

# Algunas consideraciones sobre los procesos de salinización en el acuífero Martíl-Alila (Tetuán, Marruecos)

*Some considerations about the salinization processes in the Martíl-Alila aquifer (Tetouan, Morocco)*

J.Stitou el Messari (\*), J.C. Cerón (\*\*), A. Pulido Bosch(\*\*\*), K.Targuisti (\*) y N. Aoulad Mansour (\*\*\*\*)

(\*) Departamento de Geología. Universidad Abdel Malek-Essaadi. Fac. des Sci. 2121 Tetuán. Marruecos.

(\*\*) Departamento de Geodinámica y Paleontología. Universidad de Huelva. Campus del Carmen. Avda. Fuerzas Armadas s/n. 21071 Huelva.

(\*\*\*) Departamento de Hidrogeología y Q. A. Universidad de Almería. La Cañada. 04120 Almería.

(\*\*\*\*) Laboratoire Régional de l'Environnement. 2121 Tetuán. Marruecos.

## ABSTRACT

*A process of salinization due to marine intrusion has been detected in the detrital coastal aquifer Martíl-Alila, especially in the northern of Martíl city. This intrusion has been caused by local overpumping. Geochemical studies reveals that the chemical characteristics of the analysed waters have their origin in the mixing of three different water components: intruding seawater, freshwater from the rainfall infiltration, and water, coming from border aquifers and with bicarbonate-calcium type. The chemical characteristics of all waters reveal the influence of salinization process caused by intruding seawater.*

**Keys words:** Hydrogeochemistry, salinization, marine intrusion.

*Geogaceta*, 29 (2001), 131-134

ISSN: 0213683X

## Características generales

La plana de Martíl-Alila es una llanura costera de alrededor de 11 km de largo y 8 km de ancho, y con una superficie próxima a 87 km<sup>2</sup>; su altura sobre el nivel del mar varía entre 0 m y 10 m y tiene una pendiente media del 2 %. En ella se asientan las poblaciones de Tetuán y Martíl. Los ríos Martíl y Alila atraviesan los sectores septentrional y meridional de la plana, respectivamente (Fig.1). El funcionamiento del río Alila es esporádico, mientras que el del río Martíl es permanente.

Desde el punto de vista geológico, la plana de Martíl-Alila constituye una llanura aluvial costera dentro del dominio interno de la cordillera Rifeña. Su orientación es paralela a la costa y está limitada al Este por el mar Mediterráneo y al Norte, Sur y Oeste por las colinas paleozoicas. En el ángulo SW, la plana entra en contacto con las rocas carbonatadas de la dorsal caliza.

Los sedimentos pliocuaternarios que forman el relleno de la llanura de Martíl-Alila, y que constituyen el acuífero, son detríticos; en ellos se identifican conglomerados (parte inferior), arcillas (parte intermedia) y arenas y gravas (parte superior). Este relleno se caracteriza por tener frecuentes cambios laterales de facies y de granulometría. Dos campañas de prospección geofísica eléctrica, apoyadas en las columnas litológicas de sondeos, han permitido reconocer la geometría de los materiales de este relleno. El espesor del relleno plio-

cuaternario varía entre 0 y 30 m (Stitou, 1995; Stitou *et al.*, 1997). En lo que se refiere a la naturaleza del sustrato del acuífero, se le supone impermeable y formado por margas y arcillas terciarias.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la llanura del acuífero de Martíl-Alila constituye un único sistema hidrogeológico. Dada la irregularidad litológica del acuífero, la transmisividad puede variar dentro de un amplio rango de valores, por lo que es difícil dar un valor representativo de todo el acuífero; la Direction Régionale de l'Hydraulique (1988) y El Morabiti (1991) determinan un rango comprendido entre 2.10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s y 89.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s y un valor medio de 24.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Los máximos valores de transmisividad se localizan en el área próxima a los cauces de los ríos Martíl y Alila, mientras que los mínimos se encuentran en la zona Sur, donde predomina un carácter más arcilloso en los sedimentos.

La recarga del acuífero proviene de la infiltración directa del agua de lluvia y de los ríos, así como de los aportes laterales del acuífero kárstico y del retorno del agua de riego. La descarga del acuífero se produce por las extracciones por bombeo, los aportes al río Martíl y las salidas al mar.

## Características hidrogeoquímicas

Por lo general, la mineralización de las aguas se incrementa desde el interior hacia

la costa. La distribución de los valores del total de sólidos disueltos -TSD- en la muestras (Fig. 2), confirma esta evolución y permite conocer la situación de los focos de salinización en las áreas de Coelma (al Sur) y de la población de Martíl.

El análisis de la figura 3 permite comprender la importancia relativa del ion cloruro en relación con el TSD; en ella se puede apreciar que las muestras se alinean bien, lo que significaría que éstas deben su salinidad principal a este ion. Si se considera al ion cloruro como representativo de la proporción de agua de mar que invade el acuífero, el estudio de los correspondientes gráficos y de la relación de la muestras con respecto a la hipotética línea de mezcla agua de mar-agua dulce, puede resultar de gran utilidad para identificar procesos cercanos al propio fenómeno de mezcla. Se puede reconocer el enriquecimiento de Ca<sup>2+</sup> en las aguas (Fig. 4) con respecto a la línea de mezcla agua dulce-agua de mar. También se puede identificar un cierto empobrecimiento de Na<sup>+</sup> en todas las muestras (Fig. 5).

Para reconocer la existencia de procesos modificadores que alteren la composición de la mezcla teórica agua dulce-agua de mar, o bien reconocer la influencia relativa de la componente bicarbonatada, se puede utilizar la concentración teórica correspondiente a la mezcla conservativa, tomando como miembros extremos de la

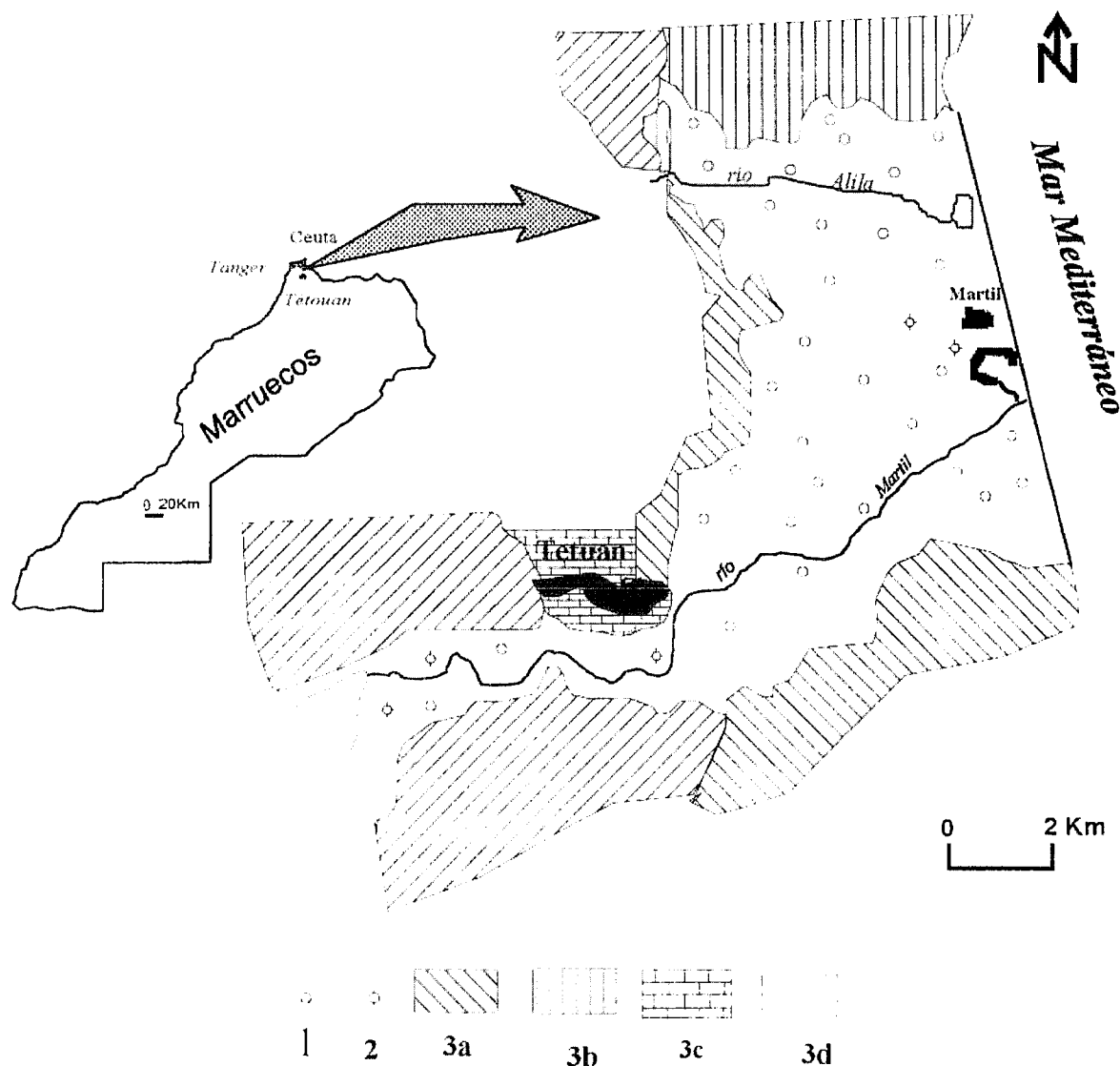


Fig. 1.- Localización geográfica y esquema hidrogeológico del área de estudio. 1: pozo; 2: sondeo; 3: rocas de borde (3a: complejo Gomáride; 3b: complejo Sébtide; 3c: dorsal caliza; 3d: flysch); 4: Cuaternario.

Fig. 1.- Geographic location and hydrogeological scheme of study area. 1: drill well; 2: well; 3: border rocks (3a: Gomarid complex; 3b: Sebtide complex; 3c: carbonated belt; 3d: flysch); 4: Quaternary rocks.

mezcla el agua de mar y el agua escasamente salina de un pozo del límite occidental.

La concentración teórica de cada muestra se calcula mediante el contenido en ion cloruro, elegido como conservativo del proceso teórico de mezcla en un sistema cerrado y presente en pequeñas concentraciones en el agua dulce. Los cálculos son sencillos y se hacen calculando la recta de mezcla para cada ion a partir de las concentraciones de este ion cloruro en el agua dulce y en el agua de mar. Las diferencias entre las concentraciones reales y las teóricas se expresan como  $\Delta_{ion}$  (en meq/l).

Muchas veces, el estudio de estos  $\Delta_{ion}$  permite reconocer procesos yuxtapuestos al de la salinización, difíciles de identificar a priori. En general, en todas

las muestras se aprecia que  $\Delta_{Ca^{2+}}$ ,  $\Delta_{Mg^{2+}}$  y  $\Delta_{SO_4^{2-}}$  son positivos (Fig. 6), mientras que los  $\Delta_{Na^+}$ , por el contrario, son negativos. Además, este comportamiento se hace más patente a medida que crece el contenido en ion cloruro, siendo notable el área sometida al proceso de intrusión de agua de mar. Las reacciones que se producen en el acuífero como consecuencia del desequilibrio entre la fase acuosa, que ha visto modificada su composición química, y la fase sólida, corresponderían a tres procesos modificadores generales: los relacionados con la precipitación y disolución de carbonatos, el intercambio iónico y la reducción de sulfatos.

La naturaleza detrítica del acuífero de Martil-Alila condiciona a priori la

importancia relativa de estos procesos. Por ello, el intercambio será, posiblemente, el proceso modificador más importante, seguido de los fenómenos que afectan a las especies carbonatadas, dado que la fracción detrítica que compone la fase sólida del acuífero está constituida por cantos de naturaleza carbonatada. Finalmente, la reducción de los sulfatos no parece ser un proceso relevante en el entorno estudiado, según ponen de manifiesto las elevadas concentraciones de ion sulfato encontradas. La relación entre el contenido de  $Ca^{2+}$  y  $HCO_3^-$  (Fig. 7) permite ver que todas las muestras, especialmente las del sector de Martil se localizan por encima de la recta 1:1, que define la disolución de

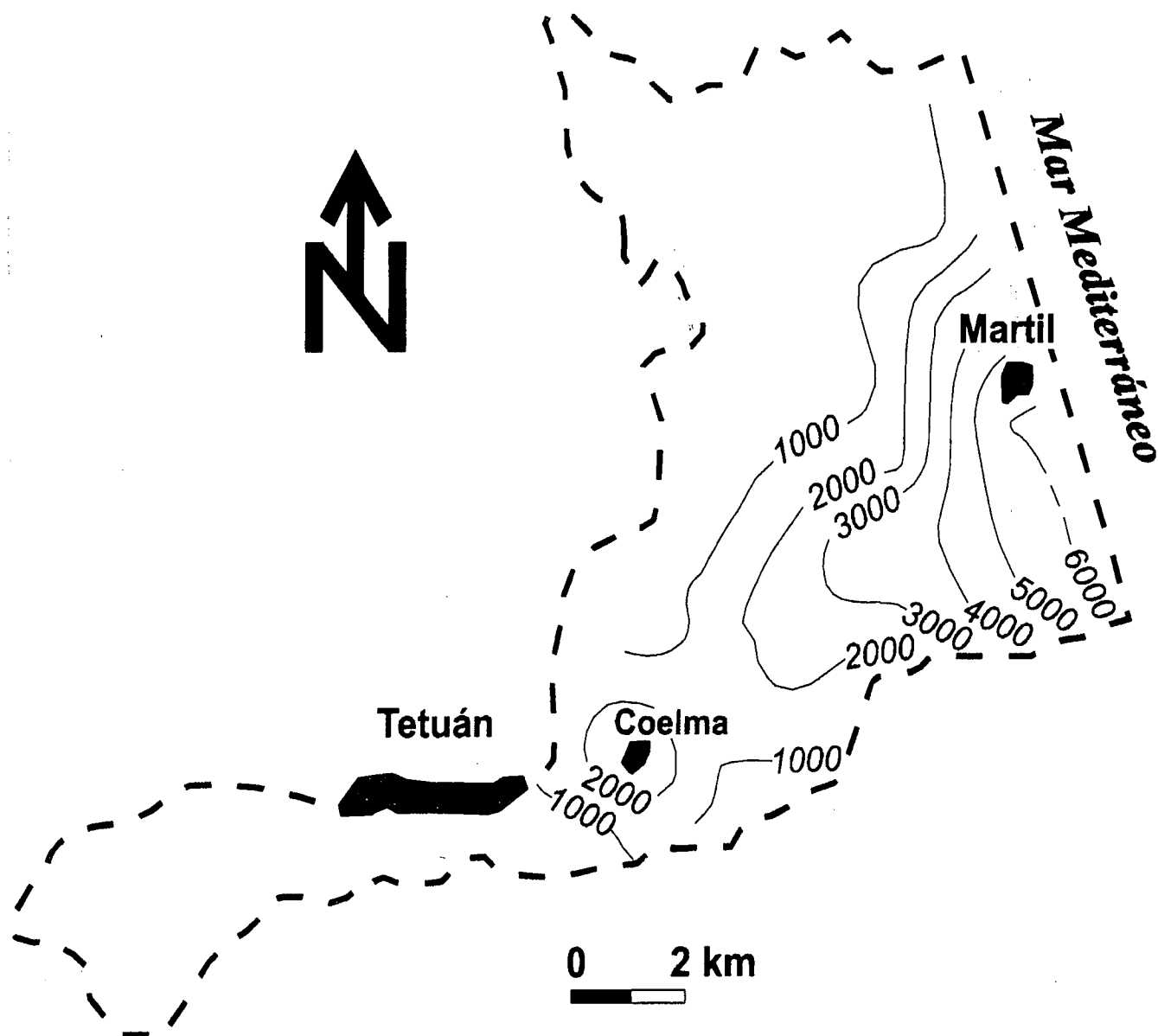


Fig. 2.- Distribución espacial del total de sólidos disueltos ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en las aguas del acuífero.

Fig. 2.- Spatial distribution of the total dissolved solids ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) in the aquifer waters.

$\text{CaCO}_3$ . Además, la representación de las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  frente a la suma de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (Fig. 8) muestra un comportamiento similar. La posición de los puntos permite ver que existe un enriquecimiento importante en estos cationes con respecto a la concentración de bicarbonato.

En cuanto a los valores del índice de saturación de la calcita (ISc), cabe destacar que la mayoría de las muestras analizadas tienen un ISc comprendido entre  $-1,5\%$  y  $+1,5\%$ . Si se tiene en cuenta la variación del ISc en relación con la proporción de agua de mar presente, se constata que existen fuertes anomalías

en las aguas del sector de Martil. Cuando los porcentajes de agua de mar están comprendidos entre  $1,5\%$  y  $5\%$ , el agua tiene un estado de sobresaturación, mientras que a porcentajes de agua de mar superiores, las aguas vuelven a estar en el entorno de la saturación, con tendencia a la subsaturación.

### Conclusiones

La mineralización de las aguas subterráneas del acuífero se debe principalmente a la presencia de ion cloruro. En relación con la mezcla teórica agua dulce-agua de mar, las aguas del acuífero

de Martil-Alila están enriquecidas en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , mientras que muestran concentraciones en  $\text{Na}^+$  normalmente inferiores a las teóricas. Los procesos de intercambio iónico parecen intervenir de forma significativa en las características químicas de las aguas del acuífero. La naturaleza detrítica del mismo y la abundancia de arcillas (ilita, esmectita, caolinita) favorece la intensidad del proceso. Respecto a los procesos de disolución y precipitación de carbonatos, las aguas muestran un grado de saturación variable en función de la proporción de agua de mar que interviene en la mezcla.

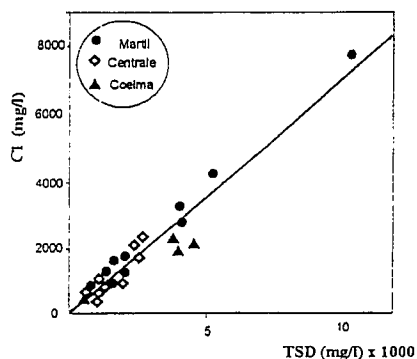


Fig. 3.- Comparación del contenido en TSD y Cl<sup>-</sup> en las muestras de agua del acuífero. Se señala la línea de mezcla con el agua de mar.

Fig. 3.- Plot Cl<sup>-</sup> vs TSD of groundwater samples in the aquifer. The line represent mixing seawater line.

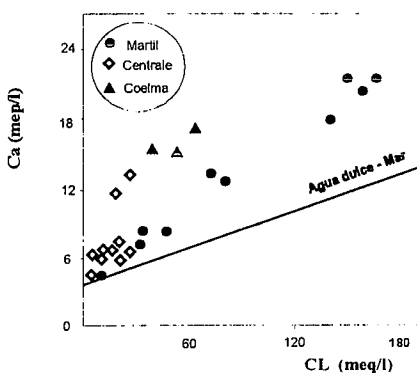


Fig. 4.- Comparación del contenido en Ca<sup>2+</sup> y Cl<sup>-</sup> en las muestras de agua del acuífero. Se señala la línea de mezcla con el agua de mar.

Fig. 4.- Plot Ca<sup>2+</sup> vs Cl<sup>-</sup> (meq.l<sup>-1</sup>) of groundwater samples in the aquifer. The line represent the Mixing Seawater Line.

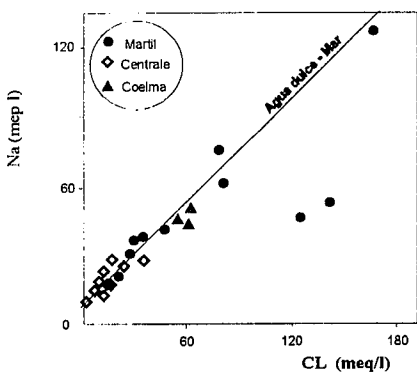


Fig. 5.- Comparación del contenido en Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> en las muestras de agua del acuífero. Se señala la línea de mezcla con el agua de mar.

Fig. 5.- Plot Na<sup>+</sup> vs Cl<sup>-</sup> (meq.l<sup>-1</sup>) of groundwater samples in the aquifer. The line represent Mixing Seawater Line.

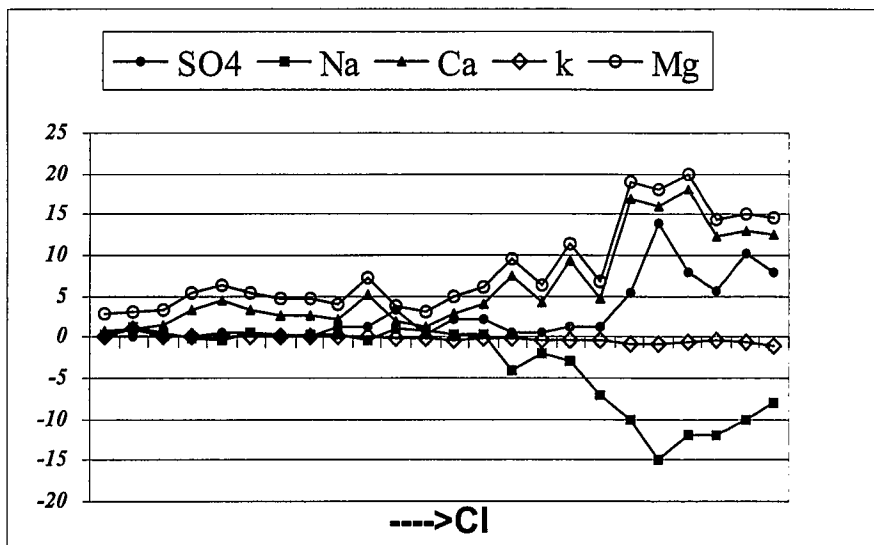


Fig. 6.- Evolución de los Δ ion en las aguas subterráneas (meq.l<sup>-1</sup>) del acuífero. Los puntos se han ordenado según el contenido en Cl<sup>-</sup> creciente.

Fig. 6.- Evolution of Δ ion (meq.l<sup>-1</sup>) of groundwater of aquifer. The order of point follows the increasing Cl<sup>-</sup> content.

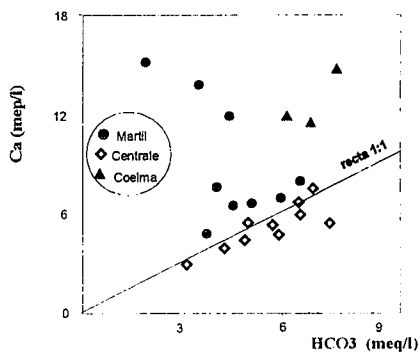


Fig. 7.- Comparación del contenido en Ca<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq.l<sup>-1</sup>) en las muestras de agua del acuífero. Se señala la recta 1:1.

Fig. 7.- Plot Ca<sup>2+</sup> vs HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq.l<sup>-1</sup>) of groundwater samples in the aquifer. The line represent relation 1:1.

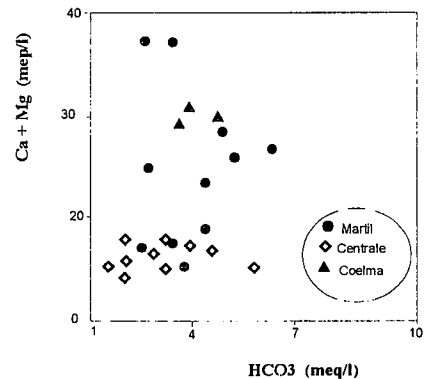


Fig. 8.- Comparación del contenido en Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq.l<sup>-1</sup>) en las muestras de agua del acuífero.

Fig. 8.- Plot Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> vs HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq.l<sup>-1</sup>) of groundwater samples in the aquifer.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Direction Regionale de l'Hydraulique de Lookkos de Tetuán por su colaboración en los análisis y la informaciones aportadas. Este trabajo se llevó a cabo dentro del marco de los proyectos de acción conjunta M-E 29/P/00 (financiado por la AECE) y PROTARS P2T3/39 (CNRS).

Referencias

Direction Regionale de l'Hydraulique (1988): Informe interno. 120 p.  
 El Morabiti, K. y Pulido Bosch, A. (1994): Hydrogeologie, 1, 21-33.  
 Stitou el Messari, J. (1995): Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Univ. Tétouan, Maroc. 152 p.  
 Stitou el Messari, J. y Pulido Bosch, A. (1995): Hydrogeologie, 3, 39-46.  
 Stitou el Messari, J. (1998): Geogaceta, 23, 147-150.