

ZUBÍA. Monográfico	10	11-25	Logroño	1998
--------------------	----	-------	---------	------

HIDROGEOLOGÍA DE LOS MANANTIALES TERMALES DE ARNEDILLO*

J. A. Sánchez Navarro*
P. Coloma López*

RESUMEN

Se estudian las características de los manantiales termales de Arnedillo (La Rioja) que se ubican en la parte oriental de la Sierra de Cameros, en el contacto entre esta unidad de la Cordillera Ibérica y la Depresión del Ebro (sector Riojano), en la cuenca del río Cidacos. Estos manantiales tienen su origen en flujos subterráneos de tipo regional a través de los materiales del Jurásico marino (especialmente del Lías inferior) que constituyen un acuífero carbonatado kárstico. La aportación media anual se ha evaluado en 5,41 hm³/año que incluye tanto aportes termales como no termales. Las características hidrogeoquímicas indican la procedencia regional de estas aguas; corresponden a aguas muy diferenciadas geoquímicamente en las que su composición se debe a evolución geoquímica. En el contexto regional se pone de manifiesto un esquema típico de evolución geoquímica en un esquema de circulación regional desde aguas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización a aguas sulfatadas cálcicas más mineralizadas y a aguas de carácter clorurado sódico muy mineralizadas y termales. El contraste de permeabilidades entre el acuitardo superior (Weald) y el acuífero subyacente, condiciona la existencia de sistemas de flujo local en el medio superior menos permeable que coexisten con un sistema regional a través del acuífero inferior, que actúa como "dren de fondo" de los materiales suprayacentes, modificándose totalmente el gradiente geotérmico y creándose fuertes anomalías geotérmicas en las zonas de descarga.

(*) Departamento de Ciencias de La Tierra. Universidad de Zaragoza. 50009 ZARAGOZA

Palabras clave: manantiales termales, acuífero carbonatado kárstico, hidrogeoquímica, anomalías del gradiente geotérmico.

The hydrogeologic characteristics of the thermal springs of Arnedillo (La Rioja) is studied. These springs are located in the eastern part of the Cameros Chain, in the contact among this Iberian Chain unit and the Ebro foreland Basin (La Rioja sector), in the basin of Cidacos river. These springs have their origin in regional groundwater flows through the materials of the marine Jurassic (especially of the lower Lías) that constitute a karstified carbonated aquifer. The annual mean resources has been evaluated in 5,41 hm³/year, that include so much thermal and non-thermal contributions. The hydrogeochemistry indicate the regional origin of these waters; correspond to very differentiated waters which their composition is due to evolution. In the regional context is evidenced a typical geochemistry evolution in a regional groundwater flow from water calcic-bicarbonated of low mineralization to water calcic-sulphating more mineralized and to sodium-chloride water highly mineralized and thermal. The permeabilities contrast among the upper aquitard (Weald) and the aquifer underlying conditions the existence of flow systems local in the means upper less permeable that coexists with a regional flow system through lower aquifer that acts as "main drain" of the upper materials, changing totally the geothermal gradient creating strong geothermal anomalies in the discharge zones.

Key words: thermal springs, karstified carbonated aquifer, hydrogeochemistry, anomalies of geothermal gradient.

0. INTRODUCCIÓN

En la zona de contacto entre la Cordillera Ibérica y la Depresión Terciaria del Ebro se localizan una serie de surgencias cuyas características hidrogeológicas (caudal elevado y constante, composición química predominantemente sulfatada cálcica asociada a elevados contenidos en sales, temperatura de emergencia constante y anormalmente alta, bajo contenido en tritio, etc...) evidencian la implicación de flujos regionales. Las investigaciones realizadas hasta el momento de este fenómeno quedan recogidas en Coloma (1995, 97), Coloma et al. (1995a, b), Coloma et al. (1997a, b) y Sánchez Navarro et al. (1990, 92, 94).

En este trabajo se estudian de manera detallada las surgencias de mayor temperatura relacionadas con este fenómeno denominado "Drenaje Subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro" (Martínez Gil et al., 1989) que se ubican en la parte oriental de la Sierra de Cameros, en el contacto entre esta unidad de la Cordillera Ibérica y la Cuenca del Ebro (sector Riojano) y corresponden a las surgencias termales de Arnedillo (La Rioja) en la cuenca del río

Cidacos. Más al este, en Baños de Fitero (Navarra), ya en la cuenca del río Alhama, también se encuentran manifestaciones similares, si bien presentan ciertas diferencias, pero no son objeto de este trabajo. Algunas de las surgencias más importantes se aprovechan con fines mineromedicinales.

1. GEOLOGÍA

La zona de estudio se sitúa en el extremo NW de la Cordillera Ibérica, representada por la Sierra de Cameros (sector oriental) y su zona de contacto con la Depresión Terciaria del Ebro (sector Riojano) (figura 1); geológicamente como “Sierra de Cameros” o “Macizo de Cameros” se considera al conjunto de materiales de carácter fundamentalmente continental y de edad Jurásico terminal-Cretácico inferior (facies Weald) que se depositaron en la denominada “Cuenca de Los Cameros” (Tischer, 1966).

Los materiales más antiguos que se encuentran en la zona corresponden al Trías en facies Keuper; aflora asociado al cabalgamiento que pone en contacto la Unidad de Cameros con la Depresión del Ebro. El Jurásico en facies marinas aparece tanto al SE de la cuenca del Alhama, en relación con la estructura del Moncayo, como al N y NE, en el frente de cabalgamiento de la unidad de Cameros (figura 1).

Las facies Weald constituyen el relleno de La Cuenca de Los Cameros, que contiene una potente serie sedimentaria de unos 9000 m de espesor (Mas et al., 1993) consecuencia de la fuerte subsidencia sufrida durante su formación. La cuenca tiene una estructura de sinclinal laxo, presentando las mayores deformaciones en el borde NE dónde los materiales del Weald se ponen en contacto con los materiales terciarios de la Cuenca del Ebro por medio de un frente de cabalgamiento de varias decenas de kilómetros de longitud con una orientación que pasa de NW-SE en la parte oriental a W-E en el sector central y a ligeramente NE-SW en la zona occidental.

En la cuenca del Ebro aflora una potente serie terciaria que abarca desde el Oligoceno hasta el Mioceno superior. El espesor de los depósitos terciarios supera, en el llamado surco Riojano, los 4000-5000 m, hecho comprobado por sondeos de investigación (IGME, 1987). Estos materiales están poco deformados y conforman a grandes rasgos un sinclinal laxo de escala kilométrica y dirección WNW-ESE que se denomina “Sinclinal de La Rioja Baja” (Casas, 1992).

La estructura de la Sierra de Cameros es el resultado de la inversión tectónica completa ocurrida durante el Terciario de la antigua cuenca mesozoica; la geometría general es de una rampa suave en el bloque inferior, con buzamiento de unos 12º, y un rellano continuo de bloque superior, situado en el Keuper (Casas,

1993). Esta geometría varía tanto hacia el sector oriental, donde la rampa de bloque inferior presenta una pendiente algo mayor, de unos 30°; como hacia el central, donde aparece un rellano en los dos bloques. El sentido de desplazamiento del bloque superior es hacia el NNW. Destaca en los perfiles sísmicos la geometría sigmoidal de los cuerpos sedimentarios correspondientes a las facies Weald que es interpretada de distintas formas por diferentes autores (Guiraud & Seguret, 1984; Casas, 1993; Mas et al. 1993).

Las Sierras de La Demanda y Cameros presentan un carácter fuertemente cabalgante, con un desplazamiento máximo para el cabalgamiento del orden de 30 km (ITGE, 1990a, Guimerà y Alvaro, 1990; Casas, 1992). El nivel de despegue fundamental del cabalgamiento son los materiales lutítico-yesíferos de las facies Keuper (Casas, 1992).

2. HIDROGEOLOGÍA

Las unidades hidrogeológicamente más interesantes corresponden a los materiales carbonatados del Jurásico inferior, constituidos por carniolas, dolomías, brechas dolomíticas y calizas que forman un conjunto hidrogeológico que presenta una alta porosidad y una elevada permeabilidad debido a una densa red de fisuración y sobre todo a un gran desarrollo de oquedades interconectadas que favorecen la circulación de las aguas. Esta unidad engloba las formaciones Carniolas de Cortes de Tajuña y Calizas y Dolomías Tableadas de Cuevas Labradas.

Los materiales margo-calcáreos del Jurásico inferior incluyen una alternancia de margas y calizas pertenecientes a las formaciones que constituyen el Grupo Ablanquejo. El predominio de los materiales margosos les confiere una baja permeabilidad que contrasta con las buenas condiciones hidrodinámicas que tienen las unidades hidroestratigráficas situadas a base y a techo de esta unidad.

Los materiales carbonatados del Jurásico medio y superior están representados por un conjunto esencialmente carbonatado que incluye las Formaciones Carbonatada de Chelva, Calizas negras de Aldealpozo y Calizas con Corales de Torrecilla en Cameros que se encuentran intensamente karstificadas.

Las unidades del Jurásico marino se encuentran muy karstificadas, permitiendo su conexión hidráulica de manera que en el contexto regional se puedan considerar como una unidad acuífera (Sánchez Navarro et al., 1990, 1992 y 1994; Coloma, 1995, 97; Coloma et al., 1997a, b).

Los materiales del Jurásico superior-Cretácico inferior en facies Weald son un conjunto estratigráfico formado por litologías muy diversas, de potencias muy va-

riables y con numerosos y rápidos cambios de facies, hidrogeológicamente todo el conjunto puede definirse como un medio de media-baja permeabilidad que presenta una capacidad de almacenamiento de agua relevante (en fisuras y poros) debido al elevado espesor que poseen (hasta 4000 m en la vertical). Su comportamiento global quedaría definido como el de un acuitardo. La presencia de numerosos manantiales de pequeño caudal localizadas casi siempre en el fondo de los barrancos y ríos y a cotas muy variadas es indicativo de la permeabilidad referida y de una superficie piezométrica cercana a la superficie del terreno, condicionada por la topografía y adaptada a la misma.

3. MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO

Los materiales de las facies Weald son predominantemente poco permeables, lo que unido a las elevadas pendientes que presentan, hace que la escorrentía directa sea claramente predominante respecto a la infiltración; sin embargo sus características de acuitardo y su gran extensión areal permiten que la recarga del acuífero carbonatado procedente de las mismas pueda ser importante. Por otra parte, los ríos al atravesar estos materiales apenas son influenciados, con excepción de los ya señalados tramos más permeables de estas facies.

Una parte importante del agua infiltrada en el Weald –que constituye la recarga del acuitardo– descarga en numerosos y generalmente poco caudalosas surgencias que en las zonas donde la permeabilidad es más elevada se ubican preferentemente en el fondo de barrancos, y donde es más baja –o la precipitación más importante– se encuentran sobre todo en las zonas de interfluvio; el resto del agua infiltrada recarga al acuífero carbonatado mesozoico.

La descarga regional se produce en la zona de Arnedillo, donde destaca la presencia de surgencias termales que corresponden a los manantiales de Baños de Arnedillo (tres manantiales de 1,6; 4,2 y 3,3 l/s respectivamente) y Las Pozas (dos surgencias de 4 y 8 l/s) ubicadas en el propio cauce del río Cidacos (figura 2); todos estos manantiales están muy próximos entre sí y surgen –a cota de 675 m– en el contacto entre la Formación Cortes de Tajuña y el Keuper.

En el corte hidrogeológico de la figura 3 se aprecia el origen profundo de estas aguas, ligadas a su circulación a través de los materiales del Lías, y a la presencia de materiales arcilloso-yesíferos del Keuper que actúan como sellado de estas aguas, evitando su mezcla relevante con otras menos profundas o superficiales, además existen en Arnedillo otros manantiales no termales que presentan un régimen de descarga más irregular que los anteriores y una temperatura y mineralización notablemente más baja (Coloma, 1997).

La descarga se produce también en el cauce del río Cidacos al atravesar los afloramientos jurásicos, a cotas entre 645 y 685 m, comportándose como efluente. El caudal aportado subterráneamente se ha evaluado mediante la práctica de aforos diferenciales (Coloma, 1997) y representa el total de las aportaciones subterráneas –manantiales y descargas difusas– y es del orden de 170 l/s (5,41 hm³/año de aportación media) (figura 4). Los caudales totales aportados en esta zona de descarga oscilan entre 380 y 27 l/s e incluyen los aportes termales –constantes en el tiempo– y otros que fluctúan en función de los episodios de recarga.

De estas observaciones se deduce la existencia de dos tipos de circulación subterránea, una que corresponde a las surgencias termales, de caudal y parámetros fisicoquímicos muy constantes en el tiempo, que indican su relación con un acuífero kárstico de gran poder regulador –con elevada inercia y recursos importantes–; corresponden a flujos profundos y de procedencia regional y otra circulación típicamente kárstica, relacionada con un sistema de menor poder regulador y respuesta más rápida a los episodios de recarga; corresponden esencialmente al drenaje de los afloramientos jurásicos del entorno de Arnedillo.

4. HIDROGEOQUÍMICA

Las aguas termales de Arnedillo han sido objeto de estudios hidrogeoquímicos por parte de IGME (1982), Auqué et al. (1988, 89), Fernández et al. (1988), ITGE (1990b), CHE (1991) y Coloma et al. (1995a, b, 97).

Para entender la evolución hidrogeoquímica es necesario tener en cuenta los datos fisicoquímicos de todos los puntos de agua relacionados con el acuífero. Así en los materiales jurásicos del frente de cabalgamiento se localizan una serie de manantiales y sondeos que en el diagrama de Piper-Hill-Langelier (figura 5) se agrupan en tres conjuntos:

Aguas de composición bicarbonatada cálcica de baja mineralización (residuo seco entre 200 y 350 mg/l), su temperatura de surgencia se sitúa entre en los 10 y 13 °C; hay pocas diferencias composicionales entre estos puntos; así la relación rMg/rCa se sitúa entre 0,3 y 0,5; la rCl/rHCO₃ es menor de 0,1 y la rSO₄/rCl entre 6 y 12 pone de manifiesto una tendencia ligeramente sulfatada en algunos puntos, que toman un valor de dicha relación entre 1 y 4. Estos puntos están relacionados con los materiales calcáreos del Jurásico medio y superior.

Manantiales con aguas de composición sulfatada cálcica de elevada mineralización (entre 1000 y 2000 mg/l de residuo seco), que surgen en el contacto entre los materiales carbonatados del Jurásico inferior y las arcillas y yesos de las facies Keuper con una temperatura entre 13 y 16 °C. Presentan ligeras variaciones

en los contenidos en SO_4^{2-} y Ca^{2+} como se refleja en la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ que se sitúa en un amplio rango entre 3,5 y 24. En contraste con las aguas del grupo anterior destacan las diferencias en la relación $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ y $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ más elevadas que apuntan a una mayor diferenciación geoquímica y una influencia dolomítica al circular por materiales calcáreos-dolomíticos del Lías.

Surgencias termales de Arnedillo. La composición química de estas surgencias es clorurada sódica, la mineralización (residuo seco) oscila entre 6000 y 7500 mg/l, el contenido en SiO_2 es elevado como corresponde al carácter termal que presentan (20-45 mg/l) y bastante constante en el tiempo.

La relación iónica $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ varía entre 0,25 y 0,40, la $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ se sitúa entre 24 y 30; las relaciones $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ y $r\text{Na}/r\text{Cl}$ alcanzan valores entre 0,28-0,35.

La temperatura de surgencia de los manantiales termales se sitúa entre 47,5 y 50 °C bastante constante, aunque varía de una surgencia a otra; los parámetros fisicoquímicos son constantes en el tiempo indicando una mezcla pequeña con respecto a aguas superficiales (IGME, 1982 –en base análisis de tritio–; Auqué et al., 1989), el contenido en NO_3 (prácticamente nulo) también es indicativo de este hecho.

La temperatura de base de estas aguas en el acuífero ha sido calculada mediante modelos de interacción agua-roca por Auqué et al. (1989) situándola entre 67 y 72°C. El gradiente teórico deducido en esta trabajo es de 49 y 47 mK/m, superior al normal como corresponde a zonas de descarga de aguas subterráneas de carácter regional.

Todas las características hidrogeoquímicas anteriores indican la procedencia regional de estas aguas, corresponden a aguas muy diferenciadas geoquímicamente en las que su composición se debe a ese proceso de diferenciación; además se pone de manifiesto un esquema típico de evolución geoquímica en un esquema de circulación regional desde aguas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización a aguas sulfatadas cálcicas más mineralizadas y a aguas de carácter clorurado sódico muy mineralizadas y termales (figura 5), paralelamente hay un incremento en el contenido en SiO_2 , cuya solubilidad en el intervalo de pH de las aguas naturales es únicamente función de la temperatura.

Si consideramos la composición química del río tras recibir los aportes subterráneos como mezcla del agua del río y de la aportada por el acuífero, podemos calcular la composición química del agua aportada subterráneamente; el método utilizado para calcular la composición de la mezcla ha sido el balance de cloruros, teniendo en cuenta el carácter conservativo de este ión (Custodio, 1991).

El río Cidacos sufre importantes variaciones fisicoquímicas al recibir aportes subterráneos en Arnedillo; antes de esos aportes la composición es bicarbonatada

cálcica de mineralización intermedia (residuo seco de 430 mg/l) que al recibir aguas del acuífero de composición clorurado sódica se mezclan para dar lugar a aguas de composición clorurada sódica; quedan representadas en el diagrama de Piper-Hill-Langelier cerca de las muestras termales de Arnedillo, si bien poseen una notable menor mineralización así como un mayor contenido relativo en HCO_3^- (la relación $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3^-$ es del orden de 4 veces menor) y Ca^{2+} ; la explicación reside en que el río recibe del acuífero jurásico flujos regionales –termales– y locales de carácter bicarbonatado cálcico, por lo que la composición resultante de los aportes es la de un agua mezcla entre las dos. Aguas abajo de Arnedillo la composición del agua es una mezcla con aguas más superficiales.

5. CONCLUSIONES

Los manantiales termales de Arnedillo tienen su origen en flujos subterráneos de tipo regional a través de los materiales del Jurásico marino (especialmente del Lías inferior) que constituyen un acuífero carbonatado kárstico. La descarga más importante de este acuífero se produce en el contacto entre estos materiales –correspondientes a la unidad cabalgante de Cameros– y la Depresión del Ebro en los puntos en que el río atraviesa el citado contacto. La aportación media anual del acuífero se ha evaluado en 5,41 hm³/año, que incluye tanto aportes termales como no termales.

Las características hidrogeoquímicas indican la procedencia regional de estas aguas, que están muy evolucionadas geoquímicamente en las que su composición se debe a ese proceso de diferenciación.

En el contexto regional se pone de manifiesto una evolución geoquímica típica en un esquema de circulación regional desde aguas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización a aguas sulfatadas cálcicas más mineralizadas y a aguas de carácter clorurado sódico muy mineralizadas y termales, paralelamente hay un incremento en el contenido en SiO_2 . La composición calculada para las aguas descargadas por el acuífero a los cauces presenta características intermedias entre composiciones típicas de las aguas termales y no termales, poniendo de manifiesto la existencia de dos sistemas diferentes de flujo.

El contraste de permeabilidades entre el acuitardo superior y el acuífero subyacente hace que exista un nivel conductor profundo; originándose sistemas de flujo local en el medio superior menos permeable que coexisten con un sistema regional a través del acuífero inferior que actúa como “dren de fondo” de los materiales suprayacentes, modificándose totalmente el gradiente geotérmico creando fuertes anomalías geotérmicas en las zonas de descarga asociadas a la circulación del agua subterránea.

6. AGRADECIMIENTOS

A A.M. Casas Sainz (Universidad de Zaragoza) por facilitarnos los perfiles de sísmica de reflexión realizados en la zona. Este trabajo ha sido financiado por una beca del Instituto de Estudios Riojanos (IER) y forma parte del proyecto PB89-0344 (DGICYT).

7. REFERENCIAS

- Auqué, L.F., Fernández, J., Tena, J.M., 1988. Las aguas termales de Fitero (Navarra) y Arnedillo (Rioja). I. Análisis geoquímico del estado de equilibrio-desequilibrio en las surgencias. *Estudios Geol.* (44), 285-292.
- Auqué, L.F., Fernández, J., Tena, J.M., Mandado, J., Gimeno, M.J., Tolosa, P., 1989. Análisis de los estados de equilibrio termodinámico en el reservorio de las surgencias termales de Fitero (Navarra) y Arnedillo (Rioja). *Rev. Soc. Geol. España.* (2), 125-132.
- Casas, A.M., 1992. El frente norte de las sierras de Cameros: estructuras cabalgantes y campo de esfuerzos. *Zubía*, monográfico núm. 4, 1-220.
- Casas, A.M., 1993. Oblique tectonic inversion and basement thrusting in the Cameros Massif (Northern Spain). *Geodinámica Acta.* (6), 202-216.
- Coloma, P., 1995. *Estudio hidrogeológico de la Cuenca del río Alhama*. Tesis de Licenciatura. Univ. de Zaragoza, 1-175.
- Coloma, P., 1997. *Funcionamiento hidrogeológico de las cuencas riojanas orientales: Iregua, Leza, Cidacos y Alhama (Cuenca del Ebro)*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 1-386.
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., 1995a. El Drenaje Subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro (sector riojano). *Geogaceta.* (18), 68-71.
- Coloma, P., Martínez Gil, F.J., Sánchez Navarro, J.A., 1995b. Caracterización hidroquímica del Drenaje Subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro. *Hidrog. y Rec. Hidráulicos.* (XX), 171-178.
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., 1997a. Sistemas de flujo subterráneo regional en el acuífero carbonatado mesozoico de la Sierra de Cameros (sector oriental). *Estudios Geológicos.* (53), 159-172.

- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., 1997b. El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro. *Revista de la Sociedad Geológica de España*. (10), 205-218.
- Confederación Hidrográfica del Ebro, 1991. *Asistencia técnica para el estudio de los recursos hídricos subterráneos de los acuíferos de la margen derecha del Ebro. Zona I: Acuíferos de Cabecera (Plan Hidrológico)*. Tomo XIV: Unidad Hidrogeológica nº 9-35. Fitero-Arnedillo. Memorias y planos. (inédito).
- Custodio, E., 1991. La interpretación hidrogeoquímica como herramienta de estudio y valoración de sistemas acuíferos: aspectos metodológicos generales. *Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva*. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona, 121-162.
- Fernández, J., Auqué, L.F., Sánchez Cela, V.S., Guarás, B., 1988. Las aguas termales de Fitero (Navarra) y Arnedillo (Rioja). II. Análisis comparativo de la aplicación de técnicas geotermométricas químicas a aguas relacionadas con reservorios carbonatado-evaporíticos. *Estudios Geol.* (44), 453-469.
- Guimerà, J., Alvaro, M., 1990. Structure et évolution de la compression alpine dans la Chaîne Ibérique et la Chaîne cotière catalane (Espagne). *Bull. Soc. Géol. de France*. (6), 339-348.
- Guiraud, M., Seguret, M., 1985. A releasing solitary overstep model for the Late Jurassic-Early Cretaceous (Wealdian) Soria strike-slip Basin (Northern Spain). In: *Strike slip Deformation, Basin formation and Sedimentation* (K.T. Biddle & N. Christie-Blick, Eds.). S.E.M.P. Spec. Publ. (37), 159-175.
- IGME, 1982. *Estudio de las manifestaciones termales de Extremadura-Salamanca-Aragón-Rioja, orientadas a su posibles explotación como recursos geotérmicos*. Memoria. Tomo II: Area Aragón-Rioja. (inédito).
- IGME, 1987. *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la Geología de España*. 1-465.
- ITGE, 1990a. *Documentos sobre la Geología del subsuelo de España*. t. 6: Ebro-Pirineos. Madrid. 1-446.
- ITGE, 1990b. *Estudio de la Franja Móvil Mesozoica en la subunidad Fitero-Arnedillo y parte de la de Jubera-Anguiano*. Memoria y planos. .
- Martínez Gil, F.J., Sánchez Navarro, J.A., De Miguel, J.L., San Román, J., 1989. El Drenaje Subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Cuenca del Ebro como proceso de transporte de substancias en disolución: sus implicaciones en el

transporte de sulfatos. In: *Sistemas lacustre neógenos del margen ibérico de la cuenca del Ebro*. Guía de Campo de la III Reunión del Grupo Español de Trabajo I.G.C.P. Secret. Public. Univ. de Zaragoza. 57-80.

Mas, J.R., Alonso, A., Guimerà, J., 1993. Evolución tectonosedimentaria de una cuenca extensional intraplaca: La cuenca finijurásica-eocretácica de Los Cameros (La Rioja-Soria). *Rev. Soc. Geol. España*. (6), 129-144.

Sánchez Navarro, J.A., San Román, J., De Miguel, J.L., Martínez Gil, F.J., 1990. El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión del Ebro: Aspectos geológicos. *Geogaceta*. (8), 115-118.

Sánchez Navarro, J.A., San Román, J., De Miguel, J.L., Pérez, A., Martínez Gil, F.J., 1992. Isopiezas y direcciones de flujo regional en el acuífero carbonatado mesozoico del margen Ibérico de la Depresión del Ebro. *Geogaceta*. (11), 122-124.

Sánchez Navarro, J.A., Pérez, A., San Román, J., 1994. *El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro: aplicación a los depósitos lacustres marginales del Mioceno superior*. Comunicaciones II Congr. del G.E.T. Simposio (I.G.C.P. nº 324), 279-282.

Tischer, G., 1966. Über die Wealden-Ablagerung und die Tektonik der ostlichen Sierra de Los Cameros in den nordwestlichen Iberischen Ketten (Spanien). (en Beuther, A.; Dahm, H.; Kneuper-Haack, F.; Mensink, H & Tischer, G.: Der Jura und Wealden in Nordost-Spanien). *Beith. Geol. Jb.* (44), 123-164.

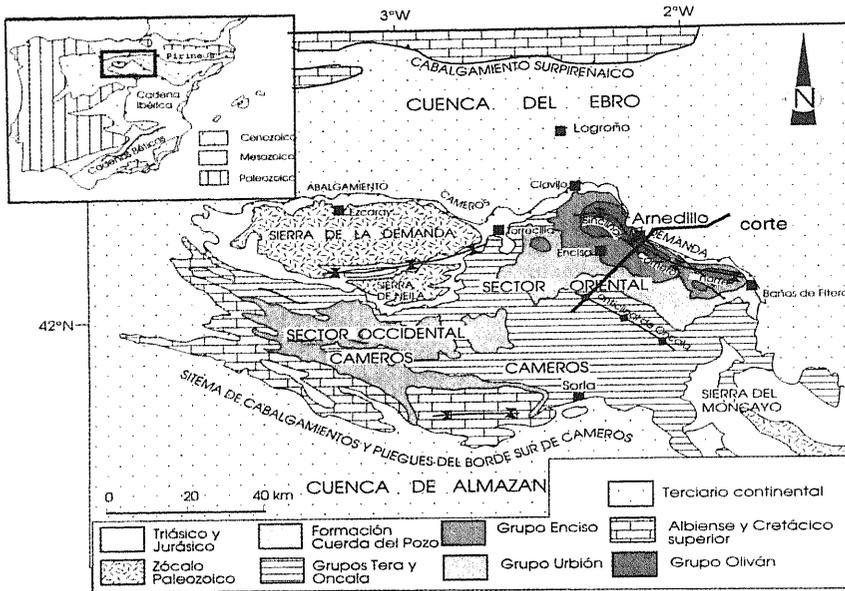


Figura 1.- Mapa general de las unidades de Demanda-Cameros en el que se sitúa el corte hidrogeológico de la figura 2 y se ubican las manifestaciones termales de Arnedillo.

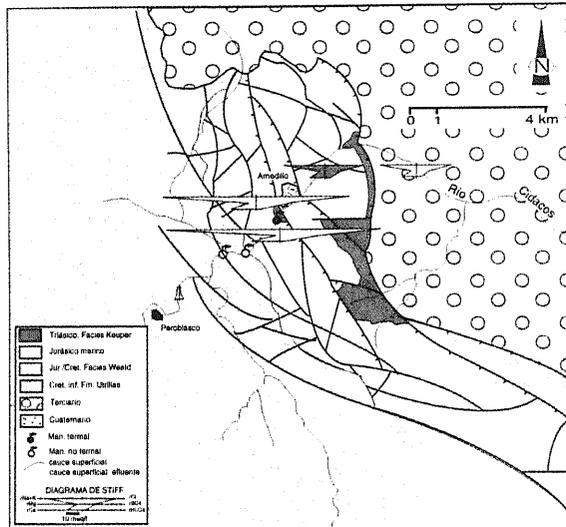


Figura 2.- Esquema cartográfico de la zona de descarga de Arnedillo en el que ubican las surgencias termales y los diagramas de Stiff correspondientes tanto a la composición de dichas surgencias, como a la correspondiente al río antes y después del tramo efluente y a la calculada para los aportes subterráneos (en trama gris).

HIDROGEOLOGÍA DE LOS MANANTIALES TERMALES DE ARNEDILLO

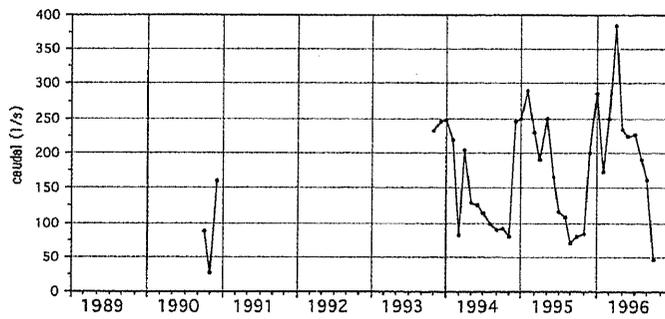
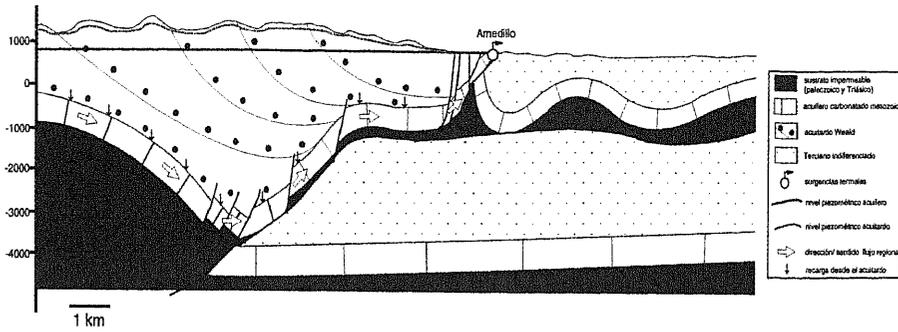


Figura 4.- Hidrogramas de las descargas subterráneas en Arnedillo a partir de la práctica de aforos diferenciales en los cauces de los ríos Cidacos y Alhama respectivamente. Los datos de 1989/90 proceden de ITGE (1990b) y MOPT-DGOH-CHE (1991); los correspondientes a 1993/96 corresponden a datos propios.

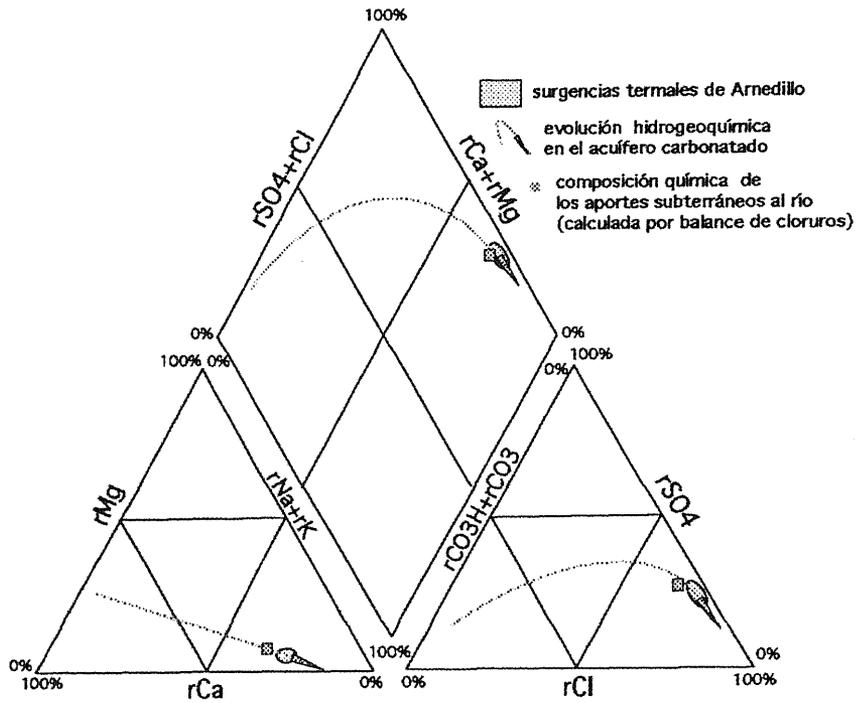


Figura 5.- Diagrama de Piper-Hill-Langelier en el que se representa lo siguiente: composición química de las surgencias termales, evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas y composición química calculada para los aportes subterráneos.

HIDROGEOLOGÍA DE LOS MANANTIALES TERMALES DE ARNEDILLO

Punto de muestreo análisis químico	Fecha	C.E. µS/cm	Res. se. mg/l	pH lab	CO3H- mg/l	SO4=	Cl-	Ca++	Mg++	Na+	K+	TDS mg/l	SAR	lcb	Cl/HCO3	Mg/Ca	SO4/Cl
manantial balneario de Arnedillo	12/94	10900	7421	8,2	149,5	1549,0	2876,9	459,4	76,6	2077,1	23,9	7243	23,6	-0,40	33,08	0,28	0,40
manantial balneario de Arnedillo II	12/94	10930	8000	8,2	150,1	1609,0	2906,7	504,2	86,5	2093,0	25,0	7407	22,6	-0,42	33,28	0,28	0,41
surgencia "Las Pozas"	12/94	10325	6233	6,8	183,0	1385,3	2556,0	391,2	63,6	1720,2	25,0	6370	21,2	-0,31	24,00	0,27	0,40
surgencia "Las Pozas II"	12/94	10560	6232	7,2	176,9	1331,0	2627,0	394,2	65,7	1700,2	25,0	6367	20,8	-0,27	25,52	0,28	0,37
rio Cidacos aguas arriba Arnedillo	12/94	424	292	8,0	222,0	67,7	11,4	66,0	26,6	6,7	0,8	409	0,2	-10,2	0,09	0,67	4,41
rio Cidacos aguas abajo Arnedillo	12/94	3860	2587	7,9	250,1	523,7	992,9	218,8	46,2	668,2	9,4	2726	10,7	-0,43	6,82	0,35	0,39
comp. qca. calculada rio Cidacos	12/94	#####	2865	###	253,2	580,8	1111,2	237,6	49,1	750,0	10,2	2992	11,6	-0,42	7,54	0,34	0,39

Tabla I.- Parámetros fisicoquímicos fundamentales de las aguas termales de Arnedillo