

ESTUDIO DE ACUÍFEROS KÁRSTICOS A PARTIR DE SUS RESPUESTAS NATURALES. APLICACIÓN A DOS SISTEMAS DEL PAÍS VASCO

I. Antigüedad Auzmendi (*)

RESUMEN

En este trabajo se presenta la investigación hidrogeológica realizada sobre los sistemas acuíferos asociados a dos macizos carbonatados del Complejo Urgoniano, a partir de sus respuestas naturales, tanto energéticas (variaciones del caudal, hidrodinámica) como de materia (variación del grado de mineralización de las aguas, hidroquímica), como base metodológica para la identificación del grado de organización del drenaje kárstico.

La hidroquímica de las aguas de las surgencias, en comparación con la de las aguas de precipitación, dentro del concepto de sistema, sirve para identificar aspectos hidrogeológicos de los sistemas drenados; de esta forma, se muestra el desigual interés funcional que presenta el epikarst y se pone de manifiesto el diferente grado de karstificación funcional de los sistemas investigados. A partir de la evolución temporal de la mineralización se identifican las distintas componentes de la infiltración y el interés regulador de las reservas. Además, la hidroquímica supone una adecuada referencia para la interpretación del hidrograma.

El análisis detallado de las formas del hidrograma y el estudio estructural de las series cronológicas ponen de manifiesto el diferente grado de organización del drenaje kárstico, mediante la caracterización de la relación entrada-salida, incidiendo sobre el carácter de la infiltración y el poder regulador de los acuíferos. Se establece una tipología de los sistemas investigados.

Palabras clave: Karst, Hidroquímica, Hidrodinámica, Hidrología Matemática, Tipología sistemas kársticos, Vizcaya, País Vasco, España.

ABSTRACT

This work deals on the hydrogeological research about two karstic aquifer systems, both associated to Urgonian limestones in the Basque Country. The data have been obtained from the natural responses in the springs. The energetic (flow changes, hydrodynamic) and material responses (mineralogical content of the waters, hydrochemistry) are considered as a methodological base to recognize the organization degree of the karstic drainage.

The accurate knowledge about the chemical composition of the waters draining the calcareous massifs and the comparison between these waters and the rainfall water hydrochemistry shows different details about the drainage development in both calcareous bodies. The hydrogeological interest of the epikarst modulating the entrance signal is conspicuous from the meteoric-originated elements in the spring waters. Similarly, it has been established the infiltration coefficient from the chlorine dosage. The rate of actual karstic ablation is appraised, with evidences about the different functionality of the karstification.

The flow type in each aquifer system is appointed according to the temporary hydrochemical evolution. The influence of the rapid and retarded components is not similar. This data suggest a different regulating interest of the reserves. On the other hand, the hydrochemistry is a very useful reference for the hydrogram interpretation.

The hydrogram profiles of the high water-low water sequences in different times reveal the drainage organization in the infiltration and saturation zones. The several infiltration types and the interest of the reserves are conspicuous. The employment of techniques in Mathematical Hydrology (correlation and spectral analysis) leads us to elucidate the hydrogeological working of the aquifer systems, with respect to the input-output ratio and its auto-regulative power. The hydrodynamic and hydrochemical data obtained are coincident. Finally, it has been established an accurate typology of the studied aquifer systems.

Key words: Karst, Hydrochemistry, Hydrodynamic, Mathematical Hydrology, Karstic system typology, Biscay, Basque Country, Spain.

Antigüedad Auzmendi, I. (1988): Estudio de acuíferos kársticos a partir de sus respuestas naturales. Aplicación a dos sistemas del País Vasco. *Rev. Soc. Geol. España*, 1, (1-2), 211-227

Antigüedad Auzmendi, I. (1988): A study of karstic aquifers from their natural responses. Application to two systems in the Basque country. *Rev. Soc. Geol. España*, 1, (1-2), 211-227.

(*) Dpto. Geotectónica. Facultad de Ciencias. Universidad del País Vasco (EHU/UPV). Apartado 644. 48080 BILBAO.

1. INTRODUCCIÓN

El karst, definido por Geze (1973) como «région constituée par des roches carbonatées, compactes et solubles, dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques», es un medio que desde hace tiempo ha llamado la atención de los hidrogeólogos dado que el conjunto de procesos que en él pueden tener lugar (la karstificación, fundamentalmente) le confieren un importante interés como acuífero. Estudios intensivos realizados sobre diversos terrenos kársticos (Tripet, 1972; Mangin, 1975; Kiraly y Müller, 1979; Pulido y Castillo, 1984) han puesto de manifiesto la gran heterogeneidad de dicho medio, consecuencia del gran número de factores que intervienen en su desarrollo.

Los métodos actuales de investigación en terrenos kársticos tienden a considerar el karst como un sistema del cual se puede llegar a conocer con precisión la función de entrada (precipitaciones) y la función de salida (caudales), habiendo una relación entre ambas de causa a efecto, respectivamente. Es a partir del conocimiento de estas funciones y de su comparación que podemos deducir el operador de transferencia que tiene lugar dentro del sistema, es decir, el conjunto de procesos responsables de la modulación que experimenta la señal de entrada (hietograma) para convertirla en una señal de salida diferente (hidrograma).

Jacquet (1971) define así un *sistema*: «toute structure, dispositif ou procédé réel ou abstrait qui relie, avec un pas de temps donné, une entrée, une cause ou une impulsion (de matière, d'énergie ou d'information) à une sortie, un effect ou une réponse (de matière, d'énergie ou d'information)». Mangin (1975) especifica el concepto y se refiere al *sistema kárstico*: «est représenté par l'ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage».

El concepto de sistema nos lleva a investigar el funcionamiento del acuífero, es decir, su grado de organización (operador de transferencia), su dinámica, de una forma indirecta, a partir de sus respuestas naturales y provocadas. Pero no es el hidrograma (hidrodinámica) el único efecto utilizable a tal fin, ya que como se expresa en la definición de sistema (Jacquet, 1971), el efecto o la respuesta del sistema puede ser no sólo energética, sino también de materia y de información. Es desde este punto de vista que la hidroquímica (Miserez, 1973; Mangin, 1975; Bakalowicz, 1979; Müller, 1982; Antigüedad, 1985, 1986), la hidrotermia (Angeli, 1976; Lacas, 1976; Andrieux, 1978) y la hidrobiología (Rouch, 1978; Moeschler *et al.*, 1982) pueden también ser consideradas efectos, y su interpretación es de gran ayuda en el conocimiento de las características hidrogeológicas y de karstificación de los sistemas acuíferos.

En el presente trabajo son la *hidroquímica*, interpretación de la variabilidad en los contenidos en sales disueltas, y la *hidrodinámica*, estudio completo de los hidrogramas recogidos, los caminos que se han seguido para el estudio hidrogeológico de los sistemas acuíferos asociados a los macizos kársticos de Itxina y Aramotz, ambos en la Provincia de Vizcaya.

2. GEOLOGÍA DE LOS MACIZOS DE ITXINA Y ARAMOTZ

La situación de los macizos kársticos de Itxina y Aramotz se puede observar en la Fig. 1. Ambos se sitúan en el valle del Río Arratia, habiendo una distancia lineal entre ellos de 10 km. Al igual que el resto de formaciones carbonatadas presentes en la Cuenca Vasco-Cantábrica estos macizos dan resaltes elevados en el abrupto relieve, sirviendo de divisoria a los numerosos ríos allí presentes.

El Macizo de Itxina cubre una superficie próxima a los 5 km². Morfológicamente constituye una tabla con una altitud media próxima a los 1.000 metros, siendo sus cotas principales Lekanda (1.308 m), Aitzkorrigan (1.090 m) y Gorosteta (1.255 m) que situadas en la periferia del macizo delimitan una importante zona endorreica.

La karstificación ha sido extraordinariamente intensa, tanto en superficie como en profundidad, como lo indica la existencia de una red espeleológica muy bien conocida (G.E.V., 1985), con importante desarrollo de cavidades, de varios kilómetros de longitud. En superficie, el Macizo de Itxina constituye un impresionante ejemplo del paisaje kárstico, con gran abundancia de formas de absorción, y sin corriente superficial alguna. La vegetación es muy escasa y se reduce a grupos aislados de hayas y coníferas.

El Macizo de Aramotz, por su parte, cubre una superficie de 20 km². Su morfología, parecida a la de Itxina, corresponde a un «plató» elevado, con una altitud media de 800 metros, siendo las cotas más elevadas Leungane (1.009 m), Mugarra (964 m) y Urtemondo (789 m). Al igual que en el caso anterior, aquí también existe una importante zona endorreica, y no existe corriente superficial alguna. La vegetación es similar a la de Itxina. La karstificación es intensa en superficie, pero no se conocen redes espeleológicas, por lo que la posible karstificación en profundidad de este macizo habrá de determinarse a partir del estudio de las respuestas de los manantiales, objetivo éste que, junto con otros, se plantea en este trabajo.

Geológicamente, ambos macizos corresponden a afloramientos de materiales carbonatados del Complejo

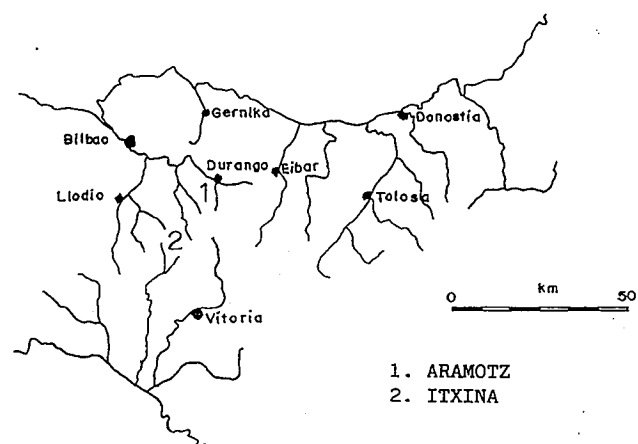


Fig. 1.—Situación de los macizos de Aramotz e Itxina.

Fig. 1.—Location of the Aramotz and Itxina Massifs.

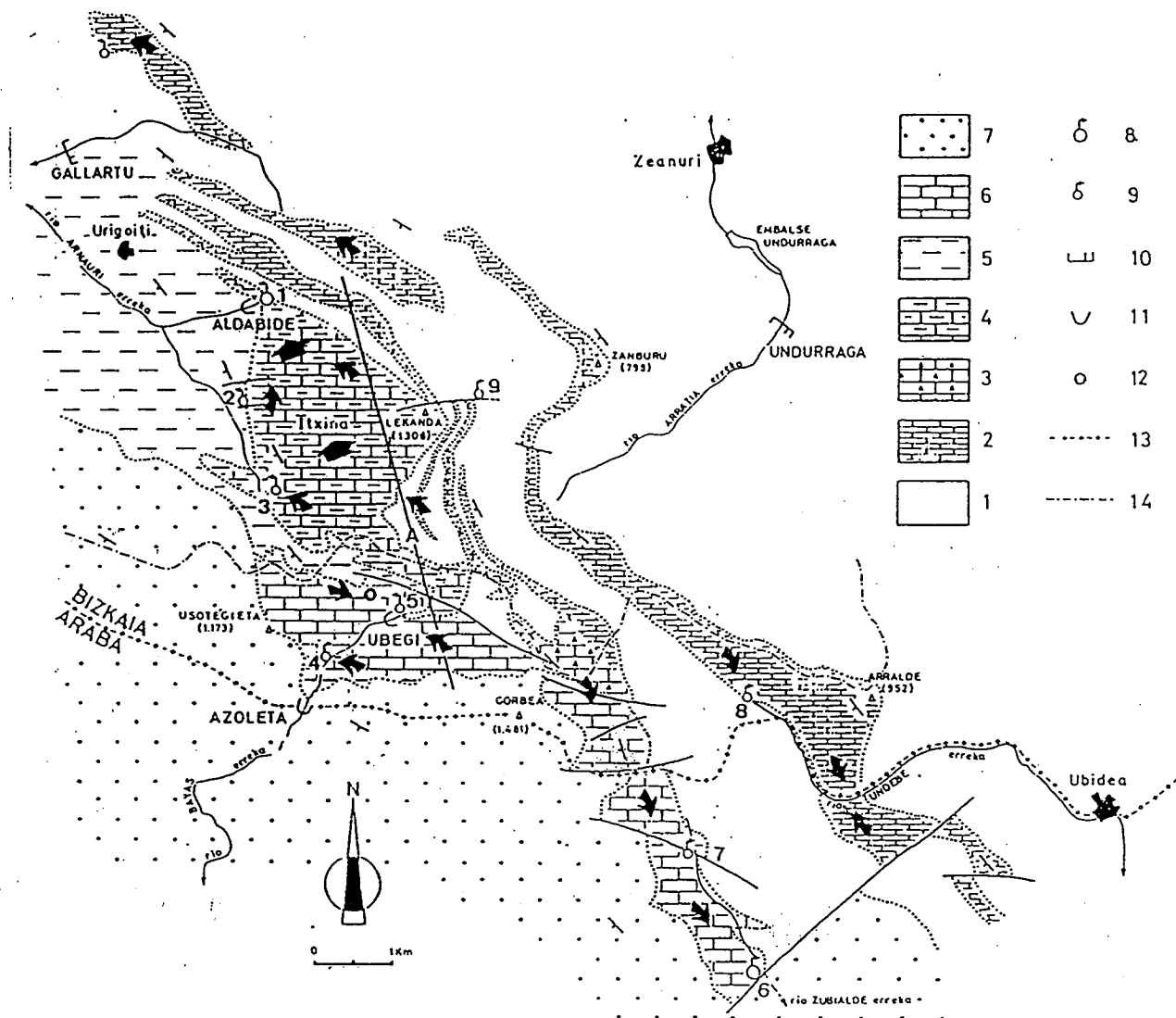


Fig. 2.—Esquema geológico de la Unidad Hidrogeológica Itxina-Aldamin, sentidos preferentes de flujo y principales surgencias. El Macizo de Itxina (Formación 4) se localiza en el sector central. 1, 5 y 7: Materiales de baja permeabilidad. 2 y 3: Bancos carbonatados inferiores. 4: Calizas urgonianas de Itxina. 6: Calizas terrígenas de Aldamin. 8: Manantiales $Q > 100$ l/seg. 9: Manantiales $Q > 10$ l/seg. 10 y 11: Estaciones de aforo. 12: Pluviógrafo. 13: Límite de provincia. 14: Divisoria fluvial.

Fig. 2.—Geological scheme of the Itxina-Aldamin Hydrogeological Unit, flux preferential directions and main springs. The Itxina Massif (Formation 4) is located in the Central area. 1, 5 and 7: Low-permeability materials. 2 and 3: Lower carbonate banks. 4: Itxina Urganian limestones. 6: Aldamin sandy limestones. 8: Springs $Q > 100$ l/seg. 9: Springs $Q > 10$ l/seg. 10 and 11: Gauging stations. 12: Pluviograph. 13: Province boundary. 14: River basin boundary.

Geológicamente, ambos macizos corresponden a afloramientos de materiales carbonatados del Complejo Urganiano (Rat, 1959). Bajo esta denominación se agrupa una potente serie (2.000 metros, aproximadamente) de materiales sedimentados durante el período Aptiense-Albiense inferior, que tienen en común el haber estado relacionados con la implantación en la Cuenca Vasco-Cantábrica de grandes conjuntos arrecifales. Las condiciones geográficas reinantes durante ese período (ambiente de plataforma) posibilitaron localmente la construcción de edificios arrecifales, algunos de ellos, en el caso de Itxina y Aramotz, de gran envergadura. El diferente crecimiento temporal y espacial de estos edificios originó una desigual sedimentación en la cuenca, lo que trajo como consecuencia los frecuentes cambios de facies, tanto horizontal como verticalmente, que se observan.

Las calizas urgonianas descansan sobre una formación basal del mismo complejo, que está constituida por una alternancia de arcillas, areniscas y margas, haciéndose éstas más abundantes a medida que ascendemos en la serie. Desde un punto de vista hidrogeológico esta formación basal se puede considerar el sustrato impermeable de los acuíferos kársticos urgonianos.

Las calizas urgonianas son biogénicas, formadas por acumulación de organismos, de colores grises claros, y que se presentan generalmente masivas, aunque localmente pueden presentar estratificación. Están formadas en un ambiente de plataforma, de escasa profundidad, y caracterizadas por una abundante fauna de fragmentos de rudistas, corales, algas, ostreidos, etc. Debido a los frecuentes cambios de facies, las barras calizas pasan de forma gradual a formaciones más margosas y ar-

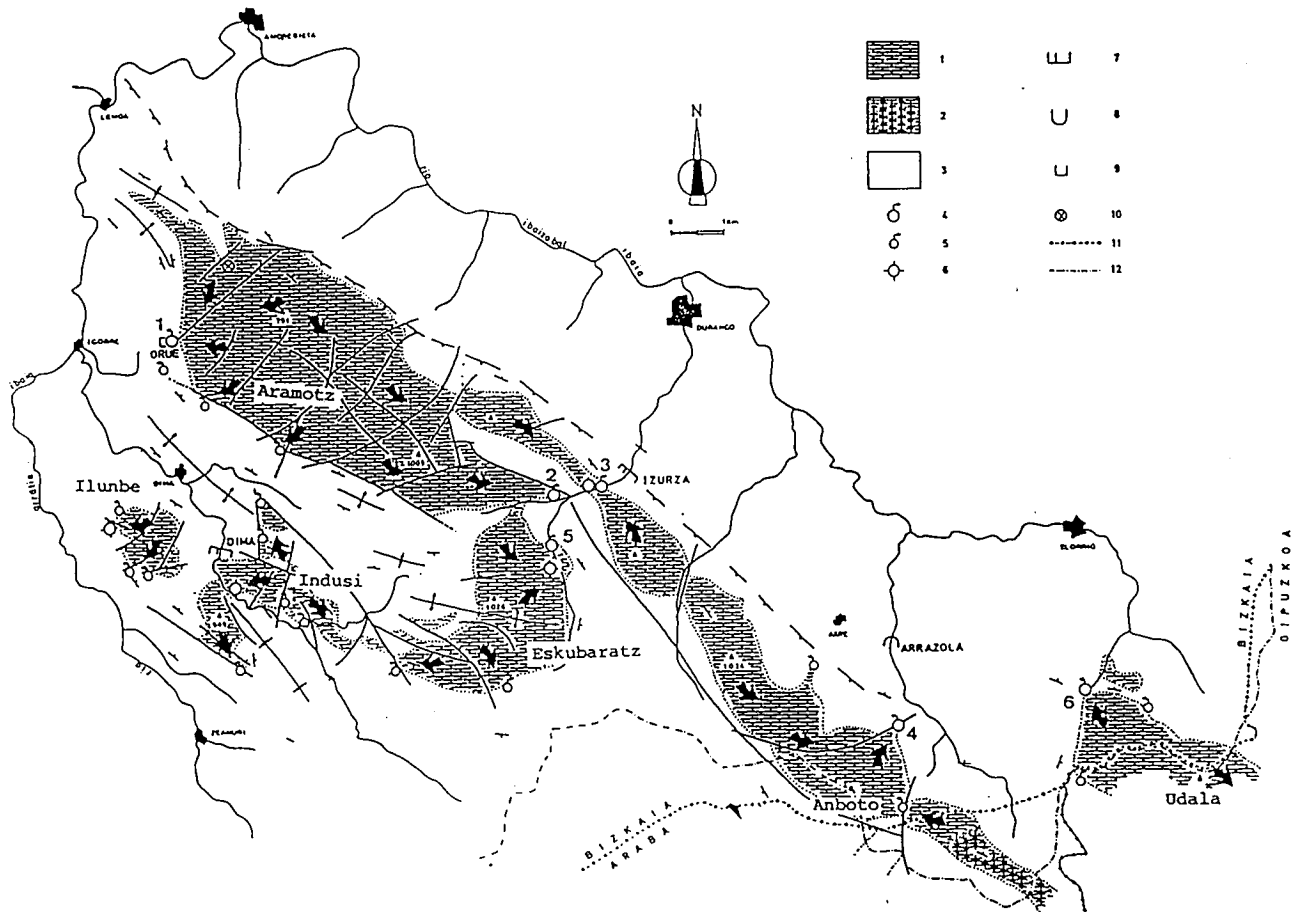


Fig. 3.—Esquema geológico de la Unidad Hidrogeológica Aramotz-Anboto, sentidos preferentes del flujo y principales surgencias. El Macizo de Aramotz corresponde al sector occidental. 1: Calizas urgonianas. 2: Calizas arcillosas urgonianas. 3: Materiales de baja permeabilidad. 4: Manantiales $Q > 10$ l/seg. 5: Manantiales $Q > 1$ l/seg. 6: Sondeos. 7, 8 y 9: Estaciones de aforo. 10: Pluviógrafo. 11: Límite de provincia. 12: Divisoria fluvial.

Fig. 3.—Geological scheme of the Aramotz-Anboto Hydrogeological Unit, flux preferential directions and main springs. The Aramotz Massif belongs to the Western area. 1: Urganian limestones. 2: Urganian shaly limestones. 3: Low-permeability materials. 4: Springs $Q > 10$ l/seg. 5: Springs $Q > 1$ l/seg. 6: Wells. 7, 8 and 9: Gauging stations. 10: Pluviograph. 11: Province boundary. 12: River basin boundary.

cillosas. Por encima de los materiales carbonatados aparecen los materiales fundamentalmente detríticos del Complejo Supraurgoniano.

En cuanto a la disposición estructural se refiere, las calizas del Macizo de Itxina (Fig. 2) se disponen monoclinamente, buzando suave ($10-15^\circ$) hacia el W-SW, aunque en este extremo el buzamiento se hace más fuerte, pasando de forma progresiva a tener un carácter más terrígeno. En Aramotz, por el contrario, el esquema estructural es bastante más complejo; las calizas contactan por el borde sur de forma mecánica con los materiales impermeables adyacentes, mientras que en el borde norte parece existir un frente de cabalgamiento de los materiales carbonatados, posiblemente relacionado con un accidente tectónico profundo (Fig. 3).

3. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DE LOS MACIZOS DE ITXINA Y ARAMOTZ

Hidrogeológicamente, la única recarga a considerar para estos dos macizos es a partir de las precipita-

ciones, ocasionalmente en forma de nieve, sobre todo en Itxina. La pluviosidad media anual en este macizo es del orden de 1.900 mm, mientras que en Aramotz es algo inferior, del orden de 1.600 mm.

En las figs. 2 y 3 se representan, mediante flechas, los sentidos principales del flujo subterráneo, así como las zonas de descarga preferente en los dos macizos. En Itxina la surgencia principal es Aldabide (Fig. 2), con un caudal medio cercano a los 300 l/seg y situada en la cota más baja del contacto de la formación carbonatada con los materiales impermeables adyacentes. También es a considerar la surgencia de Ubegi, con un caudal medio próximo al centenar de litros por segundo, si bien esta última no drena los materiales carbonatados propios del Macizo de Itxina, sino otros similares aflorando un poco más hacia el sur. En cualquier caso ambas surgencias, con gran variabilidad en sus aportaciones, son objeto de control continuo de caudal (G.E.V., 1983, 1984).

En el Macizo de Aramotz (Fig. 3) el drenaje principal se realiza hacia el este, sector de Izurza (surgencias n.º 2 y 3) y también hacia el suroeste, donde se localiza la interesante surgencia de Orue (n.º 1), con un caudal

medio del orden del centenar de litros por segundo. Esta última surgencia es objeto de control continuo de sus aportaciones, formando parte de la red hidrométrica puesta en servicio en el marco del Estudio Hidrogeológico de Vizcaya (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1986).

Los datos químicos que se tratan a continuación corresponden a muestreos realizados tanto en las principales surgencias como a partir de las aguas de precipitación recogidas en sendos pluviógrafos de ambos macizos (Antigüedad, 1986). Las crónicas de caudales analizadas corresponden, por su parte, a las series recogidas en las surgencias de Aldabide, Ubeji y Orue.

4. INVESTIGACIÓN HIDROQUÍMICA DE LOS MACIZOS KÁRSTICOS CONSIDERADOS

El interés de la hidroquímica en la investigación de sistemas kársticos ha sido puesto de manifiesto por numerosos autores (Miserez, 1973; Bakalowicz, 1976, 1979; Kiraly y Müller, 1979; Antigüedad, 1986), que consideran el quimismo de las aguas como un «vector de información», una herramienta muy útil en el estudio indirecto de la hidrodinámica del karst.

Su interés radica, sobre todo, en el estudio de la *evolución temporal* del quimismo de las aguas, poniendo especial atención en la representatividad del muestreo, es decir, en que todas las fases hidrodinámicas (crecida, decrecida, agotamiento) estén consideradas. En cuanto al tratamiento de datos, el método aquí utilizado es el del Análisis Factorial en Componentes Principales (ACP), cuyo empleo en hidroquímica ha resultado satisfactorio en numerosos trabajos (Bakalowicz, 1979; Mathys, 1982; Aguayo *et al.*, 1986).

Por otra parte, resulta obvio el interés que tiene conocer también el contenido químico de las aguas de precipitación, ya que éstas aportan la información química de entrada a los sistemas acuíferos y constituyen, por tanto, la referencia imprescindible para una adecuada interpretación del quimismo de las aguas de las surgencias, y para la evaluación de la ablación kárstica actualmente operante.

4.1. Quimismo de las aguas de precipitación

Los datos químicos medios relativos a los análisis efectuados mensualmente, durante un año (1984-1985) sobre las aguas de precipitación recogidas en los pluviógrafos de Itxina (980 ms.n.m.) y Aramotz (630 ms.n.m.) se pueden observar en la Tabla 1, en donde también se recogen datos referentes a sectores cercanos (Ereño) y otros más alejados tomados de la literatura consultada. Los contenidos salinos en las aguas de lluvia de Aramotz son algo superiores a los determinados en las de Itxina, existiendo una relación entre ambos inversa a la de las tasas de pluviosidad de los macizos, algo superior en Itxina.

Tabla 1.—Contenidos medios (mg/l) en aguas de precipitación. (1) Región de Ariège (Pirineos centrales), Bakalowicz (1979). (2) Región del Jura neuchâtelès (Suiza). Miserez (1973). El resto de los datos corresponden al Estudio Hidrogeológico de Vizcaya (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1986).

Table 1.—Mean contents (mg/l) of the rainfall waters. (1) Area of Ariège (Central Pyrenees), Bakalowicz (1979). (2) Area of Swiss Jura (Canton of Neuchâtel). Miserez (1973). The rest of the data correspond to the Hydrogeological Study of Biscay (Cruz Sanjulián *et al.*, 1986).

	Aramotz n=12	Gorbea n=12	Ereño n=12	Lachein (1) n=14	Cuenca del Areuse (2) n=13
Cl ⁻	4,68	3,75	6,31	,75	,50
SO ₄ ⁼	11,70	5,80	9,91	3,95	3,40
HCO ₃ ⁻	15,30	16,19	16,78	—	5,00
NO ₃ ⁻	1,84	1,24	2,23	—	1,30
Na ⁺	2,16	1,79	2,79	,40	,17
Mg ⁺⁺	,28	,26	,43	—	,08
Ca ⁺⁺	5,40	4,80	5,27	—	2,95
K ⁺	,28	,43	,31	—	,21

De forma general, y sin entrar en un estudio exhaustivo de la variación temporal de las concentraciones en las aguas de precipitación ahora consideradas, se puede afirmar que los mayores contenidos en elementos disueltos (cloruros y bicarbonatos) se encuentran en las lluvias del período estival, lo que pone de manifiesto un efecto de concentración debido a la menor pluviosidad, pero con precipitaciones intensas de dicha estación. Este fenómeno se hace patente en la representación factorial de la Fig. 4, obtenida a partir de un análisis en componentes principales (ACP) sobre los datos de lluvia de Aramotz.

4.2. Hidroquímica de las formaciones carbonatadas de Itxina y Aramotz

Se considera, en primer lugar, la *variación hidroquímica espacial* entre los dos macizos considerados. Los valores medios relativos a los elementos principales presentes en las aguas analizadas en ambos sistemas se pueden observar en la Tabla 2.

Resulta evidente la diferenciación hidroquímica existente entre ambos macizos, a pesar de su proximidad geográfica y de la similitud que guardan en cuanto a litología, morfología y escasa cubierta vegetal. La Fig. 5, que representa la distribución factorial de las muestras, obtenida mediante análisis en componentes principales, evidencia ese diferente carácter hidroquímico, en la medida en que discrimina las aguas en base a sus contenidos

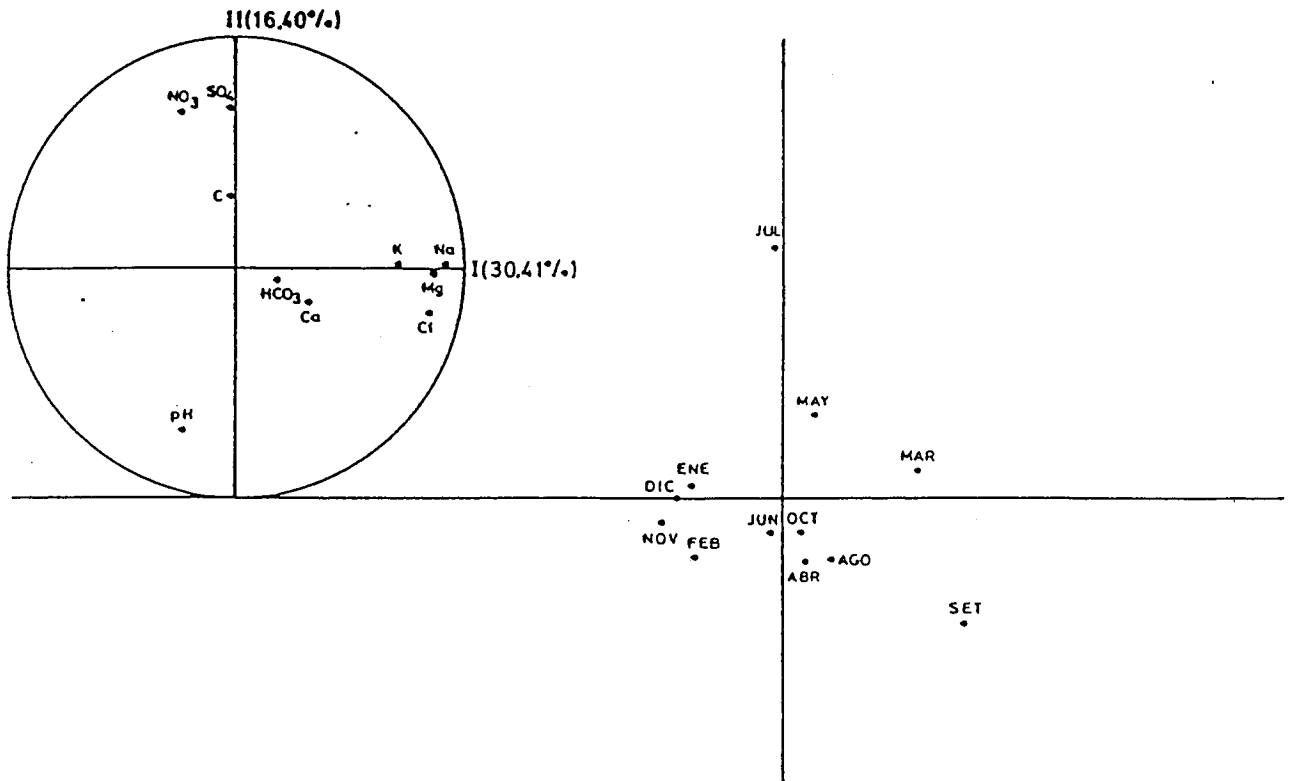


Fig. 4.—Representación en el plano factorial I-II de las aguas de lluvia recogidas mensualmente en Aramotz, a lo largo de un año. Se evidencia efecto de dilución en el período invernal.

Fig. 4.—Graphic representation on the factorial plane I-II of the monthly rainfall water samples from Aramotz Massif, throughout a year. Dilution effect is evidenced during the winter.

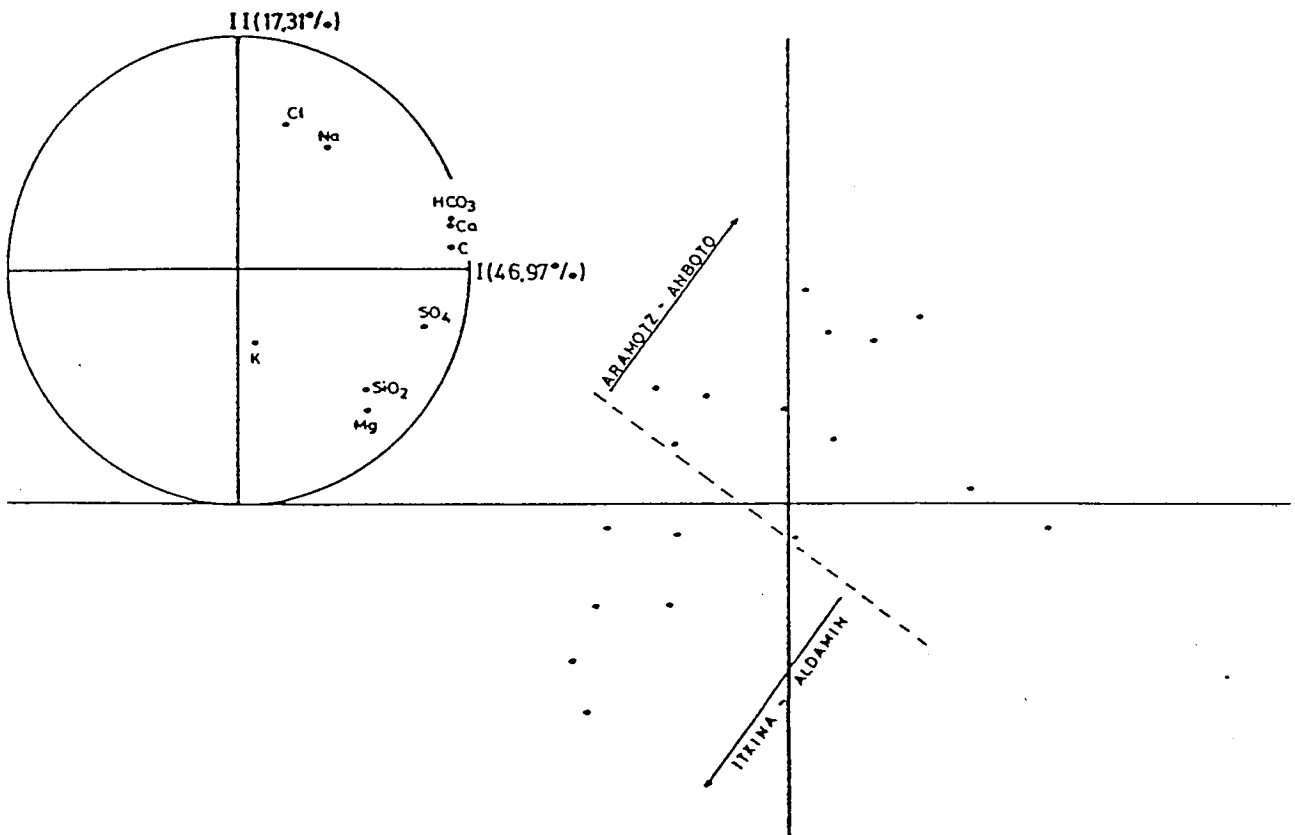


Fig. 5.—Representación en el plano factorial I-II de las aguas de los macizos de Itxina y Aramotz. Se evidencia el diferente carácter hidroquímico de las aguas.

Fig. 5.—Graphic representation of the factorial plane I-II of the waters draining the Itxina and Aramotz Massifs. A different hydrochemical character of the waters from these two areas is evidenced.

en los elementos mayoritarios. Las aguas que drenan Aramotz presentan un grado de mineralización mayor que las que drenan Itxina.

Esa diferente caracterización hidroquímica debe interpretarse en función de un también diferente comportamiento hidrodinámico de los sistemas acuíferos ligados a ambos macizos. A este respecto se pueden hacer varias observaciones:

— En Itxina se evidencia una infiltración rápida de las aguas, mientras que en Aramotz el proceso es más lento, como indica la diferenciación hidroquímica existente en lo que respecta a los elementos de origen meteórico (cloro fundamentalmente). Teniendo en cuenta que en ambos macizos las formas exokársticas son muy abundantes, se pone de manifiesto la diferente *funcionalidad* de las mismas, en cuanto a favorecer la componente rápida de la infiltración se refiere.

Algunos autores (Schoeller, 1962; Bayó et al., 1986) proponen determinar la tasa de infiltración a partir de la dosificación del cloro, tanto en el agua de lluvia como en el de las surgencias. La elección del cloro parece estar justificada por su inalterabilidad a lo largo del trayecto recarga-descarga, al no estar sometido, en principio, a más fenómenos modificadores que la posible reconcentración superficial por efecto de la evapotranspiración, dependiendo del mayor o menor tiempo de residencia de las aguas en dicha zona. La aplicación de este método supone, por supuesto, que todo el cloro considerado tiene como único origen el meteórico, cosa más que probable en los sistemas acuíferos aquí considerados, a la vista de las bajas concentraciones determinadas.

A partir de los contenidos en cloro de las aguas de lluvia y de los manantiales de los macizos de Aramotz e Itxina se ha determinado (Antigüedad, 1986) el coeficiente de infiltración para ambos macizos, que resulta ser en Aramotz del orden del 40-55% de la precipitación, según zonas, y más elevado, del orden del 70% de la precipitación, en Itxina, concordante con trabajos previos en este macizo (Cruz-Sanjulián y Saenz de Echenique, 1980). Los valores para aquel macizo son netamente inferiores a los obtenidos por las fórmulas clásicas (sobre el 70%) y se ajustan mucho mejor al balance conocido de entradas-salidas, lo que evidencia el interés de esta determinación. A la vista de estos resultados se aprecia la importancia hidrogeológica que presenta la zona superficial en Aramotz (acuífero epikárstico según Mangin, 1975), comportándose como un acuífero tampón respecto al acuífero profundo.

— El poder agresivo de las aguas respecto a la disolución de los carbonatos es más acusado en Aramotz; por tanto, hay que admitir que en este macizo adquieren mayor importancia los procesos que favorecen la agresividad de las aguas. Uno de ellos es la producción de CO_2 biológico, que a pesar de la escasa cubierta vegetal existente en ambos macizos, debe estar sometido a mayor reconcentración en Aramotz, por las razones anteriormente comentadas.

Por otra parte, también la oxidación de los sulfuros aumenta el poder agresivo de las aguas. Stumm y Morgan (1970) ponen de manifiesto la lentitud con la

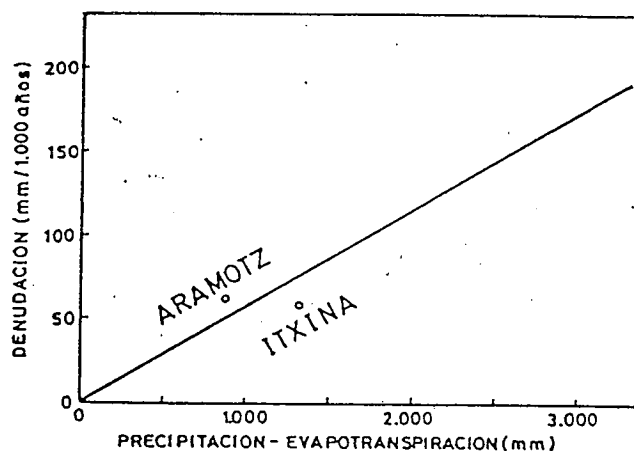


Fig. 6.—Tasa de denudación kárstica en función de la precipitación en los macizos de Aramotz e Itxina (recta tomada de White, 1984).

Fig. 6.—Karstic denudation rate related to the rainfall in the Aramotz and Itxina Massifs (straight line after White, 1984).

que se dan algunas de las reacciones que intervienen en este último proceso, y que, en consecuencia, lo controlan. En nuestro caso, los mayores contenidos en sulfatos de las aguas de Aramotz se deben tanto a una mayor reconcentración superficial del sulfato de origen meteórico, como a una mayor posibilidad de oxidación de los sulfuros diseminados en el cuerpo rocoso.

Esta última afirmación incide, por su parte, en que el flujo subterráneo debe ser más lento en Aramotz, lo cual favorecería además la disolución de carbonatos al ser mayor el tiempo de contacto agua-roca, interfase ésta en la que se producen los fenómenos de disolución.

— Considerando la hidroquímica consecuencia directa de la hidrodinámica del acuífero, y, por tanto, del grado de karstificación funcional del mismo, podemos atribuir a ambos macizos un diferente grado de organización del drenaje kárstico. Mientras que en Itxina se deducen flujos rápidos desde la zona de recarga hasta la de descarga, en Aramotz se evidencia una circulación más retardada, debido a una karstificación relativamente menos intensa. A favor de esta diferenciación está también el conocimiento espeleológico de los dos macizos, con un gran desarrollo, horizontal y vertical, de cavidades en Itxina, mientras que en Aramotz tales formas apenas son conocidas.

Con el fin de evaluar los procesos actuales de karstificación, se ha procedido a cuantificar la materia anualmente exportada en los dos macizos considerados, utilizando para ello los datos químicos y de caudal referentes a muestreos sistemáticos llevados a cabo en las surgencias de ambas formaciones a lo largo de 1984. La cuantificación es relativa, solamente, a la disolución de los carbonatos. En Aramotz la tasa de ablación kárstica resulta ser de 64 mm/1.000 años (o bien 64 m³/km²/año) mientras que en Itxina es de 52 mm/1.000 años. Estos datos concuerdan bien con los ofrecidos por White (1984) en los que este autor relaciona la denudación kárstica con la lluvia útil sobre los macizos correspondientes (Fig. 6).

Tabla 2.—Contenidos medios (m), en mg/l, y desviación típica (S) de los principales elementos en las aguas que drenan los macizos kársticos de Itxina y Aramotz. Los valores de conductividad se dan en microsie-mens (μ S). Se considera un solo análisis por manantial (n).

Table 2.—Mean contents (m, in mg/l) and standard deviation (S) of the spring waters in the Aramotz and Itxina Massifs. The values of the conductivity are in μ S. (One analysis by spring).

	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	Cond.
Aramotz m	4,11	,75	71,23	1,54	10,73	21,54	188,16	2,62	319
(n=7) S	,36	,45	11,95	,36	2,04	7,05	29,73	,74	58,82
Itxina m	2,79	,80	38,36	,79	5,44	8,75	111,16	1,62	166
(n=8) S	,53	,68	3,98	,09	2,66	1,73	9,09	,67	34,47

En base a estos datos resulta que la karstificación actual es algo mayor en el macizo de Aramotz que en el de Itxina, lo que contrasta con el desigual modelado kárstico entre ambos macizos, mucho más desarrollado, en profundidad al menos, en el caso de Itxina. Sin embargo, es precisamente este extraordinario desarrollo de la karstificación el que dificulta actualmente la continuación de la misma al tratarse de un *proceso autolimitado*: una mayor disolución de carbonatos favorece flujos más rápidos que, a su vez, dificultan nuevas disoluciones. En consecuencia, esto nos obliga a interpretar la karstificación como un fenómeno de dinamismo temporal, y, por supuesto, espacial.

La importante karstificación observable en Itxina es, pues, el resultado de una dinámica, no actual, en la que la evolución geomorfológica (incluida la vegetación) del macizo en relación con las formaciones adyacentes debió de tener una gran influencia, siendo esta evolución histórica reciente la que marcaría la diferencia hoy observable con el Macizo de Aramotz (paleohidrogeología).

4.3. Variación temporal del quimismo en Aramotz

El Macizo de Aramotz ha sido objeto de un estudio hidrogeológico específico, debido al notable interés de sus reservas reguladoras. Las principales surgencias de este macizo han sido objeto de control hidroquímico temporal sistemático y algunas de las conclusiones hidrogeológicas derivadas del estudio fueron ya publicadas (Antigüedad, 1985, 1986).

Consideramos ahora la evolución temporal de la conductividad, controlada en ocho surgencias de Aramotz durante un período que comprende las fuertes lluvias torrenciales (más de 200 mm en 40 horas) que asolaron el País Vasco durante los últimos días de Agosto de 1983. La conductividad, parámetro de fácil determinación sobre el terreno, es una excelente indicadora del grado de mineralización de las aguas, sirviendo, además, para su adecuada y simple caracterización. Las ocho surgencias objeto de control se localizan en la Fig. 7, la evolución temporal de la conductividad en las mismas en la Fig. 8, y los parámetros estadísticos correspondientes a los datos recogidos, en la Tabla 3.

Se evidencian bajos valores del coeficiente de variación, próximo a 5% en la mayor parte de los casos,

lo que, en opinión de algunos autores (Shuster y White, 1971; Ternan, 1972; Miserez, 1973) sería indicativo de aguas drenando acuíferos kársticos en los que la circulación es del tipo «diffuse flow system», y, en cualquier caso, con bajo grado de karstificación funcional.

La variabilidad temporal de la mineralización, o conductividad, a nivel de las surgencias (Fig. 8), aparece como característica del tipo de flujo realizado. Como afirma Lepiller (1980) una karstificación desarrollada permite la aparición en la surgencia de aguas de tipos diferentes, mientras que una organización poco desarrollada entraña la acumulación y homogeneización de estas aguas y la reducción del dominio de variación de la mineralización. La heterogeneidad hidroquímica es, por tanto, consecuencia de la heterogeneidad hidráulica.

Durante el período previo a las fuertes lluvias de Agosto, las precipitaciones habidas sobre Aramotz no originaron variaciones importantes en la mineralización de las aguas, lo que se interpreta como falta de dilución, es decir, falta de mezcla importante de las aguas del manto, más mineralizadas, con las aguas meteóricas recientemente infiltradas, débilmente mineralizadas; esto, a su vez, supone predominio generalizado de la infiltración lenta, al menos ante precipitaciones normales.

Las fuertes lluvias de finales de Agosto, sin embargo, originan un descenso de la conductividad, más o menos acusado, y, por tanto, de la mineralización de las aguas, si bien los valores resultantes son todavía importantes (por lo general mayor de 250 μ S). Este hecho hay que interpretarlo como consecuencia de la mayor o menor dilución que tiene lugar en cada reservorio drenado. En efecto, la gran intensidad de estas precipitaciones originó una infiltración rápida de parte del agua puesta en juego (favorecida por las frecuentes lluvias de esos meses), probablemente en las proximidades de la surgencia, y, en consecuencia, una mezcla más o menos importantes con el agua del manto, más mineralizada, y que hasta ese momento aseguraba la homogeneización química del aporte a la surgencia.

A la vista de la Fig. 8, se aprecian diferentes respuestas concretas ante estas lluvias. En las surgencias Ugario y Biteriño se observa un «efecto pistón»; las aguas rápidamente infiltradas provocan el empuje hacia la salida de aguas habiendo residido más tiempo en el reservorio y, por tanto, más mineralizadas. En Iturrieta y Harrobia, sin embargo, se puede decir que estas

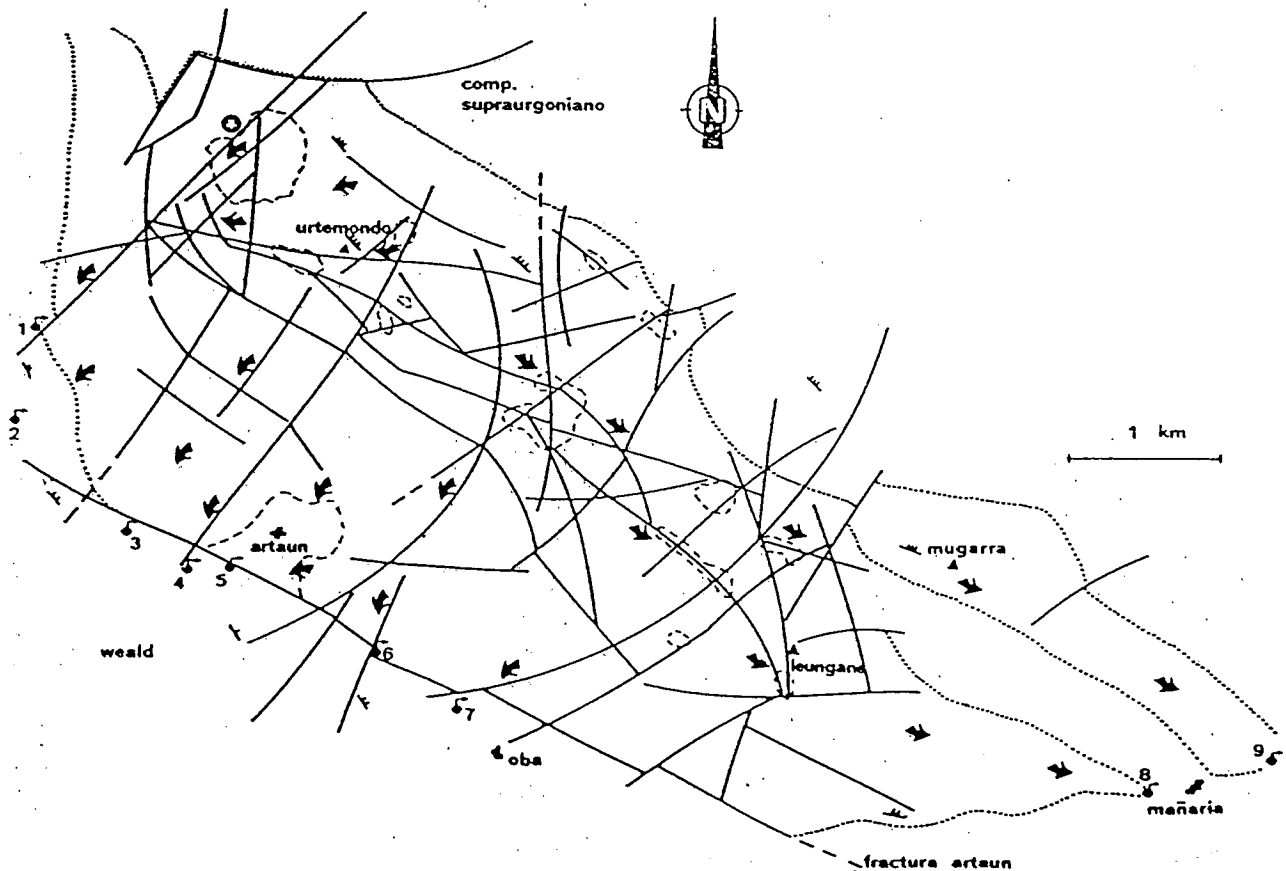


Fig. 7.—Esquema del Macizo de Aramotz: fracturación y principales surgencias.

- | | | |
|-------------|------------------|--------------|
| 1. Orue | 4. Andamariturri | 7. Emaldi |
| 2. Itza | 5. Bikarregi | 8. Iturrieta |
| 3. Biteriño | 6. Ugario | 9. Harrobia |

Fig. 7.—Scheme of the Aramotz Massif: fracturation and main springs.

Tabla 3.—Intervalo y parámetros estadísticos correspondientes a los valores de conductividad determinados en las surgencias de Aramotz (se ha contado con una veintena de medidas en cada manantial, tomadas a lo largo de un año). m = media aritmética (μ S). S = desviación típica. V = coeficiente de variación (%).

Table 3.—Intervals and statistical parameters of the conductivity values of the springs in the Aramotz Massif (approximately twenty measurements by spring during a year). m = arithmetic mean (μ S). S = standard deviation. V = variation coefficient (%).

Nº Manantial (*)	1	2	3	4	5	6	8	9
Intervalo de Conductividad (μ S)	290-320	420-450	290-310	390-420	550-600	340-360	230-250	250-270
m	300	425	292	393	535	343	247	259
S	16,0	22,6	14,5	19,1	49,7	17,1	21,0	9,3
V(%)	5,33	5,32	4,97	4,87	9,28	4,98	8,53	3,61

(*) Ver Fig. 7.

fuertes precipitaciones no originaron variaciones ostensibles de la mineralización, ya que las que se aprecian no resultan significativas dentro del conjunto. En el resto de las surgencias se hace evidente, en mayor o menor grado, el efecto de mezcla (dilución) antes comentado. El descenso, por lo general, es bastante brusco, interpretándose en función del volumen de agua de infiltración rápida que participa en la mezcla, en relación con la existente en el manto y participante también en la misma. A estas lluvias siguió un período de escasas precipitaciones, en el que se puede observar la forma en la que

la mineralización de las aguas se va recuperando hasta alcanzar su intervalo «medio», entendiéndose como tal el más frecuente a lo largo de un año hidrológico, y que representaría un estado «normal» del quimismo, y una referencia para conocer el estado hidrodinámico. Este intervalo, para cada surgencia, puede observarse en la Tabla 3.

En cuanto al «tiempo de recuperación» es de cerca de dos meses en la mayoría de las surgencias que experimentan descensos, siendo de cuatro meses en el caso de Biteriño, lo que es a poner en relación con la influencia

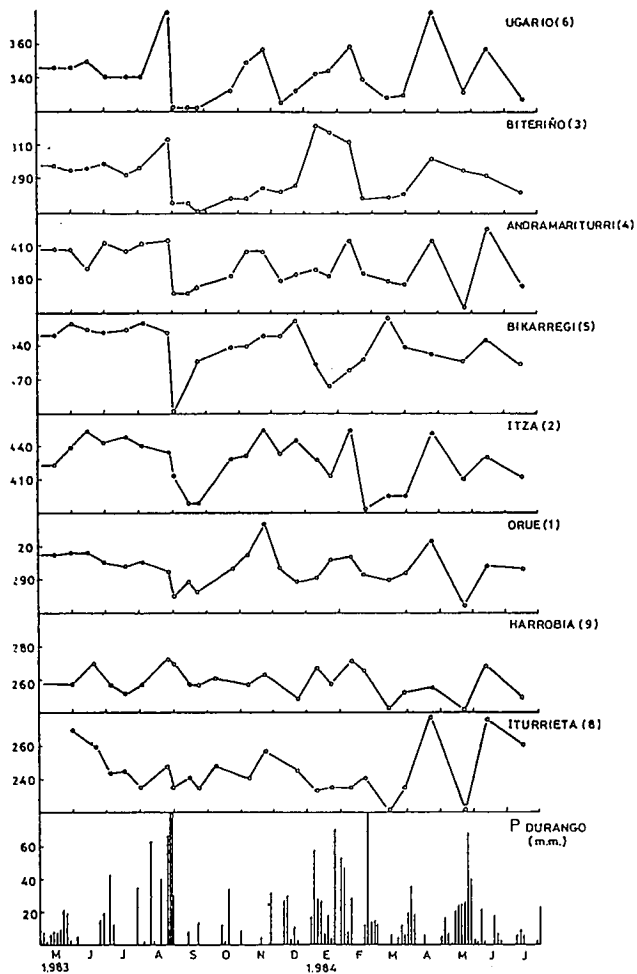


Fig. 8.—Evolución temporal de la conductividad en las principales surgencias del Macizo de Aramotz.

Fig. 8.—Time evolution of the conductivity in the main springs from the Aramotz Massif.

de la infiltración rápida y de la retardada en cada caso; también es a tener en cuenta la forma en la que esta recuperación se produce. De forma general, dos situaciones son a tener en cuenta (Fig. 9). En el caso A (representado por Bikarregi) se puede afirmar que la influencia de la infiltración rápida es grande (descenso importante y brusco) y puntual en el tiempo (corta duración), lo que se traduce en una rápida recuperación inicial; por consiguiente, una parte importante del agua infiltrada es puesta rápida y puntualmente en contacto con el agua del manto, mientras que el resto lo es de forma más retardada, en el espacio y en el tiempo, pudiendo incluso deducirse dos probables fases de retardo, a la vista de los cambios de pendiente observados durante la recuperación. En el caso B (más generalizado) la influencia de la infiltración rápida en la mezcla es también evidente en mayor o menor grado, pero con un cierto tiempo de mantenimiento, lo que se manifiesta por la meseta, más o menos larga, que dan los valores bajos; la recuperación se realiza con pendiente más suave, indicativo de la importante influencia de la infiltración retardada. En la Fig. 10 se esquematiza el funcionamiento del sistema kárstico en base a explicar las variaciones hidroquímicas temporales observadas.

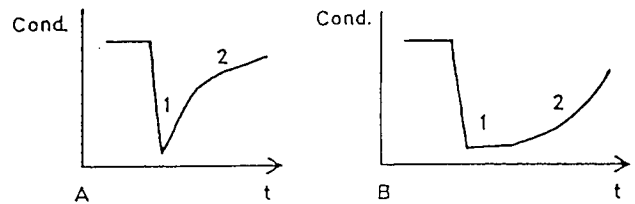


Fig. 9.—Diferentes situaciones observables en la variación temporal de la conductividad. 1. Influencia de la infiltración rápida. 2. Influencia de la infiltración lenta.

Fig. 9.—Different observable situations during the time evolution of the conductivity. 1. Influence of the rapid infiltration. 2. Influence of the retarded infiltration.

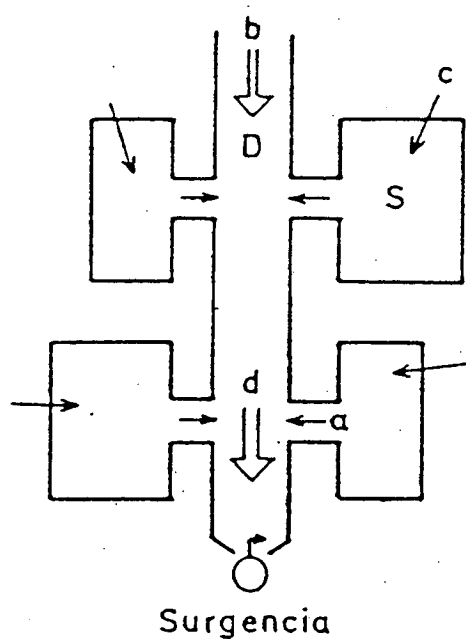
En resumen, el conocimiento de la evolución hidroquímica (de la mineralización, por ejemplo) a lo largo de diferentes situaciones hidrodinámicas —crecida, decrecida, estiaje— aporta interesante información sobre el predominio relativo de las diferentes modalidades de infiltración, rápida y retardada, así como sobre la importancia de las reservas, en la medida que éstas actúan como homogenizadoras del quimismo observado en las surgencias. En Aramotz, en concreto, se evidencia interesante respuesta hidroquímica, con notable influencia de la alimentación retardada (componente lenta de la infiltración), y circulación del tipo diffuse flow system, todo lo cual manifiesta un bajo grado de karstificación funcional del sistema y un importante poder autorregulador.

5. INVESTIGACIÓN HIDRODINÁMICA DE LOS MACIZOS KÁRSTICOS CONSIDERADOS. ESTUDIO DE SERIES CRONOLÓGICAS DE CAUDALES

La reacción de una surgencia kárstica ante una alimentación dada, energética (infiltración) o de materia (hidroquímica), está fuertemente influenciada por la distribución de las propiedades físicas en el acuífero. El correcto análisis de los hidrogramas ofrece, por tanto, una interesante posibilidad de estimar, de forma indirecta, la importancia relativa que en el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero estudiado tienen la red transmisiva kárstica (drenes) y los bloques capacitivos (sistemas anexos), poco permeables, poniendo así de manifiesto el grado de organización del drenaje kárstico (Mangin, 1970; Kiraly y Morel, 1976).

La utilización de aparatos para el registro continuo de los caudales posibilita la obtención de series cronológicas (secuencia de observaciones ordenadas en el tiempo) cuyo adecuado tratamiento (Hidrología Matemática, según Jacquet, 1971) permite identificar el funcionamiento del sistema acuífero considerado, en la medida en que determina la manera en la que los acontecimientos se suceden en el tiempo.

El estudio de las crónicas de caudales, que se aborda seguidamente, cubre tanto las series completas, relativas a años hidrológicos completos, como ciertas partes de las mismas (crecida-decrecida-estiaje). El método utilizado en el primer caso es el Análisis Correla-



Descenso de la conductividad = f (dilución)

grande predominio de b sobre a
pequeña predominio de a sobre b

Tiempo de recuperación = f (modalidad de infiltración)

corto predominio de b
largo predominio de c

S = sistemas anexos (bloques capacitivos)
D = dren (red transmisiva)

c = agua de infiltración retardada

b = agua de infiltración rápida

a = agua del manto

d = agua de mezcla (surgencia)

Fig. 10.—Esquematización funcional del sistema kárstico para la comprensión de la variación temporal de la conductividad.

Fig. 10.—Functional scheme of the karstic system in order to understand the time evolution of the conductivity.

torio y Espectral, basado en los trabajos de Box y Jenkins (1976), mientras que en el segundo caso se emplea el método propuesto por Mangin (1970) para el estudio de las curvas de recesión, así como una interpretación crítica de las formas observadas en el hidrograma (Antigüedad, 1986). Se consideran las crónicas de caudales de las surgencias de Aldabide y Ubegi, en el Macizo de Itxina (Fig. 2), y de Orue, en Aramotz (Fig. 3), todas ellas objeto de control continuo. En Orue se realiza un estudio completo, mientras que en las otras dos surgencias se consideran las crónicas solamente en su globalidad.

5.1. Observaciones sobre el hidrograma de Orue (Aramotz)

En la Fig. 11 se representa la respuesta observada en la surgencia Orue ante diversos episodios meteorológicos (época de lluvias, estiaje), así como la repartición de las precipitaciones tomadas en la vecina estación de Durango. A la vista de esta respuesta se pueden hacer varias observaciones.

— Una serie sucesiva de lluvias no origina serie sucesiva de crecidas en el manantial. La primera precipitación «importante» de la serie provoca instantáneamente un rápido y notable aumento de caudal, que se va a mantener dentro de un estrecho margen (100-200 l/seg), viéndose poco afectado por las posteriores lluvias de la serie.

— En bajas aguas sólo precipitaciones de cierta importancia (mayores de 12-15 mm) llegan a ejercer influen-

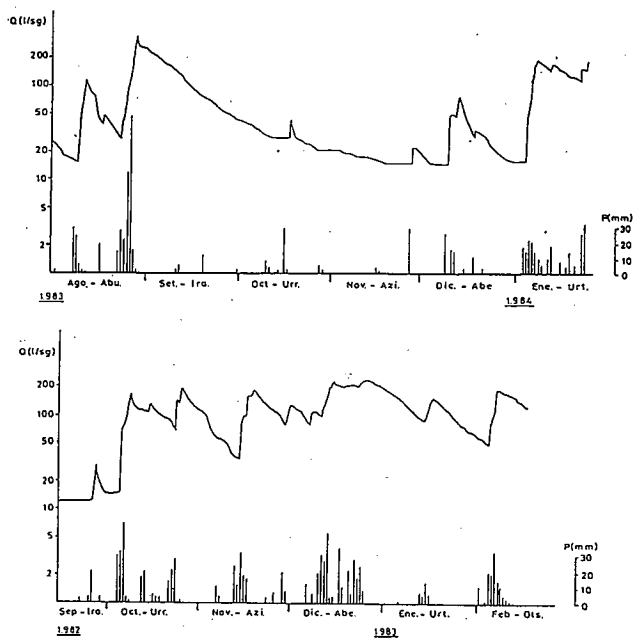


Fig. 11.—Hidrograma del manantial de Orue (Aramotz) durante un período de estiaje (arriba) y de aguas altas (abajo). Las precipitaciones corresponden a la cercana estación de Durango.

Fig. 11.—Hydrogram of the Orue spring (Aramotz) during the dry season (top) and wet season (bottom). The rainfall data belong to the close Durango rainfall station.

cia sobre el caudal de la surgencia, si bien esta influencia es también función del caudal que en ese momento es drenado por la surgencia, y, probablemente, de la intensidad de la precipitación.

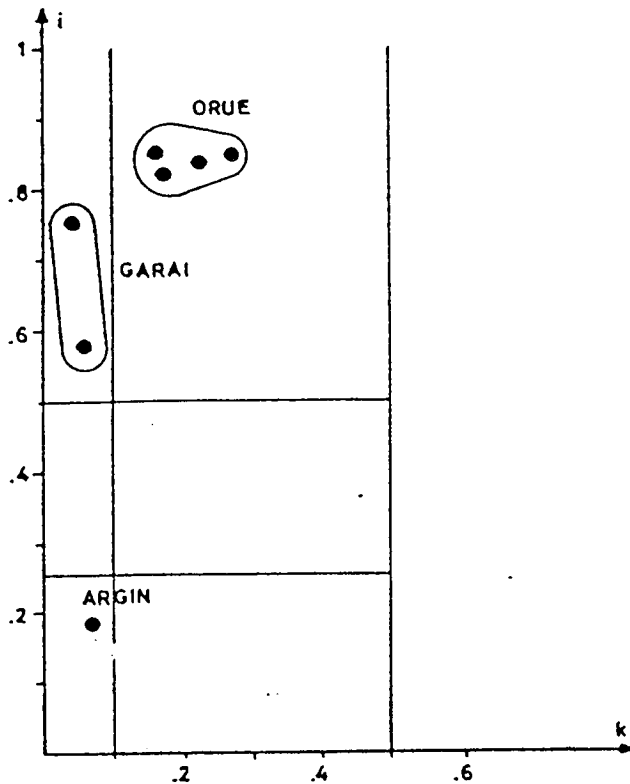


Fig. 12.—Clasificación en el diagrama i-k del sistema de Orue (Aramotz) para cuatro períodos, en base al estudio de la curva de recesión .

Fig. 12.—Classification on the i-k diagram of the Orue system (Aramotz) for the four periods based on the studied recession curve.

— En período de estiaje las oscilaciones bruscas del caudal son características: crecidas instantáneas y decrecidas bastante rápidas. A medida que las precipitaciones

se hacen más frecuentes, la curva va haciéndose más extendida (decrecidas cada vez más lentas).

A partir de la interpretación de estas observaciones se pueden identificar determinados aspectos de la organización del drenaje del sistema drenado por Orue:

— El hecho de que pequeñas precipitaciones no influyen, en cualquier época del año, la evolución de caudales en la surgencia, es indicativo del efecto filtro que el sistema ejerce sobre ellas. Este filtraje puede ser debido al efecto modulador del epikarst, cuya importancia hidrogeológica en Aramotz ha sido puesta de manifiesto anteriormente en base a la información hidroquímica.

— La respuesta ante la precipitación, cuando aquella existe, es muy rápida. La instantaneidad de la respuesta y su amplitud indican una infiltración rápida, de parte del agua precipitada, utilizando para ello una red de fracturas lo suficientemente amplias como para permitir el paso rápido de una cantidad importante de agua, influenciando de esta manera la evolución de caudales en la surgencia.

Ahora bien, el control hidroquímico en la surgencia (Fig. 8) pone de manifiesto que, generalmente, las aguas drenadas durante las crecidas corresponden a aguas con un cierto tiempo de estancia en el acuífero, que son expulsadas hacia el exterior por la onda producida por la llegada al manto de un volumen importante de agua de infiltración rápida. Es el «efecto de caza», que en algunos casos va acompañado por un «efecto de dilución» originado por la mezcla con aguas recientemente infiltradas. Aquí radica la diferencia entre *tránsito* y *transferencia* a nivel de la zona saturada. La respuesta rápida es, por tanto, consecuencia de un cierto desarrollo del drenaje en la zona no saturada, que permite un rápido contacto con el manto de parte del agua infiltrada.

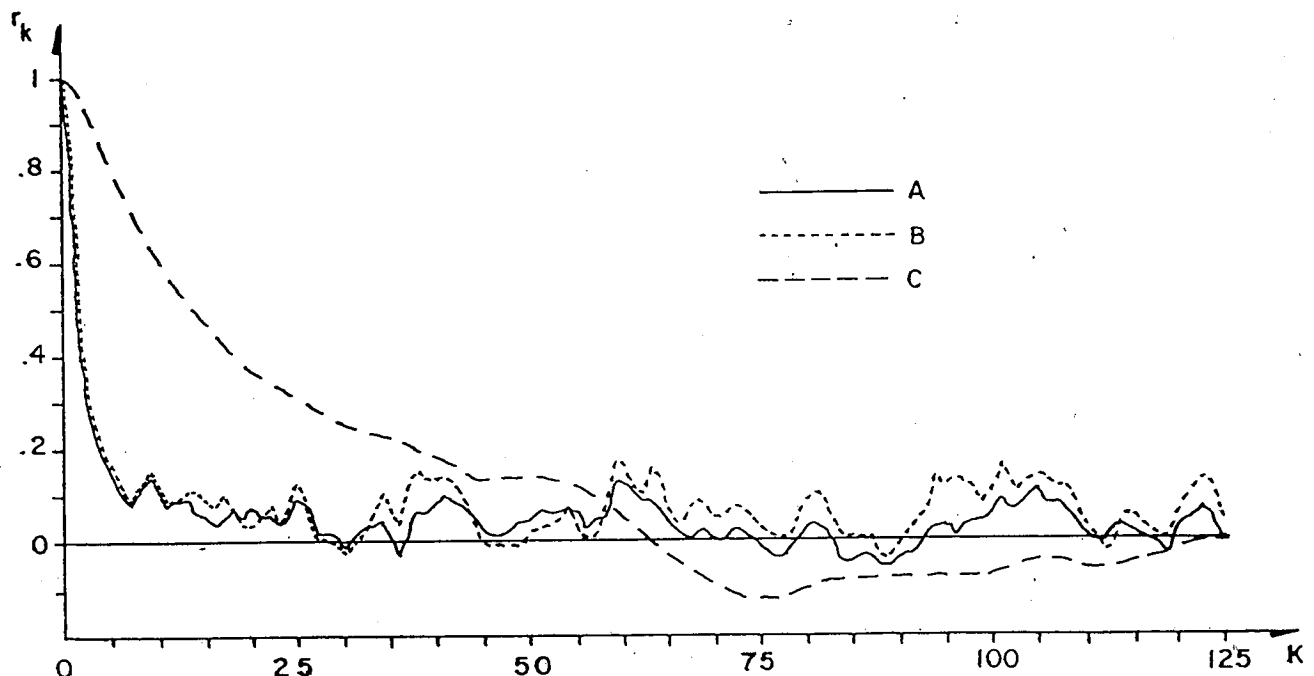


Fig. 13.—Funciones de autocorrelación de las tres surgencias investigadas. A. Ubegi (Itxina). B. Aldabide (Itxina). C. Orue (Aramotz).

Fig. 13.—Autocorrelation functions of the three studied springs.

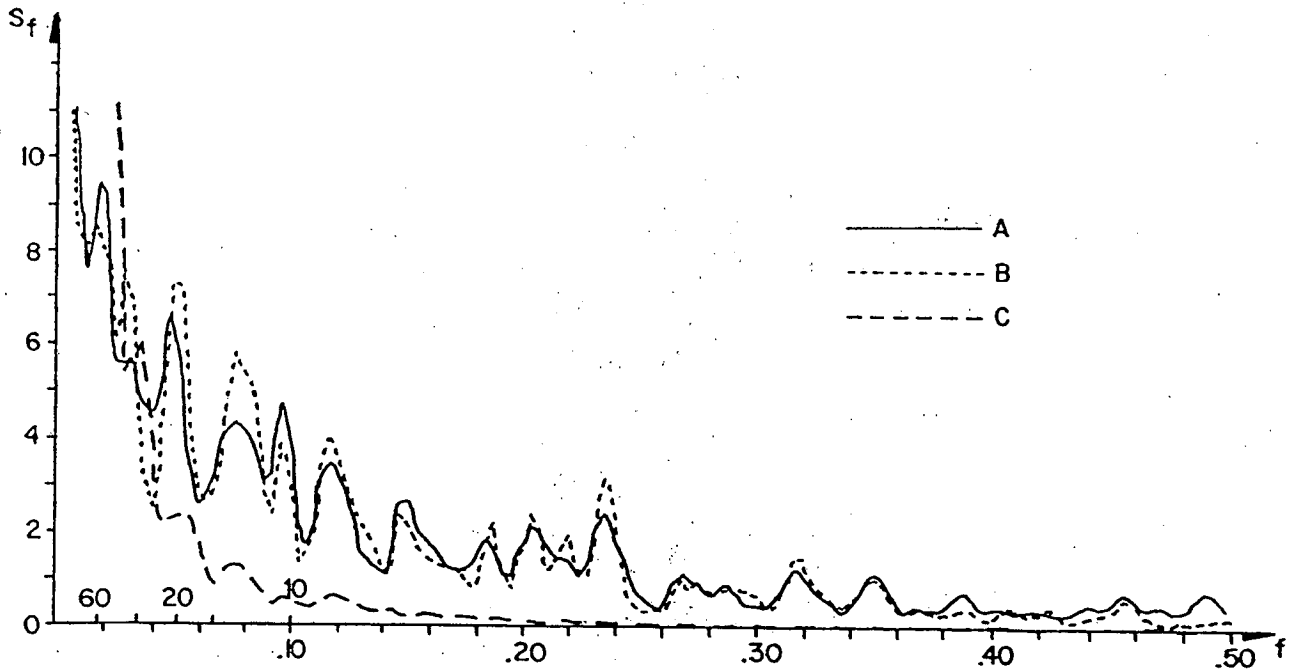


Fig. 14.—Espectros de densidad de varianza de las tres surgencias investigadas. A. Ubegi (Itxina). B. Aldabide (Itxina). C. Orue (Aramotz).
 Fig. 14.—Variance density spectra of the three studied springs.

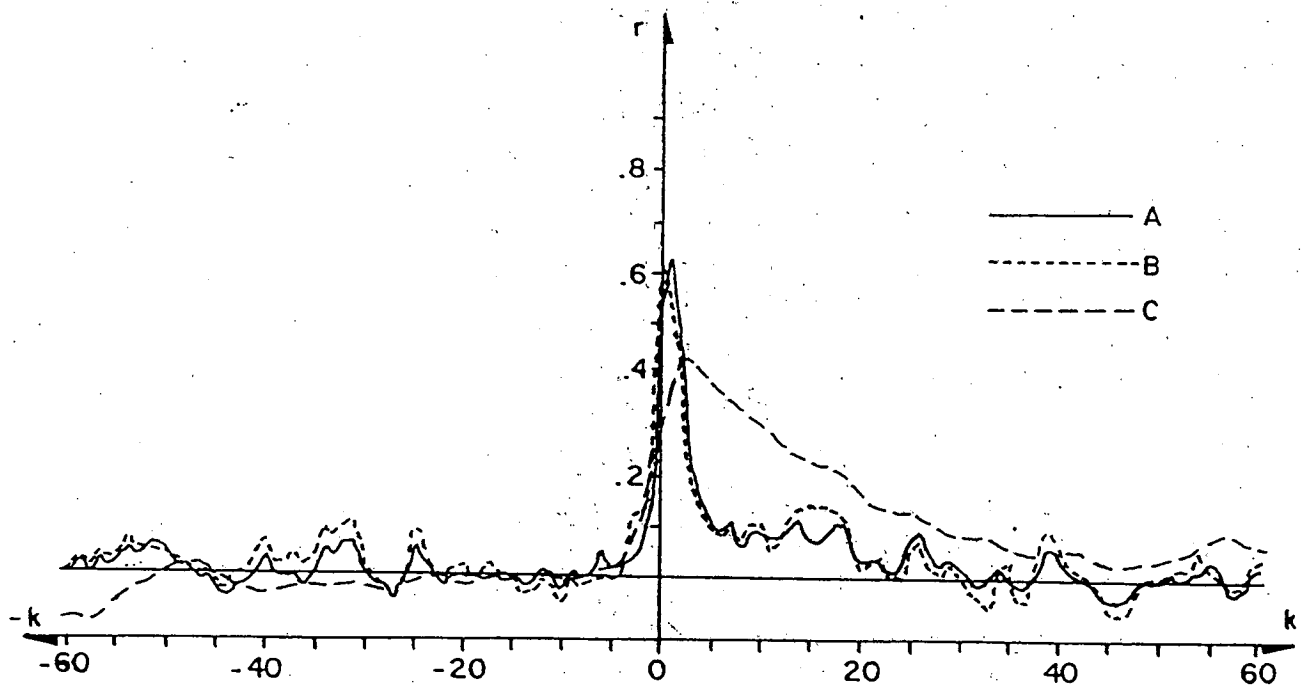


Fig. 15.—Funciones de correlación cruzada (hidrograma unitario) de las tres surgencias investigadas. A. Ubegi (Itxina). B. Aldabide (Itxina). C. Orue (Aramotz).

Fig. 15.—Cross correlation functions (unit hydrogram) of the three studied springs.

— A pesar de haber identificado desarrollo del drenaje en la zona no saturada, pequeñas precipitaciones no ejercen influencia sobre el caudal en la surgencia, tal como se ha señalado anteriormente. Este hecho, aparentemente contradictorio, es lógico teniendo en cuenta que solamente caudales de alimentación al manto (la infiltración rápida, en este caso) superiores a los drenados en ese mismo momento por la surgencia, pueden provocar en ésta aumento del caudal (Antigüedad, 1986). Este fenómeno, junto con el ya citado del epikarst, explica el efecto filtro que el sistema ejerce sobre las pequeñas precipitaciones.

— Las precipitaciones inmediatamente posteriores a una lluvia importante no originan aumento de caudal en la surgencia, sino su sostenimiento dentro de un estrecho margen. Esta cierta estabilización del caudal en la surgencia implica el mantenimiento del caudal de alimentación al manto (componente rápida de la infiltración), a pesar de los nuevos aportes pluviométricos. Se puede, por tanto, pensar en la existencia de límites en el drenaje, debido, probablemente, a colapsos provocados en la red transmisiva por superarse su capacidad de desagüe. Esto favorecería el flujo del agua hacia los bloques capacitivos anexos, menos permeables, constituyendo así un fenómeno de inversión de gradiente (Tripet, 1972), que se sumaría al efecto propio de la componente lenta de la infiltración.

— La forma de la decrecida traduce (Mangin, 1970) el efecto en la surgencia de la infiltración (es decir, la función infiltración modulada por su transferencia a través de la zona saturada), al cual hay que añadir también el del comportamiento propio de la zona saturada durante la decrecida. El suavizamiento de las decrecidas observado en Orue en aguas altas hay que interpretarlo como consecuencia de mecanismos de flujo lento en la zona no saturada. Es la acción de la componente retardada de la infiltración cuya influencia puede mantenerse durante largo tiempo (del orden de 100 días), favorecida, además, por la ya comentada inversión de gradiente.

En conclusión, a partir de las observaciones hechas sobre el hidrograma de Orue, se evidencia una notable *inercia* en el sistema, que se manifiesta en la función moduladora que sobre la infiltración ejerce la zona no saturada, en la cual se identifica un cierto desarrollo del drenaje, que favorece una alimentación rápida al manto, pero con serias limitaciones que favorecen, por su parte, la larga influencia temporal de la componente retardada de la infiltración. Se deduce bajo grado de karstificación funcional e interesante poder autorregulador del sistema.

5.2. Estudio de curvas de recesión en Orue (Aramotz)

La curva de recesión se define como la parte decreciente del hidrograma, es decir, aquella que se extiende desde la punta de crecida hasta el comienzo de la crecida siguiente. Su análisis aporta información sobre la hidrodinámica de los sistemas investigados (Mangin, 1970; Drogue, 1972; Antigüedad *et al.*, 1984). El método pro-

puesto por Mangin (*op. cit.*) para su estudio se basa en la descomposición de la curva en dos partes (decrecida propiamente dicha y agotamiento), cada una de las cuales sirve para identificar aspectos hidrogeológicos de los subsistemas infiltración y saturado. Este mismo autor propone los parámetros i y k para caracterizar la forma de la decrecida y el poder regulador del sistema, respectivamente, a partir de los cuales establece un principio de clasificación que resulta de utilidad para describir y comparar sistemas acuíferos.

En la surgencia Orue se han estudiado cuatro curvas de recesión, correspondientes a otros tantos estiajes fácilmente individualizables durante el período 1983-1985. La situación de las mismas en la clasificación i - k se observa en la Fig. 12, donde se evidencia el regular comportamiento del sistema, con posiciones próximas para los diferentes períodos considerados. El dominio ocupado por Orue es, según Mangin (*op. cit.*), el de los sistemas complejos, con bajo grado de karstificación funcional global, con una relación entrada-salida influenciada grandemente por la función de transferencia a través del acuífero. El alto valor de i (0,82-0,85) es característico de una lenta decrecida (notable influencia de la componente retardada de la infiltración), y el de k (0,16-0,27) propio de sistemas con interés autorregulador, máxime tratándose de acuíferos kársticos. Estos hechos son conformes con lo anteriormente expuesto sobre Aramotz, a partir de otras informaciones.

5.3. Análisis estructural de las series cronológicas en Itxina y Aramotz

Las crónicas de caudales presentan una componente aleatoria, relativa a la señal de entrada (lluvia), y una componente estructural, más o menos marcada, relativa a la función de transferencia operada por el sistema. Esta doble composición hace que se las pueda considerar como variables regionalizadas (Matheron, 1965), y puedan ser tratadas por métodos geoestadísticos. Entre éstos es el Análisis Correlatorio y Espectral (Box y Jenkins, 1976) uno de los más utilizados en el análisis de las crónicas, tendente a la identificación de su estructura, sirviendo, por tanto, al conocimiento del funcionamiento hidrogeológico causante de la misma.

Este tipo de análisis puede realizarse tanto en el dominio temporal (Correlatorio) como frecuencial (Espectral), y en ambos puede ser simple o cruzado, según se considere una sola crónica (lluvias o caudales) o dos conjuntamente como relación causa-efecto (lluvias y caudales). En el presente trabajo se hace referencia solamente a la función de autocorrelación (correlograma) de caudales, de correlación cruzada (hidrograma unitario) y al espectro de densidad de varianza de los caudales, obtenidos a partir de las crónicas de caudales de las surgencias Aldabide y Ubegi, en Itxina, y Orue, en Aramotz, durante el ciclo hidrológico 1982-1984.

El correlograma pone en evidencia la dependencia entre las observaciones de la crónica para intervalos de tiempo cada vez más grandes; traduce, por tanto, el *efec-*

to memoria del sistema: a una mayor influencia a largo plazo corresponde un decrecimiento más lento del correlograma. Las funciones de autocorrelación de las tres surgencias consideradas, aparecen en la Fig. 13. La de Orue muestra una decrecida suave, con aparición de una meseta para valores bajos de r , propia de una cierta complejidad del sistema. El efecto memoria (valor de k para $r = 0,1-0,2$) es elevado, próximo a 45 días, lo que indica interesante capacidad autorreguladora. Los correlogramas de Ubegi y Aldabide, por su parte, muestran una notable similitud. En ambos casos la curva desciende muy rápidamente, evidenciando el escaso poder inercial, modulador, de los sistemas drenados por estas surgencias, y, por tanto, su gran desarrollo del drenaje (grado de karstificación alto). El efecto memoria es, en consecuencia, bajo, del orden de 7 días.

El espectro de densidad descompone la varianza total de la crónica de caudales en función de la frecuencia. Pone de manifiesto las periodicidades observadas en la señal, y representa, por tanto, el efecto filtro operado por el sistema. Se caracteriza por la frecuencia de corte (f_c) a partir de la cual el espectro es nulo o despreciable (ruido blanco). Los espectros de las tres surgencias se observan en la Fig. 14. El de Orue evidencia la tendencia anual (a largo plazo) y un muy buen filtraje ($f_c = 0,09$) en el dominio de las medias y altas frecuencias, indicativo de la importante modulación (organización poco desarrollada del drenaje e interesante zona saturada) que ejerce el sistema. Los espectros de Aldabide y Ubegi, en cambio, reflejan la baja capacidad de filtro ($f_c = 0,25$) de los sistemas respectivos. La información lluvia apenas es modificada a su paso por los acuíferos, lo que indica importante desarrollo del drenaje.

La función de correlación cruzada representa la intercorrelación de dos crónicas finitas, considerada una de ellas (lluvia) como la causa de la otra (caudal). En la medida que la función de entrada es asimilable a un proceso aleatorio, el correlograma cruzado representa la respuesta impulsional del sistema, y ofrece, en consecuencia, una buena imagen del hidrograma unitario. En la Fig. 15 se observan las funciones correspondientes a las tres surgencias consideradas. Los datos pluviométricos se han tomado de estaciones cercanas a las surgencias. En Orue, la forma extendida y poco puntiaguda de la curva es propia de sistemas con dificultad de drenaje y relación entrada-salida compleja. En Aldabide y Ubegi, por su parte, la respuesta impulsional es rápida y puntual, evidenciando un importante desarrollo del drenaje en estos sistemas.

6. CONCLUSIONES

A partir del estudio conjunto, hidroquímico e hidrodinámico, llevado a cabo sobre los macizos kársticos de Aramotz e Itxina, se pueden identificar los aspectos hidrogeológicos que condicionan el funcionamiento de los acuíferos que albergan.

— La diferenciación hidroquímica entre ambos macizos, en lo que a los elementos de origen meteórico respecta, evidencia una infiltración mayor y más rápida en Itxina, mientras que en Aramotz es notable la función moduladora y de filtro ejercida por el epikarst, también puesta de manifiesto por la interpretación del hidrograma. Se muestra la diferente funcionalidad de las formas de absorción exokársticas. Se deduce menor desarrollo del drenaje subsuperficial en Aramotz.

— Considerando la hidroquímica consecuencia directa de la hidrodinámica del acuífero, se atribuye a ambos macizos un diferente grado de organización del drenaje kárstico. En Itxina se deducen flujos rápidos desde las zonas de recarga a las de descarga, mientras que en Aramotz la karstificación funcional es menos intensa, con una circulación más retardada. El conocimiento espeleológico de ambos macizos apoya esta afirmación. De todas formas, los procesos actuales de karstificación son algo más activos en Aramotz (64 mm/1.000 años) que en Itxina (52 mm/1.000 años).

— La variabilidad temporal de la mineralización (conductividad) es característica del tipo de flujo realizado. A partir de esta información se evidencia el predominio que en Aramotz presenta la componente retardada de la infiltración, consecuencia de un sistema de flujo de tipo difuso. La información hidroquímica se muestra como adecuada referencia para una correcta interpretación del hidrograma (distinción entre tránsito y transferencia), evidenciándose así la escasa dilución de la mineralización que, por lo general, se da en aguas altas en las surgencias de Aramotz, lo que incide en el interés regulador de sus reservas.

— En base a la observación de las secuencias crecida-decrecida-agotamiento de los hidrogramas de Orue (Aramotz), se evidencia un cierto desarrollo del drenaje en la zona no saturada, que aunque favorece la componente rápida de la infiltración, también la limita, provocando un sostenimiento del caudal de alimentación al manto, además de una inversión de gradiente hacia zonas anexas más capacitivas. De todo ello resulta un predominio generalizado, en volumen, de la infiltración retardada, cuya influencia en la surgencia puede mantenerse durante largo tiempo (del orden de 100 días). Para el conjunto del sistema se deduce bajo grado de karstificación funcional.

— El estudio estructural de las crónicas de caudales, por su parte, muestra el importante efecto memoria que presenta el sistema drenado por Orue (Aramotz), con una relación entrada-salida influenciada y compleja, lo que le confiere un interesante poder autorregulador de sus reservas. En las surgencias de Itxina, por el contrario, se evidencia un notable desarrollo del drenaje kárstico, con respuestas puntuales y muy rápidas, propias de sistemas con escaso poder de regulación.

— En conjunto, considerando toda la información tratada, y en base a clasificar los sistemas investigados dentro de la tipología propuesta (Bayó *et al.*, 1986) para los acuíferos carbonatados, podemos concluir que el macizo de Itxina alberga acuíferos del tipo *kárstico (s.str.)* con abundantes formas de absorción y buen

desarrollo espeleológico, bloques de pequeña permeabilidad y grandes colectores, y, por tanto, de escasa regulación natural y sin reservas de interés. El sistema de Orue (Aramotz) por el contrario, muestra un comportamiento más inercial próximo al acuífero de *flujo difuso*, con notable influencia de la infiltración retardada y relativo bajo grado de karstificación funcional; el poder de regulación natural es alto y las reservas pueden ser importantes. Recientemente se ha realizado una tipología de acuíferos kársticos de Vizcaya (Antigüedad *et al.*, 1987) en la cual se incluyen además de los ahora tratados, otros sistemas kársticos de la provincia.

7. AGRADECIMIENTOS

Los datos aquí considerados forman parte de la Tesis Doctoral del autor, realizada en el marco del Estudio Hidrogeológico de Vizcaya que financiado por la Diputación Foral fue llevado a cabo, entre 1982 y 1986, por el Departamento de Geotectónica de la Universidad del País Vasco (EHU/UPV), por medio de la Fundación Eusko-Iker. Mi agradecimiento a la Diputación Foral por la utilización de los datos, y también a los miembros del Bizkaitar Espeleologi Taldea, dependiente de la misma, que tomaron las muestras analizadas en Itxina.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguiayo, J., Antigüedad, I., García de Cortázar, A., Martínez, J., y Ortega, A. (1986): Hidrodinámica e hidroquímica del Macizo de Oiz. *Lurralde: Inv. y Espacio*, 9, 85-104. San Sebastián.
- Andrieux, C. (1978): Les enseignements apportés par la thermique dans le karst. In: *Le Karst, son originalité physique, son importance économique*. Coll. Tarbes (Francia). A.G.S.O., 48-63.
- Angeli, B. (1976): Exemples pratiques d'études des températures des eaux profondes et de surface dans le cadre de recherches d'eau. *2^e Coll. Hydrol. Pays Calcaire*, 25, 3^eme série. Univ. Besançon.
- Antigüedad, I., Eraso, A., y Cruz-Sanjulián, J. (1984): Análisis e interpretación de las curvas de recesión correspondientes a dos surgencias kársticas en la provincia de Bizkaia. *I Congr. Esp. Geol.*, IV, 17-27. Segovia.
- Antigüedad, I. (1985): Contribución de la hidroquímica al conocimiento de las características hidrogeológicas y de karstificación del macizo de Aramotz (Bizkaia). *Kobie*, 15, 165-174. Bilbao.
- Antigüedad, I. (1986): Estudio hidrogeológico de la cuenca del Nervión-Ibaizabal: contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos. *Tesis Doctoral*, Univ. País Vasco. 338 págs.
- Antigüedad, I., Ibarra, V., y Morales, T. (1987): Tipología de sistemas acuíferos kársticos de Bizkaia a partir del análisis correlatorio y espectral. *IV Simp. Hidrogeol.*, XI, 331-344. Palma de Mallorca.
- Bakalowicz, M. (1976): Géochimie des eaux karstiques. Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains. *2^e Coll. Hydrol. Pays Calcaire*, 25, 3^eme série. Univ. Besançon.
- Bakalowicz, M. (1979): Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. *Thèse Doct.*, Univ. Paris VI. 269 p.
- Bayó, A., Castiella, J., Custodio, E., Niñerola, S., y Virgos, L. (1986): Ensayo sobre las diversas tipologías de acuíferos en rocas carbonatadas de España. *Jorn. karst en Euskadi*, 2, 255-340. San Sebastián.
- Box, G.E.P., y Jenkins, G.M. (1976): *Time Series Analysis: Forecasting and control*. Holden day. 575 p. San Francisco.
- Cruz-Sanjulián, J., y Sáenz de Echenique, F. (1980): Consideraciones preliminares sobre la Hidrogeología del karst de Itxina (Vizcaya). Estimación del coeficiente de infiltración y de la evapotranspiración real. *Estudios Geol.*, 36, 281-287.
- Cruz-Sanjulián, J., Antigüedad, I., Morales, T., Ibarra, V., Arrizabalaga, I., García, F., González, J.C., y Sancho, V. (1986): Estudio Hidrogeológico de Bizkaia. *Dip. For. Bizkaia*. Proy. Inv.
- Drogue, C. (1972): Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. *Jour. Hydrol.*, 15, 49-68.
- G.E.V. (1983, 1984): Aportación de datos para el conocimiento del karst de Gorbea (Vizcaya). *Kobie*, 13, 371-464; 14, 499-541. Bilbao.
- G.E.V. (1985): Bizkaiko haitzuloen katalogoa-Catálogo de cuevas de Vizcaya. *Dip. For. Bizkaia*, 364 págs. Bilbao.
- Jacquet, J. (1971): Aspects généraux de la représentation mathématique des phénomènes en hydrologie de surface. *La Houille Blanche*, 2, 105-110.
- Kiraly, L., y Morel, G. (1976): Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulé par modèles mathématiques. *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, 1, 37-60.
- Kiraly, L., y Müller, I. (1979): Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: effet sur la variation du chimisme des sources karstiques. *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, 3, 237-285.
- Lacas, J.L. (1976): Introduction à la méthodologie d'étude et d'utilisation des champs hydrothermiques des aquifères karstiques d'après l'exemple du site de l'exurgence de la source de Lez (Hérault-France). *Thèse Doct.*, Univ. Montpellier. 68 p.
- Lepiller, M. (1980): Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique du massifs calcaires. *Thèse Doct.*, Univ. Grenoble.
- Mangin, A. (1970): Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Ann. Spéléol.*, 25, 3, 581-610.
- Mangin, A. (1975): Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Ann. Spéléol.*, 29, 3, 283-332; 4, 495-601; 30, 1, 21-124.
- Matheron, G. (1965): *Les variables régionalisées et leur estimation. Une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature*. Masson. 305 págs. Paris.
- Mathys, A. (1982): Interprétation de données physico-chimiques des sources de la région Delémont-Develier (Canton du Jura); à l'aide de l'analyse statistique multivariée. *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, 4, 185-212.

- Miserez, J.J. (1973): Géoquimie des eaux du karst jurassien. Contribution physico-chimique à l'étude des altérations. *Thèse Doct.*, Univ. Neuchâtel, 313 págs.
- Moeschler, P., Müller, I., y Schotterer, U. (1982): Les organismes vivants, indicateurs naturels dans l'hydrodynamique du karst, confrontés aux données isotopiques, chimiques et bacteriologiques, lors d'une crue de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois, Suisse). *Beitr. Geol. Schweiz. Hydrologie*, 28, 213-224.
- Müller, I., y Plancherel, R. (1982): Contribution à l'étude de l'hydrogéologie karstique du massif du Vanil Noir et de la chaîne des Gastlosen (Préalpes fribourgeoises, Suisse). *Bull. Soc. Frib. Sci. Nat.*, 71, 102-132.
- Pulido, A., y Castillo, E. (1984): Quelques considérations sur la structure des aquifères carbonatés du Levant espagnol, d'après les données de captages d'eau. *Karstologia*, 4, 38-44.
- Rat, P. (1959): Les pays crétacés basco-cantabriques (Espagne). *Thèse Doct.*, Univ. Dijon. 525 págs.
- Rouch, R. (1978): Le système karstique et son unité biologique. In: *Le karst, son originalité physique, son importance économique*. Coll. Tarbes (France). A.G.S.O., 38-47.
- Schoeller, H. (1962): *Les eaux souterraines*. Masson. 642 págs. Paris.
- Shuster, E.T., y White, W.B. (1971): Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers. *Jour. Hydrol.*, 14, 93-128.
- Ternan, J.L. (1972): Comments on the use of a calcium hardness variability index in the study of carbonate aquifers: with reference to the Central Pennines, England. *Jour. Hydrol.*, 16, 317-321.
- Tripet, J.P. (1972): Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). *Thèse Doct.*, Univ. Neuchâtel. 183 págs.
- White, W.B. (1984): Rate Processes: Chemical Kinetics and Karst landform development. In: *Groundwater as a Geomorphic Agent*. (R.G. La Fleur Ed.). Allen and Unwin. 227-248.

Recibido el 12 de julio de 1987
Aceptado el 8 de diciembre de 1987