

Primeros resultados obtenidos sobre el funcionamiento hidrogeológico de la Lagunas de Estaña y su relación con el acuífero de Estopiñán (Huesca, España)

C. Pérez y L. J. Lambán

Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Proyectos de Zaragoza. C/ Manuel Lasala, 44, 9ºB, 50006 Zaragoza
c.perez@igme.es, javier.lamban@igme.es

RESUMEN

La zona de estudio se sitúa en las Sierras Marginales Pirenaicas. Destacan el Sinclinal de Estopiñán, compuesto por dos niveles permeables: Cretácico Superior y Eoceno, y las lagunas endorreicas kársticas de Estaña. Se presentan los primeros resultados obtenidos de la caracterización hidrogeoquímica e isotópica (δO^{18} , δH^2 y H^3) de las aguas subterráneas, con la finalidad de determinar, junto con otros estudios, la relación de las Lagunas de Estaña con el acuífero de Estopiñán, así como el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico del sistema. Dicha caracterización ha permitido diferenciar los principales tipos de agua subterránea, así como deducir cualitativamente los procesos hidroquímicos dominantes, observándose una variabilidad química regional atribuida a los diferentes niveles acuíferos así como a procesos de mezcla. Por otro lado, se presenta una cartografía geológica detallada en el entorno de las lagunas, que ha supuesto una mejora en el conocimiento de la geología y estructura de la zona de estudio.

Palabras clave: aguas subterráneas, hidrogeología, hidrogeoquímica, isótopos, Lagunas de Estaña, Sinclinal de Estopiñán

First results obtained about the hydrogeological behaviour of the Estaña Lakes and their relation with Estopiñán aquifer (Huesca, Spain)

ABSTRACT

The study area is located in the Pyrenean Marginal Sierras. The main structural features are the Estopiñán syncline, made of two permeable levels: Upper Cretaceous and Eocene, and the endorheic karstic Lakes of Estaña. In this work we present the first results obtained of the hydrogeochemical and isotopic (δO^{18} , δH^2 and H^3) groundwater description, made to determine, with other studies, the relation between Lakes of Estaña and Estopiñán syncline, as well as the general hydrological and hydrogeological functioning. This description allowed us to differentiate the groundwater main groups and to deduce qualitatively the chemical dominating processes, observing a larger regional chemical variability mainly attributed to the different permeable levels as well as mixing processes. On the other hand, there is exposed a geological cartography made in the surrounding area of the lakes, which suggest an improvement in the knowledge of the geology and hydrogeology of this area.

Key words: Estaña Lakes, Estopiñán syncline, groundwater, hydrogeology, hydrogeochemistry, isotopes

Introducción y objetivos

Este trabajo presenta los resultados de los primeros estudios realizados para la elaboración de la tesis doctoral *“Funcionamiento hidrológico e hidrogeológico de las Lagunas de Estaña y su relación con las aguas subterráneas”* que se centra en el estudio de este humedal dentro de un marco hidrogeológico más amplio, y que tiene como principal objetivo determinar el origen de las lagunas, así como su posible relación con el acuífero carbonatado del Sinclinal de Estopiñán. En este trabajo se recopilan los prime-

ros resultados obtenidos sobre el estudio hidrogeológico, hidrogeoquímico e isotópico del entorno del humedal de Estaña.

Esta tesis doctoral se enmarca a su vez en el ámbito del proyecto de I+D del Instituto Geológico y Minero de España *“Funcionamiento hidrológico de humedales relacionados con la aguas subterráneas en la Cuenca del Ebro”* (2007-2010). Asimismo forma parte de los estudios realizados por el grupo AQUIFER, Grupo Consolidado de Investigación Aplicada reconocido por el Gobierno de Aragón.

La motivación que ha llevado a elegir las Lagunas

de Estaña como marco de actuación de esta tesis doctoral, parte del interés tanto de la Confederación Hidrográfica del Ebro, como del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón, por conocer el origen y funcionamiento hidrológico e hidrogeológico de este humedal, con objeto de mejorar su gestión, ya que se trata de una zona protegida por la Red Natura 2000, como lugar de interés comunitario (LIC). Dado que no constan antecedentes de estudios hidrogeológicos en las Lagunas de Estaña, no existe una definición clara de los límites hidrogeológicos. Por lo que las actividades actuales se están centrando en la definición de dichos límites, con el fin de aportar nuevos datos para ayudar a la conservación del humedal, ya que estos ecosistemas son extremadamente sensibles a las variaciones del régimen natural.

Además de la cartografía geológica y del estudio hidroquímico aquí presentados, se han instalado dispositivos para el control continuo tanto de la lámina de agua en las lagunas como de los caudales en los manantiales principales, así como una estación meteorológica completa junto al Estanque Grande de Abajo, que aportarán una información fundamental para realizar balances hidrometeorológicos en la cuenca vertiente al humedal y para cuantificar las componentes del ciclo del agua en el suelo, zona no saturada y acuífero, así como balances hídricos tanto en la cuenca vertiente como en las lagunas. Por otro lado, se está trabajando con la información piezométrica existente y se han realizado nuevas campañas de medida de niveles con la finalidad de conocer el funcionamiento hidrogeológico del sistema. Debido a la falta de puntos de agua en la zona próxima al humedal, esta prevista la realización de varios sondeos de investigación en el verano de 2009, que permitan tener acceso e información sobre el acuífero próximo a las lagunas.

Otra línea de investigación, consistirá en la monitorización de la zona ripariana mediante drive points en la zona somera, con el objetivo de conocer las reacciones que sufren los contaminantes en el suelo, en concreto el nitrato, así como su posible atenuación natural, para anticipar y prever los posibles problemas de contaminación y plantear diferentes escenarios de gestión.

En la actualidad se continúan realizando investigaciones, cuyo objetivo más inmediato es el establecimiento de los límites hidrogeológicos, determinar las relaciones entre el agua subterránea y las lagunas en condiciones naturales así como establecer previsiones de evolución bajo distintos escenarios de gestión y ante posibles cambios ambientales naturales y/o antrópicos.

Antecedentes

Los primeros antecedentes de importancia en cuanto a la hidrogeología de la región datan de la década de los 80. En DGA (1985) y en ITGE (1986) se realiza el primer trabajo de carácter general que aporta datos de campo, tales como inventario de puntos de agua, se realizan diferentes campañas de control hidrométrico y se estudia la calidad del agua. Posteriormente, el ITGE realiza trabajos de carácter local en relación con pequeños abastecimientos urbanos, como el "*Estudio hidrogeológico para abastecimiento urbano a la localidad de Estopiñán del Castillo*" (1989). En esta época Sancho (1988) analiza los aspectos genéticos y evolutivos del Polje de Saganta y sus principales características morfológicas, poniendo de manifiesto procesos de disolución kárstica, así como acumulación de tobas y travertinos. En 1994, el Ministerio de Industria y Energía en colaboración con el IGME publica el "*Estudio de las aguas minero-medicinales, minero-industriales, termales y de bebida envasadas en la Comunidad Autónoma de Aragón*" (IGME, 1994a), en el que se recopila un inventario de los principales puntos de agua y sus características, incluyendo los manantiales del Molar y el Balneario de Camporrells.

Más reciente es el "*Proyecto de puesta en riego de la Litera Alta*" (CHE, 2000), que investiga las posibilidades de explotación de las serranías más meridionales y que cuenta con un ensayo de bombeo de larga duración. Posteriormente, se realiza el "*Estudio de recursos hídricos subterráneos de los acuíferos de la margen izquierda de la cuenca del Ebro. Zona oriental*", para el Plan Hidrológico de Cuenca (CHE, 2002). En el año 2004 dentro del Curso Internacional de Hidrología Subterránea de Barcelona (CIHS) se realiza el "*Estudio hidrogeológico del Sinclinal de Estopiñán (Huesca)*" (Villa y Gracia, 2004), que incluye una campaña de medidas de niveles y una piezometría preliminar, así como una primera interpretación hidrogeoquímica, concluyendo que se trata de un acuífero kárstico multicapa con tres subunidades (Cretácico, Paleoceno y Eoceno) conectadas hidráulicamente. En el mismo año Cuchí (2004), realiza un breve informe sobre las características y problemas de este acuífero, poniendo de manifiesto la vulnerabilidad del medio kárstico y planteando un método numérico para su cálculo. Por último, en 2007, se realiza la "*Actualización del estudio hidrogeológico del Sinclinal de Estopiñán (Huesca)*" en el marco del mismo curso CIHS (González y Oliván, 2007), mejorando el estudio piezométrico y aportando un primer balance aproximado en el Sinclinal de Estopiñán.

En cuanto a la primera publicación que hace refe-

rencia al estudio de las Lagunas de Estaña, esta se remonta a Ávila *et al.* (1984), donde se resumen datos sobre la composición química, fitoplancton y zooplancton en el Estanque Grande entre febrero de 1979 y marzo de 1980. Además, se presenta una sencilla batimetría y se define el carácter monomíctico de esta laguna. Trabajos posteriores de Montesinos E. *et al.* (1983), Esteve *et al.* (1983, 1992), Guerrero R. *et al.* (1985, 1986), Gaju (1992), Miracle *et al.* (1992), Wansard *et al.* (1998), Riera *et al.* (2006) y Martínez *et al.* (2007), hacen referencia a las características microbiológicas de la Laguna Grande de Estaña.

Las publicaciones más recientes en torno a las Lagunas de Estaña aparecen en López-Vicente *et al.* (2006, 2007, 2008), donde se modeliza la pérdida de suelo en la cuenca endorreica de Estaña y se identifican los periodos erosivos en la misma. Por otro lado, Morellón *et al.* (2007) realizan una reconstrucción paleohidrológica y climática del Holoceno a partir del registro sedimentario en la Laguna Grande de Estaña.

Marco geográfico

La zona de estudio se sitúa al este de la provincia de Huesca (NE de España), en el sector central del Prepirineo aragonés, entre las comarcas de Litera Alta y la Baja Ribagorza, unos 15 km al sur de la población de Benabarre (Fig. 1). Se encuentra limitada al oeste por la Sierra Carrodilla y al este por la Sierra del Montsec. Desde un punto de vista hidrográfico se halla entre las cuencas de los ríos Cinca y Noguera Ribagorzana. Presenta una extensión aproximada de 178 km², englobando las localidades de Purroy de la Solana, Castillo del Pla, Pilzán, Saganta, Camporells, Estopiñán del Castillo y Estaña. El relieve medio oscila entre los 650 y 1000 ms.n.m, destacando varias alineaciones montañosas como la Sierra de San Quílez al suroeste, cuya cota máxima alcanza los 1100 ms.n.m. La zona se caracteriza por ser predominantemente agrícola (cereales y cultivos de secano) y ganadera (porcino y ovino). En este contexto destacan las Lagunas endorreicas de Estaña, de

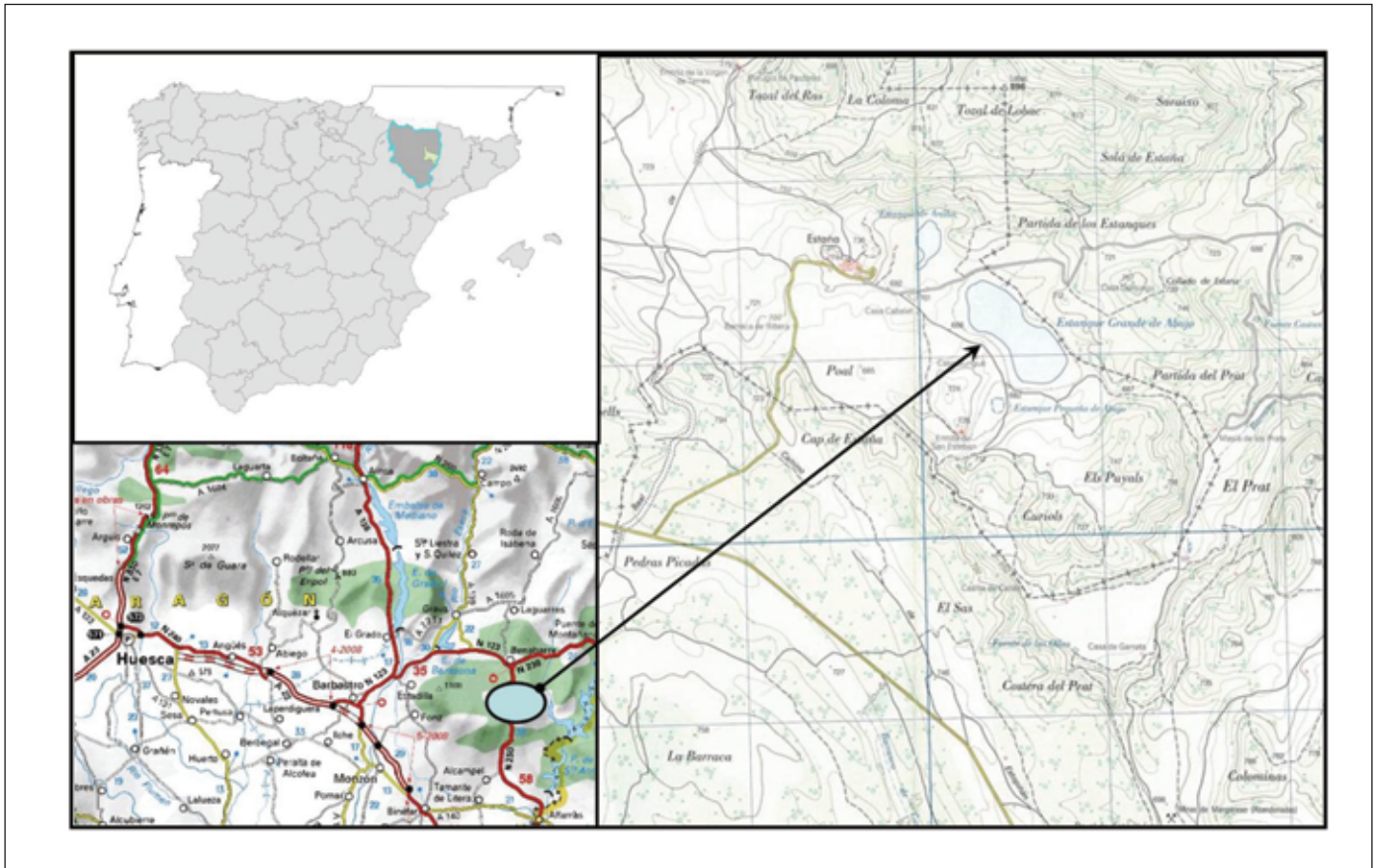


Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio
Figure 1. Study area geographic situation

origen kárstico, de especial interés tanto hidrogeológico como ecológico.

Descripción y caracterización de las lagunas

Se trata de unas lagunas endorreicas de origen kárstico situadas en las proximidades de Estaña, en torno a los 670 ms.n.m. Se diferencian dos lagunas principales (Fig. 2), una superior, más pequeña (Estanque de Arriba) y otra, de mayores dimensiones (Estanque Grande de Abajo), situada a una cota inferior. El Estanque Grande de Abajo tiene una longitud aproximada de 680 m y una anchura de unos 270 m en su zona más ancha. Presenta paredes muy verticalizadas y un umbral en el sector central quedando dividida en dos zonas diferenciadas con profundidades máximas de 12 y 20 m. En épocas de sequía, este umbral puede quedar al descubierto apreciándose una morfología en forma de uvala. Esta laguna se encuentra conectada con el Estanque de Arriba mediante un dren artificial en parte obstruido en la actualidad.

Las Lagunas de Estaña constituyen un espacio protegido por la Red Natura 2000 considerado como Lugar de Interés Comunitario (LIC). La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ha realizado recientemente una tipificación de lagos y humedales en coherencia con el sistema A del Anexo II de la DMA y con los criterios adoptados por el CEDEX en España. Según esta clasificación, las Lagunas de Estaña constituyen un humedal de origen hipogénico, con hidro-

periodo permanente poco fluctuante, representativo de los tipos humedal de cuenca de sedimentación, kárstico, grande (>50 ha). Según la clasificación recogida en el Anexo XI, las Lagunas de Estaña se sitúan en la región ecológica 1- ibérico-macaronésica. El humedal parece encontrarse próximo a su estado natural, reuniendo las condiciones hidromorfológicas, biológicas y fisicoquímicas específicas de "buen estado ecológico" del tipo de humedal que representa y se podría considerar como un humedal de referencia. Por este motivo es fundamental su estudio y protección.

Se ha planteado como hipótesis de su origen procesos de disolución que afectan a los materiales salinos de las Facies Keuper, dando lugar a las lagunas a partir de dolinas de colapso (López-Vicente, 2007). Existen morfologías similares que pueden observarse en las cercanías de las lagunas sobre los materiales del Muschelkalk. Las lagunas se encuentran ubicadas sobre materiales cuaternarios procedentes, tanto de los procesos de relleno de estas dolinas, como de los propios depósitos endorreicos y lagunares producidos por la sedimentación de la laguna durante el Holoceno. Existe constancia histórica de que las mismas han presentado en diversos periodos una extensión mayor que la actual (Morellón *et al.*, 2007).

La contaminación difusa por sustancias fitosanitarias procedentes de las actividades agrícolas, así como una posible contaminación puntual por actividades ganaderas, son las principales presiones a las que se encuentran expuestas las lagunas, incremen-



Figura 2. a) Estanque Grande de Abajo; b) Estanque Pequeño de Arriba
Figure 2. a) *Belower Big Lake*; b) *Upper Small Lake*

tando la posibilidad de contaminación por nitratos, metales pesados y otras sustancias, hecho que ya se ha observado en un manantial cercano. Cabe destacar que al encontrarse sobre materiales karstificados es una zona vulnerable a la contaminación.

Marco geológico e hidrogeológico

Desde un punto de vista geológico, el área de estudio se sitúa en las Sierras Marginales Pirenaicas, al norte de los materiales terciarios de la Cuenca del Ebro y al sur del retrocabalgamiento que limita los conglomerados de la cuenca de Graus. Las Sierras Marginales conforman una alineación ONO-ESE constituida por materiales del Triásico, Cretácico Superior y Eoceno, dispuestos según una serie de láminas de cabalgamiento con un importante desplazamiento hacia el sur, de forma que se superponen en toda su extensión a los depósitos terciarios continentales de la Cuenca del Ebro (Fig. 3). El principal rasgo geológico

estructural de la zona es el Sinclinal de Estopiñán, dentro de la lámina cabalgante de Monte Perdido que se encuentra desplazada hacia el S, con un nivel de despegue formado por los materiales del Keuper, cabalgando sobre los materiales del autóctono relativo del terciario de la Cuenca del Ebro. Este sinclinal presenta una orientación NNO-SSE, con una curvatura sigmoidal de su eje. Dicha curvatura se interpreta como resultado de una "cizalla" sinistral en la que el flanco N es arrastrado hacia el O y el S hacia el E, combinado con el empuje de dirección N-S general de los Pirineos (IGME, 1994b). Esta disposición se interpreta como correspondiente a la rampa lateral del cabalgamiento que limita la Unidad Surpirenaica Central.

Desde el punto de vista hidrogeológico, las Lagunas se sitúan al NE del Sinclinal de Estopiñán, que constituye el acuífero principal de la zona de estudio (Fig. 4). Se trata de un acuífero multicapa constituido por los materiales carbonatados del Cretácico superior y del Eoceno, separados por los

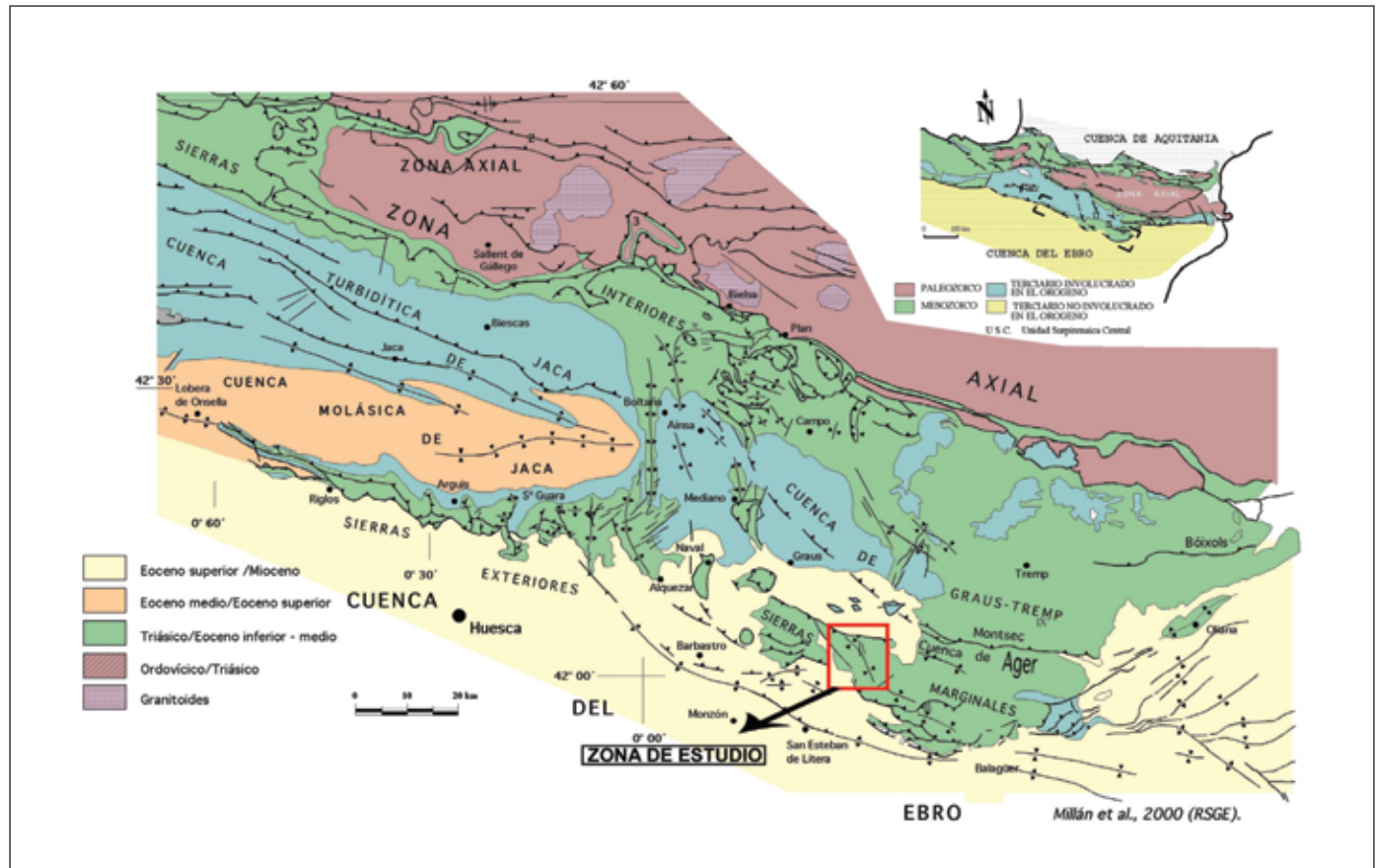


Figura 3. Marco geológico regional de la zona de estudio (modificado de Millán, 2000)
 Figure 3. Regional geologic framework of the study area (modify from Millán, 2000)

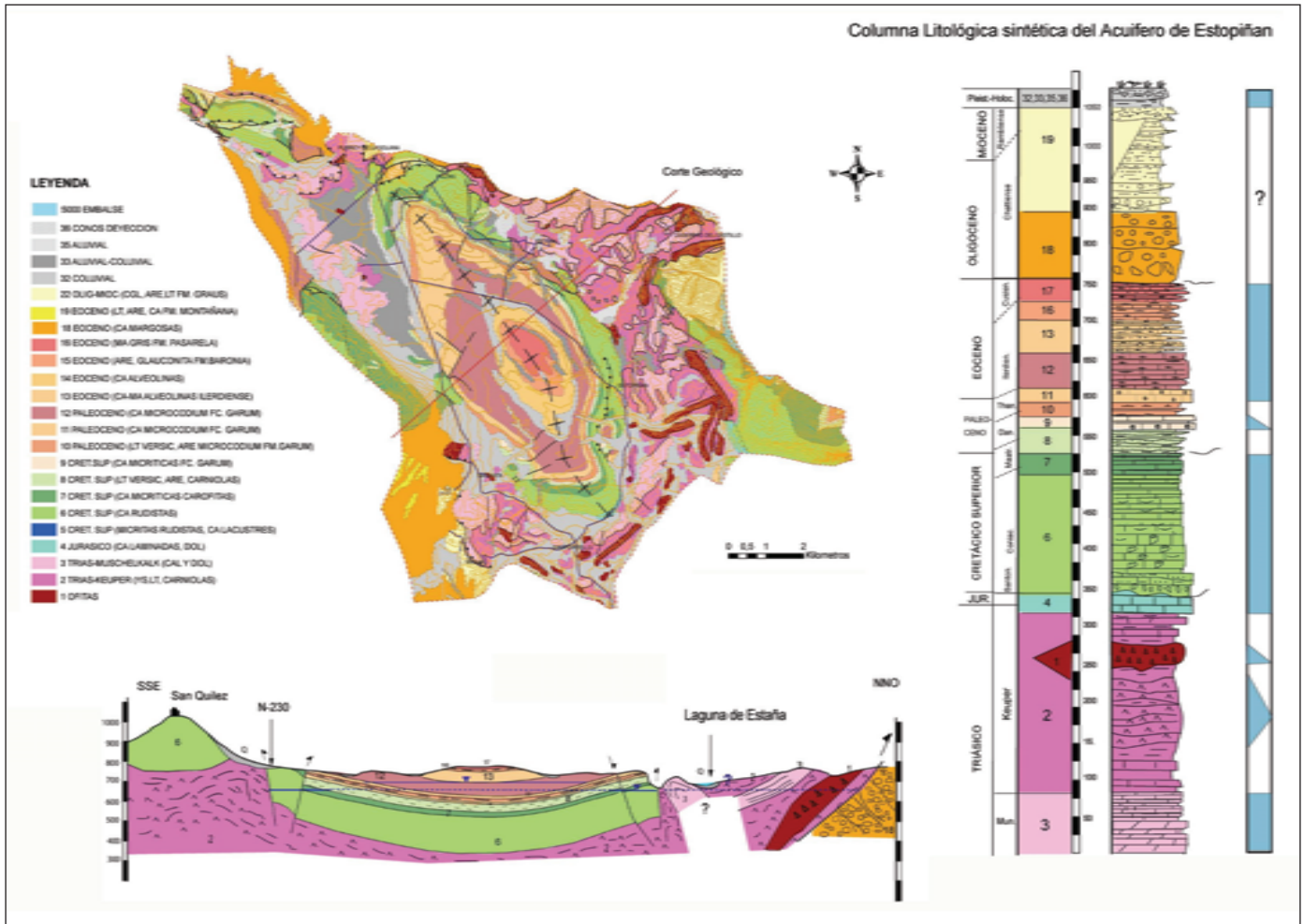


Figura 4. Marco geológico, columna litológica sintética y corte geológico de la zona de estudio
 Figure 4. Study area geological framework, synthetic lithographic column and geological section of the study area

materiales poco permeables o acuitardo del Paleoceno en facies Garum. Las Lagunas se sitúan sobre materiales triásicos karstificados, tanto carbonatados de las facies Muschelkalk, como evaporíticos y arcillosos de las facies Keuper. La zona de estudio está delimitada al N por el retrocabalgamiento que pone en contacto la Cuenca Oligocena Tresp-Graus con las Sierras Marginales Pirenaicas, al E limita con el río Noguera Ribagorzana y Embalse de Canelles, mientras que al S y O limita con las sierras de San Quilés y la Voltería respectivamente, que se interpretan como divisorias de aguas superficiales y subterráneas.

Los niveles permeables que se han identificado corresponden a los materiales dolomíticos triásicos de las facies Muschelkalk, las calizas del Cretácico Superior y Eoceno Inferior, y las terrazas, glaciares y rellenos de dolinas del Cuaternario. El Muschelkalk

parece no presentar continuidad lateral, mientras que los materiales del Cretácico Superior constituyen el acuífero principal a nivel regional, al que se atribuyen las descargas más importantes de la zona como la fuente de las Ollas o la fuente del Molar. El Eoceno, conforma pequeños acuíferos locales con puntos de descarga como la fuente Redonda.

Geología de detalle

Se ha realizado una cartografía geológica de detalle a escala 1:5000 de los materiales aflorantes en las proximidades de las Lagunas de Estaña, con objeto de identificar una posible continuidad lateral de los materiales del Muschelkalk así como conocer la geometría del acuífero (Fig. 5). Los movimientos tectónicos que originaron el Sinclinal de Estopiñán, son pro-

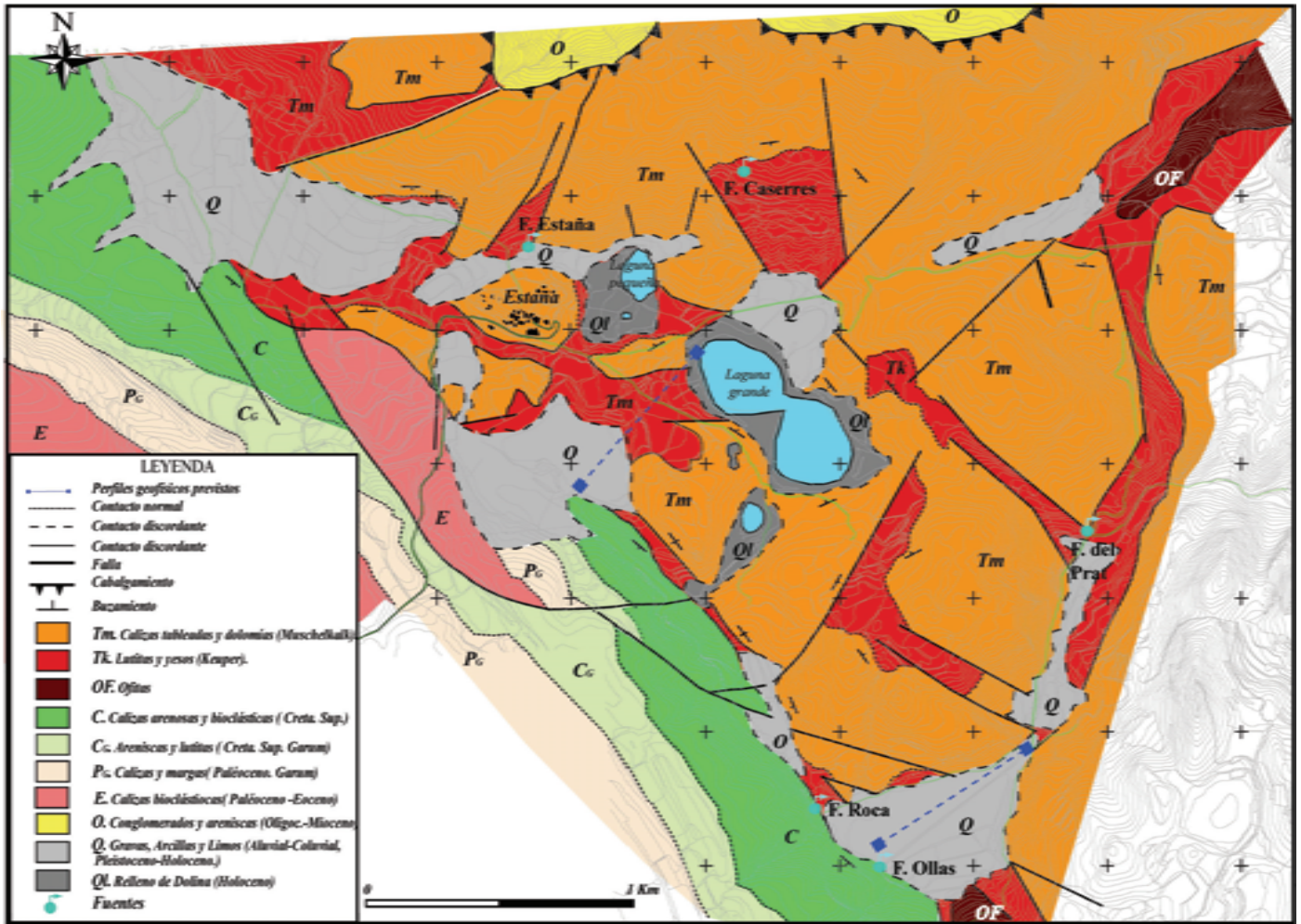


Figura 5. Mapa geológico de detalle en el entorno de las Lagunas de Estaña (Pérez et al., 2008)
 Figure 5. Detailed geological map realized in the environment of Estaña's Lakes (Pérez et al., 2008)

bablemente responsables de la aparente disposición caótica y desordenada que presentan entre si los bloques de materiales carbonatados del Muschelkalk y su compleja relación con los materiales del Keuper, afectados a su vez por procesos de diapirismo con inyección de ofitas. La primera observación derivada de esta cartografía es la mayor representatividad de las facies carbonatadas del Muschelkalk en comparación con cartografías previas de mayor escala elaboradas por el IGME en 1994, 1995 y 2007 (Pérez et al., 2008).

Las calizas y dolomías del Muschelkalk presentan según los datos regionales (IGME 1994b, 1995, 2007) una potencia de unos 60 a 80 m, dividido en dos tramos: un tramo inferior, formado por calizas grises de aspecto masivo a tabular muy dolomitizadas, a veces con aspecto carniolar e intensamente karstificadas y que puede corresponder con el tramo de Calizas

Grises de Calvet *et al.* (2004); y un tramo superior, formado por calizas micríticas a dolomías de grano fino oscuras o grises, bien estratificadas, con niveles finamente laminados y ocasionales restos de bivalvos. Esta serie puede estar intensamente replegada con buzamientos de direcciones muy variables e incluso verticalizados.

En el campo se observa que las calizas y dolomías están afectadas por un diaclasado ortogonal a la superficie de estratificación, con frecuentes signos que indican circulación de agua a favor de estas fracturas, como son los rellenos de karstificación y las pátinas rojizas. Estos materiales afloran como bloques aislados de extensión hectométrica, y suelen encontrarse en contacto mecánico o por falla con el Keuper.

Los materiales del Keuper son mayoritariamente lutitas y yesos con escasas intercalaciones de margas

y carbonatos, con espesores de hasta 250 m (IGME, 1995, 2007). Se distinguen dos tramos: inferior y superior. El tramo inferior está constituido por margas o lutitas carbonatadas con intercalaciones de calizas oquerosas con grietas de desecación y yesos blancos, que se corresponde con la Fm. Yesos de Canelles, de Salvany y Bastida (2004). El tramo superior está formado por arcillas rojas y yesos de aspecto masivo y desordenado de la Fm. Yesos de Boix (Salvany y Bastida, 2004). Esta unidad podría presentar restos de sales cloruradas en el subsuelo, como parece poner de manifiesto la composición química de las aguas subterráneas. Dentro del Keuper afloran también una serie de masas de ofitas, rocas volcánicas alcalinas, que en campo aparecen como rocas oscuras masivas, sin fábrica aparente o con disyunción en bolas que se sitúan probablemente a techo del Keuper (Lago y Pocoví, 1982). Los materiales del Sinclinal de Estopiñán al SO de las lagunas se relacionan con los del Triásico mediante contacto mecánico, probablemente una falla inversa, entre los materiales del Cretácico Superior (Santonense-Campaniense) y el Keuper.

Los materiales del Cretácico Superior, con un espesor de más de 200 m, constan de una serie carbonatada formada por calizas bioclásticas con niveles de calizas arenosas y conglomeráticas hacia la base. Estas evolucionan a calizas bioclásticas con frecuentes niveles arrecifales de rudistas, que pasan a techo a niveles de calizas micríticas con escasa fauna (IGME, 1995). Sobre estos se encuentran los materiales detríticos de las "facies Garum". Desde un punto de vista hidrogeológico las facies Garum actúan como un nivel poco permeable, que a priori aísla el nivel acuífero cretácico de los materiales acuíferos del Eoceno, aflorantes en el núcleo del Sinclinal de Estopiñán. Por otro lado, se han identificado importantes puntos de descarga en el contacto Cretácico-Triásico, como la fuente de las Ollas y la fuente del Molar, al igual que los manantiales de Estaña y El Prat, en el contacto entre los materiales triásicos del Muschelkalk y del Keuper.

Caracterización hidrogeoquímica e isotópica

Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de la precipitación

Se instalaron cinco tomamuestras a diferentes cotas, para tener mayor representatividad espacial y temporal del agua de lluvia. Los resultados presentados corresponden a las muestras pertenecientes al periodo comprendido entre septiembre de 2007 y mayo de 2008.

La representación y análisis de los datos obtenidos pone de manifiesto la existencia de una importante variabilidad composicional tanto a nivel espacial como temporal, siendo menos mineralizadas las aguas correspondientes a invierno, y más mineralizadas las correspondientes a verano, de acuerdo con lo esperado. En general, las facies hidroquímicas varían entre bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas, coherentes con los materiales aflorantes en el área de recarga (Fig. 6).

Para la caracterización isotópica del agua de lluvia, se ha analizado la relación $\delta^{18}O$ y δ^2H con respecto al VSMOW‰ (Fig. 7), observándose de nuevo una gran variabilidad en su composición, siendo más ligeras las aguas correspondientes a los meses de enero a abril. En general, todas las muestras obtenidas hasta

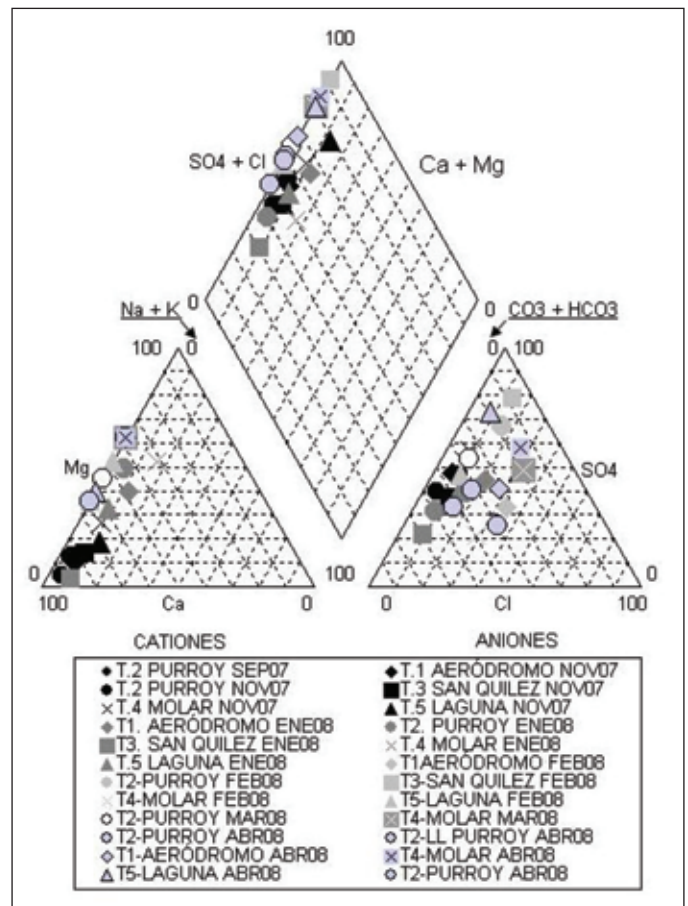


Figura 6. Diagrama de Piper mostrando la variabilidad espacial y temporal de la composición química de la precipitación entre los meses de septiembre 2007 y mayo 2008 (diferenciando los análisis por estación y fecha de muestreo)

Figure 6. Piper diagram that shows precipitation chemical spatial and temporal variability between september 2007 and may 2008. (Stations and dates are differentiated)

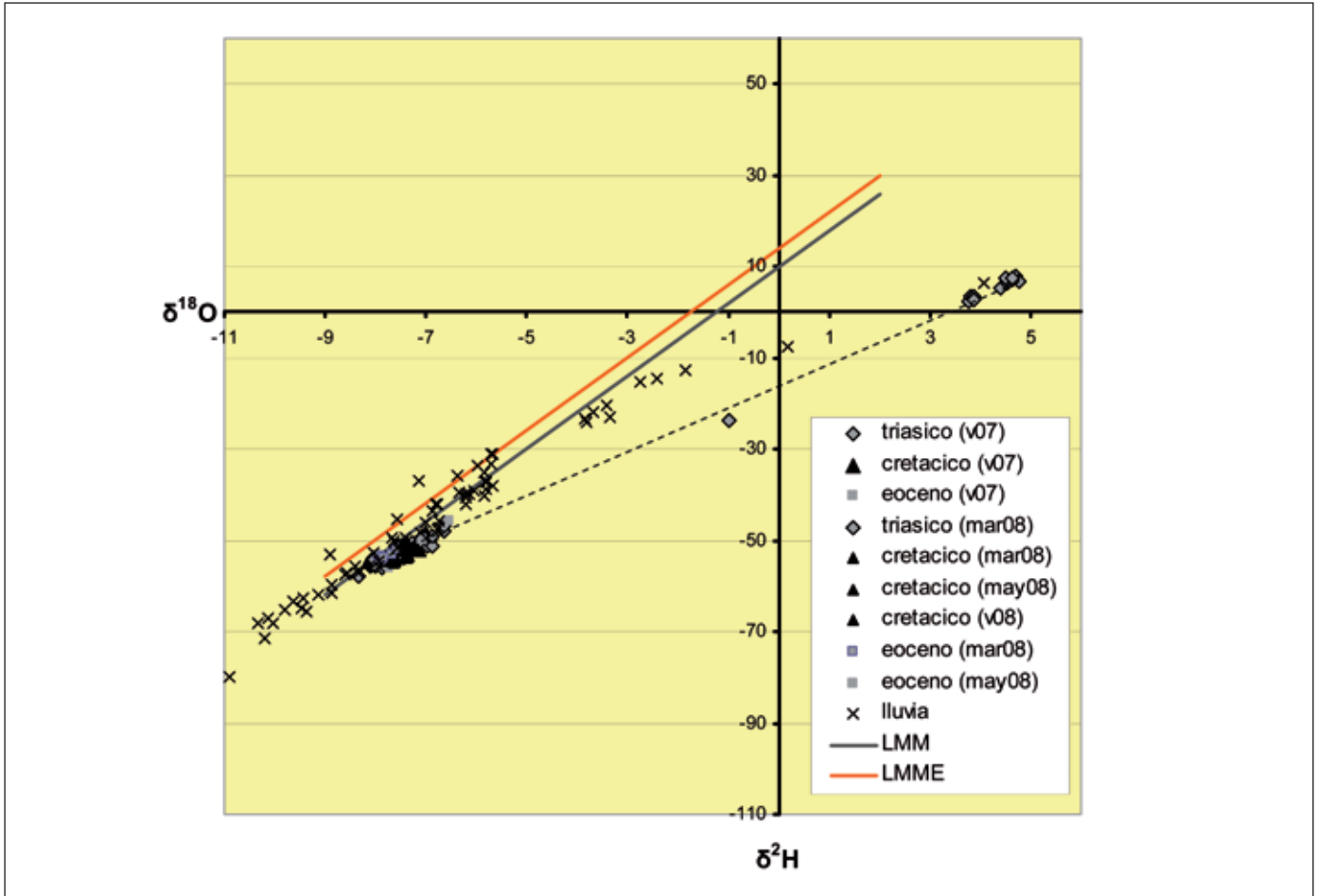


Figura 7. Relación $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas frente a la precipitación
 Figure 7. Groundwater against precipitation $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ relationship

el momento se ajustan a la Línea Meteorica Media Mundial (LMM). Los valores de exceso de deuterio "d" (Dansgaard, 1964) varían entre 10-14‰, indicando un origen predominantemente Atlántico, y en menor proporción Mediterráneo Occidental. En algunos casos se han encontrado valores de δ menores a 10‰, interpretados como debido a fraccionamiento isotópico por evaporación en los tomamuestras.

Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las aguas subterráneas

Desde un punto de vista hidrogeoquímico se identifican tres facies principales: bicarbonatada cálcica, sulfatada cálcica y clorurada sódica (Fig. 8). Las aguas bicarbonatadas cálcicas corresponden a todos los pozos y manantiales de los acuíferos eoceno y cretá-

cico, así como a manantiales triásicos situados en el contacto Muschelkalk-Keuper, y varios pozos que explotan los materiales carbonatados del Muschelkalk. Las aguas sulfatadas cálcicas corresponden al resto de puntos de agua situados en los materiales triásicos; mientras que las cloruradas sódicas constituyen un grupo heterogéneo que incluye desde un manantial hipersalino, a varias balsas con aporte subterráneo y un pozo de gran profundidad y columna litológica poco conocida.

La relación rHCO_3/rCa en torno a 1 en las aguas bicarbonatadas cálcicas indica desde un punto de vista cualitativo, que el proceso dominante es la disolución de carbonatos (calcita), mientras que en el resto de facies hidroquímicas se observa un mayor contenido de Ca frente a HCO_3 , indicando otros procesos además de la disolución de carbonatos. Por otro lado, la relación rSO_4/rCa próxima a 1 en las

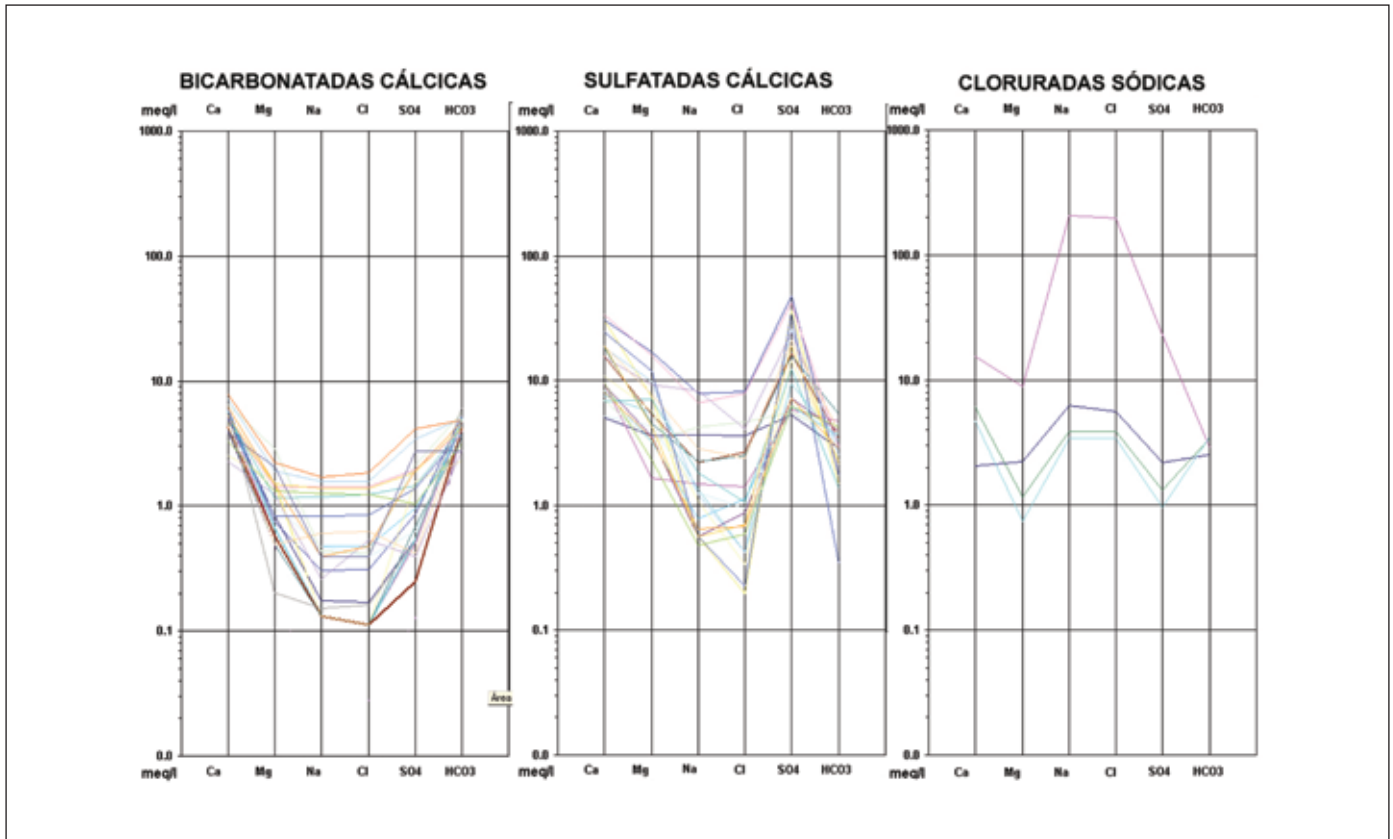


Figura 8. Diagramas de Schöeller-Berkaloff con las tres facies hidrogequímicas de las aguas subterráneas
 Figure 8. Schoeller diagrams with the three groundwater hydrogeochemical facies

aguas sulfatadas cálcicas indica cualitativamente que el proceso dominante es la disolución de yeso y/o anhidrita, mientras que el exceso de Ca frente a SO_4 observado, estaría relacionado con la disolución de carbonatos además de evaporitas. La importante variabilidad observada en la composición hidrogequímica del acuífero triásico, pone de manifiesto procesos de mezcla en función de los materiales afectados (Muschelkalk, Keuper u ofitas).

Se ha representado la relación $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ de todos los puntos muestreados en las campañas de verano 2007 y marzo de 2008, frente a la Línea Meteorica Media Mundial (LMM $\delta^2\text{H}=8 \delta^{18}\text{O}+10$, Craig, 1961) y la Línea Meteorica Mediterránea Occidental (MME $\delta^2\text{H}=8 \delta^{18}\text{O}+14$, Jiménez-Martínez y Custodio, 2008) (Fig. 9a), observándose una clara diferenciación en dos grupos: por un lado las aguas correspondientes a las Lagunas de Estaña, y por otro, el resto de aguas subterráneas. En el caso de las Lagunas de Estaña se trata de aguas isotópicamente más pesadas, con un fraccionamiento isotópico por evaporación en lámina libre, mayor en el Estanque Grande de Abajo que en

el Estanque Pequeño, y mayor en superficie que en profundidad. Las aguas subterráneas son más ligeras, con una composición isotópica próxima a la LMM, aunque se observa cierta evaporación, con valores de δ menores a 10‰, tanto en las aguas muestreadas en verano de 2007 como en marzo de 2008, lo que se ha interpretado como fraccionamiento isotópico por evaporación previa a la infiltración.

Se observa como las aguas del acuífero eoceno forman un grupo muy homogéneo de aguas más ligeras (Fig. 9b), mientras que las aguas representativas del Cretácico Superior son algo más pesadas que las del Eoceno y también bastante homogéneas. En el Triásico se observa una mayor dispersión de los datos, aunque parecen existir dos tendencias: la primera y en relación con las lagunas, siguiendo una línea de evaporación con pendiente de 4,8, y la segunda con aguas más ligeras, próximas a la LMM y correspondientes a manantiales situados en el contacto Muschelkalk-Keuper próximos a la zona de recarga.

A partir de la relación $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ de las aguas subte-

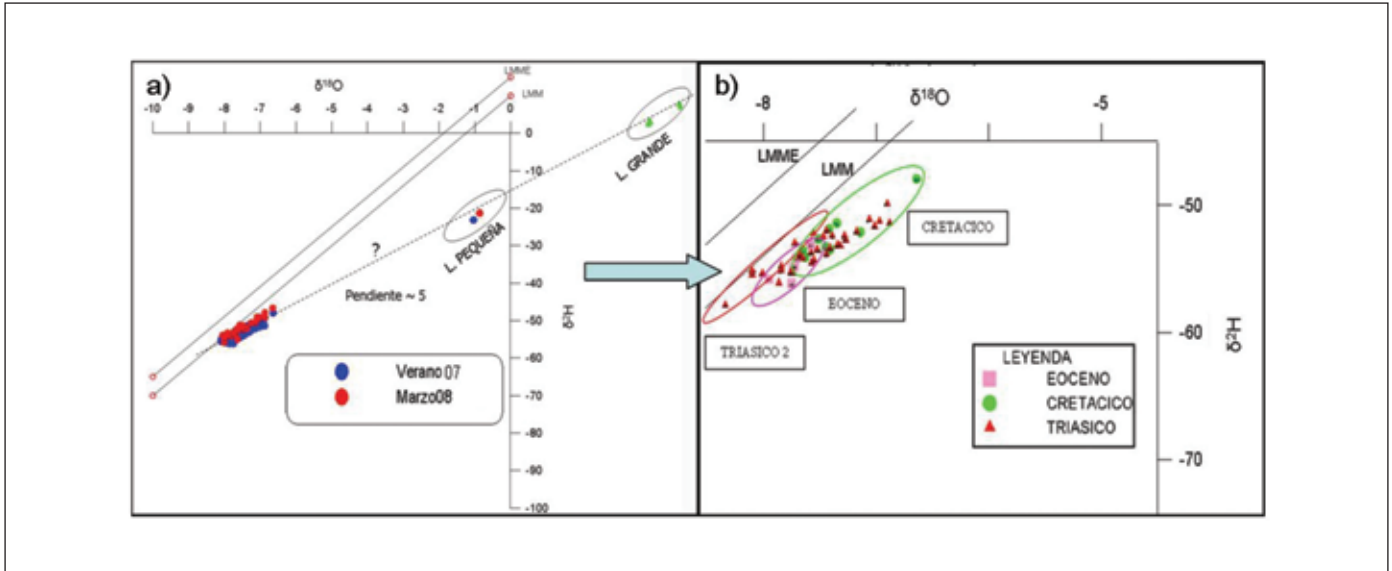


Figura 9. a) $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas. b) $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ según el nivel acuífero
 Figure 9. a) Groundwater $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ relationship. b) $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ according to the aquifer

rráneas frente a la precipitación (Fig. 8), se observa como las aguas subterráneas presentan una composición isotópica similar a la composición isotópica de la precipitación entre los meses de enero y abril, pudiendo indicar una recarga prepreferencial entre dichos meses.

Se ha representado el contenido en tritio (^3H) según el tipo de acuífero (Fig. 10), observándose una menor variabilidad en los acuíferos eoceno y cretácico, con contenidos entre 4-8 UT, coherentes con los resultados obtenidos para la lluvia actual en las cinco estaciones instaladas en la zona (3.7-7.2 UT).

Las aguas con contenidos próximos a 0.5 UT corresponderían a las aguas más antiguas, infiltradas antes del pico de 1963, y por lo tanto con un mayor tiempo de tránsito. Las aguas con mayores contenidos, en torno a 10 UT, constituirían aguas infiltradas después de 1963 pero antes que el resto (4-8 UT) y por lo tanto, con un tiempo de tránsito intermedio. La mayoría de las muestras presenta contenidos medios similares a los esperables en las precipitaciones actuales, y por lo tanto correspondientes a flujos locales rápidos con tiempos de residencia cortos.

Teniendo en cuenta conjuntamente la caracterización hidrogeoquímica e isotópica en conjunto se han identificado cuatro tipos de aguas principales:

- **TIPO 1:** Aguas bicarbonatadas cálcicas con bajo grado de mineralización ($\text{CE} = 364\text{-}573 \mu\text{S}/\text{cm}$), contenido isotópico ($\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$) próximo a la LMM y tritio entre 4-8 UT. Se trata de un grupo representativo del agua de lluvia homogeneizada. Se localizan

fundamentalmente en las sierras de Pilzán y Estaña, que constituyen el principal área de recarga del acuífero triásico.

- **TIPO 2:** Aguas bicarbonatadas cálcicas con mayor grado de mineralización ($\text{CE} = 500\text{-}958 \mu\text{S}/\text{cm}$), isotópicamente más ligeras que los tipos 3 y 4, y contenido en tritio entre 4-8 UT. Se trata de un grupo homogéneo representativo de los acuíferos eoceno y cretácico con un tiempo de tránsito relativamente corto del agua en el acuífero. Dentro de este grupo el agua correspondiente al acuífero cretácico presenta una mayor mineralización y mayores contenidos en Mg, Na, Cl y SO_4 además de una composición isotópica ligeramente más pesada ($\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$) con respecto al agua representativa del acuífero eoceno, pareciendo existir una cierta desconexión hidráulica entre ambos acuíferos. Se localizan fundamentalmente en el Sinclinal de Estopiñán.
- **TIPO 3:** Aguas sulfatadas cálcicas ($\text{CE} = 838\text{-}958 \text{ S}/\text{cm}$), por la influencia de los materiales evaporíticos del Keuper, con una relación $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ en general según la línea de evaporación de las lagunas y con contenidos en tritio muy variables entre 0.5-10 UT. La variabilidad en el contenido en tritio resulta coherente con la complejidad estructural comentada en apartados anteriores, pudiendo indicar una desconexión hidrogeológica, con diferentes sistemas de flujo en el acuífero triásico.
- **TIPO 4:** Aguas cloruradas sódicas ($\text{CE} = 750\text{-}21065 \mu\text{S}/\text{cm}$), con muy altas concentraciones en Cl y Na

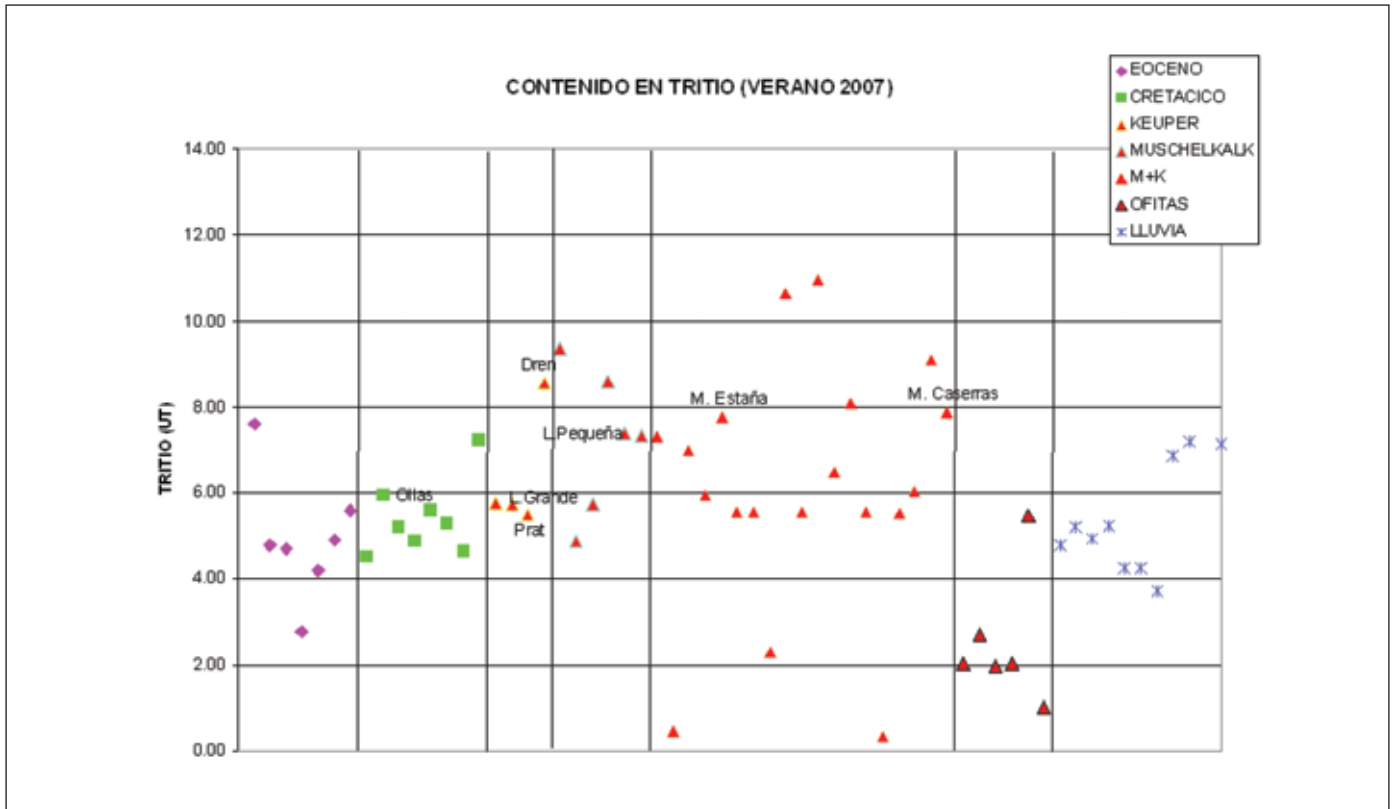


Figura 10. Contenido en tritio por acuífero, donde se observa que la mayoría de los puntos tiene contenidos entre 4 y 8 UT. Los materiales triásicos se han diferenciado entre Keuper, Muschelkalk y ofitas
 Figure 10. Tritium content according to the aquifer, where is observed that most of the points have tritium contents between 4 and 8 TU. The triassic materials have been differentiated into Keuper, Muschelkalk and ophites

frente al resto de iones y una relación rMg/rSO_4 en torno a 1 además de un enriquecimiento en Ca frente a HCO_3 y SO_4 . Presenta composiciones isotópicas variables y un contenido en tritio entre 4-8 UT. Se trata de un grupo minoritario, que no presenta una distribución espacial homogénea.

Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las Lagunas de Estaña

Se ha observado una marcada facies sulfatada cálcica en el Estanque Grande de Abajo, que se mantiene constante tanto en profundidad como en el tiempo (Fig. 11). El Estanque Pequeño de Arriba presenta una composición sulfatada-bicarbonatada cálcica menos mineralizada. Se han realizado perfiles de CE, temperatura (T°), pH, Eh, Oxígeno Disuelto y del contenido en $\delta^{18}O$, tanto en el Estanque Grande de Abajo como en el Estanque Pequeño de Arriba. Se han representado los perfiles obtenidos en verano de 2008, confirmando el carácter monomítico del Estanque Grande

(Ávila *et al.*, 1984), que sufre una estratificación entre los meses de marzo a octubre con una termoclina en torno a los 6 m (Fig. 12).

En general, se observa como la CE se mantiene constante a lo largo de todo el perfil (Fig. 12a), mientras que tanto la T° como el pH sufren un descenso brusco a partir de los 6 m de profundidad (Fig. 12a, 12c). Tanto el Oxígeno Disuelto (OD) como el Eh se mantienen invariables de nuevo hasta los 6 m, donde se observa un incremento en ambos parámetros, para volver a disminuir bruscamente a partir de unos 10 m de profundidad (Fig. 12 b, 12c). En el perfil de contenido en $\delta^{18}O$ (Fig.12d), se observa que tanto en la zona próxima a la superficie, como en torno a la termoclina el agua se hace isotópicamente más pesada.

Estas observaciones podrían indicar un efecto de movimiento convectivo desencadenado por la diferencia de temperatura, de forma que las aguas superficiales más calientes, con altos contenidos en oxígeno disuelto y más pesadas isotópicamente, debido a procesos de fraccionamiento isotópico por evaporación en lámina libre, pasarían a situarse entorno a los

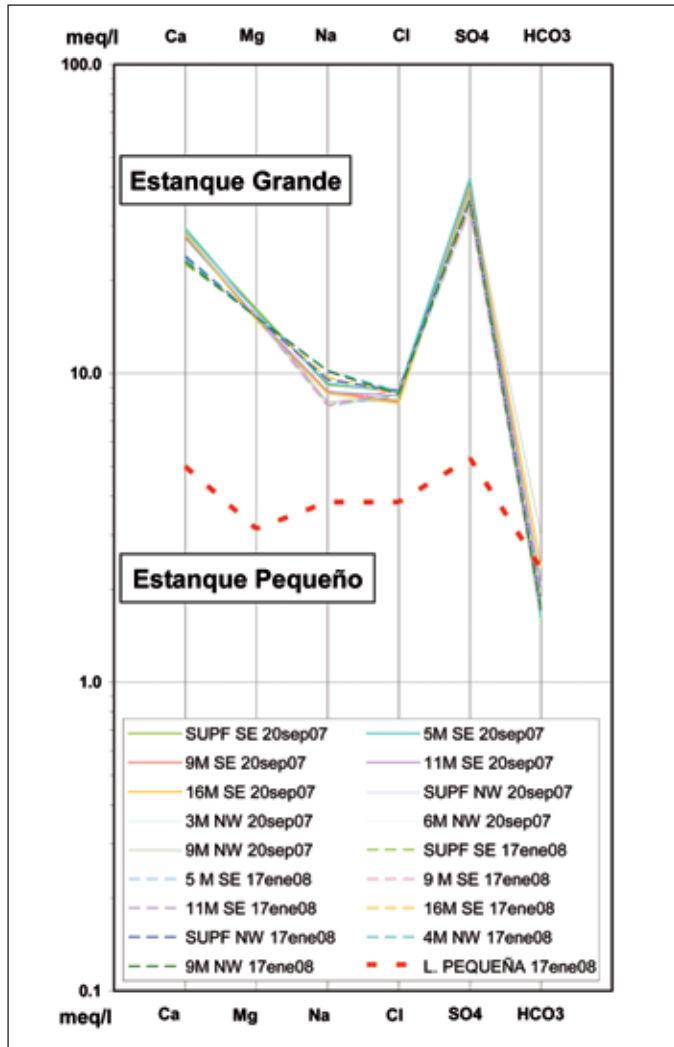


Figura 11. Diagrama de Schöeller-Berkaloff mostrando la composición química del Estanque Grande y del Estanque Pequeño de Estaña. En el Estanque Grande se presentan los análisis químicos para diferentes profundidades y fechas

Figure 11. Schöeller-Berkaloff diagram showing hydrochemical composition of Big Lake and Upper Small Lake of Estaña. For the Big Lake are represented the chemical analysis at different depths and dates

6-7 m de profundidad. Por otro lado, no se descarta que el incremento tanto en el Oxígeno Disuelto como en el Eh pueda indicar un posible aporte de aguas subterráneas.

Conclusiones

El estudio hidroquímico e isotópico realizado ha contribuido a la mejora sobre el conocimiento del funcio-

namiento hidrogeológico del acuífero de Estopiñán y las Lagunas de Estaña, permitiendo identificar cuatro tipos de aguas subterráneas coherentes con los diferentes acuíferos y deducir los procesos hidrogeoquímicos dominantes desde un punto de vista cualitativo: disolución de carbonatos, yeso y/o anhidrita y halita. Se observa una importante homogeneidad tanto hidrogeoquímica como isotópica en los acuíferos eoceno y cretácico, mientras que el acuífero triásico es más heterogéneo. No obstante, el estudio comparativo tanto de la química, como de los isótopos ambientales del acuífero cretácico frente al eoceno, parece poner de manifiesto la existencia de cierta desconexión hidráulica entre ambos acuíferos.

En relación con los tipos de agua subterránea y en función de los datos de tritio, se han podido establecer diversos sistemas de flujo con diferentes tiempos de tránsito. Los acuíferos eoceno y cretácico responden a flujos locales más rápidos, mientras que en el acuífero triásico parecen existir diferentes sistemas de flujo. La variabilidad hidrogeoquímica e isotópica observada en el acuífero triásico (calizas, arcillas, ofitas y yesos), podría indicar que no se trata de un único acuífero, sino de diversos acuíferos locales con distintos sistemas de flujo, en coherencia con la complejidad estructural existente en la zona. No obstante, dada la escasez de datos actualmente disponibles, es necesario continuar realizando muestreos y estudios complementarios para tratar de confirmar esta hipótesis.

La mencionada complejidad estructural de los materiales triásicos aflorantes en el entorno de las lagunas, no permite descartar la existencia de aportes subterráneos procedentes de los materiales cretácicos del Sinclinal de Estopiñán que contribuyan a alimentar el sistema endorreico. Por otro lado, los datos hidroquímicos e isotópicos no descartan la existencia de una posible conexión hidráulica entre el Sinclinal de Estopiñán y las Lagunas de Estaña.

En general, el estudio de los isótopos ambientales de las aguas subterráneas pone de manifiesto un cierto enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ frente a la Línea Meteorica Media Mundial y Mediterránea Occidental, como indican los contenidos en δ menores a 10‰, no siendo posible identificar las probables cotas y zonas de recarga para cada uno de los acuíferos. Por otro lado, el estudio hidroquímico e isotópico del agua de precipitación pone de manifiesto una importante heterogeneidad espacial y temporal con un origen predominantemente Atlántico, así como una posible recarga preferencial entre los meses de enero y mayo.

Los perfiles realizados en el Estanque Grande, han puesto de manifiesto una importante homogeneidad química tanto temporal como en profundidad, mientras que en los perfiles realizados en verano, durante

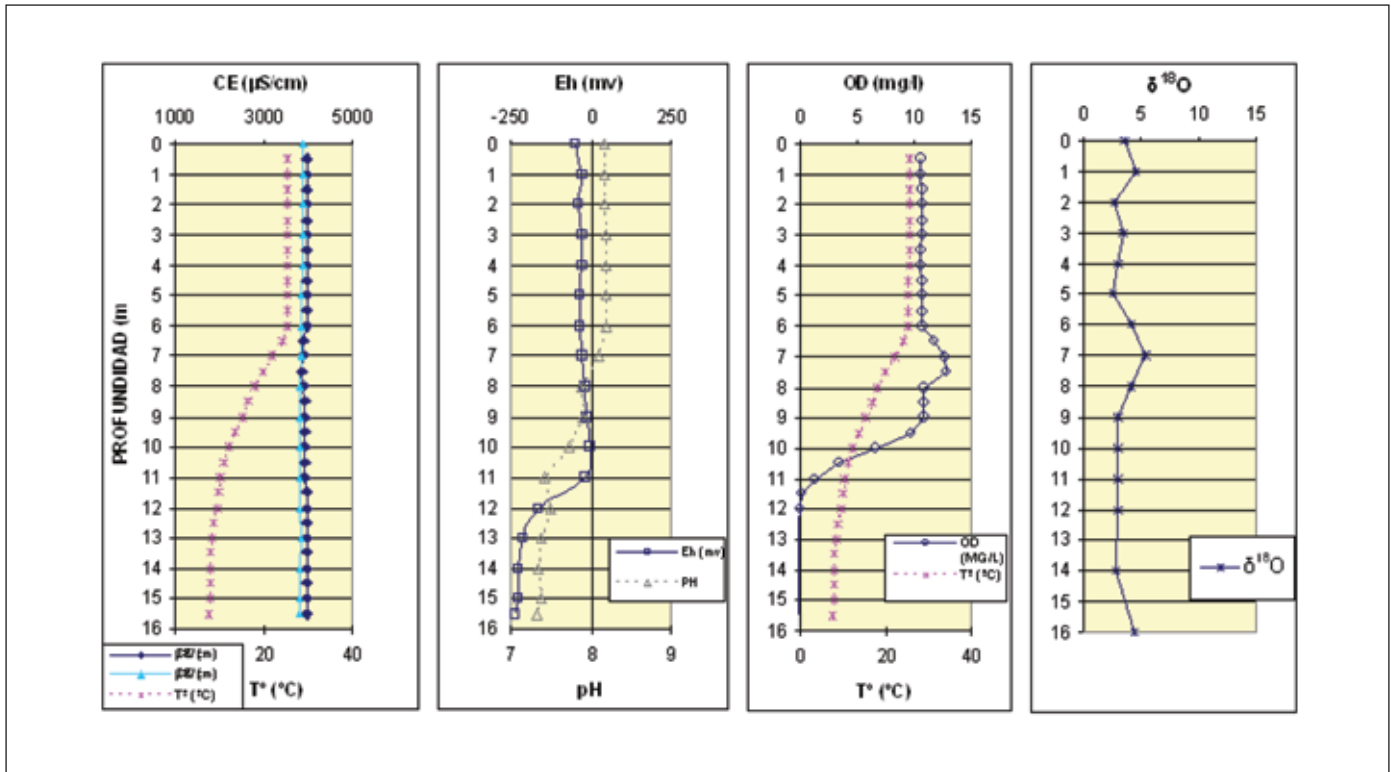


Figura 12. Perfiles en el Estanque Grande Abajo entre mayo y agosto a) CE-T°, b) Eh-pH, c) OD-T° y d) $\delta^{18}O$
 Figure 12. Big Lake profiles a) EC-T°, b) OD-T°, c) Eh-pH y d) $\delta^{18}O$

el periodo de estratificación de sus aguas, se observan variaciones importantes tanto en el contenido de oxígeno disuelto como en el Eh. Esto podría indicar movimientos de flujo convectivos en el entorno de la termoclina debido a diferencias de temperatura y densidad, aunque no se descarta la existencia de posibles aportes de agua subterránea, preferentes en las zonas donde se observa un aumento de oxígeno disuelto y Eh. Además, el bajo grado de mineralización del agua en las lagunas y el no aumento de la concentración en sales en profundidad, parece indicar la existencia de una importante renovación del agua en las lagunas indicando un importante papel de las aguas subterráneas en el funcionamiento de la laguna.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Ebro y el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón. Se agradece además a Andrés Pocoví de la Universidad de Zaragoza y especialmente a Javier

Ramajo de la Oficina de Proyectos del IGME en Zaragoza su importante aportación para la elaboración de la cartografía de detalle, y a Mario Morellón del Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) por colaborar en la realización de los perfiles en las lagunas.

Referencias

- Ávila, A., Burrel, A., Domingo, A., Fernández, E., Godall, J., Llopart, J.M. 1984. Limnología del Lago Grande de Estanya (Huesca). *Oecología aquatica*, 7: 3-24.
- Calvet, F., Anglada, E., Salvany, J.M. 2004. El Triásico de los Pirineos. In: J.A. Vera, Editor, *Geología de España*, SGE-IGME, Madrid 272-273.
- CHE 2000. *Proyecto de puesta en riego de la Litera Alta*. Confederación Hidrográfica del Ebro. (Documento interno)
- CHE 2002. *Estudio de recursos hídricos subterráneos de los acuíferos de la margen izquierda de la cuenca del Ebro. Zona oriental. Litera Alta (09.304)*. Confederación Hidrográfica del Ebro (Documento interno).
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric Waters. *Science*, 133:1702-1703.
- Cuchí, J.A. 2004. *Informe sobre las características y problemas de los acuíferos kársticos del Sinclinal de Estopiñán*

- (Ribagorza y Litera, Huesca). Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 567-584.
- DGA 1985. *Estudio hidrogeológico comarcal de Aragón. Comarca Esera-Noguera*. Diputación General de Aragón. (Informe inédito).
- Esteve, I., Guerrero, R., Montesinos, E. y Abellá, C. 1983. *Electron microscope study of the Interaction of epibiotic bacteria with Chromatium minus in natural habitats. Microbial Ecology* 9: 57-64.
- Esteve, I., Gaju, N., Mir, J., Guerra, R. 1992. Comparison of techniques to determine the abundance of predatory bacteria attacking Chromatiaceae. *FEMS Microbiology Ecology* 86: 205-211.
- Gaju, N., Esteve, I. y Guerrero, R. 1992. Distribution of predatory bacteria that attack chromatia in a sulfuriferous lake. *Microbial Ecology* (1992) 24: 171-179.
- González, M. y Oliván, C. 2007. *Actualización del estudio hidrogeológico del Sinclinal de Estopiñán (Huesca)*. 42ª Edición Curso Internacional de Hidrología Subterránea (CIHS). Barcelona.
- Guerrero, R., Montesino, E., Pedrós-Alió, I., Esteve, I., Mas, J., Gemerden, H., Hofman, P. A. G. y Bakker, J.F. 1985. Pototrophic sulfur bacteria in two Spanish lakes: Vertical distribution and limiting factors. *Limnology and Oceanography*, 30 (5): 919-931.
- Guerrero, R., Montesino, E., Pedrós-Alió, I., Esteve, I., Mas, J., Chase, D. y Margulis, L. 1986. Predatory prokaryotes: Predation and primary consumption. *Evolution and Microbiology*. 83: 2138-2142.
- IGME 1994a. *Estudio de las aguas minero-medicinales, minero-industriales, termales y de bebida envasadas en la Comunidad Autónoma de Aragón*. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME 1994b. *Mapa Geológico de España (E. 1:50000), Fonz (288)*. 89p. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME 1995. *Mapa Geológico de España (E. 1:50000), Benabarre (289)*. 191p. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME 2007. *Mapa Geológico de España (E. 1:50000), Os de Balaguer (327)*. 113p. Instituto Geológico y Minero de España.
- ITGE 1986. *Proyecto de investigación hidrogeológica del sistema 68 en el interfluvio del Esera-Noguera Ribagorzana (Huesca)*. Instituto Tecnológico y Minero de España.
- ITGE 1989. *Estudio hidrogeológico para abastecimiento urbano a la localidad de Estopiñán del Castillo (Huesca)*. (Documento interno)
- Lago, M. y Pocovi, J. 1982. Nota preliminar sobre la presencia de estructuras fluidales en las ofitas del área de Estopiñán (provincia de Huesca), *Acta Geológica Hispánica*, 17, 4, 227-233 (7 P.)
- López-Vicente, J.M., Navas, A., Machín, J. y Gaspar, L. 2006. Modelización de la pérdida de suelo en una cuenca endorréica del Pirineo Oscense. *Cuadernos de Investigación Geográfica* nº32, p. 22-42. ISSN 0211-6820. Universidad de la Rioja.
- López-Vicente, J.M. 2007. *Erosión y redistribución del Suelo en agroecosistemas mediterráneos: Modelización predictiva mediante SIG y validación con ¹³⁷Cs (Cuenca de Estaña, Pirineo Central)*. 212, Tesis Doctoral Univ. Zaragoza-CSIC.
- López-Vicente, M., Navas, A. y Machín, J. 2008. Modelling soil detachment rates in rainfed agrosystems in the Routh-central Pyrenees. *Agric Water Manage.* Doi:10.1016/j.agwat.2008.04.004.
- López-Vicente, M., Navas, A. y Machín, J. 2008. Identifying erosive periods by using RUSLE factors in mountain fields of the Central Spanish Pyrenees. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 523-535, 2008. www.hydrol-earth-syst-sci.net/12/523/2008.
- Martínez-Alonso, M., Méndez-Álvarez, S., Ramírez-Moreno, S., González-Toril, E., Amils, R. y Gaju, N. 2007. Spatial Heterogeneity of Bacterial Population in Monomitic Lake Estanya (Huesca, Spain). *Microb. Ecology*. DOI 10.1007/s00248-007-9316-0.
- Millán, H. 2000. *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico. Sierras Exteriores Aragonesas*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Miracle, M. R., Vicente, E. y Pedrós-Alió, C. 1992. Biological studies of Spanish meromitic and stratified karstic lakes. *Limnetica*, 8: 59-77.
- Montesinos, E., Guerrero, R., Abella, C. y Esteve, I. 1983. Ecology and Physiology of the Competition for Light Between Chlorobium limicola and Chlorobium phaeobacteroides in Natural Habitats. *Applied and Environmental Microbiology*, Nov. 1983, Vol. 46, No. 5, p. 1007-1016. American Society for Microbiology.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B., Moreno, A., González-Sampériz, P., Mata, P., Romero, O., Maestro, M. y Navas, A. 2007. Holocene palaeohydrology and climate variability in northeastern Spain: The sedimentary record of Lake Estanya (Pre-Pyrenean range). *Quaternary International*, DOI:10.1016/j.quaint.2007.02.021.
- Pérez, C. y Lambán, L. J. 2008. Primeros resultados sobre el funcionamiento hidrogeológico de las Lagunas de Estaña y su relación con el acuífero de Estopiñán. (Huesca, España). *6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Tomar, Portugal: 77-78.
- Pérez, C., Ramajo, J. y Lambán, L.J. 2008. Marco geológico e hidrogeológico de las Lagunas de Estaña (Huesca, España). *VII Congreso Geológico de España*, Las Palmas de Gran Canaria. Geo-temas 10, 2008. p.252. ISSN: 1567-5172.
- Riera, S., Wansard, R. y Juliá, R. 2004. 2000-year environmental history of a karstic lake in the Mediterranean Pre-Pyrenees: the Estanya lakes (Spain). *Catena*, 55: 293-324.
- Riera, S., López-Sáez, J.A. y Juliá, R. 2006. Lake responses to historical land use changes in northern Spain: The contribution of non-pollen palynomorphs in multiproxy study. *Review of Paleobotany and Palynology* 141, 127-137.
- Salvany, J.M. y Bastida, J. 2004. Análisis litoestratigráfico del Keuper surpirenaico Central., *Rev. Soc. Geol.*, 17.
- Sancho, C. 1988. El Polje de Saganta (Sierras exteriores pirenaica, prov. de Huesca). *Cuaternario y Geomorfología* 2 (1-4), 107-113.

Pérez, C. y Lambán, L. J., 2009. Primeros resultados obtenidos sobre el funcionamiento... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (3): 443-458

Villa, I. y Gracia, M.L. 2004. *Estudio hidrogeológico del Sinclinal de Estopiñán. (Huesca)*. 38ª edición Curso Internacional de Hidrología Subterránea (CHIS). Barcelona.

Wansard, G., De Dekker y P., Juliá, R. 1998. Variability in ostracod partition coefficients D(Sr) and D(Mg). Implications for lacustrine palaeoenvironmental reconstructions. *Chemical Geology* 146 (1998) 39-54.

Recibido: enero 2009

Revisado: julio 2009

Aceptado: agosto 2009

Publicado: octubre 2009