de catorce análisis químicos tomados del PHPO (1985) (5).

Se realizaron mediciones del pH y temperatura in situ, así como análisis químicos de las muestras, con la determinación de conductividad, alcalinidad, dureza y aniones y cationes principales.

#### 3.2 Características físico-químicas del agua

Los diagramas hidroquímicos (Schoeller-Berkaloff, Piper-Hill-Langelier y Stiff modificados; figs. 2, 3 y 4) ponen de manifiesto la existencia de dos grupos principales de aguas:

a) Aguas de facies clorurada sódica, mayoritariamente salobres (residuo seco entre 1673,7 mg/l y 4384,2 mg/l) y muy duras (contenidos entre 536 y 1544 mg/l de CO<sub>3</sub>Ca).

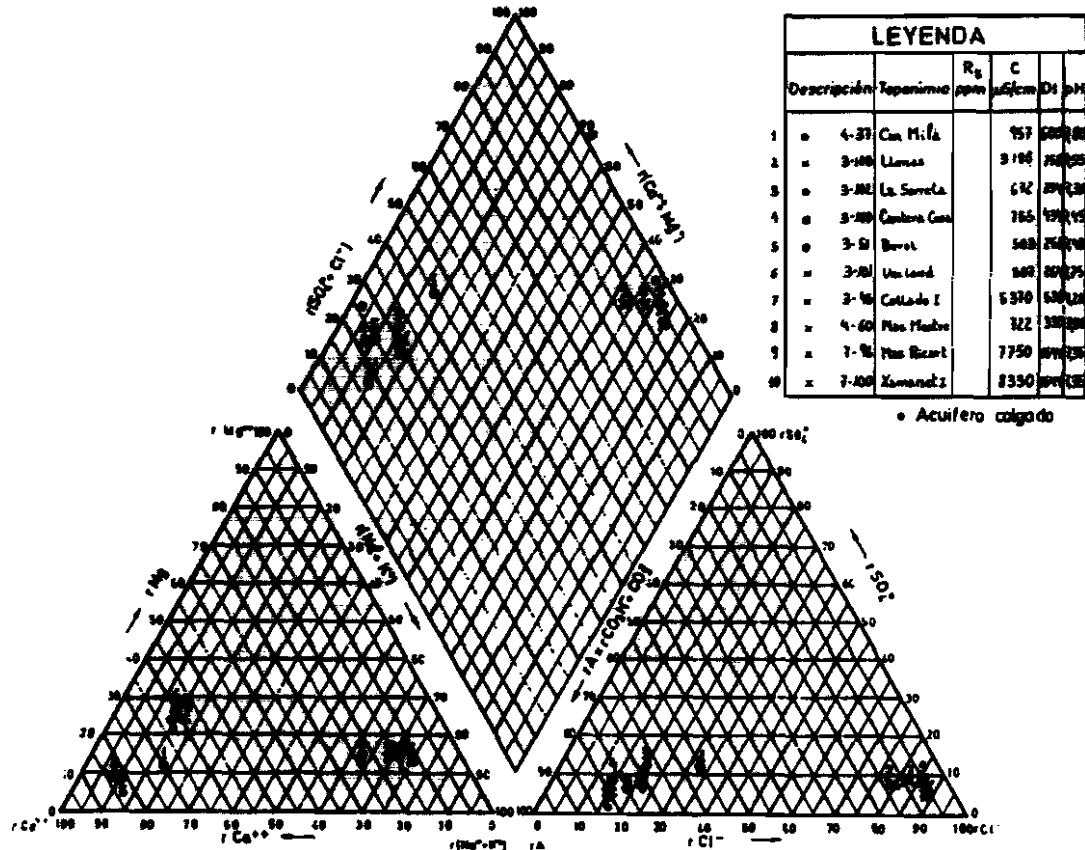


Fig. 2. Diagrama triangular de Piper-Langelier.

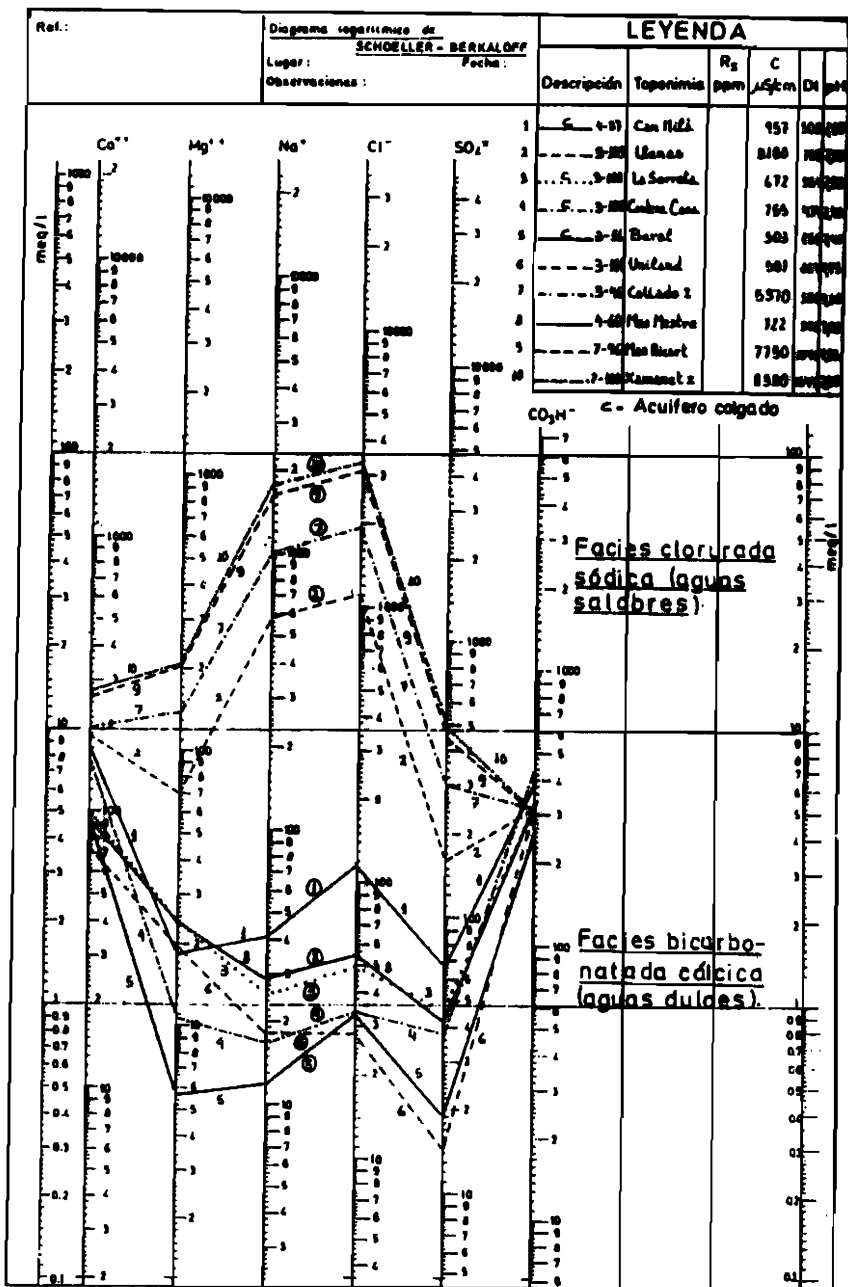


Fig. 3. Diagrama logaritmico de Schoeller-Berkaloff.

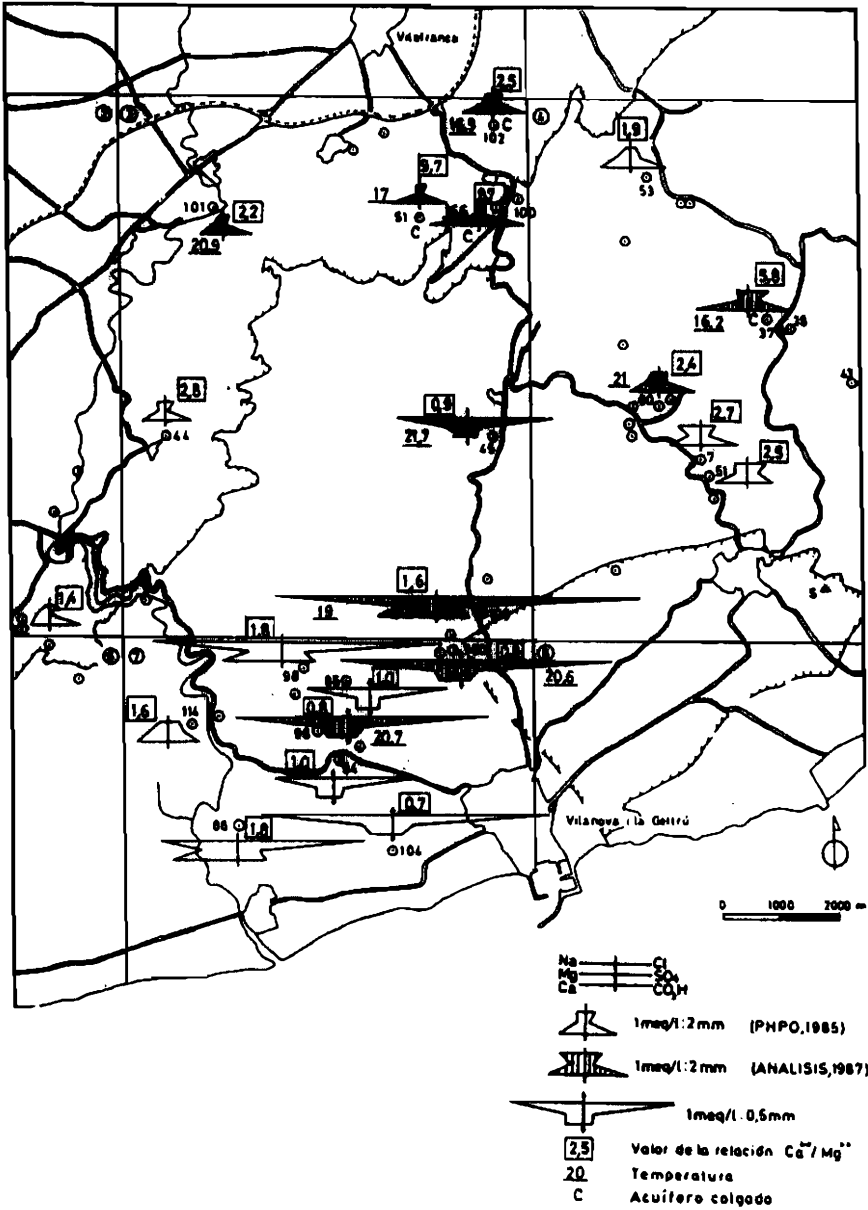


Fig. 4. Mapa de diagramas de Stiff modificados.



Situadas en la zona más próxima al litoral, y que serán tratadas más ampliamente en el apartado de intrusión marina.

b) Aguas de facies bicarbonatadas cálcicas, dulces y muy duras (aunque con contenidos más moderados que las anteriores: entre 256 y 500 mg/l de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, se han podido diferenciar pozos (4-37, 3-102, 3-51, 3-100) que explotan acuíferos colgados y pozos que explotan el acuífero regional, diferenciados a priori principalmente a partir de datos piezométricos.

Se observa que las aguas de carácter regional presentan una relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  con valores alrededor de 2, mientras que las de acuíferos colgados muestran valores mucho más elevados (entre 6 y 10) (fig. 4).

Esta misma distinción ha sido observada en las mediciones de temperatura en el campo. Las aguas pertenecientes a niveles colgados tienden a presentar una temperatura menor (del orden de 16,5 °C), en la época del muestreo (principios de junio), que las del nivel regional (del orden de 20 °C) (fig. 5).

No existe una correlación clara entre el pH (con valores de 7,13 a 7,97) y un determinado tipo de acuífero.

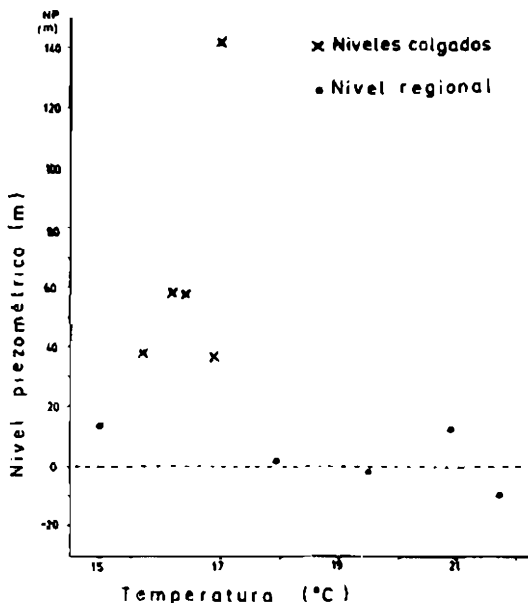


Fig. 5. Diagrama: Niveles piezométricos-Temperatura.

#### 4. INTRUSION MARINA

Existe en la zona estudiada una importante intrusión marina, que llega a afectar pozos situados a unos 8 km tierra adentro (fig. 6), distancia a la que se sitúa una de las principales captaciones de abastecimiento.

Dicha intrusión ha ido penetrando progresivamente, en forma de digitación, a partir de los años 70, época en que comenzaron fuertes extracciones en el área (5).

El mapa de isocloruros (fig. 6) muestra claramente la tendencia de la intrusión a penetrar según una dirección NNE-SSW, observándose contenidos en  $Cl^-$  entre 1000 y 4000 mg/l en las zonas de mayor bombeo.

El avance de la intrusión marina es menos acusado a ambos lados de la digitación, debido, por una parte, a las pérdidas por infiltración del embalse de Foix, situado en el lado W, y por otra parte, a la existencia de la Depresión de Sant Pere de Ribes, que con materiales detríticos no permite un avance tan rápido. También contribuye el hecho de que los materiales cretácicos que actúan de zócalo en la parte central de la depresión, se encuentran probablemente por debajo de su nivel de base de carstificación (12).

Una comparación entre la situación actual de la penetración marina y la observada en 1985 (5), refleja un aumento de la salinización en dirección NNE, conjuntamente con una ampliación lateral de la digitación hacia el E, sin olvidar que en los pozos pueden presentarse variaciones importantes de salinidad en cortos periodos de tiempo, en función de la intensidad y duración de los bombeos.

Este hecho, así como la forma de las isolíneas de  $Cl^-$ , parecen indicar una disposición de la interfaz más o menos plana, con conos ascendentes bajo los pozos de mayor bombeo (7), de forma que el incremento de salinización está en función del régimen de extracciones, de la profundidad de los pozos y de la ubicación de las captaciones en zonas preferentes de circulación.

Se estudió el comportamiento del agua de mezcla respecto a la teoría propuesta por Hanshaw y Back (1979) -citado en (6)-, según la cual, cuando dos tipos de aguas de diferente salinidad, pero ambas saturadas respecto a minerales carbonatados, se ponen en contacto, el resultado en un intervalo dado de la zona de mezcla es, generalmente, un agua subsaturada respecto a la calcita y dolomita.

La interpretación hidroquímica fue elaborada mediante el programa WATEQF (9), obteniendo los índices de saturación respecto a la calcita, aragonito y dolomita.

Los resultados obtenidos demuestran (fig. 7) una tendencia del índice de saturación (IS) respecto a la calcita y aragonito de las aguas de mezcla, a aproximarse a la línea de equilibrio al ir aumentado el contenido en  $Cl^-$  hasta valores de unos 2000 mg/l, a partir de los cuales vuelve a aumentar el índice de saturación, llegando únicamente el IS del aragonito a descender por debajo de dicha línea.

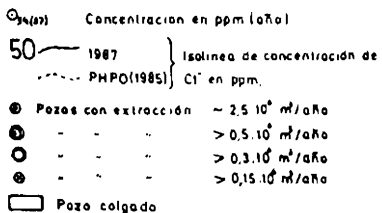
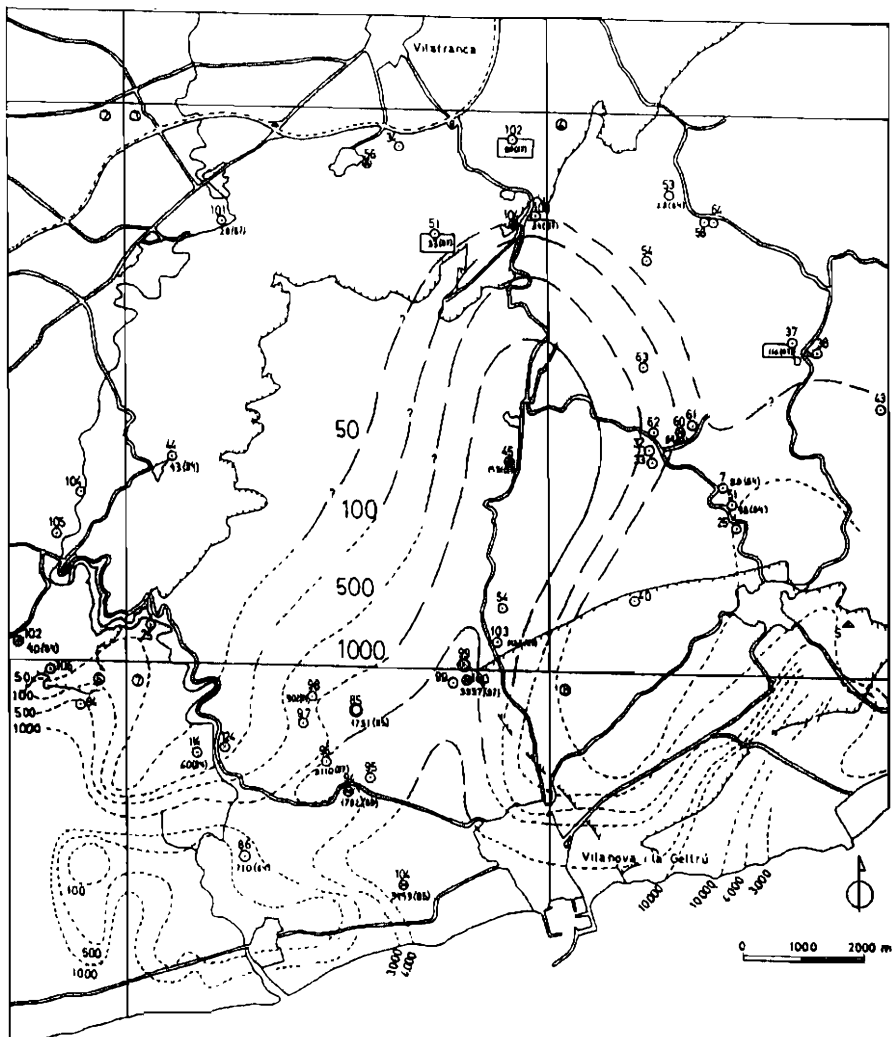
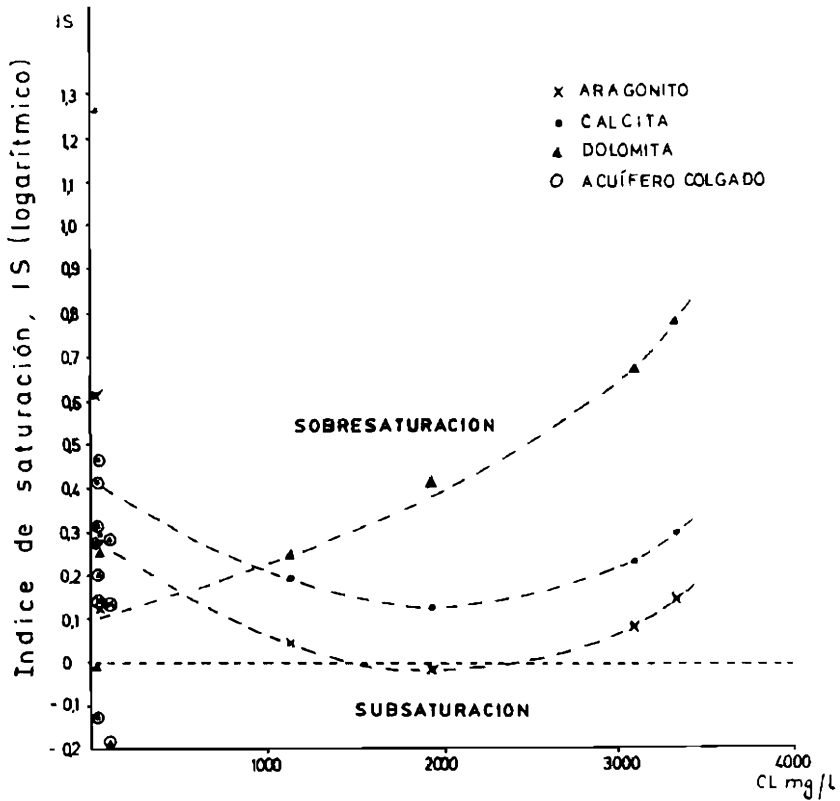


Fig. 6. Mapa de isocloruros.

Fig. 7. DIAGRAMA DE RELACION IS-CI<sup>-</sup>



Este comportamiento, sin embargo, no es seguido por el IS de la dolomita, que aumenta progresivamente al incrementar los cloruros.

Existe un acercamiento al equilibrio del IS respecto de calcita y aragonito, al ir aumentando la temperatura (fig. 8). Así, las aguas regionales se encuentran más cerca del equilibrio respecto a estos minerales que las aguas pertenecientes a acuíferos colgados.

En cuanto a la dolomita, no se observan relaciones claras de T (°C)/IS; únicamente cabe destacar que las aguas de los niveles colgados (menor temperatura) se sitúan, en su mayoría, en el campo de la subsaturación.

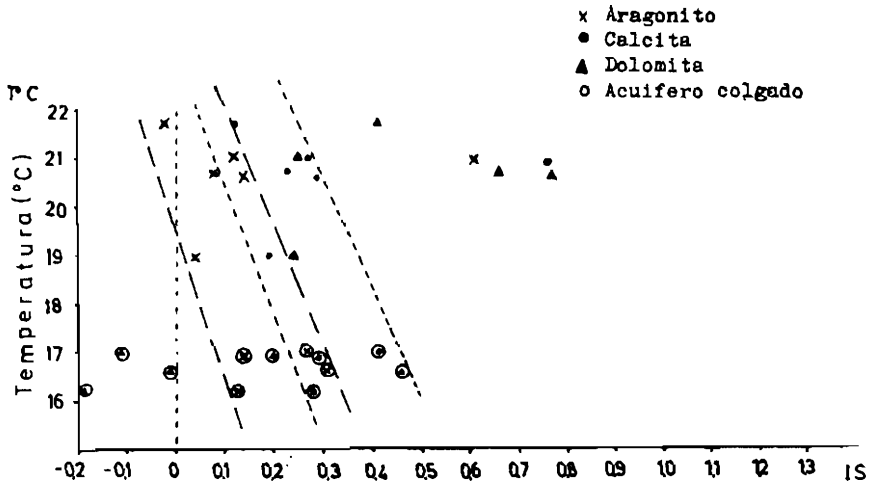


Fig. 8 Diagrama de relación  $T^{\circ}$  - IS

La variación conjunta de las relaciones  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$  y  $rSO_4^{2-}/rCO_3H_4$  conforme aumenta la salinidad es un buen indicador de la evolución del progreso de salinización (4). Como se observa en los diagramas de Stiff modificados (fig. 4), se distinguen dos tipos de aguas salobres, correspondientes posiblemente a diferentes estadios de intrusión:

- El 1er. grupo corresponde a un estadio más incipiente ( $Ca^{2+} > Mg^{2+}$ ,  $CO_3H_4 < SO_4^{2-}$ ): pozos 3-103, 7-86, 7-98.
- El 2º grupo responde a un estadio más avanzado ( $Ca^{2+} < Mg^{2+}$ ,  $CO_3H_4 < SO_4^{2-}$ ): pozos 7-100, 7-85, 7-96, 7-94, 7-104, 3-45.

Con el fin de estudiar el proceso de mezcla de las aguas a lo largo del eje principal de la intrusión, se han realizado gráficas (fig. 9, 10 y 11) que relacionan los iones  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{2+}$  con el contenido del ión  $Cl^-$ , comparándolas con las curvas de mezcla teórica establecidas para el Macizo de Garraf (6).

En la gráfica (fig. 9) que relaciona el ión  $Ca^{2+}$  con el ión  $Cl^-$ , se aprecia un exceso notable del  $Ca^{2+}$  con respecto a la curva de mezcla teórica. Esto concuerda con los resultados obtenidos con el programa WATEQF (sobresaturación en minerales carbonatados).

Dicho exceso puede ser debido a anteriores periodos, posiblemente estacionales (verano), en los que ha existido subsaturación, con la consiguiente disolución de calcita y aragonito, hasta alcanzar de nuevo el equilibrio o la sobresaturación.

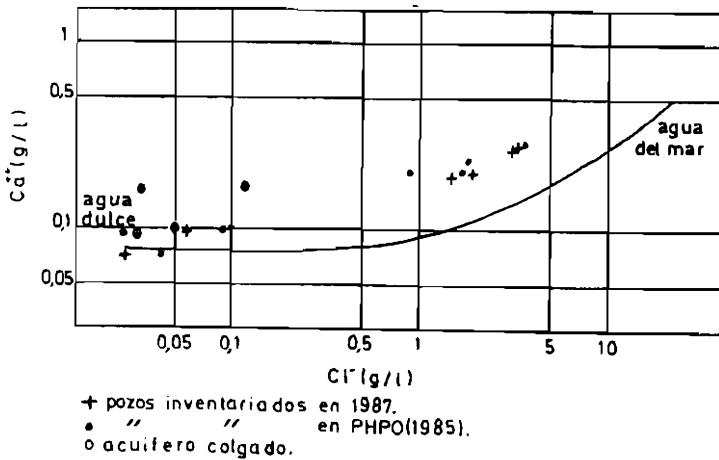


Fig. 9. Relación entre  $\text{Ca}^{2+}$  -  $\text{Cl}^{-}$  respecto a la curva de mezcla teórica.

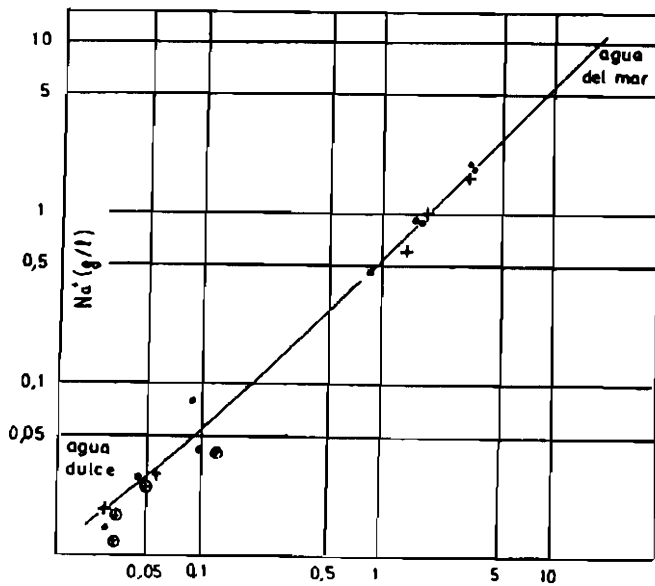


Fig. 10. Relación entre  $\text{Na}^{+}$  -  $\text{Cl}^{-}$  respecto a la curva de mezcla teórica.

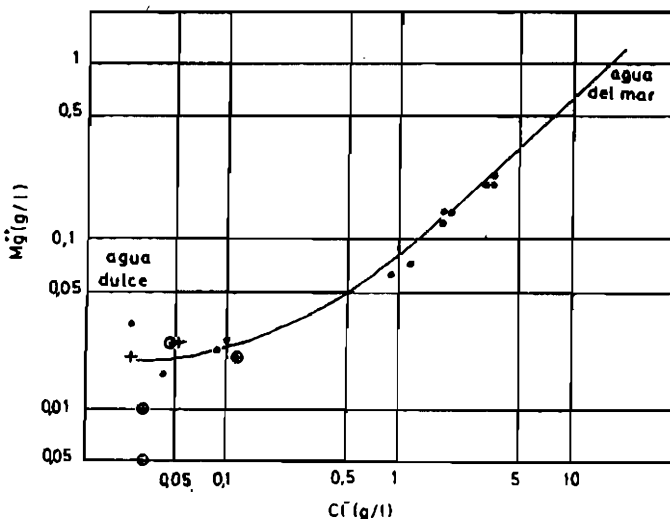


Fig. 11. Relación entre  $Mg^{2+} - Cl^{-}$  respecto a la curva de mezcla teórica.

Por el contrario, las aguas de mezcla se sitúan perfectamente alineadas según la curva de mezcla teórica en los casos del  $Na^{+}$  y  $Mg^{2+}$  (figs. 10 y 11).

A falta de un tratamiento de los datos más exhaustivo, no se refleja la existencia de un intercambio iónico que sí existe en otras áreas del macizo (6).

### CONCLUSIONES

Según lo expuesto anteriormente, las principales conclusiones del presente estudio son las siguientes:

- La intrusión marina presenta una digitación que penetra unos 8 km hacia el interior. Su avance está favorecido por la existencia de una fractura o sistema de fracturas de dirección aproximada NNE-SSW. El sistema posiblemente sea del tipo La Falconera o Agua Dolç, situadas al NE de la zona de estudio (3). Pero a diferencia de estas surgencias más o menos permanentes, y debido a las fuertes extracciones a lo largo de su recorrido, presenta un caudal de base prácticamente nulo. Las esporádicas descargas al mar se realizan solamente en épocas de tormenta.
- El agua de mezcla presenta una sobresaturación respecto a la calcita, aragonito y dolomita. Observándose una tendencia a la subsaturación (sin llegar a aguas netamente sub-

saturadas) en calcita y aragonito al ir aumentando el contenido en  $Cl^-$ , hasta valores de unos 2000 mg/l de  $Cl^-$ , a partir de los cuales vuelve a aumentar el índice de saturación.

La actual sobresaturación puede deberse a anteriores periodos estacionales (verano), en los que ha existido subsaturación. Por lo tanto existiría en la zona de mezcla una alternancia en las condiciones de sobresaturación-sub-saturación, coincidiendo probablemente con periodos estacionales en los que dominarían unos determinados procesos, pudiendo llegar a la precipitación o carstificación.

- Las aguas de carácter regional presentan una relación  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  del orden de 2 y una temperatura relativamente elevada (unos 20 °C), mientras que las aguas de los acuíferos colgados aparecen con una relación  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  entre 6 y 10, y una temperatura diferente, que en el momento del muestreo era del orden de 16,5 °C.
- La variación conjunta de las relaciones  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$  y  $rSO_4^{2-}/rCO_3H$  a medida que aumenta la salinidad, permite distinguir aguas salobres correspondientes a diferentes estadios de intrusión.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) CARBONELL, M., KOCH, M. y TERAN, W. (1987). "Estudio hidrogeológico del sector Moja-Canyelles-Pla de Jorba-Castellet, del Macizo calcáreo del Garraf (Barcelona)". XXI Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 48 pp. 5 mapas. 16 figs.
- (2) CUSTODIO, E. (1975). "Metodología y Resultados del Estudio Hidrogeológico del macizo kárstico de Garraf. Barcelona". Boletín Geológico y Minero. Madrid. Vol. 76-1. pp. 31-44.
- (3) CUSTODIO, E. y GALOFRE, A. (1976). "Evolución de la calidad del agua en la surgencia litoral de La Falconera en relación con un gran vertedero de basuras en el macizo de Garraf (Barcelona)". II Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, Barcelona 1976. Instituto Geográfico y Catastral. Madrid. p. 2131-2173.
- (4) CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. (1983). Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Barcelona. Ed. Omega, S.A.
- (5) CUSTODIO, E.; PASCUAL, M.; ALOM, A.; y BAYO, A. (1985). "Estudio hidrogeológico del macizo de Garraf". Plan Hidrológico del Pirineo Oriental (PHPO). Dir. Gral. Obras Hidr. M.O.P.U. Barcelona. 151 pp. 11 mapas
- (6) CUSTODIO, E.; PASCUAL, M.; BOSCH, X. y BAYO, A. (1986). "Sea water intrusion in coastal carbonate formations in Catalonia, Spain". Proceedings 9th SWIM. Delft, 1986. p. 147-164.



- (7) PASCUAL, M.; BOSCH, X.; CUSTODIO, E.; IRIBAR, V.; y BAYO, A. (1986). "Intrusión marina en calizas costeras: aplicación a Garraf Sur y Vandellós (Catalunya)". Karst. Euskadi. p. 13.
- (8) PASCUAL, M.; BOSCH, X.; CUSTODIO, E.; IRIBAR, V.; y BAYO, A. (1986). "Los acuíferos mixtos abiertos costeros: ejemplo de aplicación de la tipología de acuíferos de Garraf y de Vandellós (Catalunya)". II Simposio sobre el Agua en Andalucía. Granada. Vol. II, pp. 103-112.
- (9) PLUMER, L.; JONES, B. y TRUESDELL, A. (1984). Wateqf - a fortran IV versión of wateq, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. U.S. Geological Survey. Water - Resources Investigations 76 - 13.
- (10) REPO (1970). "Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales del Pirineo Oriental: Zona Sur, S-1, Informe Garraf-Penedés-Gaià". Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental. Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona. 3 Vols. pp.183 52 pl.
- (11) SOLER, X. y TRILLA, J. (1979). "Contaminación marina y continental en un carst costero (terminación SO. del Macizo de Garraf. Barcelona)". Tecniterrae. "S-170".
- (12) SOLER, X. (1984). "Dinámica de la circulación y control estructural en el acuífero cárstico del Macizo de Garraf (sector SW)". Tecniterrae.