

EUGENIO SANZ PÉREZ

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SORIA

EDICIONES DE LA EXCMA. DIPUTACIÓN PROVINCIAL DE SORIA
COLECCIÓN TEMAS SORIANOS N° 39

EUGENIO SANZ PÉREZ, de ascendencia soriana, es Doctor en Ciencias Geológicas y Profesor Titular de Geología e Hidrogeología en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

Autor de diez libros y monografías y de cien artículos sobre hidrogeología, geología, etc., muchos de ellos relacionados con la provincia de Soria, y publicados en diferentes revistas como Ground Water, Hydrological Sciences, Journal of Hydrologic Engineering (ASCE), Bulletin of Engineering Geology, Karstologia, Environmental Geochemistry and Health, Estudios Geológicos, Revista de Obras Públicas, Boletín Geológico y Minero, Revista de la Sociedad de Historia Natural, etc.

Es miembro de la Junta Directiva de la Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y de la Asociación Española del Patrimonio Geológico. Pertenece desde 1988 al Centro de Estudios Sorianos.

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
EN
SORIA

EUGENIO SANZ PÉREZ

S O R I A
1 9 9 9

AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SORIA

© Eugenio Sanz Pérez

Excma. Diputación Provincial de Soria

EDITA: Excma. Diputación Provincial de Soria

PORTADA Y CONTRAPORTADA: Imprenta Provincial de Soria

FOTOGRAFÍAS Y DIBUJOS: El autor

COLECCIÓN: Temas Sorianos nº 39

MAQUETA E IMPRIME: Imprenta Provincial de Soria

I.S.B.N.: 84-95099-09-8

DEP. LEGAL: SO-55/99

PRECIO: 1.600 pesetas

Digitalización Enrique García Garcés (2022)

AGUAS SUBTERRÁNEAS
EN
SORIA

Presentación

Uno de los problemas más acuciantes para las administraciones del final del segundo milenio, es el abastecimiento de agua para todas las necesidades que plantea la sociedad actual. Los cambios climáticos, el aumento de la demanda de agua y el desenfado en el gasto cotidiano, han reducido considerablemente los recursos hídricos de nuestro territorio y, por consiguiente, los sistemas tradicionales de abastecimiento han quedado muy lejos de poder cubrir la demanda real. Para paliar este problema se ha recurrido en numerosas ocasiones al uso indiscriminado de los acuíferos subterráneos, lo que ha provocado graves desequilibrios medioambientales, cuya rectificación es costosa y compleja.

A pesar de estar situada en la cabecera de una de las cuencas fluviales más importantes de nuestro país, la provincia de Soria tampoco es ajena a este problema y la Diputación Provincial emplea muchos esfuerzos en captaciones y mejoras del abastecimiento de agua, no sólo para el consumo humano, sino también para permitir el crecimiento de las actividades económicas que permitan elevar la riqueza de la provincia.

Todo ello nos obliga a recibir esta publicación no sólo con el interés científico con el que se acogen todas las investigaciones de tema soriano, sino con el deseo de que se convierta en un instrumento de trabajo para mejorar la calidad de vida de los sorianos sin hipotecar el futuro.

MARÍA JESÚS RUIZ RUIZ
PRESIDENTA DE LA DIPUTACIÓN PROVINCIAL DE SORIA

INDICE

PÁGINAS

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SORIA

PRÓLOGO	13
1. INTRODUCCIÓN	
1.1. Presentación, objetivos y contenido del libro.....	15
1.2. Fundamentos sobre los acuíferos y la regulación de las aguas subterráneas.	18
1.3. Antecedentes.....	24
PRIMERA PARTE	
DESCRIPCION GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SORIA.	
2. MARCO GEOLÓGICO	27
3. CLIMATOLOGÍA	29
3.1. Pluviometría.	29
3.2. Temperaturas, evaporación potencial	33
4. HIDROGEOLOGÍA, ESTUDIO DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS.	37
4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y CLASIFICACIÓN DE LOS ACUÍFEROS	37
4.2. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	38
4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ACUÍFEROS.....	39
4.3.1. CUENCA DEL DUERO.....	40
1.- Unidad 02.09 Burgos-Arlanza.....	40
- Mesetas Terciarias de Castillejo de Robledo.....	41
2.- Unidad 02.10 Arlanza-Ucero-Avión.....	41
- Acuíferos calcáreos de la parte occidental de Soria.....	41
- Acuífero de la Fuentona de Muriel.....	44
- Acuífero del Avión.....	47
- Acuífero de la Sierra de Hinodejo y río Andaluz.....	49
- Acuífero de Fuentetoba y del Tobazo.....	50
- Acuífero calcáreo del río Izana.....	52
3.- Unidad 02.15 Cubeta de Almazán.....	53
- Cuenca del Rituerto.....	53

- Cuenca del Morón.....	55
- Cúpulas calcáreas del Duero y Ucero.....	56
- Aluvial del Duero.....	57
- Terciario de la cuenca de Almazán.....	59
4.- Unidad 02.16 Almazán-Soria.....	61
- Acuífero calcáreo de Vildé y Gormaz.....	61
- Meseta terciaria de Rello.....	66
- Acuífero calcáreo de Sierra de Pela.....	66
5.- Acuíferos que no pertenecen a ninguna unidad hidrogeológica.....	67
- Calizas wealdenses de Soria.....	67
- Acuíferos carbonatados de Soria.....	68
4.3.2. CUENCA DEL EBRO.....	69
1.- Unidad 09.33. Ortigosa-Mansilla-Neila.....	69
- Acuífero calcáreo de Cameros.....	69
2.- Unidad 09-36 Queiles-Jalón.....	70
- Acuífero de Vozmediano.....	70
- Acuífero de los Ojillos del Keiles.....	71
3.- Unidad 09.39. Calatayud-Montalván.....	73
- Acuífero del manantial de Aranda de Moncayo.....	73
- Acuífero del Manubles.....	75
4.- Unidad 09-47. Sierra del Solorio.....	76
- Páramo de Maranchón.....	76
- Acuíferos calcáreos de la Tierra de Medinaceli.....	78
5.- Acuíferos que no pertenecen a ninguna unidad hidrogeológica.....	79
- Acuífero de los manantiales de Añavieja.....	79
- Acuífero del manadero de Deza.....	85
- Meseta terciaria de Radona y Aguaviva de la Vega.....	86
4 4. RECURSOS GLOBALES. BALANCE HIDRÁULICO.....	86
5. RELACIONES AGUAS SUPERFICIALES-AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	88
5.1. LOS RÍOS SORIANOS. GENERALIDADES.....	88
5.2. RELACIONES RÍOS-ACUÍFEROS.....	90
- El drenaje subterráneo de los ríos.....	91
- Los trasvases subterráneos de cuenca.....	98
- Los caudales subterráneos en el estiaje.....	88

6. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, CALIDAD, Y CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS.....	102
6.1. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS	102
- Trabajos previos. Red de muestreo.....	102
- Características hidrogeoquímicas.....	105
6.2. CALIDAD DEL AGUA PARA ABASTECIMIENTOS A POBLACIONES.....	107
6.3. APTITUD DE LAS AGUAS PARA RIEGO.....	108
6.4. CALIDAD PARA LA INDUSTRIA.....	109
6.5. CONTAMINACIÓN.....	109
- Vertidos de aguas residuales. Depuración de las aguas residuales.....	109
- Recogida y eliminación de residuos sólidos.....	110
- Vulnerabilidad de los distintos terrenos a la contaminación.....	110
7. LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	113
7.1. LAS CAPTACIONES DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO URBANO.....	113
7.1.1. Propósito y marco de la encuesta.....	114
7.1.2. Resultados.....	116
7.1.3. Conclusiones y papel de las aguas subterráneas.....	122
7.2. EL USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN REGADÍOS, GANADERÍA E INDUSTRIA	123
7.3. DEMANDA FUTURA	124
BIBLIOGRAFÍA	124
SEGUNDA PARTE	
ESTUDIOS MONOGRÁFICOS DE ALGUNOS ACUÍFEROS.....	145
8. EL KARST DEL SUR Y OESTE DEL MONCAYO.....	146
9. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL KARST DEL CAÑÓN DEL RÍO LOBOS.....	181
10. LA FUENTONA DE MURIEL.....	219
11. HIDRODINÁMICA E HIDROGEOQUÍMICA DE LOS PRINCIPALES MANANTIALES TERMALES DE LA PENÍNSULA IBÉRICA: LOS MANANTIALES DE ALHAMA Y DEZA	227
12. INTRODUCCIÓN A LOS MANANTIALES TERMALES Y MINEROMÉDICINALES DE LA PROVINCIA DE SORIA	262
DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA.....	327

PRÓLOGO

La especial configuración del relieve de la extremadura soriana, divisoria de mares, hace que sea cuna de muchos ríos que se derraman con sus aguas limpias hacia los territorios más bajos de alrededor, llevando la riqueza y la prosperidad a Aragón, La Rioja o al resto de Castilla.

La naturaleza ha dotado también a Soria de numerosos embalses subterráneos en los que se almacenan grandes reservas de agua que alimentan, traspasando las montañas de nuestras cordilleras, a manantiales y ríos.

Los recursos hidráulicos son un instrumento obligado para la ordenación del territorio ya que es un elemento imprescindible para el desarrollo de la vida humana y uno de los recursos más valiosos de la humanidad.

Así se ha venido entendiendo y para equilibrar la gran irregularidad temporal en el régimen de los ríos con las necesidades de la demanda, ha sido necesario acudir al enorme esfuerzo en la construcción de embalses artificiales. Sin embargo, el desarrollo actual de la técnica ofrece otras posibilidades de regulación menos costosas y de las que se ha hecho, y todavía se hace, un uso relativamente modesto. Nos referimos a la utilización conjunta de las aguas subterráneas y de superficie ya que nuestro país, y en concreto la provincia de Soria, tiene acuíferos importantes que permitirían esta regulación óptima.

Siendo España el país más árido de Europa, no es sostenible actualmente una moderna planificación hidráulica sin contar

con el papel esencial de las aguas subterráneas, tal como han hecho otras naciones desarrolladas de nuestro mismo entorno cultural y climático, como Estados Unidos o Israel. Quizá cerca del 30% de los recursos hídricos de España son de origen subterráneo, y aunque con ellos se atienden bastantes regadíos y se abastecen el 80% de los núcleos de población, su uso sigue siendo escaso y mal aprovechado. La última sequía que ha sufrido nuestro país ha podido ser amortiguada gracias a las aguas subterráneas, único recurso que disponían muchas regiones. En Soria el regadío queda limitado por la dureza del clima pero el abastecimiento mediante sondeos ha hecho una gran labor social, frenando el despoblamiento y mejorando el nivel de vida de la zona rural.

La cuantificación detallada de los recursos hidráulicos que almacenan estos acuíferos, permitiría la correcta aplicación de la *Ley de aguas* que tiene por objeto lograr una gestión óptima del agua, considerada tanto como un *recurso económico* como un elemento fundamental para la conservación del *medio ambiente*.

El presente libro pretende dibujar el panorama hidrogeológico de Soria, describiendo los distintos acuíferos existentes y su relación con los ríos. Se hace también una descripción pormenorizada de algunos, que por su interés o relación con el medio ambiente merece la pena darlos a conocer. Se trata pues de buscar el desarrollo aprovechando nuestros recursos, pero no un desarrollo a toda costa, si no de manera armónica con el hombre y la naturaleza.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PRESENTACIÓN, OBJETIVOS Y CONTENIDO DEL LIBRO

Los recursos hidráulicos, como condicionantes de cualquier actividad humana, son un instrumento obligado para la ordenación del territorio, tanto que en amplios ámbitos geográficos esta ordenación del territorio ha venido determinada por la ordenación del agua. Realmente el agua es un elemento imprescindible para el desarrollo de la vida humana y uno de los recursos más valiosos para la humanidad.

Ahora bien, en las zonas semiáridas como es la nuestra, con un gran desequilibrio hídrico regional y con una gran irregularidad temporal en el régimen de los ríos, la adecuación de los recursos a la demanda hizo necesario acudir al gigantesco esfuerzo en la construcción de embalses de superficie entre los años 1940 y 1980. Sin embargo, con la electrificación rural, la aparición de la bomba de turbina y el desarrollo de la técnica de perforación de pozos, se han abierto otras posibilidades menos onerosas para esta regulación y de las que se ha hecho, y todavía se hace, un uso relativamente modesto.

En Soria, como en gran parte de España, la tradición en la utilización de las aguas subterráneas ha sido prácticamente nula, quedando limitada a la estricta captación de manantiales sin ningún tipo de regulación, y a la construcción manual de pequeños pozos en las viviendas de algunos pueblos. Tan sólo en las últimas tres décadas, se produce la imperiosa necesidad de atender el abastecimiento de bastantes pueblos sorianos mediante la perforación de pozos por parte de la Diputación Provincial. Esta gran labor social ha permitido frenar el despoblamiento y mejorar la calidad de vida en la zona rural. A parte de ello, la iniciativa privada también ha perforado bastantes sondeos para explotaciones agropecuarias, sobre todo granjas de ganado porcino. Aún así, la utilización que se hace es pequeña.

De acuerdo con la Ley de Aguas, y como proyecto más ambicioso, se trata ahora de conocer lo mejor posible los recursos hídricos

subterráneos de la provincia, tal como se ha dicho, a fin de disponer de la información suficiente para una correcta utilización de los mismos en el futuro. En esta línea se enmarca esta publicación que pretende dibujar el panorama hidráulico soriano, en lo que a aguas subterráneas se refiere, de forma no exhaustiva, pero si clarificadora.

El objetivo de este libro es sentar las bases en el conocimiento general de los acuíferos de Soria, evaluando de forma aproximada sus recursos hídricos, su funcionamiento, explotación, calidad del agua y relaciones con los ríos. A partir de aquí queda mucho camino por recorrer en la profundización y cuantificación detallada de todos y cada uno de los embalses subterráneos, matizando los aspectos generales que aquí se van a tratar.

Los temas principales que se han tratado son los siguientes:

1. Estudio de las características hidroclimáticas para la evaluación del balance en los distintos acuíferos.
2. Definición y delimitación de las diferentes unidades hidrogeológicas.
3. Evaluación de los recursos hídricos de cada unidad acuífera y establecimiento de un modelo de funcionamiento hidrogeológico (recargas, circulación, descargas, etc.)
4. Establecimiento de las relaciones ríos-acuíferos, determinando el caudal de base, zonas de descarga subterránea, trasvases subterráneos, etc.
5. Conocimiento de la situación actual de los abastecimientos de agua a las poblaciones de la zona.
6. Análisis de las características hidroquímicas y de calidad de las aguas subterráneas.
7. Profundización en el conocimiento de algunos de los más importantes acuíferos de la provincia.

El libro se ha dividido en dos partes; la primera corresponde a aspectos generales sobre las aguas subterráneas de Soria y en la que se ha hecho énfasis en su relación con los ríos. En la segunda parte se presentan cinco estudios monográficos en los que se ha intentado seleccionar aquellos más interesantes o más directamente relacionados con el medio ambiente.

No se desea terminar esta presentación sin antes agradecer a aquellas personas e instituciones que de manera directa o indirecta han ayudado a la realización de este libro.

A Javier de la Peña, Gabriel Fernández del Río, Javier G. Yélamos, Juan Antonio López Geta, José Medina, Juan José López Palancar y Javier y Jesús Sanz con quienes he colaborado en la preparación de diversas publicaciones en referencia a la hidrogeología de Soria. A Clemente Sáenz y Pedro Emilio Martín-Alfaro por la ayuda prestada en la realización de la Tesis Doctoral sobre el acuífero de Vozmediano. Con Javier G. Yélamos soy coautor de dos de los estudios monográficos de este libro.

A Fidel Molinero, Rafael Segovia y Victorino Ruiz por la cesión de algunas de las fotografías que se insertan en el libro. A Loreto Gómez por la mecanografía y preparación del manuscrito.

Se quiere agradecer a Gabriel Fernández del Río y al Servicio Geológico de Obras Públicas el permitir la publicación y facilitar la información y resultados más destacables del Estudio Hidrogeológico de Soria realizado en 1989 y 1990.

Este agradecimiento se extiende a Juan Antonio López Geta y al Instituto Tecnológico y Geominero por la información igualmente facilitada, en especial por el mapa y memoria de la monografía sobre las aguas subterráneas de Soria.

En otro sentido también quiero expresar mi agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia que gracias a las ayudas y proyectos de investigación concedidos han hecho posible el estudio continuado de la hidrogeología de la provincia de Soria. Estas ayudas económicas se refieren a las becas de Personal Investigador, dos proyectos de la CICYT (Recarga Natural de Acuíferos y estudio hidrodinámico en el Parque Natural del Cañón del río Lobos), y Ayudas Concertadas a la Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, de las que he sido en todos los casos investigador principal.

También queremos agradecer al Departamento de Infraestructuras de la Junta de Castilla y León la subvención facilitada, y con la que se ha podido estudiar el uso del agua en Soria, así como a José Manuel Meneses, director del Parque Natural del Cañón del río Lobos por las facilidades que nos ha proporcionado en todo momento.

Finalmente, deseo agradecer a la Sección de Cultura de la Diputación Provincial de Soria por el interés y el esfuerzo que se ha puesto para que este libro se hiciera realidad.

1.2. FUNDAMENTOS SOBRE LOS ACUÍFEROS Y LA REGULACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Dentro de esta Introducción se ha creído oportuno explicar brevemente una serie de conceptos importantes sobre las aguas subterráneas, a fin de facilitar al lector no especialista la mejor comprensión de los distintos capítulos de este texto.

Aguas subterráneas son aquellas situadas bajo la superficie del terreno, albergadas en el seno de formaciones geológicas con poros u otro tipo de huecos. Conceptualmente, no existe la dicotomía aguas superficiales-aguas subterráneas. Se trata del mismo elemento, líquido e intercambiable

Los **acuíferos** son aquellas formaciones geológicas capaces de almacenar y transportar volúmenes y caudales significativos de agua subterránea, de tal manera que el hombre pueda aprovecharlas para subvenir a sus necesidades.

No todas las rocas poseen la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua en cantidades apreciables económicamente. Es bien sabido la diferente permeabilidad de las distintas litologías, siendo quizá los acuíferos más importantes, aquellos que están formados por depósitos no consolidados de origen fluvial y por las rocas carbonatadas. Esta es la tónica general en España.

En un acuífero tenemos, de un lado, los caudales circulantes hacia las salidas del mismo, y de otro, los importantes almacenes hídricos subterráneos, susceptibles de utilizarse en forma parecida a los embalses de superficie. Si los caudales subterráneos naturales -y los que se pueden forzar artificialmente- son una parte modesta de los que nos brinda la escorrentía, el almacenamiento hídrico en los embalses subterráneos es muy importante. Pueden ser incluso muy superiores al de los embalses artificiales de España. Ello no quiere decir que estas reservas sean totalmente explotables, ya que pueden influir aspectos técnicos y económicos.

La geología es la responsable de definir el soporte físico de los embalses subterráneos: La porosidad dependerá del tipo de roca y/o de la fracturación; la geometría estará condicionada por la estructura del terreno.

Las entradas de agua en los embalses subterráneos se originan a través de las recargas (de la lluvia, de aguas superficiales, etc). Las salidas de los mismos se realizan por fuentes, alimentación difusa o concentrada en cauces, lagos, costas y también, artificialmente, por vía de los sondeos, pozos y otras obras de captación. La fase subterránea del ciclo hidrológico cumple la ecuación del balance hidráulico: Entradas = Salidas \pm variación de almacenamiento.

En la vertical de cualquier punto de la tierra se encuentra agua a partir del llamado nivel freático, con saturación de los huecos. Así, en un acuífero se distingue la zona no saturada o vadosa, situada entre la superficie freática y la del terreno, y la zona de saturación, limitada por la superficie freática y la base impermeable del embalse subterráneo. El nivel freático puede fluctuar dependiendo de la mayor o menor cantidad de agua almacenada en cada momento.

De acuerdo con el estado de presiones hidrostáticas del agua encerrada en los acuíferos, estos se clasifican en libres o confinados. En los primeros, la superficie freática se encuentra a la presión atmosférica. Por el contrario, en los acuíferos confinados el agua está sometida a una presión superior, de tal manera que al perforar con un pozo se obtiene un ascenso rápido del nivel del agua, que puede llegar a fluir por la boca (Foto 1) (pozos surgentes) o no alcanzar la superficie del terreno.

La regulación de los recursos hidráulicos en un país tan árido como el nuestro, con zonas climáticas aptas para cultivos selectivos, y con una gran disimetría hídrica espacial y temporal de nuestros ríos, cobra un interés especial. Si a esto unimos las características topográficas de España, que ofrece posibilidades de construcción de embalses artificiales, explica las grandes inversiones que han venido materializándose en la construcción de presas, cuyos vasos recogen actualmente hasta el 40 por 100 de la aportación superficial.

Sin embargo, la rentabilidad decreciente de las inversiones en los emplazamientos que van quedando, sobre todo en algunas cuencas, y el creciente consumo de agua que condiciona, como bien escaso, nuestro progreso, obliga a considerar otras posibles fuentes de recursos, y en este sentido se piensa en los acuíferos.

Estos proporcionan bastante más del 20 por 100 del agua útil y en ellos se alojan grandes reservas que se estima alcanzan, como

valor medio, hasta el doble de los recursos hídricos anuales totales de España.

La regulación de estos embalses subterráneos tiene especial interés en la vertiente mediterránea, en la que junto al mayor valor del agua y la mayor irregularidad en su disponibilidad, se añade el hecho de ser la zona en que más abundan los acuíferos y manantiales kársticos, que son los que ofrecen mayores posibilidades de regulación.

Todos los recursos hídricos, tanto los que circulan por los ríos como los que lo hacen subterráneamente, han de considerarse en su conjunto; y la forma racional de su regulación ha de coordinar la explotación de ambos embalses, superficiales y subterráneos.

En el lenguaje comúnmente admitido, suelen entenderse por **recursos** o aportaciones hídricas de un sistema acuífero el valor medio interanual de la suma de todas las entradas. Esta cifra constituye el techo máximo del aprovechamiento anual sostenible a largo plazo. El término **reservas** se aplica al volumen almacenado en cierto momento en el embalse subterráneo. Las reservas de los acuíferos suelen ser muy grandes en comparación con sus recursos, por lo que pueden utilizarse como embalses de regulación interanual.

Es decir, puede ser muy útil en un momento determinado explotar intensamente un acuífero, extrayendo de él más agua de la que le entra, con objeto de satisfacer una demanda o necesidad perentoria. Este ritmo temporal de explotación (que a veces se le denomina erróneamente sobreexplotación) merma coyunturalmente las reservas del acuífero que pueden ser restablecidas posteriormente en períodos húmedos. Esto se visualiza muy bien en lo que ha ocurrido en amplias zonas del país durante la última sequía, donde gracias a las aguas subterráneas (las únicas que había) se ha podido abastecer a numerosas poblaciones. El período lluvioso del invierno de 1995-96 no sólo llenó los embalses de superficie sino también los subterráneos.

El objetivo que se persigue con la regulación de las aguas subterráneas, es la adecuación de las extracciones que se hagan, a las demandas a lo largo del tiempo.

El fundamento de la regulación de un acuífero reside en su tratamiento como un embalse y su viabilidad está condicionada, fundamentalmente, a la capacidad de dicho embalse subterráneo, y a la

posibilidad de recarga artificial o extracción del agua necesaria. Como se comprenderá, este embalse natural, de vida ilimitada no es necesario construirlo; de ahí el interés económico que pueden tener las aguas subterráneas.

Es necesario por tanto que haya un volumen suficientemente grande por debajo del nivel de drenaje del acuífero, ya que este stock, sin salida natural, nos permitirá un vaciado parcial mediante captaciones al ritmo de las necesidades previstas de agua en cada momento, a la vez que este vaciado proporcionará un alojamiento a las nuevas aportaciones. Este mismo efecto se puede conseguir subiendo el nivel freático mediante la recarga artificial, es decir, introduciendo en el acuífero los excedentes de ríos, aprovechando el volumen de huecos por encima del nivel de drenaje. De esta manera se evita la evaporación.

Para visualizar mejor alguno de estos conceptos, veamos el magnífico ejemplo que constituye el pequeño embalse subterráneo de Pico-Frentes, la montaña más llamativa de las cercanías de Soria y que fué estudiada en sus aspectos geológicos e hidrogeológicos por Sáenz García (1954) (Figura 1) (Foto 2).

El acuífero está formado por un potente banco de 170 m. de calizas de edad Turonense-Senoniense, muy karstificadas en superficie. Su geometría es de un sinclinal colgado, basculando hacia el Sur,

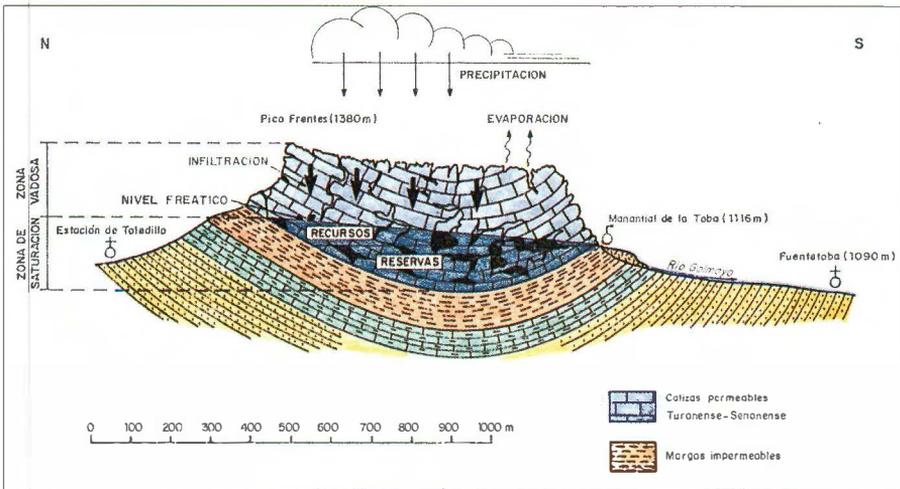


Fig. 1.—El embalse subterráneo del sinclinal de Pico-Frentes. (Inspirado de C. Sáenz, 1954)

apoyado en su parte inferior sobre las margas impermeables del Turonense. Allí donde el contacto permeable-impermeable tiene menor altura, es por donde la cubeta vierte el agua de forma natural, localizándose el manantial de La Toba, así llamado por los abundantes depósitos de carbonato cálcico que precipita en sus orillas.

El funcionamiento hidrogeológico es muy sencillo: la alimentación del embalse subterráneo se verifica, únicamente, a través de la infiltración del agua de lluvia en los pocos kilómetros cuadrados de superficie del acuífero, percolando el líquido por las grietas del terreno, atravesando la zona vadosa hasta llegar al nivel freático. Desde aquí, el agua circula a través de fracturas y cuevas hasta la fuente. El caudal medio anual del manantial es de 115 l/s, aunque oscila de 5 a más de 1.000 l/s, influenciado por el régimen de las precipitaciones. Los recursos son 3'65 hm³/año, que se almacenan en los huecos que la cubeta tiene por encima de la cota del manantial. Las aguas que rellenan los poros, desde este plano imaginario horizontal, hasta la base impermeable del sinclinal, constituyen las reservas. El acuífero, como se puede ver, es libre y se encuentra sin explotación de ninguna clase.

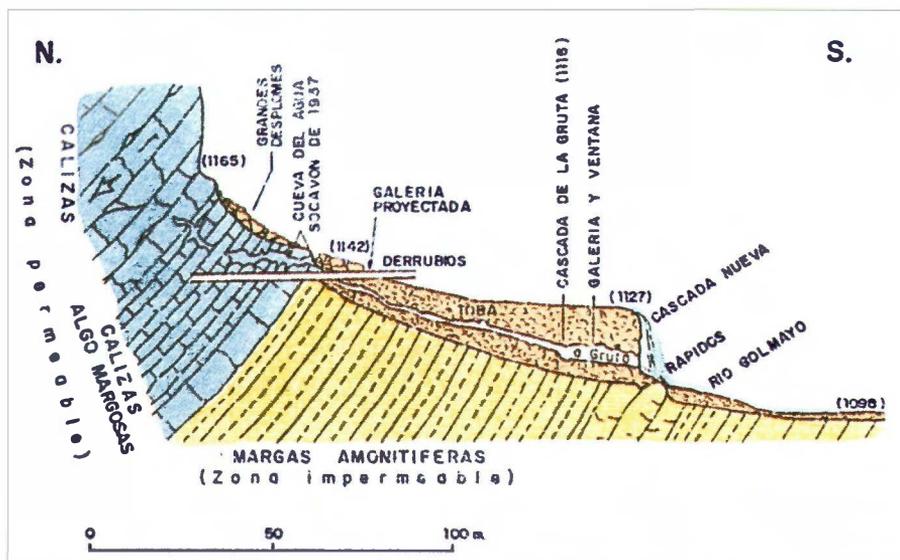


Fig. 2.—Intento de regulación del manantial de la Toba en 1937 por parte del Ingeniero de Caminos soriano D. Clemente Sáenz García

En 1937 Clemente Sáenz intentó utilizar este embalse subterráneo para el abastecimiento a la capital de Soria. Pensó en regular el manantial de La Toba mediante la perforación de una galería con “grifo” bajo la surgencia a fin de controlar según conviniese la salida del agua subterránea. (Figs. 1, 2, 10 y 11)



Fig. 10.—Corte geológico detallado del manantial de la Toba (Proyecto de abastecimiento de Soria. 1937. Clemente Sáenz García - Ayto. de Soria) (sin escala)

Esta metodología fue precursora y pionera de la moderna técnica de regulación de manantiales, que se utiliza con éxito en los países más adelantados en la gestión de los recursos hídricos, como Israel o Estados Unidos. Con la misma filosofía se podría haber aplicado al manantial de Vozmediano, manadero que aporta el 85% del caudal del río Queiles, que piensa regularse mediante la construcción del embalse del Val, presupuestado en más de 30.000 millones de pesetas, cuando seguramente sólo hubiese sido necesario el 3% de ese presupuesto para conseguir la misma regulación del río mediante pozos.

Aunque la impermeabilidad de muchas de las cuencas de nuestros ríos hace interesante su regulación mediante presas (véase los ríos Alhama, Linares, Cidacos, parte del Duero), en otros casos existen grandes posibilidades de regulación mediante pozos, como los manantiales de Gormaz o de Añavieja, por ejemplo.

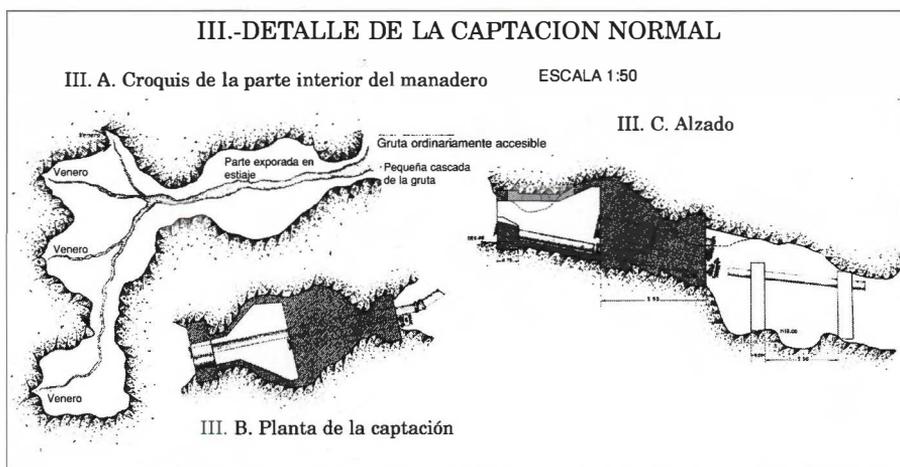


Fig. 11.—Detalle del sistema de captación para la regulación del manadero de Fuentetoba (Proyecto de abastecimiento a Soria. 1937. Clemente Sáenz García. - Ayto. de Soria).

1.3. ANTECEDENTES

Como en gran parte del país, no cuenta la provincia de Soria con demasiados ni extensos estudios hidrogeológicos. Puede justificarse, en parte, por la falta de necesidades hídricas de envergadura, que no ha requerido emplear el agua (tanto superficial como subterránea) de forma importante.

Sin embargo, en la provincia se hicieron antiguamente diversas investigaciones y proyectos pioneros, por insignes técnicos y científicos, de los más prestigiosos de la época, cuya originalidad e interés merece la pena comentar, aunque sea brevemente.

Eduardo Saavedra, realizó el proyecto de desecación de la Laguna de Añavieja (que con sus 250 Ha. de superficie fue la mayor de Soria), al objeto de acabar con el paludismo de la zona y de ganar el caudal que se perdía por evaporación, drenando los bajíos donde brotaban las fuentes vaclusianas que la alimentaban subterráneamente. Se pudo poner así en regadío nuevas tierras. La ejecución de la idea fue llevada a cabo por Lucas Mallada en 1866.

Posteriormente, Pedro Palacios (1890), hace una descripción geológica, de la provincia de Soria, muy completa para la época y con numerosos datos de índole hidrogeológico.

A Clemente Sáenz García (1953, 1958) se debe el conocimiento general de los ríos sorianos y el descubrimiento del trasvase subterráneo del Araviana al Queiles, que ha servido como tema a una Tesis Doctoral (Sáenz Pérez 1984).

Fueron particularmente originales los intentos de captación del manantial de La Toba durante el año como ya se ha dicho 1937, en Pico-Frentes, predecesores de la moderna técnica de regulación de manantiales (Sáenz García, 1954). Las obras tenían por objeto la traida de aguas a la capital de la provincia. El proyecto quedó después abortado y no se llegó nunca a terminar. Se pensaba regular el manantial mediante una galería dotada de grifo. Los trabajos fueron encaminados en tal sentido: Primero se reconoció detalladamente la geología del manantial localizando el lugar de surgencia, enmascarado por derrubios y tobas. Posteriormente se comenzaron las labores para hacer una galería más profunda, más allá del contacto en barrera entre las rocas impermeables y permeables, (Figs. 1, 2, 10 y 11) (Foto 2). El descubrimiento que el manantial salía a 26 m. por encima de donde se creía, era una ventaja pues se aseguraba la presión necesaria para llevar el agua por gravedad a Soria.

Recientemente, se han realizado estudios hidrogeológicos regionales en el Plan Nacional de Investigación de las Aguas Subterráneas (PIAS) por parte del Instituto Tecnológico y Geominero de España, (1982) así como diversos proyectos del IRYDA, Diputación Provincial de Soria y Servicio Geológico de Obras Públicas ((1990). Este último organismo realizó un estudio hidrogeológico del conjunto provincial que profundizó en el conocimiento de las unidades hidrogeológicas, su relación con la red fluvial, definición de la calidad del agua subterránea, etc. para lo que se llevaron a cabo diversos trabajos entre los que podemos mencionar el inventario de 1.450 puntos de agua, realización de 8 sondeos experimentales de pequeño diámetro con un total de 769 metros perforados, así como 5 sondeos de pre-explotación con 764 metros perforados. Parte de la información ofrecida en este libro se apoya en dicho trabajo.

Al final de este libro se han recopilado las citas bibliográficas e informes, relacionadas con la hidrogeología de la provincia de Soria.

PRIMERA PARTE

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

2. MARCO GEOLÓGICO

La provincia de Soria se encuentra situada en el centro de España y pertenece a la Comunidad Autónoma de Castilla-León. Su superficie es de 10.287 Km².

Está atravesada por los montes Ibéricos que de Norte a Este y en su periferia o proximidades destacan los Picos de Urbión (2.228 m), Sierra Cebollera, Sierra de Alba, Almuerso, El Madero y Moncayo (2.315 m). Son macizos montañosos que, situados al borde de la meseta, la separan de la depresión del Ebro.

De las parameras existentes en la región meridional van surgiendo las primeras elevaciones del Sistema Central. Entre ambas alineaciones aparece la meseta soriana, que desciende siguiendo el curso del Duero y que tiene una altitud media cercana a los 1.000 metros.

Los ríos que discurren por la provincia de Soria pertenecen a la Cuenca del Duero y a la del Ebro. La vertiente atlántica tiene una extensión de unos 7.000 km² y la vertiente mediterránea abarca unos 3.000 km². En el capítulo 5 se tratará con más amplitud la red fluvial.

Soria está dividida en tres unidades estructurales importantes (Sáenz, 1986):

- a) Las Alineaciones Ibéricas al norte (Macizos Cameranos, las altas cordilleras de la divisoria de aguas Ebro-Duero y la Subsierra Ibérica). Estas Alineaciones Ibéricas quedan limitadas al Norte por la Fosa del Ebro.
- b) Canal de Almazán, que es una cuenca terciaria constituida por

potentes depósitos detríticos, sobre todo arcillosos. Ocupa la parte central de la provincia, entre la citada Subsierra Ibérica y

- c) La Cordillera Central, formada por materiales esencialmente mesozoicos que abarcan la parte meridional de Soria. Está limitada al Sur por la Fosa del Tajo.

Las Alineaciones Ibéricas, de orientación NO-SE, están formadas por sedimentos pertenecientes al Triásico, Jurásico marino, de las facies "Purbeck-Weald" y Cretácico. En el núcleo de algunos macizos llegan a aflorar materiales paleozóicos. Al Triásico pertenecen las facies Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper, clásicas del Trias germánico. Hay también algunos apuntamientos de ofitas. El Lías, Dogger y Malm son esencialmente carbonatados y de considerable espesor. El "Weald" detrítico, ocupa gran parte del norte de la provincia: Pinares, Sierras de Urbión, Cebollera, Carcaña, Alba, comarcas de San Pedro Manrique y Ágreda.

El Cretácico comienza en la facies arenosa del Utrillas siguiendo luego episodios margosos, hasta llegar al Cretácico superior calizo, de unos 200 m. de espesor, desarrollado a lo largo de la Sierra de Cabrejas, Hinodejo, San Marcos, Santa Ana, Tiñoso, Taja-huerce, Cardejón y Ciria.

En la Cordillera Central la estratigrafía es semejante, aflorando el Trias germánico en la zona de Medinaceli y Tiermes. El Jurásico es carbonatado y pertenece en gran parte al Lías (Parameras de Barahona y Maranchón). El Cretácico viene después, ya que el Weald no aparece. Aquí el piso es muy parecido al de las Alineaciones Ibéricas, y se le ve asomar en distintas zonas; algunas veces aflora entre el Terciario en forma de cúpulas calcáreas.

El Cuaternario está, por lo general, poco desarrollado. Adquieren alguna importancia las terrazas del Duero.

La estructura predominante la podríamos clasificar como "jurásica". El Paleozóico hace de zócalo rígido, el Buntsandstein de tegumento y el Keuper de nivel de despegue. El Jurásico, es una cobertera sedimentaria, suavemente plegada y fracturada. El "Weald" ahoga y enmascara las estructuras subyacentes. El Terciario moderno fosiliza un relieve preexistente mesozóico, cubriendo la parte central de Soria, como se ha dicho, con un espesor variable, desde pocos metros, hasta cerca de un kilómetro, puesto en evidencia en las relativamente numerosas campañas de prospección petrolífera hechas en la provincia.

3. CLIMATOLOGÍA

Dentro de este apartado sólo nos vamos a referir a aquellos aspectos que se han utilizado para el cálculo del balance hidráulico de los acuíferos. Se analiza la pluviometría y se hace un breve comentario de las temperaturas y evaporaciones potenciales.

3.1. PLUVIOMETRÍA

Descripción general

La provincia de Soria dispone de 134 estaciones meteorológicas de las cuales 112 están ubicadas en la cuenca del Duero y 22 en la del Ebro. Este número de estaciones es suficiente para conocer la pluviometría de la provincia, si bien se advierten las siguientes lagunas:

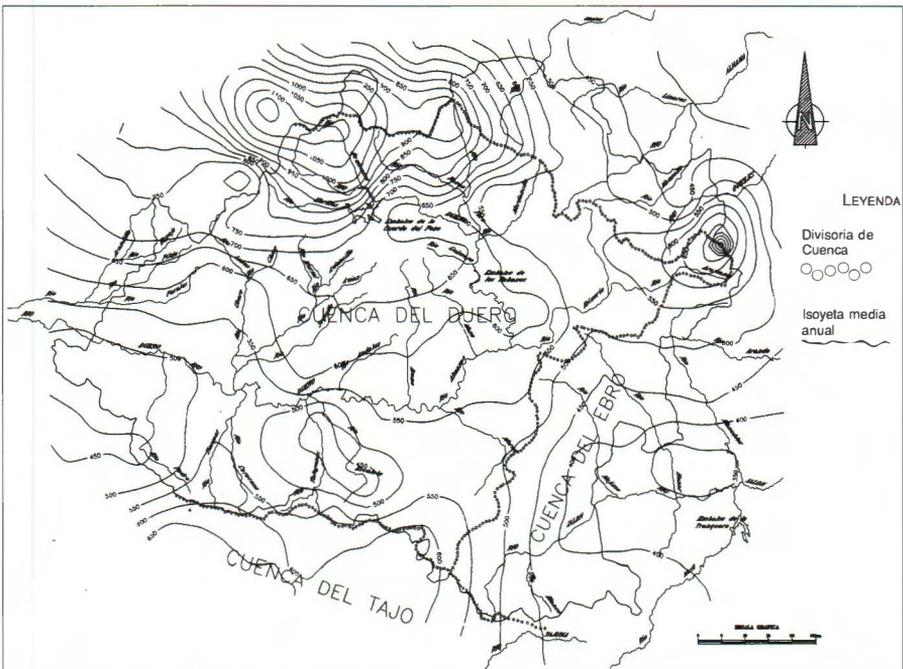


Fig. 3 –Isoyetas medias anuales (período 1940-41 a 1985-86). (Tomado de SGOP, 1990).

– No se dispone de estaciones en las zonas de montaña (solamente existe la estación de Puerto Piqueras) con lo que la pluviometría en las zonas altas de las cordilleras (Sierra Cebollera, Urbión, Moncayo, etc.) no se conoce.

– Los registros no presentan continuidad y por tanto no son coetáneos en gran parte de las estaciones.

Para determinar la pluviometría es necesario considerar series homogéneas y tratar un período significativo. Por ello se han recopilado las series utilizadas en la elaboración de la Documentación Básica del Plan Hidrológico que comprende el período 1940-41 a 1985-86. No es posible reflejar aquí la amplia documentación disponible ni los análisis estadísticos que en base a ella se han realizado. Únicamente en la Tabla 1 se dan las precipitaciones estacionales medias de las principales estaciones meteorológicas.

A partir de la precipitación media anual se han dibujado las isoyetas medias anuales de la provincia que figuran en el gráfico número 3. Según puede verse en dicho plano, la pluviometría media anual oscila entre los 400 mm. en el valle del Jalón y los 1.100 mm. de Urbión.

La región más lluviosa de la provincia corresponde a la zona de Pinares. Otro lugar de altas precipitaciones corresponde al Moncayo, aunque es una zona muy puntual. En estas regiones la precipitación media anual está por encima de los 800 mm.

Las zonas de menor pluviometría corresponden a:

- a) la cuenca del Jalón,
- b) parte de la zona Sur de la provincia (cuenca media y baja de los ríos Talegonos y Escalote, con precipitaciones menores de 450 mm. y cuenca del río Pedro con precipitaciones entre 500 y 450 mm.)
- c) cuencas medias de los ríos Linares, Alhama y Manzano con precipitaciones de 500 a 450 mm.

El resto de la provincia tiene precipitaciones medias superiores a los 500 mm. siendo superior a los 600 mm. anuales en amplias zonas de la provincia.

Se han calculado las variaciones estacionales de las lluvias en cada estación pluviométrica. A la vista de ello podemos resaltar que

hay zonas en la provincia en las que la época más lluviosa se corresponde con el otoño-invierno (Vinuesa, Póveda de la Sierra, Almarza; es decir zonas de pluviometría alta) frente a otras en las que la estación más lluviosa corresponde a la primavera (Almenar, Aliud, Almazán, Rello, Riba de Escalote, Vizmanos, Monteagudo de las Vicarías; zonas en general de pluviometría media baja). Hay, asimismo, otras zonas en las que la precipitación se reparte de manera más o menos uniforme a lo largo del otoño, el invierno y la primavera. En todas las estaciones, en general, la estación menos lluviosa corresponde al verano.

A partir de las series mensuales (completadas sus lagunas) se ha realizado, por una parte, un análisis estadístico general para analizar la distribución anual de la precipitación en el período 1940-41 a 1985-86 y por otra, un ajuste estadístico para clasificarlas según los años tipo: muy húmedos, húmedos, medios, secos y muy secos.

Para realizar estos análisis se han elaborado las siguientes distribuciones por estación:

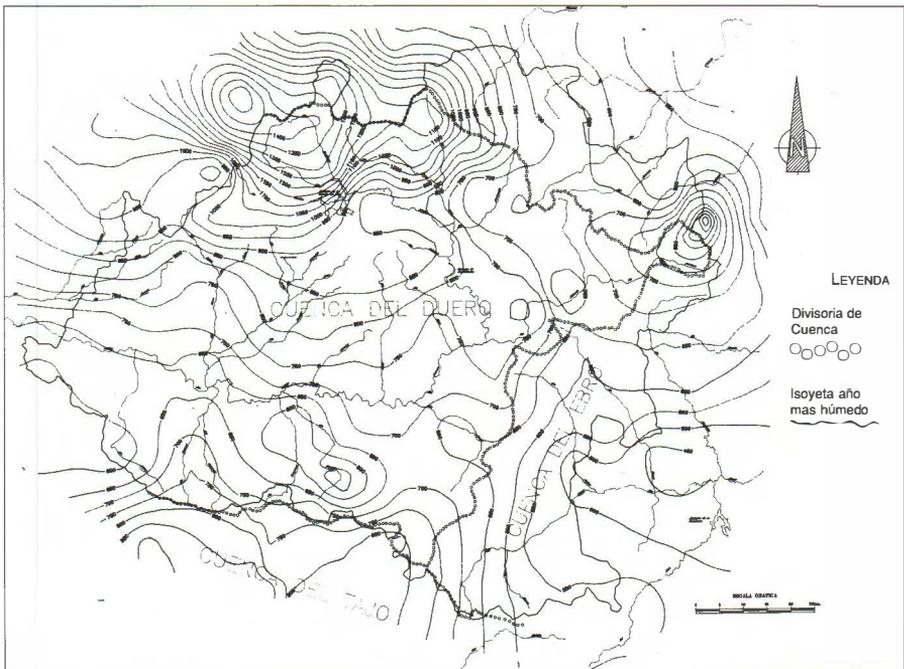


Fig. 4 –Isoyetas año más húmedo. (Tomado de SGOP, 1990).

Precipitaciones anuales en el período considerado; precipitaciones medias mensuales; clasificación de las precipitaciones anuales; diferencia de precipitaciones anuales respecto de la media; medias móviles cada 5, cada 10 y cada 15 años. A modo de ejemplo, en la figura 6, se presentan los cuadros mencionados correspondientes a la estación de Soria capital.

Por otra parte se han realizado los ajustes de la serie anual de precipitaciones a la ley Logarítmico-Normal con el fin de calcular la precipitación de los años tipo muy húmedos húmedos, medios, secos y muy secos. Para estos años tipo se han considerado las probabilidades de 0'85, 0'65, 0'50, 0'35 y 0'15 de no ser superados los valores calculados por los datos observados y todos con un margen de confianza del 95%. Como ejemplo de estos ajustes se incluyen cuatro en el gráfico 7.

Las isoyetas de los años tipo muy húmedo y muy seco se reflejan en las figuras 4 y 5, respectivamente, y las del año medio en el de la figura 3.

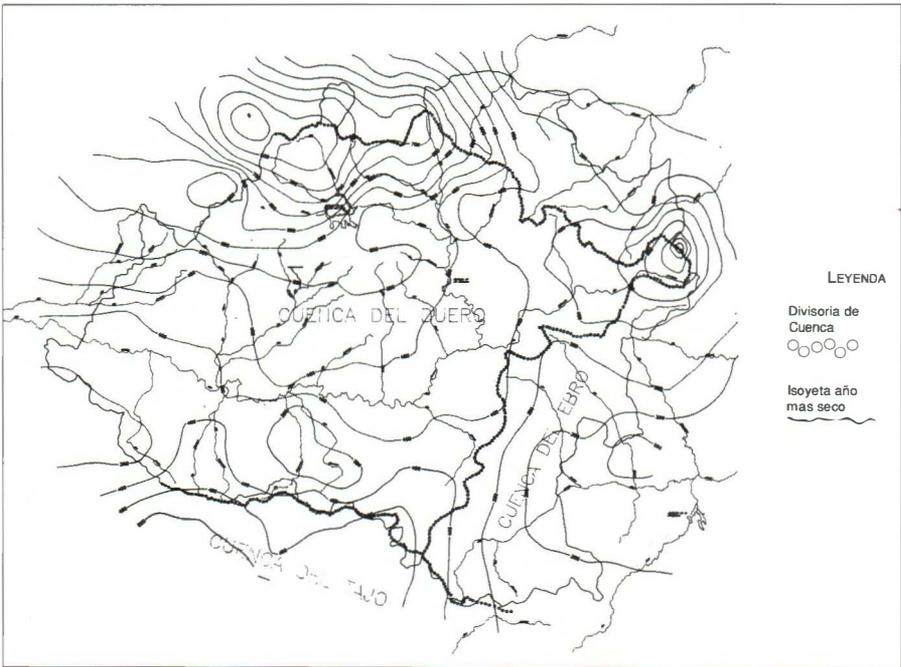


Fig. 5.—Isoyetas año más seco.(Tomado de SGOP, 1990).

Precipitación anual en los acuíferos

En la Tabla nº 2 (pág. 131) se refleja la precipitación media anual (expresada en mm o en hm³) que cae en el área de alimentación de los acuíferos de la provincia. Estos valores son el punto de partida para establecer el balance hidráulico en cada sistema hidrogeológico.

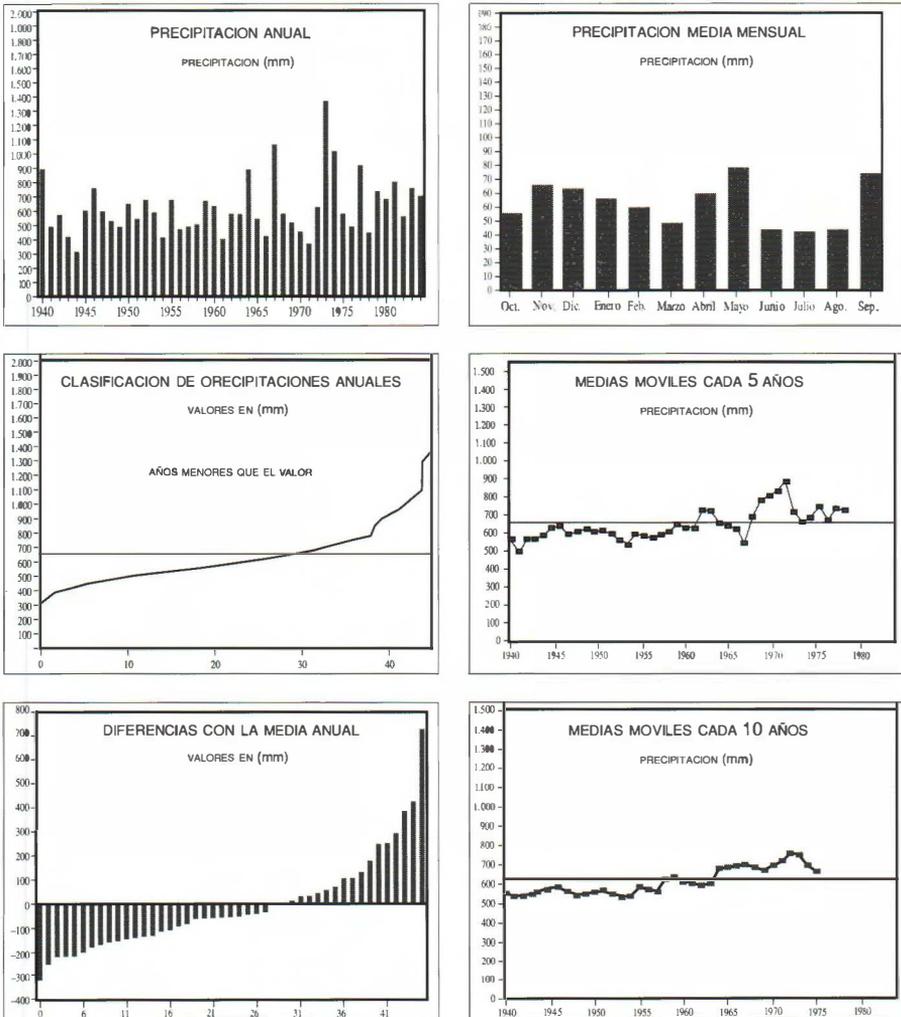


Fig. 6.-Distribuciones estadísticas de las precipitaciones en la estación meteorológica de Soria.(Tomado de SGOP, 1990).

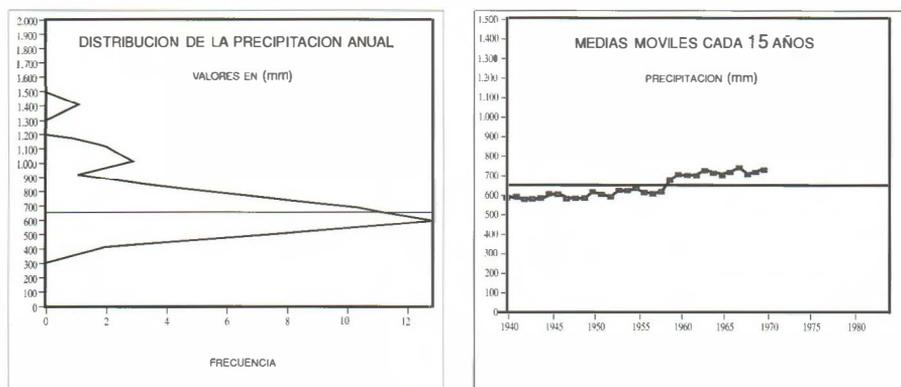


Fig. 6.—(Contin.) Distribuciones estadísticas de las precipitaciones en la estación meteorológica de Soria. (Tomado de SGOP, 1990).

3.2. TEMPERATURAS Y EVAPORACIÓN POTENCIAL

La red de estaciones meteorológicas con registro de temperaturas es escasa, pues la provincia dispone sólo de 23 estaciones.

Según los datos de las temperaturas medias mensuales, podemos ver que en la provincia de Soria, existe un largo y duro invierno que contrasta con un verano relativamente caluroso en los meses de Julio y Agosto. Así pues, la mayor parte de la altiplanicie soriana tiene temperaturas inferiores a 5°C en los meses de Diciembre, Enero y Febrero. En los meses de Noviembre, Marzo y Abril las temperaturas oscilan entre 5 y 10°. Hay también otras zonas más frías donde la temperatura del mes de Mayo está por debajo de los 0° (áreas circundantes a Montes Claros, Piqueras, Almuerzo, Hayedo, Moncayo, Cebollera, Urbión, Sierra de Pela y Barahona).

Las zonas muy frías de alta montaña, sin habitar, se restringen a los pisos supraforestales de Urbión, Cebollera y Moncayo. Las comarcas de Ágreda, Las Vicarías, Ribera del Duero, Almazán y Cigudosa, son sin embargo, menos frías que el resto.

Por otro lado, gran parte del territorio soriano tiene una evaporación potencial que oscila alrededor de los 650 mm/año. En la zona Noroeste (Pinares y Cabecera del Duero) está por debajo de 600 mm. En la parte sur tiene valores por encima de los 700 mm.

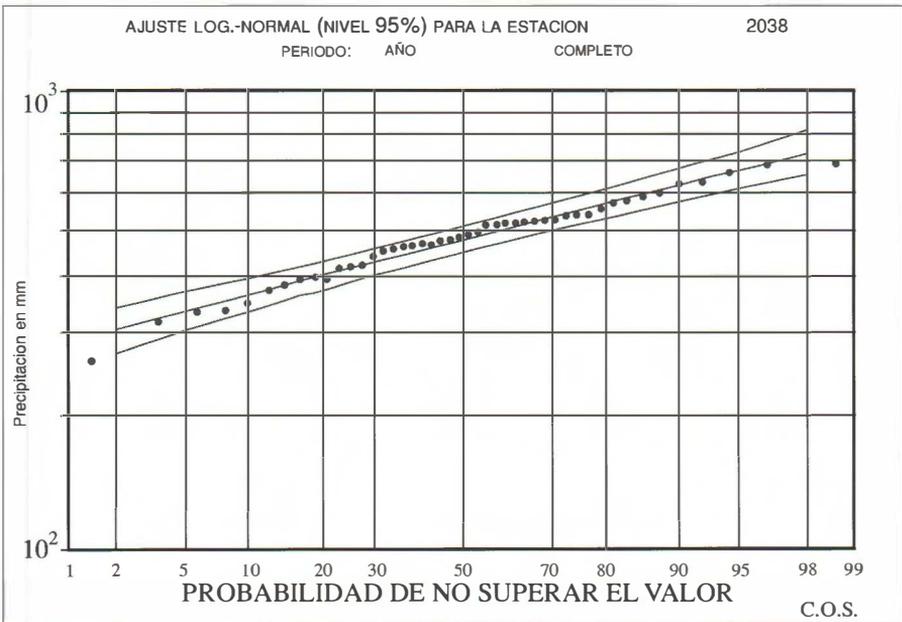


Fig. 7.-Ajustes logarítmico-normal en cuatro estaciones de la provincia de Soria.(Tomado de SGOP, 1990).

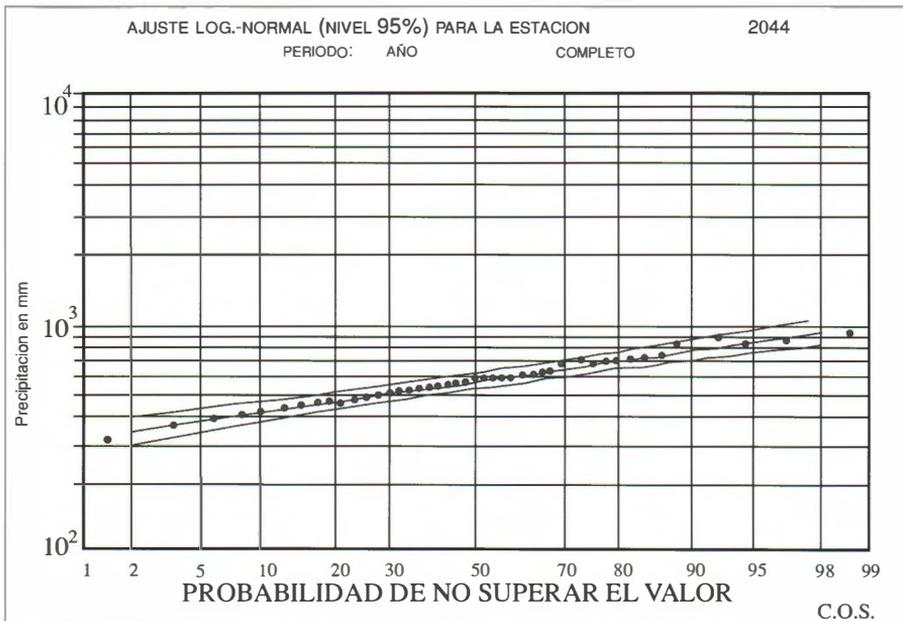
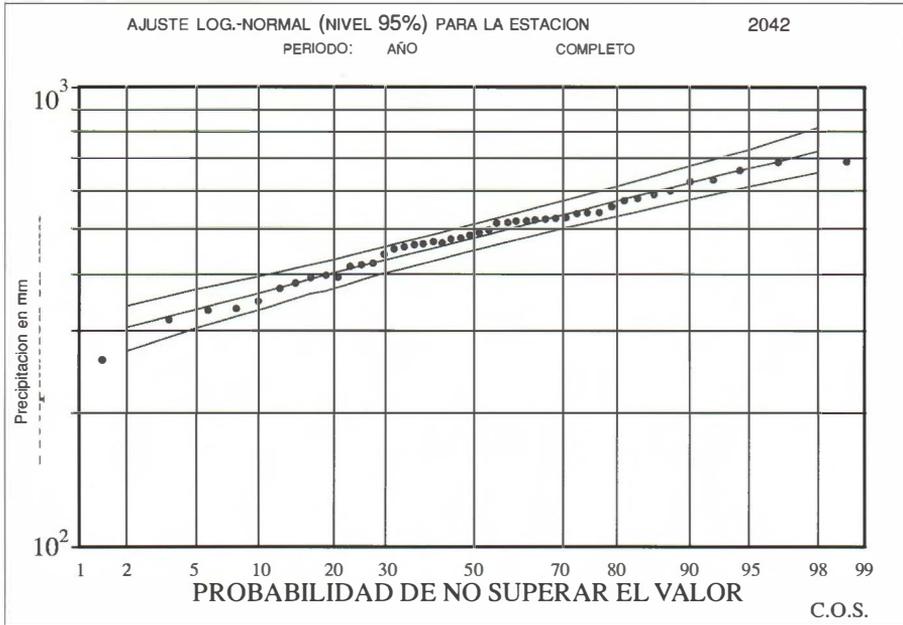


Fig. 7.-Ajustes logarítmico-normal en cuatro estaciones de la provincia de Soria.(Tomado de SGOP, 1990).

4. ESTUDIO DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Gran parte del territorio provincial está ocupado por terrenos poco permeables y acuíferos detríticos terciarios. Ocupan éstos extensas zonas del norte de la provincia (materiales wealdicos de Pinares, Cebollera, Tierra de Yanguas y Oncala, etc.) y en la cubeta terciaria de la Cuenca de Almazán, extendida en la canal del Duero, desde Langa, hasta más allá de los límites con Zaragoza.

A pesar de que dichos terrenos se consideran en general como poco permeables, existen en puntos localizados pozos que proporcionan gran caudal, a veces surgentes, como es el caso del de Valdubiel, que abastece a Burgo de Osma. Estos materiales están poco estudiados y aunque de ellos se extraen por lo general caudales modestos, estos pueden ser suficientes para atender las necesidades de pequeños núcleos de población de la provincia. Aquí, sin embargo, vamos a comentar aquellas unidades permeables que constituyen los principales acuíferos de Soria y que proporcionan la mayor parte de los recursos hídricos subterráneos.

La distribución geográfica de los acuíferos viene a coincidir a grandes rasgos, con las unidades geológicas más relevantes, reflejadas a veces, en las alineaciones orográficas de orden secundario del país.

Independientemente de la descripción que se hace de cada acuífero más adelante, puede ser interesante comentar brevemente algunas observaciones que se deducen del mapa hidrogeológico (fig. 8 final del libro).

Los acuíferos más importantes en la provincia de Soria son los de naturaleza carbonatada, de edad mesozoica y tectónica no excesivamente complicada. El aluvial del Duero tiene una relevancia secundaria.

Los acuíferos se sitúan en zonas altas, poco cultivadas y pobladas, y por ende poco contaminadas. En la zona del Moncayo y en la cabecera del Jalón, hacen de divisoria entre el Duero, Ebro y Tajo. Por lo general, son mal conocidos, faltan datos de aforo, de niveles piezométricos y están muy poco explotados. Suele ser esto una regla general de nuestro país, la falta de datos de infraestructura hidrogeológica, lo que obliga a hacer muchas veces estudios someros y meras aproximaciones.

4.2 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Se han reunido un total de 1.454 puntos de agua correspondientes a toda la provincia de Soria. Este archivo se resume en la Tabla 3, pág. 132, donde se clasifican dichos puntos según su naturaleza y la procedencia de la información.

Los tres inventarios de la tabla son distintos y no se solapan. El realizado por el SGOP (1990) se limita casi exclusivamente a los acuíferos de Soria. Solo una parte del inventario del ITGE corresponde a los acuíferos. Entre estos dos inventarios se recogen casi todos los manantiales más importantes y más del 90% de los sondeos existentes en los acuíferos. El del Archivo de Minas, sin embargo, se refiere casi en su totalidad al resto de los terrenos menos permeables, fuera de los acuíferos, y como se puede ver en la tabla 3, es el que reúne mayor número de puntos.

Según este inventario, en los acuíferos de Soria hay muy pocos pozos y sondeos, a veces ninguno, por lo que éstos no han podido ser herramienta importante para el estudio de dichos acuíferos. Por este motivo no ha sido posible trazar las isopiezas en ninguno de ellos. Ello se explica al observar que los principales acuíferos ocupan zonas abruptas, con escasa población y deprimidas económicamente.

Hasta 1989, en Soria se habían perforado unos 54.000 m. en pozos y sondeos para agua. Esta cifra corresponde a pozos legalizados, por lo que las cifras reales pueden ser mayores, incluso el doble si consideramos los que no están legalizados. La mayor parte de estos sondeos se encuentran en lo que hemos venido considerando como terrenos poco permeables. Habría que admitir, entonces, que la mayor parte del agua extraída en Soria no se verifica en los acuíferos, sino en los acuitardos. Así, se estima que la producción de aguas subterráneas en los acuíferos asciende a menos del 6% del total provincial.

Las características generales de estos puntos de agua se pueden resumir así, según procedan de los principales acuíferos o de terrenos poco permeables:

- a) Los puntos de agua de los principales acuíferos.

El inventario reunido de los principales acuíferos sorianos lo consideramos bastante completo pues, como ya se ha dicho, cubre el

90% de los puntos de agua existentes. Sin embargo, este número es tan pequeño, que resulta insuficiente para sacar conclusiones generales y representativas de las características hidráulicas de los acuíferos.

Destaca en Soria el drenaje natural a través de manantiales, entre los que se pueden contar 6 ó 7 por encima de 500 l/s y entre 30 y 50 los comprendidos entre 50 y 500 l/s.

Los sondeos son escasos y totalizan 10.000 m. de perforación, con profundidad que oscilan entre 50 y 300 m. para la mayoría. La profundidad del nivel del agua es muy variable y oscila entre menos de 1 m. y más de 100 m. No hay sondeos surgentes. La mayor parte están perforados en calizas y tienen un caudal medio de 7,6 l/s.

La potencia de las bombas es pequeña. La mayor parte de estos sondeos se suelen emplear para abastecimiento a núcleos urbanos, otros no se utilizan (como algunos del IRYDA e Instituto Nacional de Colonización) y otros pocos se usan para agricultura o ganadería.

Los pozos se encuentran en su inmensa mayoría ubicados en los aluviales de los ríos, sobre todo en el del Duero. Son de gran diámetro y escasa profundidad (alrededor de 4 m.) El nivel freático es somero (≈ 2 m).

b) Los puntos de agua en los terrenos poco permeables.

De los 961 puntos de agua inventariados, la mayor parte corresponden a pozos y sondeos perforados en materiales detríticos. La profundidad de éstos suele ser menor de 100 m. y totalizan 30.717 m. perforados. Hay alguno surgente. El nivel freático suele estar somero (menos de 5 m). Del caudal hay pocos datos por lo que no se pueden considerar representativos. En cuanto a los usos, el 60% están relacionados con la agricultura y la ganadería; el 20% se utiliza para abastecimiento (la mayor parte para núcleos urbanos) y el 11% para industria. La potencia de los equipos de extracción es pequeña, casi siempre por debajo de 5 C.V.

4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ACUÍFEROS

Siguiendo la clasificación de unidades hidrogeológicas de la Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH-ITGE 1989), se des-

criben a continuación los distintos acuíferos que comprende cada unidad. Para cada acuífero se analizan sus características principales y sus recursos.

En muchos de estos acuíferos se ha calculado la recarga en función de la precipitación media, utilizando para ello la relación entre precipitación y recarga obtenida en el acuífero de Vozmediano, para el que se hizo un estudio más detallado (Sanz, (1984, 1986); Sanz y López (1992); Sanz (en prensa). Esta extrapolación a otros acuíferos puede ser discutible, aunque no deja de ser una aproximación preliminar que habrá de ser matizada en el futuro. Sin embargo, creemos que esta extrapolación puede ser aceptable por las siguientes razones: 1) El clima de las zonas donde se ubican los principales acuíferos es bastante similar. 2) Las características geológicas, vegetación, suelos y relieve de los diferentes acuíferos carbonatados son también bastante parecidas. 3) El funcionamiento hidrogeológico es semejante para los acuíferos de naturaleza calcárea.

4.3.1. CUENCA DEL DUERO

1. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 2.09. BURGOS-ARLANZA. MESETAS TERCIARIAS DE CASTILLEJO DE ROBLEDO

Se encuentran las mesetas de Castillejo de Robledo en el extremo suroccidental de la provincia, en el límite con las de Segovia y Burgos. Forma una paramera aprovechada para cultivo de secano, y en cuyos bordes, justamente donde se encuentran los manantiales, se asientan pequeños núcleos urbanos. No toda la meseta está formada por calizas permeables; éstas se encuentran sobre todo hacia el norte, pasando lateralmente a facies más margosas y arcillosas, de tal manera que en las cercanías de Ayllón, el terciario es prácticamente impermeable. Las capas se disponen horizontalmente y el espesor de las calizas no es superior a 20 o 25 m.

La recarga se verifica a través de la infiltración del agua de lluvia que cae sobre los 121 Km² de superficie de alimentación (aunque no toda ella es permeable, como se ha dicho); dicha recarga se estima en 6,5 hm³ /año. La circulación del flujo subterráneo es desconocida pues no existen pozos y sondeos. La descarga se efectúa en los bordes de la mesa, unas veces rápidamente a través de pequeños

manantiales temporales, que en situación de estiaje no se manifiestan y otras mediante manantiales más constantes, entre los que cabe destacar los de Valdanzuelo (137,7 l/s, en 25-4-89) y Castillejo de Robledo (25,5 l/s en 25-4-89). Aunque no se han estudiado estas fuentes, se sospecha que deben ser de caudal muy variable, pues ante el tamaño de este “acuitardo”, sus débitos de estiaje son muy modestos, lo que delatan, por otra parte, unas reservas poco importantes.

2. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 02.10. ARLANZA-UCERO-AVIÓN

ACUÍFEROS CALCÁREOS DE LA PARTE OCCIDENTAL DE SORIA

Estos acuíferos están drenados por los ríos Perales y Arandilla. Ambos confluyen en Peñaranda de Duero (Burgos) y son afluentes del Duero, desembocando en Aranda de Duero, donde el río mantiene el nombre del principal, Arandilla.

En la cabecera hay una serie de ramales que provienen de la provincia de Soria (Perales, Pilde, Espejón y Rejas, principalmente). Todos estos ríos tienen su nacimiento en las calizas cretácicas de la unidad que continúa por Uceró o por la cuenca del Arandilla, ya en Burgos.

A continuación se va a describir brevemente el régimen hidrológico de cada uno de estos ríos; pues es prácticamente la única información hidrogeológica de que se dispone.

Río Espejón: Tiene dos ramas en la provincia de Soria: el que nace en Espejón y el que proviene de Espeja.

El arroyo de Espeja lleva algo de caudal, aguas arriba del pueblo, que le proviene del wealdense y de la facies Utrillas, aunque se infiltra al llegar a las calizas cretácicas, donde forma una hoz muy angosta. En el término brota una fuente que se utiliza para el abastecimiento al pueblo (de 2-4 l/s, en febrero 89). Cuando el arroyo baja con suficiente agua, logra sobrepasar la faja de calizas.

El río Espejón nace en el wealdense, llevando en estiaje unos pocos litros por minuto que se toman para el abastecimiento al pueblo. Luego se infiltra en un modesto cañón labrado en calizas jurásicas, y vuelve a brotar al terminar este afloramiento, en el contacto del Jurásico con los materiales menos permeables de Weald y del

Utrillas. A veces, cuando el nivel freático sube, corre agua por todo el Jurásico y entra en funcionamiento un curioso manantial llamado "La Cueva", que se pone en carga y por el que puede llegar a salir por una sima, a boca llena, un caudal superior a los 200-300 l/s. En períodos de sequía se ha aprovechado como abastecimiento de apoyo a Espejón, bombeando directamente de la sima, como si de un pozo se tratase. En estiaje el nivel freático asoma en la sima a 3 ó 4 m. de profundidad, aunque es variable según las épocas. Este pozo natural ha sido reconocido por espeleobuceadores comprobándose que no tiene apenas continuidad en profundidad.

La poca agua que lleva el río en Espejón se vuelve a infiltrar en el cañón abierto en las calizas cretácicas que afloran inmediatamente después del pueblo. Sin embargo, en todo el cauce del río (febrero 89) se ven charcas más o menos permanentes, indicando que el nivel freático es somero, y que a poca aportación que llevase el río, éste entraría en circulación. Pasadas las calizas ya sólo aparecen materiales terciarios, considerados como poco permeables, aunque en el pueblo de Hinojosa hay unas fuentes relativamente caudalosas en este terreno, que es donde el río coge la mayor parte de su caudal en estiaje.

Río Pilde: El río Pilde proviene de Santa María de las Hoyas. Circula con un poco de agua en estiaje a la altura de Muñecas. Luego se pierde por las calizas, más abajo, apareciendo zonas algo pantanosas. En Guijosa nace un brote notable en la Fuente del Convento, llevando a su salida de la provincia unos 50-70 l/s.

Río Perales: El río Perales nace en dos ramas: una proviene de la fuente de agua templada (17º) de Fuencaiente (Manantial de la Ermita 20-30 l/s), y la otra de un manantial algo más modesto también de agua templada. Estos manantiales se localizan en conglomerados terciarios, próximos al Cretácico. Después el río no aumenta significativamente su caudal. Tampoco existen pozos y sondeos dignos de mención. A su salida de la provincia, el aforo realizado en el río en el estiaje de 1989 dio un caudal de 227 l/s.

Río Rejas: El río Rejas nace también en una fuente de agua templada, en Rejas de Ucero, brotando entre conglomerados terciarios cercanos al contacto con el Cretácico. No hay pozos ni sondeos en las proximidades. Desemboca en Rejas de San Esteban, con un caudal de 162 l/s. (febrero de 1989).

Recursos

Considerando los aforos realizados, la aportación pluviométrica y suponiendo un coeficiente de infiltración alto obtendremos unos recursos aproximados de 8 hm³ /año para la cabecera. Para el páramo intermedio se estima una recarga de 11 hm³ /año. En total suman unos 19 hm³.

ACUÍFERO DE UCERO

El acuífero de Ucero se extiende en unos 129 Km² a lo largo de las mesetas, parameras, pinares y sabinares que se encuentran al sur de San Leonardo, Hontoria del Pinar, Casarejos, Vadillo y Talveila; al norte de Ucero y al Este de Santa María de las Hoyas.

Los materiales filtrantes más importantes son las calizas karstificadas y permeables del Coniaciense-Campaniense, las cuales constituyen una gruesa capa suavemente inclinada hacia el norte. El río Lobos la ha tajado dejando al descubierto un profundo y bello cañón, de traza meandriforme por efecto de la sobreimposición del río y con paredes verticales propio de la estratificación subhorizontal (Foto 4). Bajo estos estratos calizos hay unos niveles de margas y margocalizas que son las que forman la base impermeable del acuífero.

El funcionamiento de este embalse subterráneo se realiza de la siguiente manera:

Hay dos tipos de recargas. Unas provienen de las pérdidas de los ríos, como el Lobos, en Hontoria del Pinar y en otros sumideros localizados a lo largo del cauce. Durante gran parte del año, el Lobos no llega a circular por su propio cauce, perdiéndose a la entrada del cañón, entre Hontoria y el puente de Siete Ojos de la carretera que va de San Leonardo a Santa María de las Hoyas. (Foto 5).

El río Navaleno (proveniente de la fuente kárstica de San Leonardo y del arroyo que baja de Navaleno y otros ramales), también se suele perder durante gran parte del año aguas abajo de Arganza, al comienzo del cañón, en el lecho del Lobos o en su propio cauce (Foto 6). En períodos más húmedos, tanto el Lobos como el Navaleno logran circular con agua hasta la salida del cañón, en la Cuesta de la Galiana (Foto 7). Cuando disminuye el caudal, el curso de agua va

retrocediendo, poniendo en funcionamiento sumideros intermedios, pero quedando siempre charcas y pozas con agua permanente, que no son sino el afloramiento del nivel freático.

También los arroyos de Casarejos, de Aylagas, del Chorrón (Foto 8) y otros menos importantes, se pierden en el Cretácico calcáreo. Al igual que los otros ríos, la cabecera de estos arroyos lo constituyen terrenos weáldicos y del Utrillas, poco permeables. El río Chico también se sume aguas abajo de Talveila, a la altura de Cantalucia. Antiguamente se tapaban estos sumideros para poder regar y mover las ruedas de algunos molinos situados más abajo.

Otro origen de las recargas es la infiltración de las aguas de lluvia o de nieve, infiltración que seguramente es muy alta, a la vista de la alta karstificación de las calizas.

La descarga se realiza a través del manantial de La Galiana, a la salida del Cañón (Fotos 9 y 10). Este manantial ha estado controlado durante casi un año, habiendo dado un caudal medio en el período de febrero a octubre de 1988 de más de 2 m³/s. El brote nace de una cueva, que ha sido explorada por buceadores en un pequeño tramo de 12 m. Seguramente, la Cueva baja de La Galiana, sita a unos metros por encima, representa el antiguo conducto de salida de este manantial.

Los recursos de este acuífero pueden ser de unos 40 hm³/año. Este valor es una estimación basada en los aforos de la estación de Burgo de Osma y en los controlados en Ucero. Otras estimaciones se han hecho considerando la recarga de precipitación y de los perdedores de corrientes superficiales. Como este acuífero es objeto de un estudio monográfico en la parte segunda de este libro, aquí no nos vamos a extender más en su descripción.

ACUÍFERO DE LA FUENTONA DE MURIEL

El manadero de la Fuentona de Muriel u Ojo de Mar (Fotos 14 y 15) se encuentra al pie del borde sur de las parameras que se extienden al occidente de la Sierra de Cabrejas, en el término de Muriel de la Fuente, a un kilómetro al Norte del pueblo. Da lugar al nacimiento del arroyo de Muriel, aportando la mayor parte del caudal que lleva el río Avión, siendo éste a su vez afluente del Ucero (Foto 16).

Los materiales calcáreos coniacienses y santonienses campanienses, son los que definen los acuíferos importantes de la comarca de Cabrejas.

En concreto, el acuífero drenado por la Fuentona de Muriel está constituido por estos materiales, que tienen de 200 a 250 metros de espesor y se extienden unos 160 Km², desde cerca de Fuentetoba hasta Muriel Viejo. La geometría de los materiales acuíferos es de un sinclinorio de dirección Este-Oeste. Las margas turonenses y coniacienses son el nivel de base kárstico y barrera impermeable. Allí donde este límite se sitúa a menor cota es donde brota el manantial de Muriel a unos 1.020 metros de altitud.

La recarga se lleva a cabo a partir de la infiltración directa del agua de las precipitaciones que caen sobre los afloramientos del acuífero libre, también de algunas recargas esporádicas de arroyos, como el de la dehesa de Cabrejas del Pinar, que se infiltra en caudales bajos en los afloramientos calcáreos (Foto 17). Admitiendo un coeficiente de infiltración alto, el valor total de estas entradas se ha calculado en 39 hm³/año.

El río Milanos, afluente del Avión, también se pierde más abajo de La Cuenca o en Calatañazor cuando lleva poca agua. Si lleva bastante el curso permanece constante hasta los ojos de Blacos. La descarga se efectúa a través del manadero de Muriel y de los brotes que pueda haber en el cauce u orillas del río aguas abajo del pozo, como la fuente del Cura, de 50 l/s. Por el arroyo de la Hoz, aguas arriba del ojo, también se ve circular agua durante gran parte del año.

La circulación del agua subterránea a través del acuífero es un tema que no ha podido ser abordado, a falta de sondeos y pozos suficientes para el establecimiento de un mapa de isopiezas. Entre éstos, se pueden citar el pozo de abastecimiento a Cabrejas del Pinar y otros utilizados en el cultivo de trufas.

No se tienen datos de aforo del manantial, aunque puede estimarse, según apreciaciones basadas en la extensión y precipitación media de su cuenca y análisis del hidrograma del Avión en Valdealbillo, que el caudal puede oscilar alrededor del metro cúbico por segundo. Es decir, los recursos aproximados pueden estimarse entre 30 y 40 hm³/año.

Dentro de la zona de alimentación del acuífero, en el borde septentrional de la Sierra de Cabrejas, en las elevaciones situadas

entre Cabrejas y Abejar, se encuentran unas fuentes que constituyen un paraje de singular belleza. Se trata de las “Tres Fuentes”, manaderos suspendidos en la media ladera de un anfiteatro kárstico y que drenan pequeños acuíferos colgados que rápidamente se vacían, como en Fuentetoba, aunque éstos son mucho más modestos. El régimen de las fuentes es muy irregular (de 1 a 70 l/s). Las aguas se precipitan en rápidos tapizados de toba, rodeados de una vegetación abundante, dando lugar a un microclima propio, como una especie de oasis dentro de la paramera siempre seca que se extiende al Sur. Las aguas de los tres manantiales desaparecen rápidamente en las calizas que alimentan el manadero de La Fuentona.

En períodos lluviosos surgen rebosaderos en distintos puntos del acuífero, como el Chorrón de Cabrejas del Pinar, en las Fuentes de Villaciervos, o en las proximidades de la cascada que forma el arroyo de Cabrejas, cerca de la Fuentona.

Como se sabe, la Fuentona sale de una cueva sumergida en forma de sifón que ha sido explorada por espeleobuceadores (Foto 18). (Fig. 9).

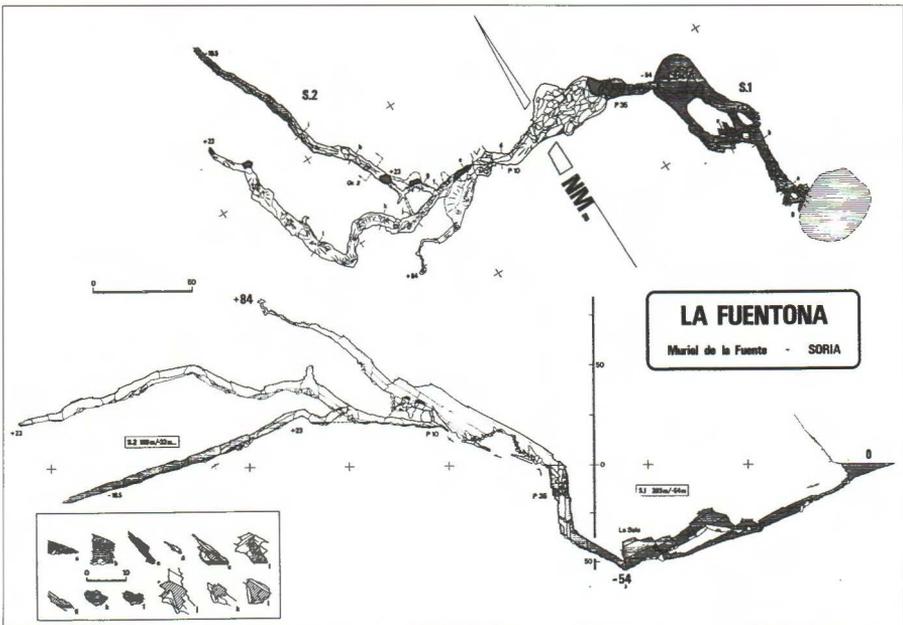


Fig. 9.—Planta y alzado de los sifones y galerías aéreas de la Fuentona de Muriel. (Fidel Molinero, 1990).(3 figuras).

ACUÍFERO DEL AVIÓN

Se halla situado en la cabecera del río Avión, en tierras de Calatañazor.

La estratigrafía de este acuífero es similar al de la Fuentona de Muriel por lo que las litologías permeables y aun sus espesores se pueden seguir en el anterior apartado. Lo único que cambia, desde luego, es la estructura. Aquí es algo más compleja, con pliegues en dirección E-O y contacto discordante al sur con el Terciario arcilloso e impermeable.

Las principales redes de drenaje que atraviesan y drenan este sistema acuífero son el río Avioncillo, el río Muriel y el Milanos.

El río Avioncillo nace en la Fuentona de Muriel y es objeto de otra descripción aparte, aunque el sistema hidráulico está parcialmente conectado con el del Avión y los límites orientales de separación entre los dos acuíferos sea impreciso.

El Avioncillo circula en estiaje con agua en todo su trayecto hasta los materiales terciarios, en Blacos, y no se le nota perder ni ganar caudal en su trayecto. En febrero de 1989, a su salida de Muriel llevaría unos 100 l/s (Es de advertir que la Fuentona es un manadero muy variable y sensible a las precipitaciones, lo que viene a demostrar que se trata de un drenaje subterráneo rápido del sistema kárstico de la Sierra de Cabrejas). En Blacos se le engrosa el caudal de las fuentes de Resquebrajo, que nacen en las orillas y cauce del río y muy cerca de la confluencia del río Muriel. Estas fuentes tenían en febrero de 1989 unos 200 l/s y su caudal es mucho más permanente y regular que el de la Fuentona. La fuente se sitúa en el contacto del Cretácico calcáreo con el Terciario impermeable.

El río Muriel proviene del Wealdense de la zona de Muriel Viejo, donde drena subterráneamente unas pocas decenas de litros por segundo, según estimaciones y observaciones directas. Así, en el estiaje del invierno de 1989, el río Muriel llevaba 30-60 l/s antes de entrar en la faja de calizas cretácicas del acuífero de Blacos. El río puede perder agua en un tramo que circula por las calizas pero en la parte baja lleva siempre agua.

El río Milanos proviene de La Cuenca, donde nace en unas pequeñas fuentes de poco caudal que drenan en las arenas de las facies Utrillas. Dos o tres km. aguas abajo de la Cuenca también

tiene algunos brotes en las calizas cretácicas. En situación de estiaje se pierde en las calizas cretácicas que se encuentran antes de llegar a Calatañazor. En este pueblo a veces aflora el nivel freático y circula con agua en un corto tramo; pero en otras ocasiones, está seco (febrero de 1989). Más abajo de Calatañazor el río suele estar seco también en estiaje, o con muy poca agua, hasta el manantial lindante con el término de Blacos, situado en el contacto del Cretácico y el Terciario impermeable, a la salida de la Hoz. Este manantial tenía 100 l/s en febrero de 1989, brotando el agua por varios ojos. Es una fuente también de caudal bastante regular y que se mantiene más o menos constante durante estiaje.

En Cubilla hay también un arroyo que proviene del Weald (en febrero de 1989 llevaba 1 l/s) y que se filtraba también al llegar a las calizas cretácicas.

Salvo estos arroyos y ríos, en la zona no existen prácticamente otras redes de drenaje significativas, puesto que la zona de Las Fraguas, Villaciervos, etc., constituyen parameras calcáreas inhóspitas, sin apenas redes de circulación superficial.

Unos kilómetros más abajo de los manantiales de Blacos, el río Avioncillo y el Milanos se juntan en Torreblacos, denominándose entonces Avión. Un poco después de la confluencia se instaló una escala de aforos (en Valdealbillo) (SGOP, 1990), con el fin de controlar las salidas del sistema del Avión (Fuentona más manantiales de Blacos), evitando así el tramo medio y bajo del río, (que circula casi exclusivamente por terrenos impermeables terciarios) a fin de tener menos distorsiones con la escorrentía superficial. En estos tramos apenas tiene el río aportaciones subterráneas significativas salvo en el estrecho de Velasco, donde hay una fuente de 5-10 l/s en la margen izquierda, que brota de un anticlinal cretácico calcáreo.

En el capítulo que trata las relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas se analiza el hidrograma obtenido en 1988-89.

En este acuífero la recarga se lleva a cabo a partir de la infiltración directa del agua de lluvia que cae sobre los afloramientos del acuífero libre y de las pérdidas del río Milanos. La recarga de lluvia se ha estimado en unos 12,5 hm³/año. La precipitación media es de 669 mm. y la superficie de alimentación del acuífero es de 48,5 Km². La descarga se efectúa a través de los manaderos de Blacos. Aunque

no se tienen datos de aforo suficientes, según los análisis de los hidrogramas de Valdealbillo y las medidas directas efectuadas, estas fuentes pueden tener un caudal medio superior a 350 l/s, teniendo en cuenta que las observaciones realizadas se han efectuado en un estiaje muy acusado. La explotación del acuífero es nula; el pozo realizado por el Instituto Nacional de Colonización en Blacos no se utiliza y está abandonado.

La dirección del flujo subterráneo del agua es, una vez más, un tema que no puede ser abordado por falta de sondeos. El agua, proveniente de las áreas de recarga, circulará hacia estos brotes, respetando los límites impermeables del Terciario y del Cretácico margoso. Es de sospechar que el flujo sea más lento y profundo que en el acuífero de la Fuentona, pues el caudal de las fuentes de Blacos es bastante constante.

ACUÍFERO DE LA SIERRA DE HINODEJO Y RÍO ANDALUZ

Corresponde por completo a la cuenca del río Andaluz, desde la Sierra de Hinodejo, en su cabecera, hasta su desembocadura en el Duero, en Andaluz. Morfológicamente el terreno es más o menos llano, aprovechado para cultivos de secano. El portillo de Andaluz rompe esta tónica general. Hinodejo, calcáreo y poblado de encinar, constituye un excelente mirador del centro de la provincia.

La mayor parte de la cuenca del río Andaluz es impermeable pues está constituida por terrenos arcillosos del Terciario. Tan sólo en su cabecera afloran las calizas cretácicas de la vertiente meridional de la Sierra de Hinodejo, y una mancha aislada en Fuentelárbol. En la parte de abajo, junto al pueblo de Andaluz, y muy cerca de su confluencia con el Duero, el río atraviesa perpendicularmente un anticlinal calizo cretácico de dirección Este-Oeste.

La recarga se lleva a cabo a partir de la infiltración de la lluvia en la Sierra de Hinodejo y, secundariamente, la que se verifica en el propio Terciario. En los montes de Hinodejo se puede estimar una recarga de 9,3 hm³/año. La precipitación media es de 644 mm y la superficie de afloramiento de 32 Km². En cuanto a las salidas, el Andaluz cuenta con unos manantiales situados en Torreandaluz con un caudal muy regular, y que aunque nacen en terrenos terciarios, es muy posible que provengan de las calizas que se encuentran en profundidad. Las calizas del anticlinal de Andaluz no parecen añadir

caudal al río, tal y como hemos podido comprobar, pero sí al Duero en el punto de menor cota, mediante dos fuentes que totalizan un caudal conjunto de 70l/s (febrero 1989), y que han sido captadas para el riego de la vega derecha del Duero, entre Andaluz y Tajueco (Foto 22). Es muy posible que en esta zona haya brotes subterráneos en el Duero, tal como parece deducirse de los aforos diferenciales efectuados en dicho río durante la sequía del invierno de 1989. Las calizas cretácicas es de suponer que no sólo se alimenten de la infiltración de la lluvia en sus afloramientos, sino que drenen también los materiales menos filtrantes del Terciario en los que están insertos.

Con el fin de controlar el Andaluz se instaló en el pueblo del mismo nombre, cerca de su desembocadura, una escala de aforos (SGOP, 1990). El análisis del hidrograma obtenido en estos meses de observación se comentará en el capítulo 7. Recordemos aquí que en el estiaje de 1989 se aforó un caudal subterráneo de 234 l/s que era el 98% del total. La pendiente de la única curva de agotamiento fue de 0,0022 y el volumen hidrodinámico 6,3 hm³.

Suponiendo un caudal medio subterráneo en el Andaluz de 234 l/s y 70 l/s proveniente de las fuentes del Duero, resultan unos recursos que, en estiaje, se estiman ascienden a 9,6 hm³/año.

ACUÍFERO DE FUENTETOBA Y DEL TOBAZO DE CUEVA PACHÓN

A. Acuífero de Fuentetoba o del Pico Frentes

El acuífero se encuentra en el apéndice occidental de la Sierra de Cabrejas, formado por el Pico-Frentes, la montaña más llamativa de las cercanías de Soria (Foto 2). El manantial que lo drena se sitúa cerca del pueblo de Fuentetoba, que con su nombre delata el fenómeno hidrográfico más importante de la zona (Foto 19).

El acuífero está formado por un potente banco (de 170 m. de potencia) de calizas de edad Turonense-Senoniense, muy karstificadas en superficie. Su geometría es de un sinclinal colgado, basculando hacia el Sur, apoyado en su parte inferior sobre las margas impermeables del Turonense. Allí donde el contacto permeable-impermeable tiene menor altura, es por donde la cubeta vierte el agua de forma

natural, dando origen al manantial de La Toba, así llamado por los abundantes depósitos de carbonato cálcico que precipita en sus orillas (Fig. 1).

El funcionamiento hidrogeológico es muy sencillo: la alimentación del embalse subterráneo se verifica, únicamente, a través de la infiltración del agua de lluvia en los pocos kilómetros cuadrados de superficie del acuífero, percolando por las grietas del terreno y atravesando la zona vadosa hasta llegar al nivel freático. Desde aquí, el agua circula a través de fracturas y cuevas hasta la fuente (Fig. 1). El caudal medio anual del manantial es de 115 l/s aunque oscila de 5 a más de 1000 l/s, influenciado por el régimen de las precipitaciones (Sáenz, 1954). Los recursos son 3,65 hm³/año, que se almacenan en los huecos que la cubeta tiene por encima de la cota del manantial. El acuífero, como se puede ver, es libre y se encuentra sin explotación de ninguna clase, pues no existen pozos ni sondeos en su área de alimentación.

Como ya se ha comentado anteriormente, el Manantial de la Toba fue objeto de un estudio hidrogeológico e ingenieril con el fin de aprovechar la capacidad reguladora del sinclinal, y garantizar así el abastecimiento de agua a la capital de Soria. El proyecto y labores de reconocimiento fueron dirigidas en 1935 por el ingeniero de Caminos soriano y catedrático de Geología Aplicada, D. Clemente Sáenz García, quien contó con la ayuda y colaboración del entonces Ayudante de Obras Públicas y joven estudiante de Ingeniería de Caminos, D. Álvaro del Portillo.

En las figuras 10 y 11 se reproducen unos planos originales de aquel proyecto, donde se representa un corte geológico del manadero de la Toba y el plano de la cámara subterránea de captación.

B. Acuífero del Tobazo o Cabecera del río Mazos.

La fuente del Mazos está más avanzada al mediodía, en el borde sur de otro apéndice occidental de la Sierra de Cabrejas, cerca del pueblo de Villaciervos.

El río Mazos nace en la Fuente del Tobazo o de Cueva Pachón, llamada así por el importante depósito de tobas que han precipitado sus aguas. Se trata de un pequeño manantial de iguales características que el de Fuentetoba (Foto 20).

Tiene esta fuente una cuenca superior a los 3 Km², constituida por una planicie calcárea, cretácica, en la que se ha instalado una gran dolina de 1 Km de radio pero de sólo unos pocos metros de profundidad. En el fondo de esta suave celada hay un sumidero que recoge las escasas aguas de escorrentía que pueden originarse en lluvias intensas. El cretácico está ligeramente basculado hacia el sur, igual que Pico-Frentes, lo que obliga al agua a drenar hacia este borde meridional. Las calizas tienen aquí unos 170 m de espesor. Una fuente permanente nace en el Utrillas, pero sin duda lo hace más arriba, en el contacto estratigráfico entre las margas y las calizas del Turonense-Seronense, filtrándose el agua por los depósitos de toba. En períodos de crecida se manifiesta este brote superior, que parece un trop-plein. (Foto 21).

El funcionamiento es también muy sencillo: la alimentación se verifica únicamente, a través de recarga de lluvia, percolando el agua hasta llegar al nivel freático, cuya situación o profundidad se desconoce, pues el acuífero carece de pozos y sondeos. Desde aquí, el agua circula a través de fracturas y cuevas hasta la fuente. El caudal medio anual del manantial es de 43 l/s. En el estiaje del invierno de 1989, esta fuente tenía tan solo 3 l/s. Luego, el arroyo sigue su marcha sin ganar ni perder caudal significativamente por el trayecto que hace sobre el Utrillas y el Wealdense. Después llega a la faja de calizas cretácicas que se extiende más allá de San Marcos, y donde se pierde por una sima-perdedero. Tan sólo cuando este riachuelo lleva suficiente caudal, logra traspasar este afloramiento permeable. Más abajo, el Mazos es un pequeño arroyo que se alimenta de los rezumes y pequeñas fuentes del Terciario. Muchas veces va seco a la altura de Lubia. En el invierno de 1989, en su desembocadura, tenía un caudal de unos 30 l/s.

ACUÍFERO CALCÁREO DEL RÍO IZANA

Se encuentra en la cabecera del río Izana, entre Cuevas de Soria y Villabuena.

Nace el Izana en los Ojos de Villabuena (20-30 l/s), en calizas del Cretácico y constituye el drenaje de los altos de Villaciervos. Se sitúa en el contacto entre las calizas y las margas de este período geológico. El río circula con agua durante un corto tramo y se pierde al entrar en los afloramientos calcáreos de la Sierra de Hinodejo, donde

forma una modesta hoz. A la salida de ésta, en Cuevas de Soria, unos 500 m aguas arriba del contacto entre estas calizas y el Terciario arcilloso impermeable, aparecen unos manantiales, de unos 100-200 l/s de caudal. Luego, y más abajo, el río transcurre por el Terciario y apenas ve aumentado su caudal con pequeños brotes y fuentecillas provenientes de los terrenos cuaternarios y terciarios. El caudal que lleva el río en Quintana Redonda es prácticamente el mismo que por Matamala de Almazán (unos 15-20 l/s en estiaje)

Cuando hay lluvias circula agua por todo el cauce del Izana en el cañón de Cuevas de Soria y ello es debido a que el nivel freático sube y asoma por encima del lecho del río.

La potencia de las calizas cretácicas permeables viene a ser aproximadamente la misma que en el resto de los acuíferos de la Sierra de Cabrejas: unos 200 o 250 m.

El área de alimentación no se puede delimitar con exactitud, pues se prolonga más hacia el Oeste y al Este, donde se extienden las Sierras de Hinodejo y San Marcos, respectivamente, con drenaje hacia el Andaluz o hacia el Duero, en uno y otro caso. Con todo, la superficie debe aproximarse a los 12 Km².

Aparte de la resurgencia de Villabuena, el acuífero se alimenta de la infiltración del agua de lluvia, que se ha estimado en 3,67 hm³/año. La precipitación media es de 674 mm. La circulación no ha podido ser determinada ya que no hay sondeos ubicado en el acuífero. La descarga se efectúa a través de los manantiales de Cueva de Soria, de 100-200 l/s aproximadamente.

3. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 02-15. CUBETA DE ALMAZÁN

CUENCA DEL RITUERTO

Aunque realmente no constituye un acuífero la cuenca de Rituerto, se le ha incluido sin embargo aquí, por tratarse del río con mayor cuenca de los de la provincia de Soria e interesaba conocer el régimen de sus caudales, en especial su componente subterránea.

Por este motivo, el SGOP (1990) instaló una escala de aforos en la finca de Rituerto, cuyo análisis se comenta con más detenimiento

miento en el apartado correspondiente a la relación de aguas superficiales-aguas subterráneas.

La cuenca del Rituerto, si exceptuamos su cabecera, es poco permeable desde Jaray, constituida por materiales arcillosos y margosos del Terciario superior. Sin embargo, los extensos campos de labor que ocupan su valle, la escasa pendiente que tiene el perfil del río, y la gran superficie de la cuenca, hacen que este río consiga tener cierto caudal de base, como veremos más adelante. En situación de estiaje, aguas arriba de Jaray el río lleva unos 20-30 l/s, prodecente de los campos y llanada de Valdegeña (donde nace en la Dehesa, en un brote de 4-5 l/s), de Masegoso y Molino de Tajahuerce. El río Araviana, afluente del Rituerto, se pierde por dos veces en el Valle superior de Araviana y en los campos de Noviercas, por lo que no llega casi nunca con caudal al Rituerto. En Noviercas, el Araviana se filtra en el acuífero del manantial de Aranda del Moncayo, constituyendo también un pequeño trasvase de aguas del Duero al Ebro, como en Vozmediano. En Almenar brota también un manantial (10-20 l/s) que hace engrosar el caudal de este río. Llama la atención por otra parte, que gran parte de la Cuenca del Rituerto esté ocupada por relieves de tipo monte-isla (Sierra de la Pica, Tajahuerce, Cardejón) que constituyen áreas de recarga de acuíferos calcáreos sin aparente salida natural en los contactos con el Terciario que ocupa las llanuras. Como veremos en los estudios monográficos de la parte segunda del libro, estas montañas constituyen áreas de alimentación de los manantiales de Deza y Alhama.

Del análisis del hidrograma, y del conocimiento que se tiene del territorio, hemos podido observar que son los manantiales pequeños que existen en su cuenca y muy repartidos por ella los que alimentan al río: Valdegeña, La Pica, Masegoso, Tajahuerce, Almenar, etc. y dan lugar al caudal de base. Contribuyen también las esorrentías hipodérmicas o rezumes difusos al cauce, provenientes del desagüe lento del manto de suelo de labor del valle. El río, sin embargo, presenta fuertes crecidas en períodos de lluvias intensas o tormentas.

La escala de aforos situada en su desembocadura, y aún a pesar de que el período de control ha sido muy corto, nos ha informado que en estiaje profundo el caudal de origen subterráneo representa el 85% (189 l/s).

CUENCA DEL MORÓN

Al igual que la cuenca del Rituerto, la del Morón tiene también una gran extensión -aunque no tanto como la de aquel río- y se piensa que es interesante tratarla como si fuera un acuífero.

En la desembocadura del río Morón circula un caudal apreciable (durante estiaje 60-185 l/s) que parece estar en contradicción con la poca permeabilidad de los terrenos de su cuenca. Sin embargo, siguiendo las diferentes ramas que constituyen el río Morón en su cabecera: Arroyos de Zorraque, de Taroda y de Escobosa. Se puede ver que en el arroyo de Taroda circulaban unos 15 l/s (marzo 1989, con fuerte estiaje), en el de Zorraque 10 l/s, y por el de Escobosa 6 l/s. El Morón también se alimenta de otros pequeños arroyuelos y acequias muy poco importantes, así como de rezumes y drenajes de los campos de labor, que totalizan el resto del caudal que lleva en la desembocadura.

El arroyo de Zorraque proviene de la fuente de Zorraque (3 l/s) y de la fuente de abastecimiento a Momblona (3 l/s) y otras situadas en las cercanías. Todas salen de un nivel drenante de roca arenisca algo calcárea, intercalada en los sedimentos arcillosos del Terciario, que son los más abundantes. Son manantiales separados más de 1 Km uno de otro, de caudal muy regular (propio de litologías poco permeables) pero que pueden aumentar el doble o el triple en períodos húmedos.

En Alentisque, hay una fuente junto al pueblo de unos 2 l/s y que se utiliza para su abastecimiento. No existen pozos en estos pueblos. El terreno es muy impermeable aunque hay algunos niveles esporádicos de rocas duras que son los que están asociados a manantiales, como ya se ha dicho.

El arroyo de Escobosa nace en varias fuentes del término de este pueblo, de 1 ó 2 l/s cada una, asociadas a niveles delgados de caliza o arenisca introducidas entre arcillas rojas muy impermeables.

El arroyo de Taroda proviene de las pequeñas fuentes de Adradas y Taroda y rezumes y drenajes de campos de labor. Realmente no representan las salidas de acuíferos significativos.

Como resumen, se puede decir que la componente subterránea del caudal del río Morón proviene de pequeñas fuentes muy repartidas geográficamente, asociadas a niveles delgados insertos

entre materiales impermeables que son los que constituyen la mayor parte de la superficie de la cuenca.

Si admitimos que la escorrentía subterránea en el Morón es de tipología similar a la del Rituerto, los terrenos son los mismos, las precipitaciones similares, la extensión de los campos de cultivos parecidas, las pendientes también, etc., habríamos de multiplicar el valor de la escorrentía del Rituerto por un coeficiente de reducción deducido por la menor superficie del Morón. De ello se estiman unos recursos aproximados de 4,7 hm³.

CÚPULAS CALCÁREAS DEL DUERO Y UCERO

Los acuíferos se encuentran en los pequeños afloramientos carbonatados cretácicos que asoman en Burgo de Osma y San Esteban de Gormaz. El primero es atravesado por los ríos Ucero, Avión y Sequillo. El segundo se sitúa junto al Duero.

Los materiales acuíferos están formados por las calizas cretácicas del Turonense-Senonense, que alcanzan un espesor de al menos 150-200 m. Estas calizas se encuentran bastante karstificadas hasta más de 150 m. de profundidad, tal como pudimos averiguar con los dos sondeos de reconocimiento que se hicieron en el Estudio de SGOP (1990): Burgo de Osma y San Esteban de Gormaz-1. Sin embargo, las grietas se encuentran bastante rellenas de arcilla, por lo que la permeabilidad obtenida en estos sondeos –que no tiene por qué ser la real– es baja. La permeabilidad del terreno y el caudal de los pozos fue aumentado con la realización de un desarrollo de acidificación (Foto 23).

En Burgo de Osma el Cretácico se presenta plegado, y continúa por debajo del Terciario hasta San Esteban. Discordantemente sobre las calizas se apoyan los materiales arcillosos y margosos del Terciario: Oligoceno, Mioceno. Por debajo, las facies margosas del Cretácico hacen de nivel de base kárstico.

El funcionamiento de este acuífero es impreciso. El manantial que lo drena: fuente del Molino, en San Esteban de Gormaz, con unos 500 l/s de caudal medio, no se puede explicar con la pequeña superficie de afloramiento que constituye el Cretácico (unos 20 Km²) si añadimos la Pedriza de Burgo de Osma, que no es seguro que participe en el juego hídrico de dicho manantial. Así, si admitimos un coe-

ficiente de infiltración propio de estas calizas y una precipitación media de 548 mm. la recarga sería de 5,2 hm³/año (=133 l/s). Es por ello que se piensa que, seguramente, este nivel calcáreo filtrante hace de dren natural de las restantes litologías menos permeables del Terciario. En todo caso, la regularidad del caudal de la fuente, y la temperatura algo elevada de sus aguas, hacen sospechar en una circulación profunda y lejana. No parece que reciba aportes por parte de los ríos Uceró, Avión y Sequillo a su paso por Osma, pues no se aprecian aquí pérdidas de caudal.

Del manantial del Molino no se tienen más datos de aforo que el realizado para el proyecto del SGOP (460 l/s en estiaje de 1989). Dicho manantial se utiliza para abastecer a San Esteban de Gormaz, para mover un molino y para el riego de la vega derecha del Duero. Aunque no se tiene una serie continua de aforos de este manantial, y aunque es también posible que existan descargas difusas al Duero en las cercanías, si admitimos un caudal medio de cerca de 500 l/s (dato conservador pues sólo se tienen referencias de estiaje), los recursos pueden alcanzar unos 15 hm³/año.

ALUVIAL DEL DUERO

La unidad hidrogeológica del aluvial del Duero se extiende sobre unos 274 Km², entre el Royo y el límite con la provincia de Burgos, aunque las terrazas afloran de forma continua a partir del Embalse de Los Rábanos (tan solo interrumpidas por el estrecho de Gormaz), habiendo en la cabecera dos zonas aisladas: El Royo y el campo de Garray. En planta, tiene el aluvial forma de curva de ballesta N-S hasta Almazán y luego, sigue la dirección E-O.

El aluvial del Duero coincide con los terrenos llanos de la Depresión Terciaria de Almazán, si exceptuamos los estrechos calizos de Garray, Soria, Los Rábanos y Gormaz. Presenta un sistema de terrazas, entre las que destaca, por su importancia hidrogeológica, la terraza inferior y la llanura de inundación y, secundariamente, las terrazas bajas. En las primeras se realiza la conexión hidráulica con el río, conexión que no se verifica en las más altas. Las terrazas están solapadas, a excepción de las medias y altas, que pueden estar colgadas. La altura de las terrazas bajas sobre el río suelen oscilar aproximadamente entre 1 y 7 m. Las terrazas medias y altas, de mucha menor importancia, no se han incluido en esta unidad.

La anchura de las terrazas permeables cuaternarias del Duero en Soria oscila entre pocos metros y 3,5 Km; el mayor desarrollo lo alcanzan en el tramo Almazán-Langa de Duero.

A pesar de los importantes cambios laterales que puedan existir, estos depósitos aluviales presentan una litología más o menos uniforme constituida por gravas con matriz arenosa y limosa. Son frecuentes las intercalaciones arenosas, con poca presencia de finos. La potencia habitual es inferior a los 10-12 m.

En los aluviales de los ríos Izana, Rituerto, Morón y Ucero, hay llanuras de inundación de menos de 1 Km de anchura y están constituidas, por lo general, por materiales más finos, es decir, menos permeables. Los únicos aluviales dignos de mención son los del Ucero y los del Avión, sobre todo en la desembocadura con el Duero.

Los materiales que forman la base del acuífero, tal como hemos dicho, son los terrenos arcillosos y margosos de la Cuenca de Almazán, a excepción de los tramos calcáreos anteriormente mencionados, que suelen coincidir con brotes subterráneos de agua.

En el aluvial del Duero se han medido niveles piezométricos en más de 40 puntos. Por lo general, la piezometría está predominantemente influida por el río. Los niveles más altos se encuentran en invierno-primavera y los más bajos en estiaje (excepto en las zonas donde se riega, que ocurre todo lo contrario), aunque de estas oscilaciones no se ha hecho ningún control continuo. La pluviometría apenas ejerce influencia sobre los niveles. La recarga por parte de la lluvia puede estimarse en 30 hm³/año si se admite un coeficiente de infiltración del 20%. (La precipitación media es de 562 mm.).

Los pozos inventariados oscilan generalmente entre profundidades de 3 y 10 m, estando situado el nivel freático entre 1,5 y 6 m.

La utilización de los pozos existentes en el aluvial del Duero es muy pequeña. Aparte de que hay muy pocos, muchos de ellos están abandonados y otros se usan para usos doméstico y riego de pequeños huertos.

Los recursos del aluvial del Duero y afluentes son difíciles de evaluar, ya que forma un sistema único con el Duero. Habría que tener en cuenta la infiltración del agua de lluvia (poco importante), la infiltración de los excedentes de riego (es limitado en el espacio y en el tiempo: en Soria sólo se riega en verano), y la conexión hidráulica con el río, que es el factor más importante.

Para la evaluación de las reservas en el acuífero aluvial, se ha estimado un espesor medio saturado de 3,5 m y una porosidad eficaz de 23% (estimada según curvas granulométricas). Como la superficie es de 274 Km², las reservas pueden ascender a 218 hm³.

TERCIARIO EN LA CUENCA DE ALMAZÁN

Con esta denominación asignaremos los materiales detríticos, más o menos arcillosos, que ocupan la canal del Duero y los terrenos pertenecientes también a la cuenca del Ebro.

La naturaleza de los depósitos es, como ya se ha dicho, fundamentalmente arcillosa: margas, limos, arcillas, en ocasiones hay areniscas y paleocauces de conglomerados, etc. La disposición es horizontal para el Mioceno, que es el que ocupa la mayor parte de la superficie aflorante. El Paleógeno, relegado a los bordes de la cuenca, se encuentra plegado y buzante, adosado al Mesozoico. El espesor de la cubeta es variable, ya que se encuentra rellenando un paleo-relieve ante-Mioceno. Así, se le ve discordante sobre el Cretácico, sobre el Jurásico y sobre el Paleozoico.

Según diversos trabajos de geofísica realizados para la exploración petrolífera, el contacto entre el Mioceno y el sustrato. Tiene profundidades muy variables de un lugar a otro; más de 1000 m. en la zona de Monteagudo de las Vicarías, a unos pocos de cientos de metros en la cuenca de Vildé, etc. Es precisamente en esta última donde emergen diversos afloramientos calcáreos cretácicos: Gormaz, Burgo de Osma, San Esteban de Gormaz, Andaluz, Bayubas de Arriba y de Abajo, Boós, Velasco, Lodaes, etc.

Por encima del Mioceno se apoyan unos mantos detríticos, limosos, de rañas cuaternarias y pliocuaternarias que son especialmente abundantes en la margen derecha del Duero, sobre todo en la comarca de Pinares de Almazán.

En la margen izquierda y hacia Burgos, hacen su aparición las típicas mesas calizas del Páramo.

El Terciario de la cubeta de Almazán en Soria ha sido objeto de un estudio monográfico del Instituto Tecnológico y Geominero de España (1978). Los materiales son bastante impermeables, carece de manantiales y captaciones importantes. Las fuentes son de caudal modesto y pequeño, el agua circulante en estiaje por los arroyos y ríos

que lo drenan es escasa. Parece que al Duero, desde Sinova hasta Andaluz, en estiaje, lleva poca agua procedente de la descarga difusa del Terciario.

Sin embargo, sus recursos no son despreciables. Hay que tener en cuenta que la gran superficie que ocupan los afloramientos, a poca que sea la infiltración, hace alimentar de alguna manera el almacén hídrico subterráneo. Ello explicaría el caudal de base de los ríos Morón y Rituerto, por ejemplo. Los demás ríos que surcan el Terciario prácticamente van secos en estiaje: Henar, Nágima, Bordecorex, afluentes del Pedro, Mazos, etc. Sólo en períodos lluviosos, el rezume y la descarga hipodérmica de rañas mantienen un caudal significativo. También aparecen algunos pocos manantiales relativamente importantes, como los de la cuenca del Andaluz (30-60 l/s), Momblona en la cuenca del Morón (7-8 l/s). Además, hay pozos de caudal importante, a veces surgente, como el de abastecimiento a Burgo de Osma (30 l/s) y otros en Almazán que captan aguas procedentes de lechos de gravas.

En el Jalón, tenemos la cuenca del río Margón. Este es un arroyo modesto, que gana la mayor parte de su caudal de la fuente de Aguaviva de la Vega (entre 15-20 l/s), que riega una bonita huerta. Esta fuente drena algunos niveles duros calcareomargosos que asoman entre el Terciario arcilloso horizontal. Si exceptuamos otros pequeños manantiales situados más abajo (Utrilla, Almaluez), el resto de la cuenca carece de recursos subterráneos. Los sondeos realizados en estos pueblos presentan a veces agua con alto contenido en sales (de ahí le proviene seguramente el nombre al río).

Un aspecto que consideramos importante es la descarga de este acuífero a través de los drenes naturales que suponen las cúpulas calcáreas del área de Gormaz. Creemos que parte del caudal de los grandes manantiales de esta zona proceden del Terciario. Apoya esta idea la disposición geométrica de las calizas, la regularidad del caudal de las fuentes, su relativa elevada temperatura y la alta mineralización de sus agua en algunos puntos concretos.

Es decir, las descargas se reparten de esta manera:

- Manantiales grandes relacionados con calizas.
- Manantiales pequeños y medianos en el Terciario.
- Descargas difusas a ríos y arroyos.
- Bombeo.

El Terciario ocupa una gran parte de la provincia y sobre él se asientan numerosos pueblos. Gran parte de estos núcleos de población, siempre pequeños, han podido satisfacer sus necesidades de abastecimiento mediante pozos ubicados en estos materiales. Aunque los caudales extraídos han sido siempre escasos, han resultado suficientes para la pequeña demanda exigida.

El cálculo de los recursos también es difícil. Parte de éstos, han sido asignados a las calizas drenantes de Gormaz, otros se han repartido entre las cuencas del Morón, Rituerto y Andaluz. Los correspondientes a los pequeños rezumes, por situarse muy repartidos, son de difícil control, aunque no creemos que supongan una cantidad grande; además, estos manantiales drenan depósitos cuaternarios. Todos sumados quizá superen los 30 hm³/año.

4. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 2.16. ALMAZÁN-SORIA

ACUÍFERO CALCÁREO DE VILDE Y GORMAZ

Dentro de la denominación de esta unidad, se incluyen, aparte de los afloramientos calcáreos de Vildé y Gormaz, todos aquellos que se sitúan en la zona sur de la provincia, dentro de las cuencas de los ríos Escalote (excepto el acuífero de la Meseta de Rello, Talegonas, Caracena y Pedro, éste último tiene realmente poco juego en el acuífero).

Los materiales permeables que constituyen el acuífero se dividen en dos tipos: los materiales calcáreos cretácicos, y los jurásicos. Los primeros forman parte del acuífero principal y se encuentran más cercanos al Duero, en la parte norte. En el sur son más frecuentes los terrenos jurásicos, muchas veces aislados de los otros, y dando lugar a mesetones arrasados por la superficie de erosión fundamental de la Ibérica (páramos de Barahona, Retortillo, etc.).

La estructura de estas rocas, en una superficie tan grande, es bastante variable como para poder simplificarla. Diremos que, por lo general, tanto el Cretácico como el Jurásico se encuentran plegados. El Jurásico buza en la zona límite con la provincia de Guadalajara

hacia el Sur. Allí, asoma el Keuper impermeable que hace de barrera con la cuenca del Tajo. El Cretácico, en el norte, se sumerge bajo el Terciario impermeable de la cuenca de Almazán, pero vuelve a aparecer en modestos afloramientos a lo largo del río Duero.

Particularmente interesante es conocer la disposición del Mesozoico en profundidad, utilizando los datos de geofísica de reflexión de las diversas empresas que han estado trabajando en la cuenca de Almazán y sierra de Cabrejas, desde los años 30 hasta fechas recientes y que se han podido consultar en el Instituto Tecnológico y Geominero de España y en el Servicio Nacional de Hidrocarburos.

En la zona de Gormaz, por ejemplo, el afloramiento cretácico de Burgo de Osma se prolonga, en profundidad, hacia el manantial del Molino en San Esteban. El anticlinal de Lodares se prolonga por debajo hasta Bayubas de Arriba, y el de Bayubas de Abajo hasta el de Andaluz y Gormaz. El afloramiento de Velasco se prolonga hasta el de Boos.

Las recargas al acuífero se realizan a través de la infiltración del agua de lluvia que cae sobre los afloramientos carbonatados (unos 598 Km²) y en algunos perdederos localizados en los cauces de los ríos de la zona (Fig. 12). Para situar de modo más o menos exacto estos sumideros se han recorrido los cauces de todos los arroyos importantes (más de 200 Km), observando en qué partes brotaba agua y en cuales disminuía o se perdía completamente.

La entrada de agua correspondiente a la lluvia puede estimarse en unos 100 hm³/año, considerando un coeficiente de infiltración de 35% y una pluviometría media de 527 mm.

Los sumideros localizados más importantes son los siguientes:

- “Son del agua”, en el río Bordecorex o Torete, en Alcubilla de las Peñas. Aquí se suele perder casi todo el agua. Es permanente.
- El río Talegones se pierde en Torrevicente (para salir incrementado en Lumías), y en Arenillas. Pocas veces suele sobrepasar el río este pueblo.
- Arroyo del río, en Mosarejos.
- El río Tielmes se pierde a veces en Hoz de Arriba y Hoz de Abajo.
- El río Pedro se pierde a veces en Torraño.

Se desconoce qué caudal total se pierde en estos sumideros. En el estiaje de 1989 se infiltraban unos 100 l/s. En condiciones normales puede ser superior a 400 l/s, pues, aparte de las pérdidas en los ríos, hay que contar con las que se verifican en arroyos temporales.

Las descargas se realizan de dos maneras:

1. Mediante manantiales a los ríos Escalote, Talegones, Caracena y Pedro.

2. Directamente al río Duero, a través de fuentes situadas en sus orillas o en el fondo del cauce (descargas difusas).

Las primeras son mucho menos importantes y, en ocasiones, esas mismas descargas vuelven a perderse más

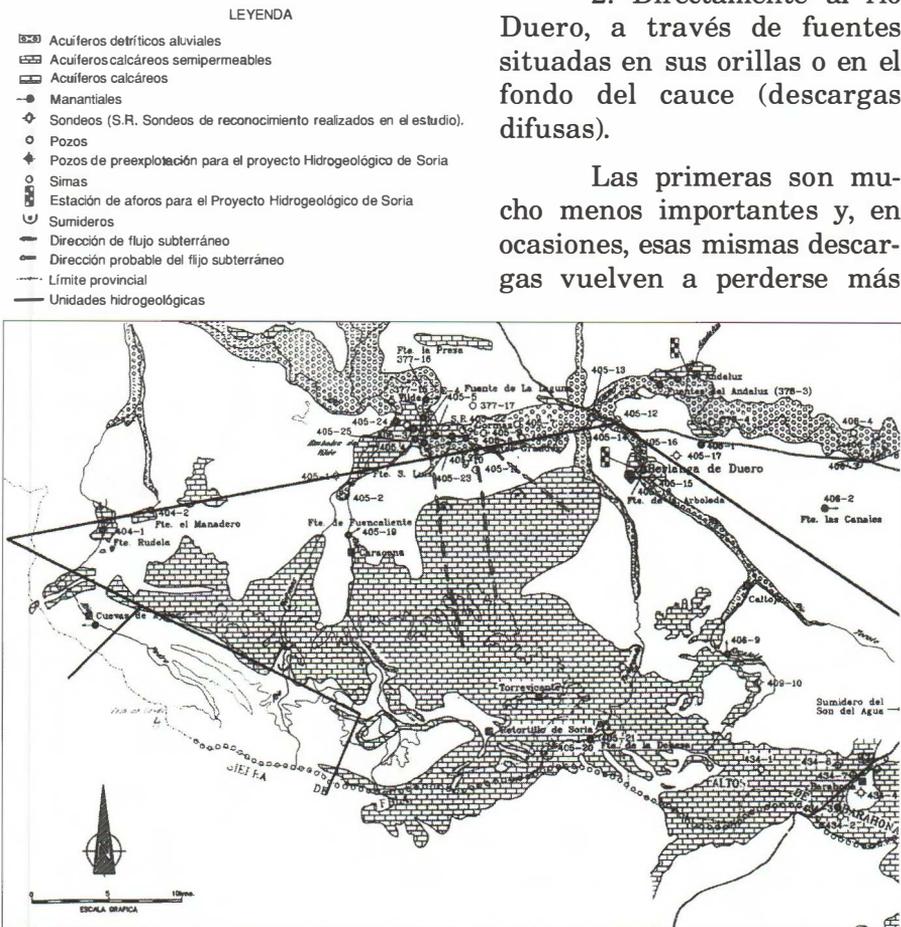


Fig. 12.—Esquema hidrogeológico del acuífero calcáreo de Vildé y Gormaz.(Tomado de SGOP, 1990).

abajo. Las fuentes más importantes son las de la Dehesa de la Riba del Escalote y la de Berlanga, en el río Escalote (sumadas las dos dan alrededor de 100 l/s). Las de Lumias (50-70 l/s) en el Talegon. Las de Caracena, en el río Caracena, y en el Tielmes. Las de Ligos, en el río Pedro. Todos estos aportes subterráneos fueron aforados en el estiaje de 1989 y totalizan una aportación de unos 350-400 l/s (sin contar con los que se suman después aguas abajo). En condiciones medias, estos valores pueden ser significativamente mayores. Sin embargo salta a primera vista que la gran superficie de la cuenca de todos estos ríos no se corresponden con los caudales tan modestos que drenan (totalizan una superficie global de 598 Km²). Pensamos que la explicación se debe a que el flujo subterráneo principal va dirigido directamente hacia el Duero, en la zona de Gormaz. Ello resulta lógico pues hay que contar que el tirante hídrico puede ser mayor que el de estos ríos y arroyos.

Las salidas por el Duero se distribuyen a lo largo de los afloramientos calizos cretácicos de su vega, desde Andaluz hasta Gormaz (Foto 24). Estas descargas se clasifican en manantiales y en descargas difusas al Duero. La fuentes más importantes son las de Andaluz (Foto 22), Quintanas de Gormaz (Foto 25). La Laguna de Gormaz (Foto 26) y la de Vildé (San Luis) (Foto 27). Estos manantiales son difícilmente aforables, pero se les puede estimar un caudal medio total de alrededor de 2000 l/s. El conjunto total de manantiales de las orillas más descargas difusas nos da un resultado total de 3.900 l/s, aunque en condiciones normales se puede sospechar que pueden llegar a ser más de 4.000 l/s (todo ello en base a los aforos diferenciales realizados entre Andaluz y Vildé).

Por otra parte, las extracciones por bombeo son despreciables y no merecen ser comentadas.

La situación del nivel freático viene determinada por el nivel de los pocos pozos existentes y la situación de fuentes y/o áreas de descarga en los cauces de ríos, arroyos y en el Duero, como se ha dicho; se puede ver cómo en las zonas de recarga, el nivel se encuentra relativamente profundo, entre 50 y 150 m.

Los grandes manantiales de Gormaz y del Molino en San Esteban de Gormaz, son posiblemente los últimos manantiales grandes que tiene el Duero junto a su cauce hasta la frontera de Portugal.

Esta especial situación de los manantiales en cabecera de la cuenca, y aunque actualmente contribuyen de forma importante a mantener el caudal de base del Duero en estiaje, su regulación mediante bombes podría beneficiar al regadío y asegurarlo en periodos de sequía aguas abajo de este punto. El esquema de explotación sería extremadamente sencillo, pues el caudal bombeado en el acuífero calcáreo con pozos junto a los manantiales se vertería directamente al río Duero, que haría de vía de conducción del agua. Ello no debería causar ningún impacto ambiental sino más bien lo contrario, pues sustentaría el caudal ecológico del Duero, especialmente en periodos de sequía. En las estaciones o años húmedos las reservas del acuífero se recuperarían.

En este sentido, el SGOP (1990) realizó una campaña de pozos experimentales que tenía por objeto determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, conocer los caudales que se podrían extraer y tantear las posibilidades de regulación e influencia de los bombes en los manantiales de Gormaz.

Las características y descripción de estos pozos y de otros que se perforaron para aquel estudio se detallan en los cuadros 4 y 5.

De la campaña realizada de pozos experimentales, es de destacar los grandes caudales obtenidos en Quintanas de Gormaz (más de 200 l/s con 3,5 m de depresión del nivel) y en Vildé (Vildé P-2) (75 l/s con una depresión en el nivel de 0,24 m), donde los bombes se dejaron sentir en las Fuentes Grandes y manantial de San Luis, respectivamente (Fotos 28 y 29).

El pozo de Burgo de Osma triplicó su caudal después de la acidificación y ha sido aprovechado como apoyo en el abastecimiento a Burgo de Osma.

Como se comprenderá, no se tienen datos de aforos suficientes como para cuantificar con fiabilidad los recursos de este gran acuífero. Se cuenta con los aforos del año 1989 y otros, así como la aportación pluviométrica que cae en el área de alimentación. Con todos ellos, estimamos que los recursos medios anuales pueden oscilar alrededor de 110 hm³/año; en todo caso son muy grandes.

El volumen de reservas es indeterminado, pero se sospecha que son también muy grandes, pues la regularidad de los caudales de descarga del Duero así parecen indicarlo.

MESETA TERCIARIA DE RELLO

Es una meseta muy despoblada, situada a ambos lados del río Bordecorex y del Escalote, en la zona de Rello, Bordecorex y Villasa-yas.

Es un páramo pontiense constituido por un banco superior calizo bastante permeable de 30 a 40 m. de potencia, apoyado sobre margas grises y blanquecinas impermeables. El conjunto se dispone horizontal y está atravesado por los ríos Bordecorex y Escalote, que lo dividen en tres unidades principales.

El acuífero está, por lo tanto, colgado, alimentado por la infiltración del agua de lluvia y drenado rápidamente hacia sus bordes impermeables, donde se ubican los manantiales. La superficie de alimentación tiene unos 160 Km².

El vaciado del acuífero debe ser bastante rápido, pues durante la realización del proyecto del SGOP (1990) no se localizó ninguna surgencia notable, a pesar de la envergadura del mismo. Las reservas deben ser poco importantes.

Si consideramos un coeficiente de infiltración del 30% y teniendo en cuenta que la precipitación media es de unos 515 mm y que el área de alimentación tiene 162 Km², los recursos de este acuífero serían de 25 hm³/año aunque, como se ha dicho, pueden ser muy variables en el tiempo.

ACUÍFERO CALCÁREO DE SIERRA DE PELA

Forma parte de la vertiente septentrional de la Sierra de Pela, que hace de divisoria entre las cuencas del Tajo y del Duero, y límite de las provincias de Soria y Guadalajara.

En la Sierra de Pela, los materiales filtrantes son de edad Jurásica y Cretácica. Entre ellos se encuentran discordantes o en contacto fallado. Estas rocas permeables se extienden sobre todo hacia el Sur, en la provincia de Guadalajara, ocupando ambas vertientes de la Sierra. En la parte soriana, tanto el Cretácico como el Jurásico se ponen en contacto mediante falla con el Triásico impermeable.

La Sierra de Pela, de altura modesta (1500 m), constituye su área de recarga. Esta recarga se estima en 1,7 hm³/año. La precipitación media es de 594 mm. y la superficie del acuífero de 7 Km². El drenaje va dirigido sobre todo hacia el lado Sur, brotando aquí un copioso manantial que forma la Laguna de Somolinos. No existen pozos ni sondeos. Hacia el lado soriano también hay un pequeño flujo subterráneo, dirigido a las fuentes kársticas de Pedro, cuna del río Pedro. Son dos fuentes muy próximas, de no más de 50-70 l/s de caudal medio, y que se piensa fueron utilizadas para el abastecimiento a la ciudad celtíbera y luego romana de Tiermes, situada a varios kilómetros al Norte.

Los recursos de agua, según apreciaciones de la superficie de alimentación y de algún aforo realizado, puede oscilar alrededor de 1,5 hm³/año.

5. ACUÍFEROS QUE NO PERTENECEN A NINGUNA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA

CALIZAS WEALDENSES DE SORIA

Son pequeños afloramientos aislados y estrechos, de menos de 125 m. de espesor, pertenecientes al grupo Oncala de la facies Purbeck-Weald. Se encuentran interestratificados entre materiales detríticos más o menos impermeables, del mismo grupo litológico. Es por esta razón por la que no constituye un acuífero de gran importancia. En total, suman una superficie de 24 Km².

La mancha mayor se encuentra en la ladera meridional de la Sierra de Carcaña. La recarga se verifica a través de la infiltración del agua de lluvia, y la descarga a través de pequeños manantiales, como los de Chavaler, a orillas del río Tera, o como la fuente de La Parra, en Hinojosa de la Sierra, que presenta el curioso fenómeno de intermitencia.

En las últimas crecidas del Tera y del Razón, en la primavera de 1991, se vieron como brotaron de las laderas de la sierra de Carcaña, entre Espejo y Chavaler, a más de 60 m. del cauce, algunos brotes de 10 y 20 l/s.

ACUÍFEROS CARBONATADOS DE SORIA

Dentro de esta unidad se han englobado diferentes afloramientos que se encuentran alrededor de la capital de la provincia, aunque en ocasiones estén separados hidráulicamente. A continuación se hace un breve comentario de ellos:

a) Sierra de San Marcos: Representa un área de recarga de la infiltración del agua de lluvia y de las pérdidas del río Mazos en Camparañón (esto último no es seguro). La descarga se efectúa posiblemente hacia el Duero, en la zona situada entre San Saturio y Sinova, pues en el río Golmayo y en el Mazos no aparecen manantiales ni ganancias de caudal en el cauce. Existen pocos datos de sondeos y pozos como para verificar y cuantificar el flujo subterráneo (la mayoría de los pozos se encuentran en la zona de la Fuente de la Teja, emboquillados en el Terciario). Está rodeada de materiales impermeables Terciarios, aunque creemos no impiden su comunicación profunda con el Duero.

b) Sierra de Santa Ana: Constituida, al igual que San Marcos, por calizas karstificadas del Cretácico superior; la permeabilidad y karstificación de estos materiales queda evidenciada por las numerosas cuevas existentes entre Soria y Sinova. Está igualmente rodeada por todas partes de materiales impermeables terciarios, emergiendo dos masas calcáreas entre ellos: la Sierra de Santa Ana y la Sierra del Picazo. Sólo existen pozos en las granjas de cerdos de Los Rábanos, en el mismo pueblo, y en las cercanías de la carretera de Zaragoza; el nivel viene a coincidir con el Duero o está ligeramente más alto.

El drenaje se verifica hacia el Duero, a través de manantiales en sus orillas (como los de la electra de la Sequilla, hoy día ocultos bajo las aguas del embalse de Los Rábanos) y los que de manera difusa deben nacer en el cauce.

c) Cuencas del río Merdancho y Moñigón: Son afloramientos calcáreos, de edad fundamentalmente jurásica, que constituyen una planicie irregular, fuertemente karstificada, con uvalas y dolinas abundantes. La base impermeable suele estar formada muchas veces por el Keuper

La superficie de alimentación se extiende en la zona del Perejinal (Soria), Garrejo, Velilla de la Sierra, Renieblas y cabecera de los ríos Moñigón y Merdancho.

La recarga es a través del agua de lluvia, y no hay perdederos permanentes. Si suponemos un coeficiente de infiltración de 31% y una precipitación media de 558 mm, la recarga para los 214 Km² de superficie de acuífero es de 37 hm³/año, que resulta ser 13 hm³/año más que la obtenida con la separación de la componente subterránea del río Duero entre Garray y Sinova. Los puntos de agua son insuficientes como para comentar características generales, tan sólo decir que sus caudales son muy diferentes; algunos pozos son bastante productivos, como el pozo de abastecimiento a Tozalmoro. Algunos se utilizan para el abastecimiento a pequeños pueblos: Nieva, Calderuela, etc. y otros para granjas de ganado porcino.

El drenaje se dirige hacia el Duero (zona del Perejinal donde se pueden ver antiguas cuevas-surgencias) o hacia la capital, tal como apuntaba Sáenz García (1973), hacia el río Moñigón y hacia el río Merdancho (aquél es afluente de éste). Destaca por su importancia el manantial kárstico de Renieblas. “Los Ojos”, de bastante regularidad. El aforo realizado en este río en su desembocadura, durante el estiaje de 1989, nos dio un caudal de 300 l/s.

El Merdancho es un río de caudal modesto y cuenca bastante llana, excepto en su cabecera. En su parte alta se ramifica en varios arroyos (Viejo, Moñigón, el de Aldeaseñor, etc.) que le suministran un caudal pequeño pero permanente. Esta circunstancia y la existencia de brotes en Renieblas hace que sea un arroyo de caudal bastante regular.

Según los aforos diferenciales entre Garray y Los Rábanos, los recursos subterráneos de esta unidad se han estimado en 24 hm³/año, que representan el caudal de base del Merdancho y las descargas directas al Duero entre Soria y Sinova. Según las estimaciones de recarga, los recursos son 37 hm³/año.

4.3.2. CUENCA DEL EBRO

1. UNIDAD ACUÍFERO 09.33. ORTIGOSA-MANSILLA-NEILA

ACUÍFERO CALCÁREO DE CAMEROS

Es una mancha jurásica que aflora en Montenegro de Cameros y se extiende en La Rioja.

El acuífero lo constituye una serie carbonatada de Lías y del Dogger, de 500 m de espesor y que en Soria sólo constituye área de recarga por parte del agua de la lluvia. Esta se ha estimado en 4,75 hm³/año. La superficie de afloramiento es de 44 Km², aunque a Soria sólo le corresponde una cuarta parte. La precipitación media es de 992 mm. y el coeficiente de infiltración se supone elevado (45%). El nivel de base kárstico lo constituyen los materiales impermeables del Keuper, y el techo de los sedimentos del grupo Tera (Weald). Poco más podemos decir de este acuífero del que se desconoce bien su funcionamiento y que carece de pozos y sondeos.

2. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 09.36 (QUEILES-JALÓN)

ACUÍFERO DE VOZMEDIANO

El acuífero de Vozmediano se extiende sobre unos 130 Km², en las proximidades de la Sierra del Moncayo, en el lado soriano. Comprende, en sentido geográfico, la mencionada sierra, la sierra de Fuentes, valle de Araviana y sierras de Toranzo, Tablado y Madero.

El acuífero de Vozmediano es quizá uno de los mejores estudiados de los de Soria, pues ha sido objeto de una Tesis Doctoral (Sanz Pérez, 1984).

La cuenca de alimentación tiene una superficie total de 130 Km², de los cuales 40 Km² pertenecen hidrográficamente al valle del Ebro y 90 Km² a la del Duero. Ella, a su vez, está formada por dos zonas perfectamente delimitadas: una kárstica de 70,5 Km² de extensión, y en cuyo límite norte, a 905 m de altitud, surge el manantial de Vozmediano, único drenaje del acuífero, y otra triásica-paleozoica de 59,5 Km² de extensión, que rodea a la primera por la parte este y sur, y forma la divisoria de aguas, entre el Duero y el Ebro con el Moncayo, Tablado y Toranzo.

La geometría del acuífero es de un sinclinal en el Araviana y de una serie monoclinal en el resto. El manantial se sitúa allí donde ese contacto de litologías de diferente permeabilidad está a una cota más baja. Los terrenos acuíferos paleozoicos hacen de barrera por el sur mediante la falla de Tablado, falla de gran salto que interrumpe bruscamente la continuidad del acuífero en profundidad. Por el nor-este está limitado por los materiales del Buntsandstein y Keuper.

La recarga se lleva a cabo a partir de la infiltración directa del agua de las precipitaciones que cae sobre los afloramientos del acuífero tanto en los montes de Fuentes de Ágreda, como en el polje de Araviana, y de la infiltración indirecta de los numerosos arroyos y barrancos que provienen de las áreas montañosas, que al llegar a las calizas jurásicas desaparecen.

La descarga se efectúa a través de dos aliviaderos naturales: la fuente de Vozmediano y el río Araviana.

El manadero de Vozmediano es una surgencia permanente en la que brota por un solo conducto un caudal medio de 1,1 m³/seg (Foto 30) lo que significa una aportación de 32 hm³/año. Presenta una gran regularidad natural en su caudal. El río Torambil representa la escorrentía superficial que sale del sistema kárstico.

Las aguas dentro del acuífero kárstico se desplazan desde el valle del Araviana hasta el manantial de Vozmediano, bordeando el macizo del Moncayo.

ACUÍFERO DE LOS OJILLOS DEL KEILES

Se encuentra al sur de las proximidades de Ágreda y el nivel geológico permeable se extiende hasta más allá de Ólvega y Muro de Ágreda.

Aunque los ojillos del Keiles son los manantiales más importantes de esta rama del Queiles, el verdadero nacimiento de este río (aparte del manadero de Vozmediano), lo tiene en la fuente de Vomitrosa, de 10 ó 15 l/s de caudal medio, y que nace en Ólvega, al pie de la Sierra del Madero. Desde hace unos 6 o 7 años hay que añadir el trasvase de agua artificial para el abastecimiento de Ólvega, desde el valle de Araviana (cuenca del Duero) (puede estimarse un caudal de unos 20 l/s).

El caudal de este río se afora en una estación del MOPU, nº 90 en los Fayos de Tarazona antes de su confluencia con la otra rama del Queiles, procedente de Vozmediano.

En Ágreda existen pequeñas vegas y huertas que se riegan con las aguas de los Ojillos principalmente, pues las que bajan de Ólvega llegan altamente contaminadas. Con el fin de aumentar las disponibilidades, la Comunidad de Regantes de esta villa, ha reali-

zado un pozo profundo en el acuífero de estas fuentes a fin de regularlas. Las obras han sido costeadas por el IRYDA. En Ágreda también utilizan para riego las fuentes que nacen en el Buntsandstein de las laderas del Moncayo, en el término de la Aldehuela. Su abastecimiento se sitúa también aquí y, posteriormente, se ha construido un pozo dentro del acuífero de Vozmediano, a fin de apoyar el abastecimiento tradicional que resultaba insuficiente durante el invierno.

La surgencia de los Ojillos es permanente y se localiza en el contacto de las calizas pararecificales del Jurásico con los primeros materiales correspondientes al grupo Tera, de la facies "Purbeck-Weald". Este manantial presenta un caudal que, aunque no ha sido aforado con regularidad, puede estimarse entre 30 y 60 l/s. La surgencia emerge entre sedimentos cuaternarios y el agua se difunde entre ellos, de tal manera que no pueden verse los verdaderos puntos de salida, brotando en diversas zanjas realizadas a fin de sanear la dehesa en la que nace, y de varios "ojos" de límpidísima agua y muy incrustante, dejando importantes depósitos de toba en las inmediaciones de Ágreda.

Este nivel permeable carbonatado no está alimentado tan solo por la infiltración en su propia superficie de afloramiento, sino que seguramente hará también de dren de los materiales menos filtran-tes sobre los que está intercalado. Suponiendo un coeficiente de infiltración del 37% (son calizas muy karstificadas), para los 7,3 Km² de afloramiento y con una precipitación media calculada de 516 mm., la recarga es de 1,4 hm³ (=44 l/s), que es acorde con los datos de aforo disponibles.

Según los análisis efectuados, las aguas son de tipo bicarbonatado-cálcicas, con bastante contenido en sulfatos y muy incrustantes.

Como esta rama del Keiles cuenta con una extensa superficie impermeable, los aforos de la estación de los Fayos son representativos de la escorrentía subterránea solo en los períodos de estiaje.

Teniendo en cuenta los datos de la estación de aforos del MOPU n^o 90, las estimaciones de recarga y, sobre todo, los aforos y apreciaciones en los manantiales de los Ojillos y Ágreda, podemos indicar que los recursos subterráneos aproximados son de unos 1,6 hm³ /año.

3. UNIDAD HIDROGEOLOGICA 09.39. CALATAYUD-MON-TALBÁN

ACUÍFERO DEL MANANTIAL DE ARANDA DE MONCAYO

Se extiende este acuífero entre las provincias de Soria y de Zaragoza, adosado a la cadena montañosa de la Sierra de Tablado. Está surcado perpendicularmente en su cabecera por los ríos Araviana (Cuenca del Duero) y Manubles (Cuenca del Ebro), y da lugar al nacimiento del río Aranda. Las poblaciones que se encuentran próximas o dentro de su área de alimentación son : Borobia , Ciria, Noviercas en Soria; Pomer y Aranda de Moncayo en Zaragoza.

Los materiales filtrantes son principalmente un conjunto dolomítico perteneciente al Jurásico inferior, de unos 100 m de espesor, así como diversos materiales carbonatados que se apoyan encima, de potencia variable o incompleta en la zona. Este tramo permeable se asienta sobre el Keuper impermeable y lateralmente se pone en contacto con el Triásico y con el Paleozoico.

La cuenca de alimentación de los manantiales de Aranda de Moncayo tienen una superficie total de 162 Km², de los que la mayor parte pertenecen hidrográficamente al valle del Ebro. Hacia el Oeste, los afloramientos calcáreos enlazan en continuidad estratigráfica con la cuenca del río Rituerto, afluente del Duero, siendo la divisoria real de aguas de carácter subterráneo.

La geometría de los materiales acuíferos es de un sinclinorio en la zona oriental, que continúa así, aunque con diversos repliegues, a enlazarse con el resto de los materiales carbonatados del valle del Rituerto. El Paleozoico y sobre todo el Keuper, es el nivel de base kárstico. En el valle del río Aranda, unos pocos kilómetros aguas arriba de Aranda de Moncayo, que es donde este contacto de litologías de diferente permeabilidad está a una cota más baja, brota el manantial del mismo nombre. Los terrenos paleozoicos hacen de barrera por el norte, mediante el contacto con las laderas de las Sierras de Toranzo y Tablado. Por todos los demás lados el acuífero está limitado por los materiales del Buntsandstein y Keuper, a excepción de la parte occidental, que, como ya hemos dicho, el acuífero continúa hasta más allá del Rituerto.

La recarga es de lluvia y de la infiltración de los ríos, arroyos y barrancos que de las áreas montañosas de las sierras de Toranzo y Tablado provienen y que desaparecen al llegar a las calizas y dolomías jurásicas. Principalmente el río Manubles, que nace en la Dehesa de Borobia, en la sierra de Tablado. En estiaje circulan unos 15 ó 20 l/s que se infiltran a la salida del pueblo, que es donde está el contacto del Triásico con el Jurásico, idéntica situación que en el Estrecho de Araviana. El cauce del Manubles, en el cañón de Ciria, va seco, excepto 2 Km aguas arriba del pueblo, donde brota una fuente de unos 10-15 l/s, que forma un arroyuelo que vuelve a perderse 1 Km más abajo. El Manubles sigue seco hasta Berdejo y Torrelapaja, que es donde brotan fuentes importantes en el propio cauce del río. Sólo cuando va muy crecido, llega a sobrepasar todo el cañón y se junta con su cauce permanente en Berdejo. Sería muy interesante hacer aforos diferenciales a la entrada y a la salida del cañón en esta situación, a fin de valorar la capacidad de infiltración del cauce, que parece ser bastante importante, según se ha podido observar. También un afluente del Manubles (Arroyo de la cueva del Zapato) se pierde al llegar a las calizas del acuífero.

Otro río que participa en la alimentación de este acuífero es el Araviana, cuando logra sobrepasar el polje de su cabecera (donde pierde 500 l/s de su caudal para ir a parar a Vozmediano). Sale de su cabecera por el llamado Estrecho de Araviana, cortando las sierras del Madero y de Toranzo. En el propio Estrecho gana unos 10 o 20 l/s provenientes de los terrenos paleozoicos y triásicos, pero una vez pasados estos afloramientos (2 ó 3 Km), vuelve a infiltrarse en las calizas y dolomías que aparecen al otro lado de dichas sierras. Aunque esta infiltración depende de la capacidad de pérdidas del cauce del Araviana, también está en función de la mayor o menor cantidad de caudal que lleve el río, de tal manera que si lleva mucha, logrará tributar al Rituerto y, si no es así, se infiltrará totalmente en el acuífero. Desconocemos esta capacidad de infiltración pero se puede suponer que es la misma que en el acuífero de Vozmediano: 42 l/seg/Km de cauce sobre las carniolas, y 5,8 l/seg/Km por el resto de las calizas jurásicas. De la cabecera del Araviana provienen 2,3 hm³/año y han sido aforados a su paso por el Estrecho durante 1982, 1983 y 1984. Según la capacidad de infiltración citada, se supone que se recarga una media de 2,6 hm³/año, a los que hay que añadir unos 20 l/s que nacen en el propio Estrecho.

En estiaje el panorama es diferente: el caudal del Araviana baja siempre seco porque se infiltra en el Polje y tan solo circula con agua en el Estrecho: luego se pierde al pie del cerro de Torrambil.

En lo que respecta a la recarga debida a la lluvia, en su cálculo se ha estimado un coeficiente de infiltración del 38%. Así, para una precipitación media de 532,5 mm. la recarga vale 33 hm³/año (=1039 l/s), lo que parece estar por encima de los valores de los escasos datos de aforo existentes. Además, esta recarga se refiere únicamente a la infiltración en los afloramientos calcáreos. Si el coeficiente de infiltración fuese 30%, la recarga sería de 26 hm³ (=824 l/s).

En cuanto a la circulación del agua subterránea, nos ha sido imposible trazar un mapa de isopiezas pues en todo el acuífero sólo se contaba con 3 pozos.

La descarga se efectúa a través de la fuente de Aranda, principalmente, en la provincia de Zaragoza. Este manantial, según diversos aforos efectuados para el Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), tiene un caudal medio aproximado de 600 l/s.

ACUÍFEROS DEL MANUBLES

Este acuífero está formado por una serie de afloramientos carbonatados mesozoicos (jurásicos y cretácicos), alargados según la dirección NE-SO, altamente fracturados y compartimentados entre niveles poco permeables, mesozoicos y terciarios situados a caballo entre las provincias de Zaragoza y Soria.

El Manubles nace en Borobia (Sierra de Tablado), corriendo con un escaso caudal, en estiaje, hasta Ciria. Al pasar por Borobia se infiltra en las calizas jurásicas del acuífero del manantial de Aranda del Moncayo, al que alimenta, tal y como se ha dicho. Donde verdaderamente gana agua el Manubles, y a partir de donde nunca se seca, es en Torrelepaja; antes es muy frecuente ver su cauce seco. Según aforos realizados por el SGOP (1990) y para el plan PIAS, el río gana aquí unos 280-250 l/s, y se ve incrementado más abajo, hasta Berdejo, por unos 150-240 l/s. En total circulan unos 350-400 l/s.

Se ha supuesto un coeficiente de infiltración de 35% y como la precipitación media es de 487 mm en los 36 Km² de superficie de aflo-

ramiento calcáreo, la recarga resulta de 6,1 hm³/año (=200 l/s), que parece ser casi la mitad que los datos de aforo. Posiblemente, que este acuífero también hace de dren de los materiales menos permeables entre los que está inserto.

4. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 09.47. SIERRA DEL SOLORIO

PÁRAMO DE MARANCHÓN

Este acuífero coincide con la región geográfica del páramo de Maranchón, meseta alta y pobre, muy despoblada, dedicada al pastoreo y cultivo de cereales. Está poblada también de bosques de enebros, sabinas y carrascas.

Coincide con la divisoria de aguas entre el Ebro y el Tajo y también con los límites de las provincias de Guadalajara y Soria. El pueblo más importante es Maranchón. Los principales ríos son el Mesa y Jalón, del Ebro, y el Tajuña, del Tajo. Al Jalón se derrama el río Blanco y otros arroyos menos importantes, como son el Sagides, Chaorna e Iruecha.

Los terrenos jurásicos, sobre todo las carniolas del Lías, son los que forman los principales acuíferos, como en la tierra de Medinaceli, aunque aquí la erosión todavía no ha disecado la gran meseta que forman. La potencia de estas dolomías y calizas es variable, dependiendo que estén o no representados otros pisos superiores del Jurásico. Lo más frecuente es que tengan unos 200 m. aunque aumenta hacia el Mesa, y disminuye hacia Medinaceli, donde el Keuper ya aflora en los valles, separando hidráulicamente unas zonas de otras. La estructura está constituida por una sucesión de plegamientos suaves.

En teoría el Keuper es el nivel de base kárstico y los carbonatos constituyen el acuífero. Sin embargo, hay que contar con que seguramente también la parte superior del Keuper colabora en el funcionamiento hídrico, por percolación de las aguas que le provienen del Jurásico. Ello explica que haya manantiales situados en él, como el de Urex, aunque siempre más o menos cercanos al contacto con el Mesozoico.

La recarga se verifica principalmente por la lluvia. El área de alimentación de este acuífero, hasta el río Mesa, es de unos 380 Km². También se han observado pérdidas en sumideros en la cabecera del río Mesa.

La recarga por lluvia se ha estimado en 47 hm³/año (=1.490 l/s). La precipitación media es de 426 mm/año.

La circulación del agua subterránea no ha podido ser abordada, pues existen en esta zona muy pocos pozos y sondeos. Tan solo se han podido registrar los de Maranchón, Iruecha, Codex y Alconchel de Ariza. La profundidad del nivel freático, en estos puntos, oscila entre 70 y 190 m.

La descarga se realiza a través de los siguientes manantiales:

– Del río Jalón: Mochales en el río Mesa, Urex y Layna en el río Blanco, principalmente. Hay otros menos importantes que alimentan los arroyos de Chaorna, Iruecha y Sagides.

– Del río Tajo: Manantiales de Anguita en el río Tajuña.

De todas estas descargas se han medido los caudales durante el estiaje de 1988-89:

- Río Mesa en Mochales: 696 l/s
- Río Blanco en Layna: 60 l/s
- Río Blanco en Urex: 120 l/s
- Río Blanco en la desembocadura: 130 l/s
- Ayo. de Chaorna: 16 l/s
- Ayo. de Sagides: 26-37 l/s
- Ayo. de Iruecha: 6 l/s
- Río Tajuña en Anguita: 197 l/s
- Ayo de Judes: 8 l/s.

En total, el acuífero drenaba 1090 l/s.

Para un año medio, se tienen los siguientes datos de aforo: río Blanco en desembocadura (años 1971, 72, 73) (C.H.E.), 349 l/s; río Mesa, 1.500 l/s (de Soria se puede considerar que viene la mitad) y diversos aforos realizados por el PIAS (1978, 79, 80).

Con todo ello, parece que el caudal de origen subterráneo de este acuífero debe ser alrededor de los 1500 l/s.

ACUÍFEROS CALCÁREOS DE LA TIERRA DE MEDINACELI

Se encuentran estos acuíferos coronando las mesetas que se disponen en los alrededores de la Tierra de Medinaceli, y por conveniencia, se incluye todo aquel territorio que drena la estación de aforos del Jalón en Jubera. La población más importante es Medinaceli. La zona constituye la cabecera y nacimiento del Jalón, cuya cuenca limita aquí con la del Tajo y la del Duero.

La geología de la zona desde el punto de vista estratigráfico es bastante sencilla, ya que los únicos materiales que constituyen acuíferos son las carniolas del Jurásico que tienen una potencia aproximada de 90 m. Descansan sobre el Keuper arcilloso, más o menos impermeable, aunque en muchas ocasiones el agua penetre a su través, apareciendo los brotes en el seno de esta formación, tal como ocurre con los manantiales de Esteras. Otras veces las fuentes se sitúan en el contacto de las dos formaciones antes citadas. La parte superior de las mesetas están arrasadas por la superficie de erosión fundamental de la Cordillera Ibérica, lo que hace dar un aspecto al país de "mesetas terciarias del páramo", aunque en realidad se traten de Jurásico plegado, aunque suavemente.

Se pueden contar más de 10 de estos afloramientos calcáreos, aislados unos de otros por el Keuper, que ocupan las zonas bajas y de los valles de la red de drenaje. Cada uno de estos pequeños acuíferos está asociado a uno o varios manantiales, que representan su drenaje. Los más importantes son los de Esteras de Medinaceli (nacimiento del Jalón) y de Ambrona (Arroyo de Fuencaliente, afluente del Jalón). Hay también otros más modestos que drenan los apéndices meseteños del gran páramo de Maranchón, que se extiende hacia el Este. En total se suman unos 196 Km² de superficie.

El funcionamiento de estos acuíferos es sencillo: la recarga se lleva a cabo a partir de la infiltración del agua de lluvia. Según la precipitación media (554 mm) y un coeficiente de infiltración alto (39%), la recarga puede ser de 42 hm³/año (=1343 l/s). Sin embargo, una tercera parte drena hacia el Henares, por lo que resultaría 28,5 hm³/año para el Jalón, que es en 12 hm³/año superior a lo estimado en la estación de aforos de Jubera. Si el coeficiente de infiltración fuese del 30%, la recarga sería de 21,5 hm³/año. El drenaje se realiza a través de los manantiales antes mencionados. La circulación del

agua subterránea es rápida, ya que estos manantiales tienen un régimen muy variable, aunque nunca se agotan. Esto también se observa en el hidrograma de la estación de aforos de Jubera. Las reservas serán, por lo tanto, no demasiado grandes. En la zona no existen pozos ni sondeos ubicados en los acuíferos, por lo que no es posible situar la profundidad del nivel freático, y mucho menos trazar las isopiezas.

Según el hidrograma de la estación de aforos de Jubera la escorrentía subterránea se ha estimado en 16,3 hm³/año (517 l/s), que representa el 65% de la total. También se han podido discernir tres curvas de agotamiento diferentes y el volumen de agua almacenado por encima de la cota de los distintos puntos de drenaje (12,3 hm³).

Según los aforos realizados en el proyecto del SGOP (1990), en estiaje se pueden estimar que hasta Jubera, el Jalón tiene unos 140 l/s.

Es de señalar también la existencia de manantiales con alto contenido en cloruros (Salinas de Medinaceli -Foto 31-, Fuente de Fuencaliente), provenientes de la disolución del Keuper (el nombre de Jalón significa río Xalón, o Salado). hay también pequeños rezumes de tipo sulfhídrico, como el que existe en Esteras de Medinaceli, y que debe su origen también a la existencia de yesos en el Keuper y a turberas de antiguas zonas pantanosas.

Para todos los pequeños acuíferos de Medinaceli se han estimado unos recursos globales de unos 16-26 hm³/año. Han sido calculados según los datos de la estación de aforos de Jubera y otros aforos directos realizados.

5. ACUÍFEROS QUE NO PERTENECEN A NINGUNA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA

ACUÍFERO DE LOS MANANTIALES DE AÑAVIEJA

El acuífero de Añavieja, con una superficie aproximada de 123 Km², se ubica en la comarca denominada "La Rinconada" perteneciente a la tierra de Ágreda.

Comprende, en sentido geográfico, la cara oriental de la Sierra del Madero y la llanada de Matalebreras. Dicha sierra hace aquí de divisoria de aguas con el Duero (cabecera del Rituerto) y con el

Queiles. La región está drenada por el río Añamaza, afluente por la izquierda del Alhama, afluente a su vez del Ebro.

Creemos que es interesante describir brevemente, pero con cierto detalle, el conjunto de la infraestructura hidráulica de la cuenca alta del Añamaza, dentro de la cual los manantiales de Añavieja constituyen el aporte más importante.

El río Manzano se denomina Cajo o Añamaza a partir de Dévanos. Es afluente por la derecha del Alhama, donde confluye en los Baños de Fitero (Navarra-Logroño), siendo éste a su vez tributario del Ebro.

Antes de los manantiales de Añavieja, el caudal del río Manzano está constituido fundamentalmente por un componente superficial, la de sus arroyos afluentes, sobre todo el arroyo Abejera, procedente de Campiserrado, y otro arroyo procedente de Matalebreras. Este último tiene una cuenca bastante impermeable, por lo que a veces, sus avenidas son relativamente importantes, de tal manera que este pueblo cuenta con una obra hidráulica singular, que es un dique de protección contra las riadas. Tiene casi 200 m de longitud y se le llama "muralla mora", de construcción indudablemente antigua. En la cabecera de este arroyo hay una fuente de 2 ó 3 l/s que es de la que se abastece Matalebreras.

La mayor parte de estos arroyos, también el río Manzano, van prácticamente secos durante todo el año, excepto en épocas de deshielos y lluvias intensas. Se piensa que el caudal medio conjunto no sobrepasa los 50 l/s, pero desde luego, no está aforado. Su componente subterránea es muy pequeña (suma de las fuentes de Muro de Ágreda, Fuentestrún, Trébago, etc.) y rezumes difusos; se estima que pueden ser unos 15 l/s.

Los pueblos de la Rinconada pertenecientes a la cuenca del Añamaza son: Valdelagua, Trébago, Montenegro de Ágreda, Matalebreras, Muro de Ágreda, Castilruiz, Fuentestrún, Añavieja y Dévanos. De ellos, a Muro de Ágreda, Valdelagua, Castilruiz y Fuentestrún, se les ha hecho sondeos para su abastecimiento por parte del SGOP y Diputación Provincial de Soria, habiéndose extraído en algunos de ellos caudales importantes. El objetivo de estos sondeos era atender la demanda en verano, pues durante la mayor parte del año no era necesario; son pueblos de muy pocos habitantes, y con las pequeñas fuentes existentes ha sido hasta ahora suficiente.

En Matalabreras los sondeos resultaron negativos y actualmente se abastecen de un pozo de gran diámetro situado en la llanada de la laguna, y de una fuente que nace en la Sierra del Madero, en el barranco del arroyo antes citado. Castilruiz también se abastece de un sondeo.

Unos 800 m antes del puente de la carretera de Añavieja, el río Manzano tiene siempre agua, pues en su propio cauce brotan unos 7 u 8 l/s de manera difusa. Estos rezumes se sitúan en el término de Añavieja. Aparecen en depósitos cuaternarios.

Pasando el puente y hasta la “Presa Vieja”, es decir, hasta la toma del Canal de San Salvador, se sitúan la mayor parte de los manantiales de Añavieja, distribuidos en un tramo del río de unos 2,5 km de longitud.

Aparte de las descargas difusas que pudiera haber, se pueden contar nueve manantiales puntuales. Estos han sido tradicionalmente utilizados para el riego en Ágreda (en la vega de La Nava) desde muy antiguo, empleándose para ello el canal de San Salvador, que salta la divisoria de aguas del Añamaza al mencionado valle.

Del puente de la carretera hasta el puente del camino de Ágreda, en Añavieja, aparecen tres manantiales. El llamado “Chicharrín” es el más caudaloso. El más cercano al pueblo de Añavieja sirve para abastecimiento al mismo (Foto 32). Añavieja también se suministra de la fuente “Las Fuentezuelas”, pequeño brote de agua situado 1 Km al norte y a media ladera de la sierra de Pégado, y que era insuficiente para el abastecimiento. Muy cerca de los manantiales del río hay un sondeo muy productivo. Todas esas fuentes, así como el pozo, se ubican en calizas jurásicas.

Frente al pueblo y pasando el puente del camino de Ágreda hay 4 ojos, dos de ellos muy caudalosos. Nacen todos ellos también en calizas jurásicas. En las inmediaciones hay otro sondeo muy productivo (Foto 33).

Un poco más abajo, próximos a la ermita de la Virgen de Sopena, hay dos sondeos. Uno de ellos está seco, el otro parece que tiene bastante caudal.

Un kilómetro más abajo, junto al puente del camino de San Felices, hay dos fuentes pequeñas y sin importancia. Medio kilóme-

tro más abajo está la derivación del canal de San Salvador. Aquí también hay una pequeña toma de agua de 17 l/s que tiene derecho Dévanos para el riego de 47 Ha. y otra para la finca "El Palacio", sita en Dévanos, de 3 Ha., que es independiente de los 17 l/s antes citados.

La toma del canal consta de una pequeña compuerta y la derivación propiamente dicha del canal. Por el canal circulan alrededor de 250 l/s (aunque varía, por supuesto, según el régimen de las fuentes de Añavieja y río Manzano). Aunque no se ha aforado con regularidad, se han hecho algunos aforos con molinete, dando 230 l/s, 200 l/s y 220 l/s. Este canal, llamado de San Salvador, va a parar a Valverde de Ágreda, que es donde se riega. Su descripción y uso del agua está suficientemente detallada en las Ordenanzas del Ayuntamiento de Ágreda. Valverde de Ágreda se abastecía del canal, pero el agua baja tan contaminada de las granjas y vertidos de Añavieja que fue necesario hacer un sondeo por parte del SGOP y la Diputación en las proximidades de esta aldea.

Unos metros más abajo de la toma, se encuentra el manantial de la Caseta, perteneciente a Dévanos, de unos 12-20 l/s. Junto a él hay dos sondeos abandonados hechos por el Instituto de Colonización, en una finca propiedad del Ayuntamiento de Cascante (Navarra). Parece ser que eran bastante productivos, aunque influían en el manantial, el cual secaban cuando se bombeaba.

Antes de llegar a Dévanos, hay otra fuente pequeña en el río, de la cual se abastece Dévanos, y otra a media ladera de la que también se abastece.

En Dévanos hay una estación de aforos de la Confederación Hidrográfica del Ebro que no controla la derivación del canal de San Salvador. Hacia abajo, y hasta el límite con La Rioja, el río circula por terrenos prácticamente impermeables aunque hay algunos brotes y manantiales sin importancia. También se han inventariado todas estas fuentes, pero se omiten aquí por creer que no entran dentro del interés de este trabajo. Asimismo están inventariados todos los pozos y manantiales de las zonas próximas, pero tampoco creemos sirvan para nuestros objetivos.

En Valdegutur (Rioja) hay un sondeo en el cauce que se utiliza para regadío y es muy productivo.

Los materiales acuíferos están constituidos por rocas carbonatadas permeables pertenecientes al Jurásico marino.

En concreto, y refiriéndonos a las litologías descritas anteriormente, deben ser los niveles de calizas oolíticas, calizas masivas, alternancias de calizas y areniscas y calizas pararrécifales las que forman el acuífero. Los límites impermeables están definidos por margas y margocalizas jurásicas en muro y por los terrenos del grupo Tera en techo. La geometría del acuífero, basándonos en el mapa geológico de las hojas 1/50.000 nº 319 y 351 y los datos sobre sismica de reflexión que para prospección de hidrocarburos se han tomado en la región, es de un anticlinal (anticlinal de Pégado), donde los terrenos jurásicos afloran en el núcleo, entre Añavieja y Dévanos, rodeados por todas partes de los materiales impermeables de la facies "Purbeck Weald", apareciendo los manantiales precisamente en los puntos más bajos de dicho afloramiento (cota aproximada de 960 m) que es el cauce del río Añamaza.

Este es un esquema que intenta simplificar el modelo de funcionamiento hidrogeológico, porque no hay que olvidar que, dentro de la facies "Purbeck-Weald", hay también niveles muy filtrantes, tal como lo atestiguan los caudales relativamente importantes que se han aforado en sondes recientemente perforados para el abastecimiento de Fuentestrún, Muro de Ágreda y Valdelagua.

La recarga procede de las precipitaciones que caen sobre los 68 Km² de afloramientos del acuífero libre, además de que éste hace también de dren natural de las formaciones menos permeables entre las que se encuentra inserto, por lo que la superficie real de alimentación puede ser mucho mayor. La precipitación media anual en estos afloramientos es de 524,6 mm por lo que si suponemos una infiltración del 30% la recarga por agua de lluvia es de 10,6 hm³/año (=338 l/s). Si fuese del 20% sería 7,1 hm³ (=226 l/s). La descarga se efectúa a través de los manantiales de Añavieja y Dévanos.

No pretendemos aquí el establecimiento de un balance hidrogeológico exhaustivo, entre otras cosas porque se carece de datos suficientes para ello. No se tienen datos de los caudales de los manantiales de Añavieja, aunque los de Dévanos están registrados en la estación de aforos nº 49 del MOPU (río Añamaza en Dévanos). Controla dicha estación no sólo las aportaciones de las fuentes kárs-

ticas de Dévanos, sino también las aguas que no toma el canal de San Salvador que, por avenidas o limpias u otras causas se vierten al río Añamaza.

Como resumen, el balance hidrológico es el siguiente (Sáenz y Sanz, 1989):

– Caudal medio tras las fuentes de Añavieja (escorrentía superficial + fuentes)	350 l/s
– Derivación canal (estimado con mediciones)	250 l/s
– Tras derivación	100 l/s
– Fuentes de Dévanos	150 l/s
– Añamaza tras Fuentes de Dévanos (aforado)	250 l/s
– Aportación total	500 l/s

Con motivo de llevarse a cabo la desecación de la laguna de Añavieja en el siglo pasado, el nivel freático que estaba representado por la superficie de sus aguas, bajó, quedando al ras de los manantiales de su fondo. Se logró evitar así la evaporación tanto directa en

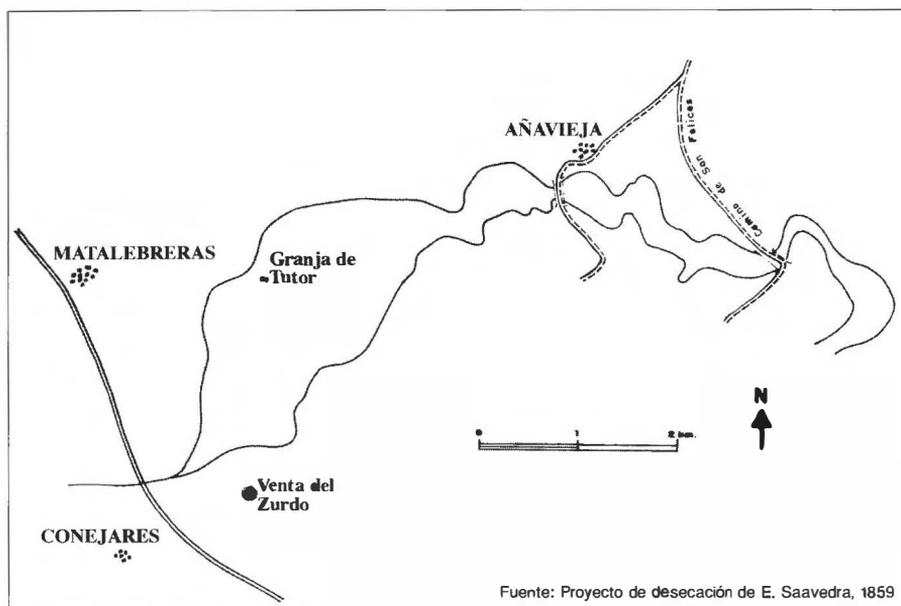


Fig. 13.—Plano de 1850 de la Laguna de Añavieja (según Eduardo Saavedra).

la capa de agua como a través de las plantas freatofitas, lo que hizo aumentar los recursos hidráulicos en 3,6 hm³/año. (Fig. 13).

A pesar de que la zona no cuenta con demasiados puntos de agua, el acuífero de Añavieja ha sido el único de la provincia en el que se han podido trazar un mapa de isopiezas que, aunque sencillo, sí es altamente clarificador en cuanto a la circulación del agua subterránea.

El flujo del agua se dirige concéntricamente desde las zonas más alejadas a los puntos de descarga de Añavieja, donde se concentran las líneas. Aquí, la pendiente tan suave hace aflorar el manto freático a lo largo de todo el valle entre Añavieja y Dévanos en forma de grandes manantiales. En el resto del área de alimentación las isopiezas se adaptan más o menos a la topografía de la zona y no existe por otra parte, ninguna fuga o entrada significativa de los acuíferos colindantes. El río Manzano, y luego el Añamaza, están comunicados hidráulicamente con el acuífero.

Las fuentes de Añavieja tienen una temperatura (16°C) algo más elevada que el resto de los manantiales sorianos, lo que parece denotar una circulación más profunda. También es de destacar el mayor contenido en sulfatos y en nitratos, debido probablemente a la presencia de piritas y a las actividades agrícolas. Las fuentes de Dévanos son más incrustantes, de tipo bicarbonatado-cálcico. Las de Añavieja son de facies mixta de dos términos: sulfatada/cálcica y bicarbonatada-cálcica.

Si consideramos como válidas las cifras dadas anteriormente de las salidas del sistema, los recursos medios anuales de este acuífero se estiman en unos 14 hm³/año. Según se deduce de la lectura de los anuarios de aforos, de las observaciones propias que se han hecho, y de la encuesta a los habitantes de la zona, los manantiales de Añavieja son bastante regulares en su caudal.

ACUÍFERO DEL MANADERO DE DEZA Y DE LOS MANANTIALES DE ALHAMA DE ARAGÓN

El acuífero se extiende a lo largo de la sierra de Miñana, que se orienta en dirección NO-SE, constituyendo las laderas de la margen izquierda del valle del río Henar. La principal población es Deza.

Su descripción se hace en un estudio monográfico de la parte segunda del libro.

MESETA TERCIARIA DE RADONA Y AGUAVIVA DE LA VEGA

Es una meseta que se encuentra entre la divisoria del Duero y del Ebro, en los altos de Radona.

El acuífero lo constituyen aquí las calizas del Páramo que se encuentran coronando la meseta de los altos de Radona, dando lugar a una superficie de unos 35 Km². El espesor de estas calizas es pequeño y son materiales bastante karstificados, con dolinas en superficie. Se apoyan sobre margas grises y blancas, dispuestas horizontalmente y que constituyen el muro impermeable.

La recarga proviene del agua de lluvia. La situación del nivel freático se desconoce porque no existen sondeos ni pozos. El drenaje se realiza hacia los bordes impermeables, bien hacia el río Torote de forma intermitente y rápida o bien hacia el arroyo Margón (cuenca del Ebro) a través del manantial de Aguaviva de la Vega (aunque este manantial drena más bien niveles calcáreos intermedios y no los de la meseta).

Si suponemos un coeficiente de infiltración del 37%, teniendo en cuenta que la precipitación es de unos 511 mm y que la superficie de alimentación es de 35 Km², la aportación de este acuífero es de unos 6,5 hm³/año, aunque como el drenaje es muy rápido, no más de 1,5 hm³/año puede considerarse como realmente "subterráneo". Parece que carece de reservas significativas.

4.4. RECURSOS GLOBALES. BALANCE HIDRÁULICO

Considerando el año medio, la escorrentía total en Soria puede estimarse en 1360 hm³, de los cuales 1000 hm³ corresponden a la Cuenca del Duero y 360 hm³ a la del Ebro.

En el Duero, la escorrentía subterránea total, estimada a base de sumar los recursos de todos sus acuíferos, es de 330 hm³ (Tabla 6). Ello representa el 23% de la escorrentía total provincial, el 33% de la escorrentía del Duero y el 68% de la escorrentía subterránea provincial. De todos los caudales subterráneos, el 37% nacen en el propio cauce del Duero en el área de Gormaz, y el 26% provienen del Ucero y del Avión.

En el Ebro, la escorrentía subterránea es de 153 hm³, casi el 42% de la total correspondiente a esta cuenca, y el 31% de la total provincial. El 95% de dicha escorrentía se concentra en los ríos Añamaza, Queiles, Henar, Aranda, Jalón, Manubles y Mesa. En el resto de los ríos no llega ni al 6%. También hay que señalar que unos 25 hm³ le provienen del Duero, mediante el trasvase subterráneo del Araviana al Queiles.

Hay que tener en cuenta que las cifras del Duero y del Ebro no son del todo comparables por corresponder a períodos hidrológicos diferentes. Las del Duero corresponden al período 1940/41 -1977/78 (38 años): las del Ebro se refieren a los años de funcionamiento de las estaciones de aforo (series de 8, 10, 20 años). Los valores que se dan aquí han de tomarse como aproximados y provisionales, por lo que se deberán comparar o confirmar con otros estudios que se hagan en el futuro.

Si lo que antecede se refiere a la distribución geográfica (por cuencas) de las escorrentías para un año medio, no menos interesante es la que resulta de observar la evolución temporal de los caudales subterráneos. Ciertamente es que no se tienen datos suficientes para hacer un análisis minucioso, aunque sí se han observado algunos hechos dignos de ser comentados.

El primero, se refiere a que, en estiaje, la escorrentía subterránea en el Duero, a su salida de la provincia es muy elevada, de tal manera que puede estimarse entre 80 y 95% del total. En el Ebro, y también durante estiaje profundo, la aportación subterránea representa la mayoría de la escorrentía total.

Otro aspecto se refiere a la regulación de los débitos subterráneos. Así, y según apreciaciones, se pueden considerar como bastante regulares los manantiales de Gormaz, Vildé, Quintanas de Gormaz, San Esteban de Gormaz, Vozmediano, Añamaza, Deza y Mochales; también los que nacen en el Terciario de las cuencas del Andalúz, Rejas, etc. Es decir, en Soria se pueden estimar 6 ó 7 m³/s de caudales subterráneos altamente regulados. Las fuentes del río Aranda, Jalón, Blanco, Sagides, Izana y por lo general los manantiales de los ríos del Sur de la provincia, pueden considerarse como de regularidad media. Los de la Galiana, Fuentona, Fuentetoba y nacimiento del río Mazos, por ejemplo, son bastante variables.

5. RELACIONES AGUAS SUPERFICIALES AGUAS SUBTERRÁNEAS

5.1. LOS RÍOS SORIANOS, GENERALIDADES.

Teniendo en cuenta que los acuíferos en Soria están muy poco explotados, con pocos sondeos y pozos que nos puedan proporcionar información acerca de su funcionamiento, es la observación de los manantiales y por ende de los ríos que originan (y también de sus sumideros, como entradas de agua a los acuíferos), una herramienta de suma importancia y ayuda. De ahí el interés de incluir en este libro un apartado dedicado a los ríos que circulan por esta provincia.

Los ríos que discurren por la provincia de Soria pertenecen a la Cuenca del Duero y a la del Ebro. La vertiente atlántica tiene una extensión de 7.000 kilómetros cuadrados, frente a los 3.000 kilómetros cuadrados que tiene la mediterránea.

El Duero es la principal corriente fluvial de Soria, destacando sobre sus afluentes y sobre los ríos mediterráneos, todos ellos mucho más modestos. El especial trazado en arco del Duero en la extremadura soriana, y la cercanía de divisorias de aguas con el Ebro y el Tajo, hace que los afluentes de este río sean cortos y con desagüe rápido hacia la arteria principal, que no sólo lo es de la escorrentía superficial, sino también de la escorrentía subterránea, que fluye directamente al río, de forma abundante, en el área de Gormaz (Foto 24).

Los afluentes más importantes del Duero por la izquierda son el Revinuesa, Tera y Razón, Merdancho, Rituerto, Morón, Escalote, TaIegones, Caracena y Pedro. Por la margen derecha recibe aguas de los ríos Ebrillos, Golmayo, Mazos, Izana, Andaluz, Uceró, Rejas y Arandilla.

Los principales afluentes del Ebro son el Cidacos, Linares, Alhama, Queiles y Jalón, con los afluentes de este último Manubles, Henar, Nágima y Blanco.

A continuación se incluye un cuadro con los datos de los caudales de los ríos más importantes de la provincia. (Cuadro 7, pág. 135).

Los ríos sorianos presentan una variabilidad importante en sus caudales, aunque no tan acentuada como en otras regiones de España. Ello se debe a que la lluvia se distribuye a lo largo del año sin grandes oscilaciones, y a las nieves acumuladas y embalses sub-

terráneos de las montañas ibéricas, que contribuyen a la suavización de los caudales. (Sáenz. 1987)

Las observaciones más destacadas, de orden hidrológico general, se pueden resumir así:

a) Como ya se ha dicho, aparte del Duero, los ríos de Soria son por lo general de escaso caudal, aunque el Ucero y el Tera pueden considerarse relativamente caudalosos. El Jalón también lo es fuera de la provincia y bien adentrado en la de Zaragoza. El Ucero tiene una aportación media anual en Osma de 221 hm³, con variación entre 518 hm³ en 1965/66 y 53 hm³ en 1975/76. Del Tera no se tienen datos, aunque su afluente Razón tiene 1 m³/s en su cabecera y mucho más aguas abajo.

b) La vertiente del Duero es de pendiente suave si exceptuamos la parte alta de su cabecera. Sin embargo, la del Ebro es empinada, y sus afluentes tienen una gran capacidad erosiva y remontante. La labor de zapa hace pues retroceder la divisoria a favor de la del Ebro.

c) Los ríos Ebrillos, nacimiento del Duero y Revinuesa, están regulados por el embalse de la Cuerda del Pozo, de 200 hm³ de capacidad. El río Aranda lo está por el embalse de Maidebera, de 25 hm³ de capacidad (aunque este río es enteramente zaragozano, se incluye aquí porque gran parte de las aguas de su nacimiento proceden de acuíferos sorianos). Aparte está el embalse de Los Rábanos, de aprovechamiento eléctrico, aguas abajo de la capital; el de Monteagudo de las Vicarías, de 1 hm³ de cabida, en el río Nágima, y, finalmente, el pequeño embalse de Vildé en el río Caracena. (Fotos 34, 35, y 36)

d) Los ríos Tera, Razón, cabecera alta del Duero, Revinuesa y Araviana, presentan una marcada influencia nival. El primero, de las nieves de Piqueras, el Razón de la Sierra de Cebollera, el Duero y el Revinuesa de Urbión, y el Araviana del Moncayo. (Foto 37)

e) Los ríos Linares, Cidacos, Alhama, Nágima y Henar, son de caudal muy irregular, debido a la impermeabilidad de los terrenos de sus respectivas cuencas y de lo acusado de sus pendientes. La alimentación subterránea en estos ríos es muy pequeña, excepto en el Henar.

Los ríos sorianos que bajan a La Rioja y a Navarra son de recorrido corto y de caudal escaso, tal como se puede apreciar en la Tabla 7, pág. 135.

f) En el Duero, destacan por su irregularidad los ríos Revinuesa, Ebrillos, Tera, Razón, Merdancho, Rituerto, Morón y Pedro. Todos ellos tienen una gran parte de la superficie de su cuenca de carácter impermeable, wealdense para los cinco primeros y terciaria para los tres últimos.

5.2. RELACIONES RÍOS-ACUÍFEROS.

Con el fin de controlar los caudales y las aportaciones totales de los ríos, el MOPU tiene instaladas una serie de estaciones de aforo en la provincia (Foto 38). Esta red de estaciones estaba concebida a nivel de cuencas hidrográficas y en las cerradas más interesantes para la construcción de futuros embalses, por lo que, a pesar de constituir una fuente de datos muy importante, resulta insuficiente para el estudio de las aguas subterráneas. Se cuenta también con la

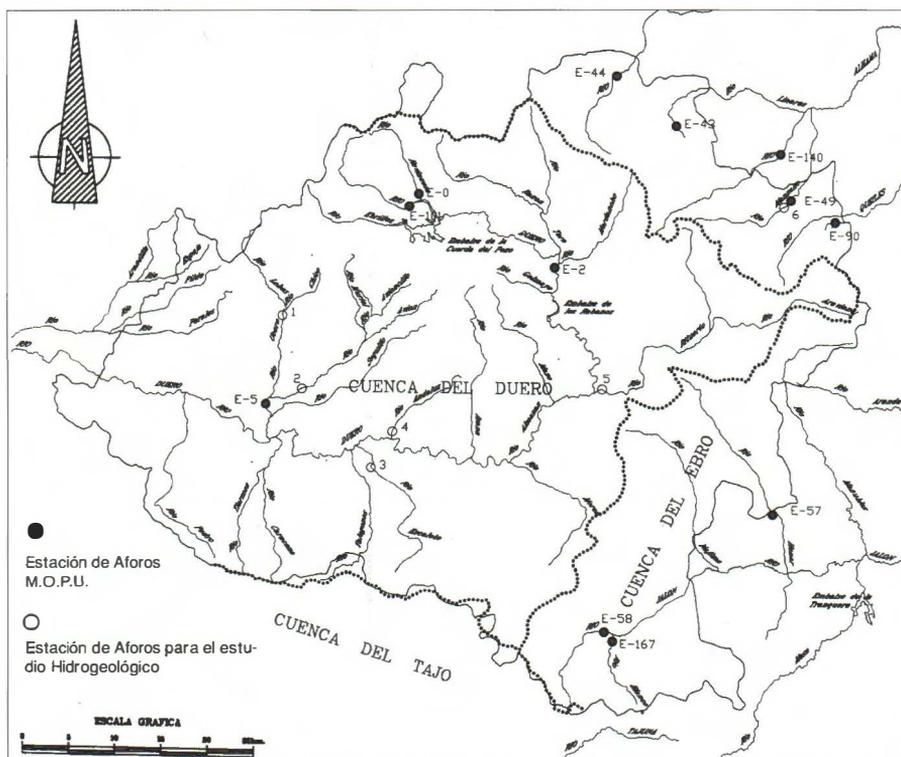


Fig. 14.—Puntos de control de caudales. (Proyecto Hidrogeológico de Soria, SGOP, 1990)

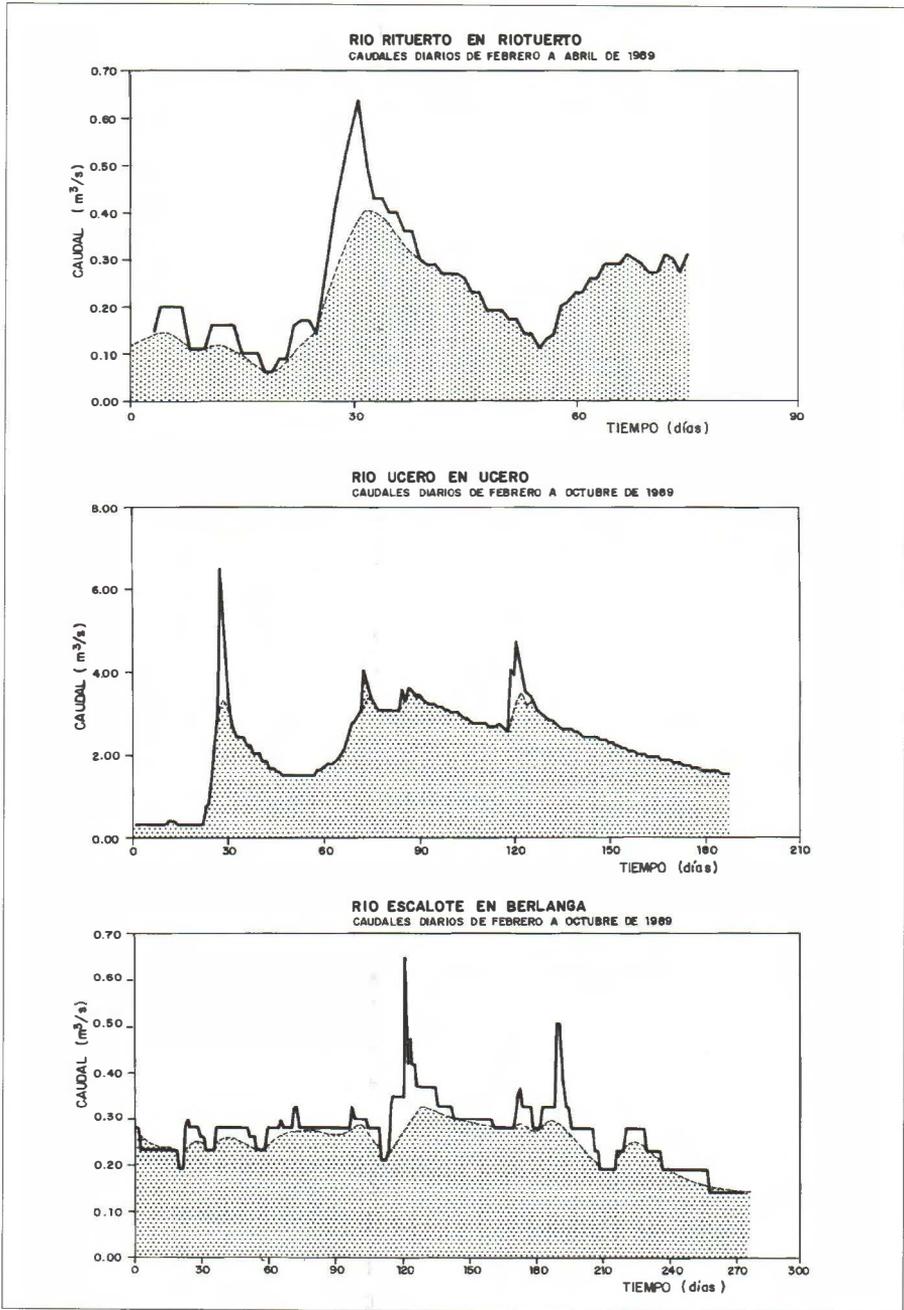


Fig. 16.-Separación de la componente subterránea en varios ríos de Soria durante 1989.

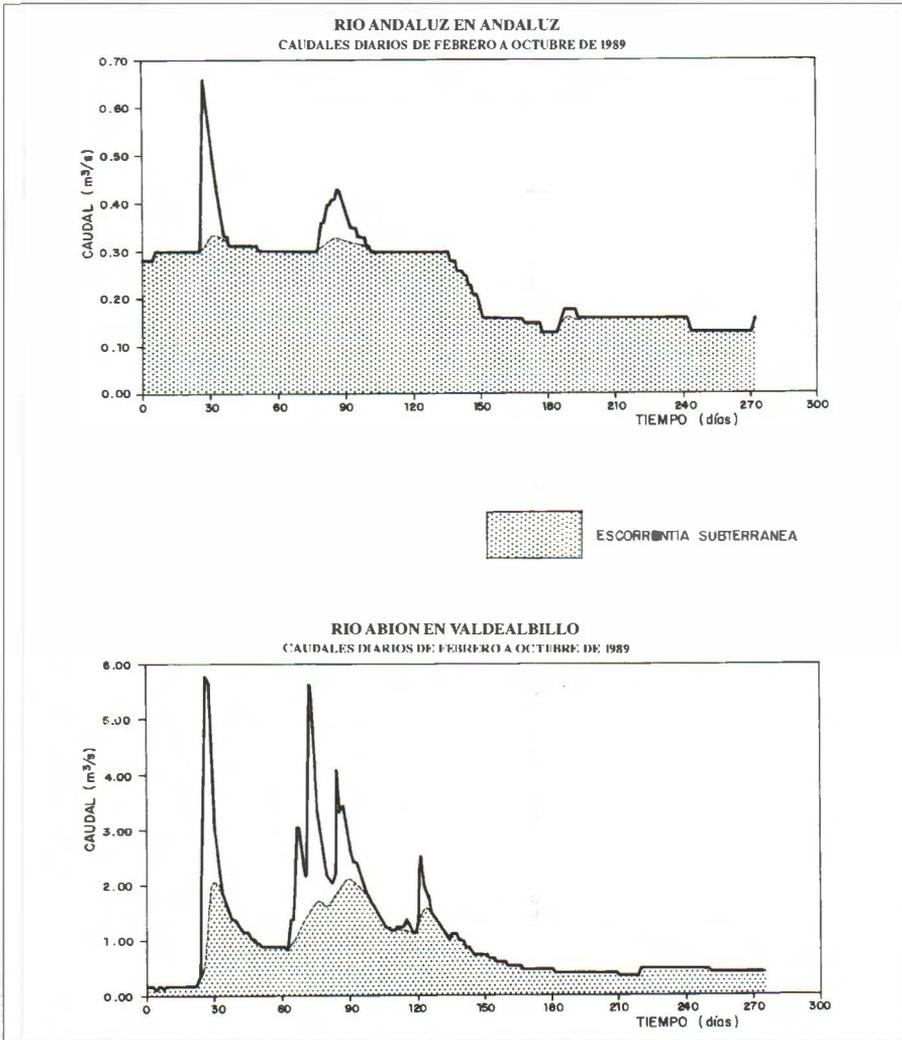


Fig. 16.—(Cont.) Separación de la componente subterránea en varios ríos de Soria durante 1989.

je 1988/89). La escorrentía subterránea fue de $65 \text{ hm}^3/\text{año}$ (91% del total). La pendiente de la curva de agotamiento principal $\alpha_1 = 0,008$ y el volumen hidrodinámico oscila entre $27\text{-}42 \text{ hm}^3$ (Fig. 16)

El Aviión, afluente del Ucero, controlado durante este mismo período de tiempo en la salida de sus acuíferos, tuvo una aportación total de $33,6 \text{ hm}^3/\text{año}$, en la que la componente subterránea repre-

sentaba el 83%. La pendiente de la curva de agotamiento principal es $\alpha_1 = 0,0012$ y el volumen hidrodinámico al inicio de ésta fue de 36 hm³ (Fig. 16). El Avión tiene unos grandes brotes de agua en Muriel de la Fuente: La Fuentona, de 1 m³/s.

En la Estación de Burgo de Osma (Ucero más Avión), la aportación media durante el período 1959/69 fue de 8'339 m³/s. La escorrentía subterránea en este punto se ha obtenido según el método de Barnes y representa el 25% de la total (79 hm³), y el volumen hidrodinámico 77 hm³.

El Andaluz tiene un caudal de base significativo, procedente de los brotes de Valderrodilla y Torreandaluz. En su desembocadura ha tenido durante el período 1988-89 un caudal medio de 240 l/s, de los que el 95% fueron de escorrentía subterránea. La curva de agotamiento principal tiene una pendiente de $\alpha_1 = 0,0022$ y el volumen obtenido por encima de la cota de drenaje fue de 6,3 hm³ (Fig. 16).

Aparte de estos ríos, merece la pena destacar al mismo Duero. Entre su nacimiento y Garray (donde lleva 12'6 m³/s) el Duero apenas recibe aportes subterráneos. Entre Garray y Los Rábanos hay una descarga subterránea procedente del acuífero calcáreo de Soria de unos 766 l/s.

La diferencia de caudales entre la estación de aforos de Garray y Los Rábanos en régimen natural representa sobre todo la escorrentía subterránea del acuífero carbonatado de Soria y que de manera difusa descarga en el Duero y en el Merdancho. Hay que tener en cuenta sin embargo los aportes de los ríos Merdancho y Galmayo, ríos ambos poco caudalosos y con un flujo de base significativo. Aplicando el método de Barnes al hidrograma resultante de la diferencia de caudales, y restándole los 115 l/s que corresponden al manantial de Fuentetoba (nacimiento del Galmayo), resultan 24 hm³/año de aportación subterránea (766 l/s), que son los recursos del acuífero carbonatado de Soria.

Hasta Andaluz apenas hay brotes en el río. Entre este pueblo y Gormaz, el río recibe unos 4 m³/s procedente de los grandes manantiales situados en sus orillas, en Andaluz, en Quintanas de Gormaz, Gormaz, Vildé y los que fluyen ocultos en su cauce, todos ellos coincidentes con los afloramientos cretácicos calcáreos que atraviesa. Luego, en San Esteban de Gormaz gana al menos 0,5 m³/s. Desde aquí, y hasta su salida a la provincia de Burgos no existen descargas importantes en su cauce.

– Cuenca del Ebro.

El río Añamaza -afluente del Alhama- está muy regulado por las fuentes kársticas de Añavieja y Dévanos, de casi 500 l/s. La escorrentía subterránea del Añamaza en Soria puede llegar a representar el 85% de la total, es decir, unos 14 hm³/año. Las fuentes de Dévanos tienen un caudal medio de 150 l/s, su curva de agotamiento tiene como pendiente 0,0094 y el volumen hidrodinámico es de 1 hm³, (estos valores son la media de diez curvas de agotamiento localizadas a lo largo del período de tiempo comprendido entre 1930 y 1975) (Tabla 10, pág. 139). Las de Añavieja no han podido ser analizadas en detalle.

La escorrentía subterránea del Queiles soriano representa la casi totalidad de su aportación, proveniente del manantial de Voz-mediano. El caudal de esta fuente es de 1.115 l/s. El coeficiente de agotamiento es de 0,003 y el volumen hidrodinámico vale 25 hm³ (valores medios de trece curvas de agotamiento durante el período 1962-1982).

A igual que el Queiles, la mayor parte del caudal del río Aranda es de origen subterráneo. Procede del manantial de Aranda del Moncayo, de más de 600 l/s de caudal medio. (Tabla 11, pág. 140).

El río Henar tiene una escorrentía subterránea de 4,6 hm³/año que representa el 57% de la total. Esta proviene de los manaderos de Deza, cuya curva de agotamiento tiene un coeficiente de 0,0057 y con un volumen hidrodinámico medio de 2 hm³ (valores medios de 43 curvas de agotamiento observadas durante el período 1945-1975). (Tabla 12, pág. 140).

El Jalón está controlado en su cabecera soriana por las estaciones de Jubera y Barrioblanco en su afluente el arroyo Blanco. Más abajo está la estación de Cetina de Aragón. En la primera se ha estimado una escorrentía subterránea de 16'3 hm³, que constituye el 65% de la total (25 hm³). Aquí la curva de agotamiento principal tiene un coeficiente de 0,0048. El volumen hidrodinámico medio es de 12'3 hm³ (valores medios de 55 curvas de agotamiento observadas durante el período 1948-1978, Tabla 13, pág. 142).

El Blanco tiene una aportación media de 11 hm³, que se considera casi en su totalidad como escorrentía subterránea. La curva de agotamiento tiene un coeficiente de 0,0016 y el volumen hidrodinámico vale 16'8 hm³ (valores medios de 3 curvas de agotamiento observadas durante el período 1971-1973).

En Cetina no fue posible separar la escorrentía subterránea del hidrograma.

La componente subterránea del Jalón proviene principalmente de las fuentes de Esteras, Fuencaliente, Layna y Urex.

El río Mesa tiene en su cabecera diversos fenómenos de resurgencias. Sin embargo, mantiene constante su caudal a partir de Mochales, donde existe una gran manadero de 1.500 l/s de caudal medio; parte de las escorrentías subterráneas de este manantial provienen de la zona soriana de Iruecha.

– Cuenca del Tajo.

El aporte subterráneo del río Tajuña le viene de las calizas jurásicas de Aguilar de Anguita y cercanías de Soria. La escorrentía subterránea es de 12 hm³/año, que es la mayor parte de su caudal.

Con alimentación subterránea menos importante, se pueden citar los siguientes ríos:

– Cuenca del Duero.

El Merdancho tiene cierto caudal de base procedente de los ojos kársticos de Renieblas, aunque también es causa de regularidad su cuenca arborescente, que le proporciona agua de diversos cauces. El Golmayo está parcialmente regulado en su nacimiento por el manantial de la Toba, de 115 l/s. Igual ocurre en el Mazos, con el manantial de Cueva Pachón. Al Izana le ocurre algo parecido, nace en Villabuena, se pierde un poco más abajo y resurge en Cuevas de Soria, habiendo ganado aquí más caudal. Desde este lugar hasta su desembocadura, en Matamala, no vuelve a adquirir apenas aporte subterráneo.

El Rituerto y el Morón tienen un caudal de base significativo, a pesar de la impermeabilidad de su cuenca. Ello se debe, para ambos ríos, a la poca pendiente de sus vertientes y a la escorrentía hipodérmica procedente de los extensos campos de labor; en el Morón, además, hay que contar con los brotes, aunque modestos, de Momblona. Según los aforos del SGOP (1990), el Rituerto tuvo un caudal medio de 223 l/s donde la escorrentía subterránea representa el 85%. La curva de agotamiento presenta una pendiente de $\infty = 0'060$, con un volumen hidrodinámico correspondiente de 0,5 hm³ (ver Fig. 16).

El Bordecorex, afluente por la derecha del Escalote, se pierde en Alcubilla de las Peñas. Después, y en un recorrido de más de 30 km. el río baja casi siempre seco. El Escalote recibe gran parte de su caudal subterráneo en La Riva de Escalote y luego, ya cerca de su desembocadura, en Berlanga de Duero. Este río tuvo en 1988-89 una aportación equivalente anual de $8'6 \text{ hm}^3/\text{año}$ (274 l/s), de los que el 68% se estiman que correspondían a escorrentía subterránea. La pendiente de la curva de agotamiento principal es de 0,0034 y el volumen hidrodinámico 8 hm^3 (Fig. 16).

Desde su nacimiento hasta Torrevicente el río Talegon es un pequeño arroyo. En este último lugar se infiltra para volver a salir en Lumias, donde gana en caudal. Sin que este caudal varíe sustancialmente llega a Arenillas, donde se vuelve a perder definitivamente la mayor parte del año. En el tramo final recibe una modesta cantidad de agua.

El río Caracena gana aportes subterráneos en Caracena y algo más abajo. El Tielmes, su afluente, se pierde a veces entre Fresno y Hoz de Abajo. Aunque el débito del Caracena no se ha controlado, es muy probable que se trate del río más caudaloso de los de la zona Sur de Soria, al menos en escorrentía subterránea.

El río Pedro, de componente subterránea poco importante, tiene sus brotes más significativos en Pedro, su nacimiento, y en Cuevas de Ayllón. Los arroyos de Castillejo de Robledo y de Valdenzuelo tienen también caudales de base significativos.

Los ríos Rejas, Pilde y Espeja, todos muy similares, tienen su nacimiento (y origen de la mayor parte de la escorrentía subterránea), en el acuífero calcáreo cretácico de la terminación, hacia Burgos, de la sierra de Cabrejas. La escorrentía subterránea de todos ellos podría estimarse en 17 hm^3 .

– Cuenca del Ebro.

El Val, afluente del Queiles, de 240 l/s de caudal medio, está parcialmente regulado con los Ojillos del Keyles, en la Dehesa de Ágreda, y en la fuente Vomitrosa, de Ólvega. La escorrentía subterránea se estima en un 40%.

El Manubres recoge un brote modesto en Ciria, aunque aumenta considerablemente de caudal subterráneo en Torrelapaja y Berdejo, ya en Zaragoza (unos 350 l/s).

Los arroyos de Sagides e Iruecha también tienen pequeños brotes en su cabecera.

Los trasvases subterráneos de Cuenca.

El hecho de que gran parte de los acuíferos calcáreos, en Soria, se localizan en la divisoria de ríos o cuencas de distintos mares, hace que se den cuatro capturas subterráneas importantes (Fig. 17), ya que otros fenómenos de pérdidas y resurgencias menores se han citado con frecuencia en la descripción de los acuíferos.

a) Trasvase del Araviana al Queiles: La mayor parte de las aportaciones del manantial de Vozmediano (1,1 m³/s) proviene de la recarga en el desarrollado aparato kárstico de la cabecera del río

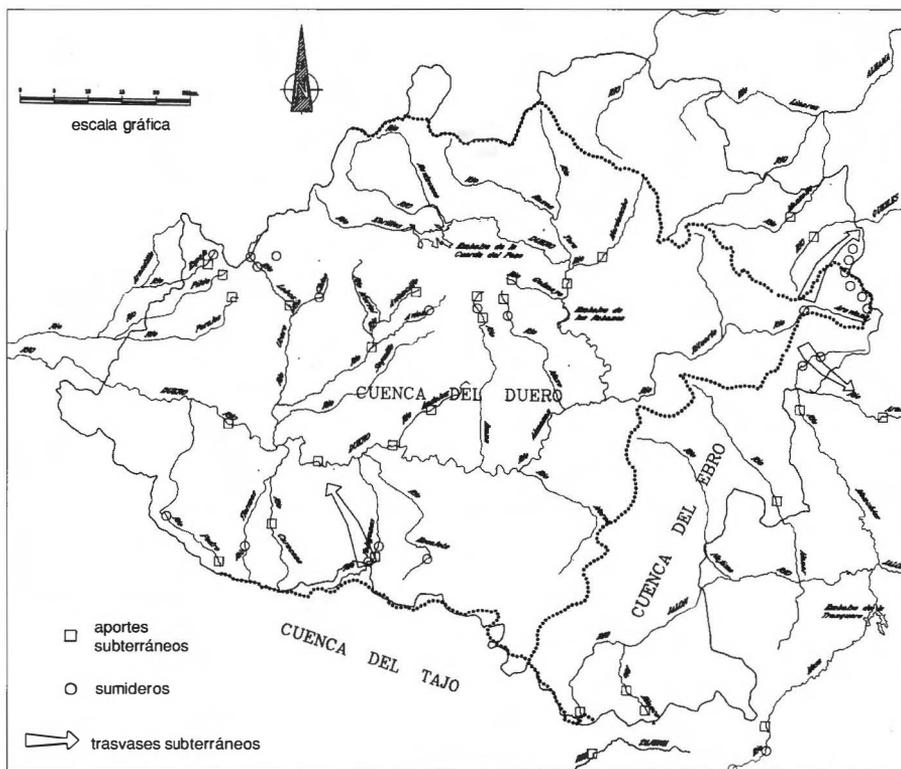


Fig. 17.—Aportes subterráneos, sumideros y trasvases subterráneos en la provincia de Soria.(Tomadas de SGOP, 1990).

Araviana, cuyas escorrentías superficiales no alcanzan el estrecho del mismo nombre salvo en avenidas, calculándose que sólo 0,26 m³/s/año lo traspasan realmente, a pesar de su importante cuenca nival (más de 60 km²). Es decir, cerca de 25 millones de m³ anuales pasan subterráneamente de la Cuenca del Duero a la del Ebro, fenómeno que es conocido en mayor o menor grado por los habitantes de la zona y que tal vez explique, en parte, el dicho local: “Moncayo traidor, que haces pobre a Castilla y rico a Aragón”

b) Trasvase del Araviana y Manubles al manantial de Aranda de Moncayo: No se puede explicar el gran caudal del manantial de Aranda del Moncayo (0'6-0'7 m³/s) si no se considera toda su área de alimentación que se prolonga más allá de la propia cuenca hidrográfica del río Aranda, adentrándose a la del Manubles y hasta la del Araviana, éste ya perteneciente al Duero. Efectivamente, tanto uno como otro río presentan sendos sumideros en Noviercas y entre Borobia y Ciria, en el mismo acuífero que el de la fuente de Aranda.

c) Los fontarrones de Gormaz: El escaso caudal que llevan los ríos del Sur de la provincia, que no corresponde con la extensión de sus cuencas, se explica por las pérdidas que en ellos existen (como es el caso del Talegonos y el Bordecorex, por ejemplo), que van dirigidas hacia las descargas que hay en el Duero, en el área de Gormaz.

d) Travase del río Rituerto a los manantiales termales de Deza y Alhama de Aragón: Una parte considerable del área de recarga de los manantiales de Deza y Alhama de Aragón se sitúa en los afloramientos carbonatados de las Sierras de Cardejón, La Pica y Tajahuerce (véase capítulo 11).

Los caudales subterráneos en el estiaje.

Durante los ocho meses comprendidos entre febrero y octubre de 1989 se tuvo la gran oportunidad de aforar los caudales diarios subterráneos de los ríos tras un prolongado estiaje sin llover casi nada (y que siguió así durante unos meses más), en pleno invierno, con las compuertas del embalse de la Cuerda del Pozo cerradas, y turbinando cada dos o tres días en el de Los Rábanos; los canales estaban vacíos. Los 139 aforos realizados se hicieron en campañas muy cortas, en distintos puntos y tramos de ríos y arroyos cubriendo prácticamente la totalidad de los que llevaban agua aquel invierno (Fig. 18) (SGOP, 1990).

En la figura 19 pueden verse los aforos realizados en cada una de las 34 subcuencas en que se ha dividido el territorio provincial, así como los valores aforados en las mismas.

De los aforos realizados merece una atención especial la campaña de medidas diferenciables llevadas a cabo en el Duero, en el área de Gormaz, que es donde aparecen las mayores descargas subterráneas. Estas medidas pueden considerarse como fiables, y no se hubiesen podido realizar con el Duero en régimen normal de crecida.

De los resultados obtenidos (Figs. 19 y 20), llama poderosamente la atención la gran ganancia que adquiere el Duero en Gormaz. La cuantificación de estas descargas subterráneas constituye uno de los aspectos más interesantes de este capítulo.

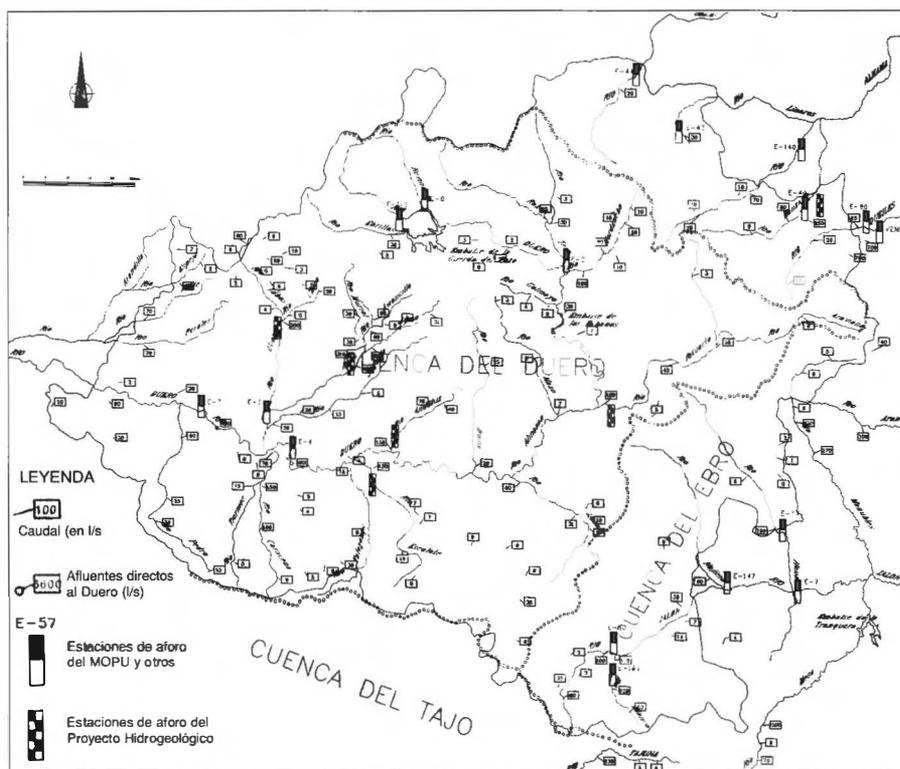
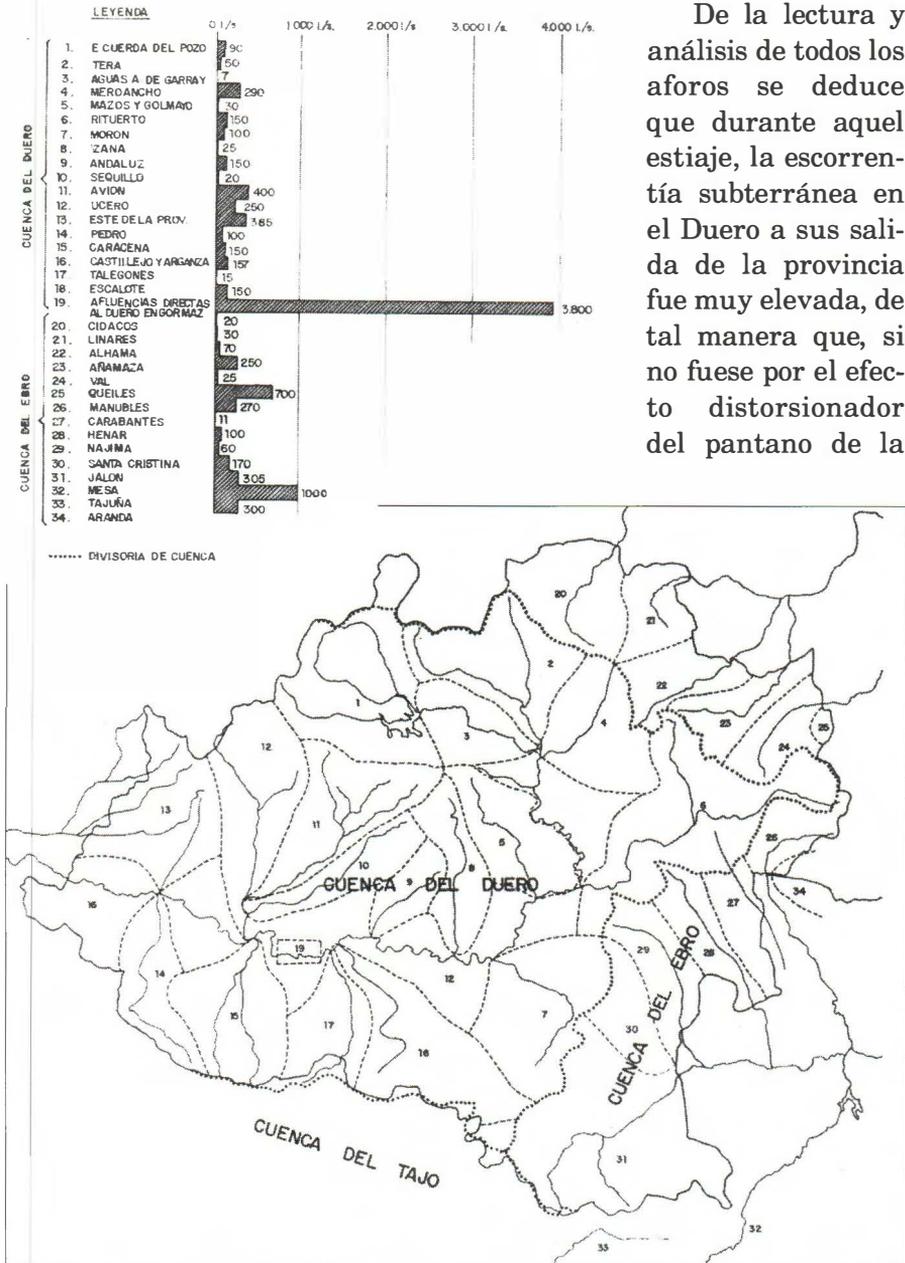


Fig. 18.—Aforos directos en los ríos sorianos durante el estiaje de 1988-89.(Tomadas de SGOP, 1990).



De la lectura y análisis de todos los aforos se deduce que durante aquel estiaje, la escorrentía subterránea en el Duero a sus salida de la provincia fue muy elevada, de tal manera que, si no fuese por el efecto distorsionador del pantano de la

Fig. 19.—Subcuencas y valores aforados en las mismas (1988-89).(Tomadas de SGOP, 1990).

Cuerda del Pozo, se podría estimar en más del 90%. Para el Duero, el conjunto total dió una aportación de 5,83 m³/s, que era el 94% de lo que entonces pasaba por la estación de aforos de San Esteban de Gormaz. De ellos, casi el 70% correspondían a los manaderos del Duero en Gormaz y San Esteban.

En el Ebro, la aportación subterránea representa la mayoría de la escorrentía total. Se estimaron unos caudales de estiaje de 2.650 l/s. Hay que tener en cuenta que el efecto regulador de las sierras es aquí mucho más reducido, excepto en el Moncayo, donde queda absorbida, por otra parte y casi exclusivamente, por el acuífero kárstico de Vozmediano.

6. CARACTERISTICAS, CALIDAD Y CONTAMINACION DE LAS AGUAS

6.1. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS.

Trabajos previos. Red de muestreo

Las dos consideraciones que han presidido este análisis se pueden resumir así:

1) Por una parte, ya que el escaso volumen de aguas subterráneas que se extrae se emplea de forma importante para el abas-

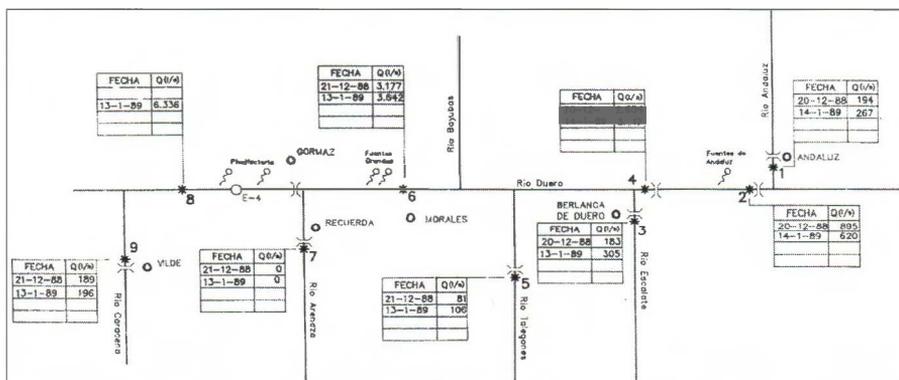


Fig. 20.—Aforos diferenciales en el Duero en el área de Gormaz (SGOP, 1990).

tecimiento a núcleos urbanos, conocer la potabilidad de estas aguas es uno de los aspectos prácticos más importantes. Para ello se cuenta con los datos proporcionados por el Instituto Nacional de la Salud de Soria (análisis bacteriológicos y de índices químicos de contaminación). Los pozos de abastecimiento no se encuentran necesariamente en los acuíferos principales, es más, la mayor parte de las veces están ubicados en terrenos que podríamos considerar como poco permeables.

2) El segundo punto se refiere a las características químicas de las aguas de los acuíferos con mayores recursos hidráulicos de la provincia, que servirán de contraste a las hipótesis de funcionamiento hidrogeológico. Para su estudio se contaba con la siguiente información: datos procedentes del Estudio Hidrogeológico de Soria (SGOP, 1990), base de datos del Instituto Tecnológico y Geominero de España y reconocimientos de la Junta de Energía Nuclear en zonas concretas : Álvarez Herrero y otros (1972 a y b, 1973, 1975 a y b, 1976 a y b).

La interpretación fundamental se ha hecho en base a 71 análisis que proceden del estudio del SGOP (1990), y que corresponden a muestras de distintos puntos de aguas tomadas en los meses de abril y mayo de 1989. El criterio de selección de puntos de muestreo fue muy riguroso por lo que la red se puede considerar representativa. (Fig. 8).

En las muestras se determinaron cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, nitratos, sodio, magnesio, calcio, potasio, nitritos, litio, boro, fluor, amonio, fosfatos, conductividad, sólidos disueltos, pH, dureza, hierro, manganeso y sílice. En campo se determinaron también la temperatura y la conductividad.

Los muestreos se realizaron en casi todos los acuíferos más importantes de la provincia. Aquí, los puntos de muestreo corresponden casi siempre a manantiales porque en Soria, los grandes acuíferos están prácticamente sin explotación, y escasean los pozos y los sondeos.

Como se verá más adelante, los resultados obtenidos de este muestreo indican que el quimismo de las aguas es bastante parecido en todos los acuíferos debido a que su naturaleza y funcionamiento hidráulico es también semejante.

La red de muestreo fue la siguiente:

A) Zona de la Sierra de Cabrejas.

15 Fuentetoba. 16 El Tobazo o nacimiento del río Mazos. 17 La Fuentona de Muriel. 18 Pozo de abastecimiento a Cabrejas del Pinar. 19 Manantial de La Galiana (río Ucero). 20 Ojos de Blancos. 21 Manantial de Valderrodilla. 22 Cuevas de Soria (nacimiento río Izana). 23 Manantial de la Ermita, en Fuencaliente del Burgo. 24 Manantiales de Alcubilla de Avellaneda. 26 Manantial de Rejas de Ucero. 27 Manantiales del Milanos, en Blacos. 28 Fuente del Puente, Cuevas de Soria. 66 Pozo, en San Leonardo de Yagüe. 67 Pozo, en Valdemaluque. 68 Pozo, en Vadillo. 69 Pozo, en Nafría La Llana. 70 Pozo, en Villacierros.

B) Zona del Moncayo.

1 Manantial de Vozmediano. 2 Manantiales de Añavieja. 3 Ojillos del Queiles. 5 Manantial de Purujosa. 6 Manantial de Ciria. 7 Pozo de abastecimiento a Noviercas. 8 Manantial de Pomer. 9 Manantial de Aranda de Moncayo. 10 Manantiales del Manubles en Berdejo. 11 Fuentes de la Dehesa de Valdejeña. 12 Manantial de Deza. 74 Pozalmuro (pozo). 79 Pozo en Pinilla del Campo. 41 Fuente de Deza.

C) Páramo de Maranchón y tierra de Medinaceli.

42 Manantiales de Sagides. 43 Manantiales de Chaorna. 44 Manantial del Mesa, en Mochales. 46 Fuentes de Arcos de Jalón. 47 Fuentes de Somaén. 48 Fuentes de Ambrona. 49 Manantial de Urex. 50 Manantial de Jubera. 51 Nacimiento del Jalón, en Esteras de Medinaceli. 62 Fuencaliente de Medina. 75 Manantiales del Tajuña, en Anguita. 61 Pozo, en Iruecha.

D) Zona Sur.

29 Manantial de la piscifactoria, Vildé. 30 Manantial de Vildé (Central eléctrica). 31 Fuentes Grandes, de Quintanas de Gormaz. 32 Manantial de La Laguna (Gormaz). 33 Fuente de

Andaluz. 34 Pozo en Burgo de Osma. 35 Fuente del Molino, en San Esteban de Gormaz. 36 Manantial de la Arboleda (Bergalanga de Duero). 37 Manantiales de la Riba del Escalote. 40 Manantial de Lumías. 71 Pozo en Fresno de Caracena. 72 Pozo en Vildé. 77 Manantial de Fuencaliente, en Caracena.

E) Aluvial del Duero.

53 Pozo en El Royo. 54 Pozo en Garray. 60 Pozo en San Esteban de Gormaz. 59 Pozo en La Rasa.

Otros.

14 Manantial de Viniegra de Arriba (La Rioja). 80 Pozo en Aldehuela de Periañez. 76 Manantial de Valdanzuelo. 64 Pozo, en Rello. 78 Fuentes de Momblona. 52 Manantial de Pedro. 63 Pozo, en Marazovel. 65 Fuente de Alpanseque. 81 Manantial de Radona. 45 Manantial de Almaluez. 34 Pozo, en Valdelubiel.

Características hidrogeoquímicas

Las facies químicas son bastante homogéneas. Más del 90% de las muestras son de tipo bicarbonatado cálcica, de mineralización ligera a notable y duras. Son aguas propias de acuíferos calcáreos. (Fig. 8)

Existen también casos aislados de aguas sulfatadas cálcicas e incluso cloruradas sódicas (Fuencaliente de Medina), que pueden relacionarse con flujos profundos y/o condiciones litológicas locales.

En la Sierra de Cabrejas, las aguas subterráneas son bicarbonatadas cálcicas, de gran uniformidad. Los contenidos en sulfatos, cloruros y nitratos se mantienen en niveles muy bajos. Respecto a los cationes, los porcentajes de magnesio pueden sobrepasar el 30% del total.

Las temperaturas de emergencia se mueven en un amplio rango, de 9 a 17°C (coexistencia de flujos cortos y largos) aunque dependa también de la temperatura media del área de recarga, mientras que la variación de pH es pequeña, de 7.6 a 7.8. Los valores de sílice disuelta son bajos, sobrepasando raramente 6 mg/l.

Es de destacar la muestra nº 33 correspondiente al manantial Andaluz, que tiene carácter sulfatado cálcico, una temperatura de 17°C, así como 10'5 mg/l de sílice en solución y pH básico de 7'9. Todas estas características indican con toda probabilidad que este manantial drena flujos profundos que han estado en contacto con materiales solubles sulfatados y silicatados.

En la zona del Moncayo, también hay predominio de las facies bicarbonatadas cálcicas, aunque esta vez la presencia de sulfatos y nitratos es apreciablemente mayor. Las temperaturas registradas se encuentran entre 14° y 16°C.

Los materiales jurásicos y wealdenses de la zona oriental son muy ricos en sulfuros (piritas), que por oxidación pueden incorporarse al agua como sulfatos. Así mismo la presencia de silicatos parece mayor que en la Sierra de Cabrejas obteniéndose valores de sílice disuelta mayores (de 6 a 10 mg/l).

El punto nº 12, Deza, destaca por su alta temperatura de emergencia, 19'5°C, y conductividad superior a 700 μ S/cm por lo que puede tratarse de la descarga de un flujo de mayor recorrido que el resto e hidrogeológicamente relacionado con las fuentes termales de Alhama de Aragón.

En la zona de Maranchón y Tierra de Medinaceli, las aguas son frías (9 a 14°C), de carácter bicarbonatado cálcico, aunque con proporciones apreciables de magnesio y sulfatos en algunos puntos. Los nitratos pueden llegar a representar el 10% del total aniónico.

Las características señaladas indican la existencia de flujos rápidos; posiblemente la karstificación sea importante en la zona (y por tanto la velocidad de circulación). Los pH medidos (alrededor de 7'9) indican un medio básico, propicio para la formación de tobas y travertinos, tan abundantes, que forman terrazas de esta naturaleza en el río Blanco, por ejemplo.

Los acuíferos del sur de la provincia también son predominantemente bicarbonatados cálcicos. Algunas de las descargas se producen en el propio cauce del Duero, como las de las muestras 31 y 32 (Fuentes Grandes y Manantial de La Laguna), o en otros cauces, como la muestra 37, que aparece en el río Escalote. Las temperaturas de emergencia (15-16°C) indican largos recorridos.

Otros puntos descargan flujos de agua más locales, y registran temperaturas apreciablemente más frías (9-13°C).

Por último, en el aluvial del Duero también hay predominio del tipo bicarbonatado cálcico, pero los niveles del resto de iones pueden ser muy considerables (véase muestra 53 con altos contenidos de sulfatos y de sodio). En general, y como cabía esperar, poseen concentraciones de nitratos elevadas (índice de contaminación). Las cantidades de sílice en solución son altas, entre 10 y 20 mg/l, lo que está en concordancia con la mayor abundancia de materiales detríticos silíceos de las terrazas del Duero.

Ya se ha comentado que en algunas zonas del aluvial se localizan descargas importantes de los acuíferos calizos, como los manantiales 31 o 32, procedentes de la zona sur de la provincia, o el número 35, Fuente del Molino, que drena materiales calizos de los alrededores de San Esteban de Gormaz.

Cabe mencionar también la existencia de fuentes mineromedicinales, que se refieren a pequeños rezumes de tipo sulfhídrico y ferruginoso. El origen de estas aguas está en relación con los materiales wealdenses, en los que hay gran abundancia de sulfuros (pirritas) y sulfatos (yesos), o con los del Keuper, ricos en evaporitas. En la parte segunda de este libro se presenta un estudio monográfico de este tipo de manantiales.

En concreto, hay fuentes sulfhídricas en Villarijo, Ontálvaro, Sarnago, Valdeprado, Cigudosa, Suellacabras, Ágreda, Esteras del Ducado, Vinuesa, etc. Fuentes ferruginosas en Vinuesa, Villarijo, Sarnago, Ventosa, Valdeprado, etc.

6.2. CALIDAD DEL AGUA PARA ABASTECIMIENTO A POBLACIONES.

Para esta evaluación se dispone de la información proporcionada por los laboratorios de Sanidad de Soria sobre los manantiales y pozos utilizados en toda la provincia para abastecer núcleos de población.

Desde el punto de vista químico, la gran mayoría de las aguas son aptas para consumo. Sin embargo hay un porcentaje elevado de aguas no potables desde el punto de vista bacteriológico, por lo que es necesaria la aplicación de tratamientos desinfectantes en la gran mayoría de captaciones (cloración, etc).

Los componentes que pueden afectar localmente las condiciones de potabilidad química son fundamentalmente nitratos (en áreas agrícolas), cloruros (valle del Jalón) y hierro (zona de Pinares y Cidones).

Nosotros aquí solo comentaremos el estado actual de la potabilización de las aguas de abastecimiento urbano según la encuesta de Equipamiento e Infraestructura Local realizada por la Diputación Provincial en 1987.

La mayoría de las aguas de Soria gozan de potabilización, pero aún así es de destacar que de los 484 núcleos de población aún hay 127 que no efectúan ningún tratamiento y la mayoría de ellos corresponden a núcleos pequeños : 114 son inferiores a 100 habitantes y los otros 13 se sitúan en el grupo de 100 a 499 habitantes.

La mayoría de los tratamientos se hacen en los depósitos (el 75%) siguiéndole en importancia la ubicación en la captación con un 19%. Puesto que el contaminante más frecuente suele ser de origen orgánico, no es de extrañar que el 96% de todos los tratamientos aplicados consista en la cloración.

El control de las aguas se hace en un 56% con periodicidad mensual, en un 33% con periodicidad semanal o quincenal, y solo en un 9% con periodicidad diaria. Para los 8 municipios mayores de 1.000 habitantes la periodicidad es diaria y es semanal en 4.

Este control, parece que compete a la comunidad autónoma, si bien es gestionado en muchos casos por los propios municipios.

6.3. APTITUD DE LAS AGUAS PARA RIEGO.

Es obvio que la aptitud de un agua para riego no puede establecerse tan solo en función de sus caracteres fisicoquímicos, puesto que también juegan un importante papel las características del suelo y la tolerancia de los cultivos a la salinidad total así como al sodio. No obstante, la clasificación de este tipo es altamente orientativa. Así, según la clasificación de Thorne y Peterson, la mayor parte de las muestras se encuentran en la categoría C2-S1, esto es, aguas de salinidad media y bajo contenido en sodio. En el aluvial del Duero hay algunas muestras de calidad C3-S1, es decir, altamente salinas, en las que es necesario controlar la salinidad incluso con drenaje adecuado.

De acuerdo con el índice de Scott, las aguas son en su mayoría de buena calidad; según el criterio de toxicidad específica del bazo (criterio de Scotfield) tampoco parece haber problemas de tolerancia, excepto en algún punto muy concreto.

6.4. CALIDAD PARA LA INDUSTRIA.

Dado que cada proceso industrial requiere sus propias especificaciones, no se puede dar una idea de conjunto en este sentido.

Únicamente, se puede resaltar que en la zona de Pinares y Cidones, se dan casos de aguas ferruginosas. En otros lugares hay aguas agresivas y en otros aguas de dureza alta, que crearía problemas de incrustaciones y obligaría a tratamientos mediante ablandamientos.

6.5. CONTAMINACIÓN.

Nosotros sólo nos vamos a referir a dos aspectos concretos investigados por nosotros, que se refieren a la contaminación urbana (vertido de aguas y residuos sólidos, en base a la encuesta que la Diputación Provincial realizó en 1987), y a la vulnerabilidad de los terrenos a la contaminación.

a) Vertido de aguas. Depuración de las aguas residuales. (Tabla 14, pág. 144) (situación en el año 1989))

De los 484 núcleos de población existentes en la provincia, solamente 105 tienen algún sistema de depuración de las aguas residuales. Los 379 restantes no disponen de ningún tratamiento; de estos 379 núcleos, 289 son inferiores a 100 habitantes y 76 se sitúan en el grupo de 100 a 499 habitantes. Para los que tienen 500 o más habitantes y que en total son 21, hay 14 sin ningún sistema de depuración por lo que la Administración debería centrar en ellos la atención ya que estos 14 albergan aproximadamente la mitad de la población provincial y el caudal de desagüe por ella originada, seguramente que rebasa los 4 millones de m³ al año. Es de señalar que posteriormente a esta encuesta se construyó la planta depuradora de la capital.

De estos 379 núcleos sin depuración de aguas residuales, el 31% vierten éstas a los arroyos, el 37% a los ríos o acequias, o sea que

en el 68% de los casos producen contaminación directa de aguas superficiales.

Respecto a las 105 entidades de población que tienen algún sistema de depuración, estos sistemas se pueden resumir así:

Las 16 estaciones que figuran en "Otros sistemas" se desglosan así : 6 con tanque in-hoff, 2 con tratamiento primario, 1 con tratamiento secundario, 3 con filtro verde y 4 con otros tipos.

Las tres cuartas partes de las 69 fosas sépticas se localizan en el grupo de núcleos de población de hasta 100 habitantes.

b) Recogida y eliminación de residuos sólidos.

Según los datos en 1989 recogidos se puede ver, que de los 484 núcleos urbanos existentes, el 74% carece de servicio de limpieza y recogida de basuras, concentrándose esta carencia (85%) en núcleos de menos de 100 habitantes y de 100 a 499 (15%). Por encima de 500 habitantes, todos los núcleos urbanos tienen servicio, siendo la periodicidad de recogida de carácter diario o de días alternos, en su gran mayoría.

La producción anual de basuras en toda la provincia es es 89.048 Tm. Soria capital produce el 43% de éstas, y los núcleos entre 1.000 y 10.000 habitantes, el 35%.

Tan sólo el 16% de los núcleos tienen un vertedero adecuado. El 74% carece de servicios, como se ha dicho, y el 10% tienen un vertedero inadecuado.

En cuanto a la clase de tratamiento que se sigue con los residuos, en el 91% de los casos se queman. En sólo 4 se queman y se entierran, y en uno se vierten simplemente. Tanto la adecuación como el tratamiento es más frecuente en núcleos de mayor población.

Para el futuro, se piensan concentrar la mayoría los residuos sólidos en una planta de reciclado construida en la Tierra de San Marcos.

c) Vulnerabilidad de los distintos terrenos a la contaminación.

Se acepta que las unidades hidrogeológicas consideradas a lo largo del presente trabajo -dado que han sido definidas según sus

características litológicas y permeables- establecían por sí mismas una adecuada clasificación a efectos de exponer su susceptibilidad o vulnerabilidad frente a la contaminación.

Así se han establecido los siguientes grupos y que se detallan a continuación.

Terrenos muy vulnerables a la contaminación.

Aluvial del Duero y afluentes.

Estos acuíferos presentan una gran vulnerabilidad, debido a la propagación relativamente rápida de los contaminantes que entran en ellos a través de ríos, arroyos o bien por infiltración directa. Su poder autodepurador frente a la contaminación orgánica y bacteriológica es limitado.

Por ello debe evitarse la implantación sobre estos terrenos de actividades contaminantes, como vertederos de residuos sólidos o vertidos líquidos en superficie o profundidad; asimismo está contraindicada la ubicación de cementerios, debido a que el nivel freático se puede encontrar próximo a superficie. Debe vigilarse la posible contaminación por prácticas agrícolas inadecuadas (exceso de aporte de nitrógeno, etc) así como prestar una especial atención al reacondicionamiento de graveras en explotación o abandonadas.

Acuíferos kársticos con permeabilidad alta.

Son los terrenos acaso más vulnerables a la contaminación, debido a la propagación rápida de los contaminantes que entran en ellos a través de perdederos y sumideros de ríos y arroyos. Además, la circulación subterránea puede ser también muy rápida si el régimen es turbulento. Su poder autodepurador frente a la contaminación orgánica y bacteriológica es muy limitado, a veces nulo.

Por ello, debe evitarse la implantación sobre estos terrenos de actividades contaminantes, como vertido de residuos sólidos o líquidos. También es relativamente frecuente -aunque cada vez menos- utilizar las torcas y simas como vertederos de basuras y animales muertos por infecciones, sobre todo cerdos.

Terrenos en los que la contaminación se puede producir y propagar de forma muy variable.

Los terrenos medianamente permeables, constituidos por alternancias de terrenos karstificados y otros menos permeables, suelen actuar de forma parecida a los acuíferos kársticos s.s, aunque aquí, la propagación es más limitada porque el flujo subterráneo no suele ser tan rápido.

Terrenos poco permeables en los que la contaminación sólo afectaría en la práctica a las aguas superficiales.

Se trata de los terrenos arcillosos terciarios y los del Weald. La contaminación solo afectará a los metros más superficiales, lo que incide, sin embargo, en los pozos excavados poco profundos. Las precauciones a tener en cuenta son las medidas clásicas para la preservación de acuíferos (pozos sellados en sus primeros metros, prohibición de inyección de productos químicos, etc.), aunque aquí el examen individualizado de cada caso podrá reducir la rigurosidad de las medidas a tomar.

Terrenos que contaminan naturalmente las aguas superficiales y subterráneas.

Nos referimos en primer lugar a los materiales triásicos y terciarios con alto contenido en sales solubles; las aguas circulantes por estos materiales pueden presentar a veces una calidad inadecuada para cualquier tipo de uso.

Así, por ejemplo, en el Valle del Jalón, existen manantiales salinos de los que hasta hace poco se aprovechaban de manera industrial. En Arcos de Jalón y en la Cuenca del Nágima, ya en el Terciario, se han tenido que abandonar diversos pozos perforados para abastecimiento y regadío, por el alto contenido en sales de sus aguas.

En segundo lugar, en la zona de Pinares y Cidones, las areniscas del Utrillas, y, sobre todo, del Weald, tienen cemento de tipo ferruginoso que ocasiona altos contenidos en hierro en las aguas de numerosos pozos de Cidones, Pedrajas, Toledillo, Villaverde del Monte, Navaleno, San Leonardo de Yagüe, etc. Muchos manantiales

también contienen en abundancia este elemento, difícil de eliminar, y dejan en el lecho de los arroyos la característica película roja de precipitado.

7. LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Dentro de las diversas actividades que utilizan el agua, aquí nos vamos a centrar en tres usos prioritarios: el urbano, agrícola e industrial.

Según el trabajo del SGOP (1990), en Soria se utilizan unos 27 hm³/año de agua de origen subterráneo. De ellos, unos 22 hm³/año se extraen mediante bombeo; el resto corresponde a manantiales. La estimación de la distribución por usos se efectúa de la siguiente forma:

VOLUMEN DE AGUA SUBTERRÁNEA

USOS DEL AGUA	UTILIZADA (HM ³ /AÑO) (SGOP, 1990)	%
Abastecimientos públicos.....	5'35	19
Regadío	3	1
Ganadería	13'5	50
Industria	5	20
Total	26'95	100

A continuación se hace una descripción de la utilización subterránea en cada uno de los usos mencionados, aunque se detallará mucho más en los abastecimientos públicos, al tratarse del empleo más noble e importante.

7.1. LAS CAPTACIONES DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO URBANO EN LA PROVINCIA DE SORIA

RESUMEN

La provincia de Soria incluye a 495 núcleos de población con un total de 97.006 habitantes. Se ha realizado una encuesta sobre las captaciones de agua que abastecen a poblaciones menores de 20.000

habitantes. Se indica si la captación es de un río, manantial o subterránea, transporte por gravedad o impulsión, disponibilidad, caudales, población atendida, consumo anual de energía, etc. El resumen de esta encuesta da una visión sobre la estructura de los abastecimientos en esta provincia. (Sanz y Sanz, 1994).

7.1.1. PROPÓSITO DEL ESTUDIO Y MARCO DE LA ENCUESTA

Los recursos hidráulicos, como condicionantes de cualquier actividad humana, son un instrumento obligado para la ordenación del territorio. En amplios ámbitos geográficos, esta ordenación del territorio ha venido determinada por la ordenación del agua y con frecuencia se ha olvidado la adecuación del medio físico.

El desarrollo sostenible que se propugna actualmente trata de armonizar el crecimiento económico y la calidad de vida con las necesidades de protección o conservación del medio natural. Ahora bien, la naturaleza es el medio rural y éste es el medio predominante en Soria, por lo que las demandas de recurso hidráulico que exige su protección (conservación de fuentes, caudales de ríos, riberas, parajes, etc.) ha de generar cierta desventaja hacia el desarrollo de algunas actividades económicas.

Con todo ello, las posibilidades y las condiciones de desarrollo del medio rural han estado siempre vinculadas a la gestión y uso de los recursos naturales y, en particular, esa vinculación lo es ahora de manera más estrecha con las posibilidades de disponer de caudales de agua.

A la vista de esta importancia de los recursos hídricos y concretándonos al consumo urbano, se ha creído de interés ofrecer este resumen sobre las captaciones de agua que abastecen los 495 núcleos de población de la provincia de Soria. Su conocimiento, agrupado según diversas clasificaciones, y su comparación con otros ámbitos territoriales, ofrece un panorama sobre la situación del abastecimiento de agua para consumo urbano en la provincia, por lo menos en su parte más problemática: la captación de este recurso.

Los datos proceden de la Encuesta de Infraestructura y Equipamiento Municipales realizada por la Diputación de Soria que con referencia temporal al año 1.986, se hizo en todos los municipios de hasta 20.000 habitantes. A ellos se ha incorporado el de Soria capital.

La unidad de investigación es el núcleo de población considerando como tal a un conjunto de al menos diez edificaciones incluyendo aquellas que, aun estando aisladas, disten menos de 250 m. de los límites exteriores del mencionado conjunto. La encuesta de Soria afecta a 495 núcleos que recogen un total de 97.006 habitantes de hecho, según el Padrón Municipal de dicho año 1.986. Queda fuera del ámbito de la encuesta la población diseminada y que en dicho año ascendía a 559 habitantes.

En las comparaciones que con los resultados relativos de Soria, se harían más adelante con otros ámbitos territoriales (España y cuenca del Duero) se excluye la capital ya que para los otros ámbitos no se incluyen los municipios mayores de 20.000 habitantes.

El grado de agrupamiento de la población en núcleos urbanos influye en el costo que supone atender las dotaciones de agua a todas las entidades de población.

La distribución de estos núcleos, por tamaños de los mismos según población, así como la población que alojan y su comparación con otros ámbitos, es como sigue:

Tamaño de los Núcleos	NÚCLEOS DE POBLACIÓN (%)			POBLACIÓN (%)		
	Soria	Cuenca del Duero (1)	España (1)	Soria	Cuenca del Duero (1)	España (1)
Hasta 100 habitantes	75,8	43,1	49,5	22,0	6,9	3,4
De 101 a 1.000 habitantes	22,0	52,8	38,5	36,8	53,2	19,5
De 1.001 a 5.000 habitantes	2,0	3,5	9,2	32,6	22,5	33,2
De 5.000 a 20.000 habitantes	0,2	0,6	2,8	8,6	17,4	43,9
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

(1) Los resultados correspondientes a España y cuenca del Duero han sido elaborados por los propios autores en base a la información recogida en las encuestas realizadas por las diputaciones provinciales

Estos resultados confirman la gran diseminación de la población rural soriana (excluida la capital): Cerca del 76% de los núcleos

de población no rebasan los 100 habitantes y este alto porcentaje contrasta con el ámbito nacional que esta próximo al 50% y aún con el registrado para la cuenca del Duero, a la que pertenece Soria en su gran mayoría, que sólo alcanza al 43,1%. Respecto a la población baste destacar que sólo el 8,6 % se asienta en el único núcleo de tamaño entre 5.001 y 20.000 habitantes y en los otros dos ámbitos territoriales este porcentaje alcanza el 17% en la cuenca del Duero y el 43% en España.

El tamaño de estos núcleos rurales (hasta 20.000 habitantes), como media que puede sintetizar este contraste, es de 132 habitantes en Soria, frente a 285 en la Cuenca del Duero y 616 en España. La densidad media de la población soriana, excluida la capital, no llega a los 7 habitantes por km².

Como ya se ha apuntado anteriormente, esta gran diseminación de la población rural soriana, influye necesariamente en el coste que ha de suponer atender las dotaciones de agua a todos los núcleos de población o bien en su rentabilidad.

Las cuencas hidrográficas a que pertenece el territorio soriano son dos, la del Duero y la del Ebro si bien hay un pequeño núcleo de 18 habitantes (Maducedano) que vierte al Tajo. La importancia relativa de dichas cuencas es como sigue:

Cuencas	Superficie	Nº de Núcleos	Habitantes
Duero	70,0	78,6	84,5
Ebro	29,8	21,2	15,3
Tajo	0,2	0,2	0,2
TOTAL	100,0	100,0	100,0

La del Duero está formada por una antiplanicie rodeada de montañas y la del Ebro es más accidentada por las pérdidas de cotas que se originan en los descensos de la meseta a la depresión de dicha cuenca. La densidad de población es de 11,7 habitantes por Km² en la del Duero y de 5 en la del Ebro.

7.1.2. RESULTADOS (Figs. 21-22)

Sobre cada una de las captaciones, figuran en la encuesta los siguientes datos: tipos de captación en relación con el origen del agua,

características de las captaciones (si es para uso exclusivo del núcleo de población o es compartida con otros y si el sistema de transporte del agua al depósito es por gravedad o es por elevación forzada), disponibilidades de agua y para la que figuran dos datos de caudales, el mínimo en estiaje y el máximo posible; finalmente para las instalaciones forzadas se recoge también el consumo anual de energía.

Todos estos datos se han tabulado según tres grupos clasificativos que ofrecen diferencias significativas: Tamaño de los núcleos de población, tipos de captación y cuencas hidrográficas.

Se advierte que en algún núcleo de población existe una segunda captación, con carácter complementario, por si en alguna circunstancia se hiciese necesario su uso; en este resumen no se contemplan estas segundas captaciones.

Se puede afirmar que todos los núcleos de población se suministran de alguna captación de agua pues aunque en la encuesta se

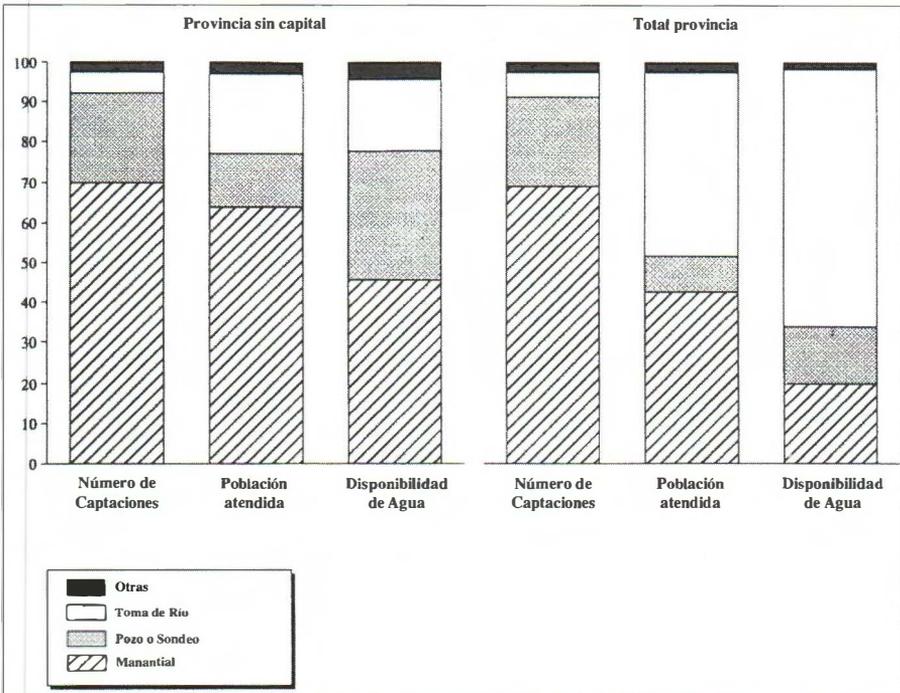


Fig. 21.—Uso del agua para abastecimiento público en la provincia de Soria

registran 8 pequeños núcleos (que totalizan 257 habitantes) sin captación, éstos se surten de las de otros núcleos próximos.

Tipos de Captaciones.

De los ocho tipos en que la encuesta clasifica las captaciones atendiendo al origen del agua, solo tienen importancia en Soria las que toman el agua de manantial, de pozo, de sondeo y de río, bien directamente o mediante un embalse.

Y entre éstas destacan por su número las captaciones que toman el agua directamente del manantial. Ello puede responder a la gran diseminación de la población, a la estructura geológica y orográfica de gran parte de la provincia que lo hace posible y al origen de los primitivos asentamientos urbanos. Se trata, en general, de pequeños manantiales que pueden satisfacer las necesidades de núcleos de reducida población y que por término medio suponen unos 121 habitantes. El 69% de todos los núcleos captan su agua en manantiales y este porcentaje es significativamente superior al de ámbito nacional (53,7%) y al de la cuenca del Duero (47%). La población que atienden estos manantiales representa el 42,8% del total provincial.

El principal problema de estas captaciones es su fragilidad y no es raro que el sistema establecido por los servicios de protección civil se dispare en algunos puntos del medio rural en los meses de verano.

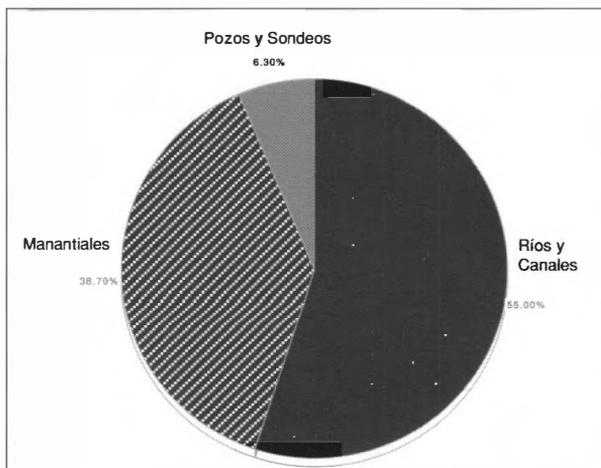


Fig. 22.-Captaciones de agua, población atendida y disponibilidades mínimas por tipos de captación (en %).

De los otros tipos de captaciones, siguen en importancia, en cuanto a número, las efectuadas por pozos y sondeos pues juntas suponen el 22,2% de todas; sin embargo, la población que atienden sólo representa el 9% del total.

Por el mayor volumen de población atendida destacan las captaciones que hacen su toma de río, bien directamente o mediante un embalse. Son en total 30, sólo el 6% de todas, pero que cubren las necesidades del 45,7% de toda la población. Entre ellas figura la del municipio capital.

Excluida la capital, es significativo el gran predominio en el aprovisionamiento de los núcleos, de las aguas subterráneas (manantial, pozo y sondeo) respecto de las superficiales que son más propias de los grandes núcleos urbanos. Estas aguas subterráneas constituyen el suministro del 92% de los núcleos, porcentaje superior al del conjunto nacional (77,3%) y aún al de la cuenca el Duero (88,4%).

En la cuenca soriana del Ebro sólo el 3% de la población se abastece con aguas superficiales y en la del Duero, capital incluida, se abastece el 55% de su población respectiva.

Características de las Captaciones.

Por lo que hace a la titularidad (si es exclusiva para atender el núcleo que la explota o es compartida con algún otro núcleo) destaca el que cerca del 90% de las captaciones sean para uso exclusivo de un núcleo, porcentaje, muy superior al registrado en el orden nacional (62,6%) y más alto que el que figura para la cuenca del Duero (82,7%); este alto porcentaje de uso exclusivo parece lógico en una población tan diseminada como la soriana.

Las captaciones de uso exclusivo para un núcleo son más frecuentes en las que se hacen sobre aguas subterráneas ya que una ventaja de estos acuíferos es que están más diseminados y los asentamientos urbanos han estado, en el pasado, más subordinados a ellos. Para las captaciones de aguas superficiales, el porcentaje de uso exclusivo desciende al 54%.

En este aspecto de la titularidad, también merece reseñar que las 105 captaciones ubicadas en la cuenca del Ebro son todas de uso exclusivo del núcleo que la explota, y lo mismo puede decirse de los 12 núcleos mayores de 1.000 habitantes, aunque en algún caso suministren agua a otros núcleos de su municipio.

Por lo que se refiere al sistema de captación (por gravedad o forzada) se constata un ligero predominio a favor de las que conducen el agua por gravedad (52,7%) y es éste un porcentaje intermedio

entre el registrado en la cuenca del Duero, más llana, (el 46,7%) y el conjunto nacional (62%).

Por lo que se refiere a las captaciones de aguas subterráneas, que son las predominantes, las que son por gravedad en manantiales (67,1%) superan en valor relativo a la media de todas y, como es natural, casi todas las captaciones en pozos y sondeos son forzadas; aun así se constata que ocho de ellas corresponden a aguas artesianas.

En la cuenca soriana del Duero, más llana, las captaciones forzadas superan a las de gravedad y, por el contrario, en la del Ebro, más accidentada, las de gravedad son más del doble que las forzadas.

En los grandes núcleos, con gran consumo de agua, las instalaciones son forzadas.

Caudales Disponibles

Para el caudal de cada captación se disponen de dos datos: el mínimo en estiaje y el máximo posible que, como es natural, está limitado no sólo por el caudal que puede proporcionar la captación sino también por la capacidad de extracción o transporte al núcleo de población. Los datos del resumen pueden proporcionar valores medios de disponibilidades y por lo menos para las grandes captaciones no pueden identificarse con el consumo ya que en las instalaciones se han previsto incrementos futuros de tal consumo.

Para tener una idea del tamaño de estas captaciones, en cuanto al volumen de agua que pueden aportar y de las disponibilidades de agua que pueden proporcionar por habitante, se reflejan a continuación los siguientes valores relativos, según los distintos grupos clasificatorios. Son valores medios alrededor de los cuales fluctuarán los casos individuales.

El caudal medio de todas las captaciones es muy reducido pues oscila entre 0,28 l/s y un máximo posible de 0,70 l/s, pero su distribución se muestra muy variable según los distintos grupos y así, refiriéndonos sólo a los valores mínimos, oscila entre 0,08 l/s como media para los 374 núcleos que no rebasan los 100 habitantes y los 41,5 l/s de media en los dos núcleos de más de 5.000 habitantes; por tipos de captación estas medias mínimas oscilan entre los 0,08 l/s para las 342 de manantial y los 13,42 l/s para las 6 tomas de río con embalse. En la cuenca del Duero la disponibilidad media por captación es más del doble que en la del Ebro.

La disponibilidad media de agua por habitante en toda la provincia oscila entre los 126 l/día en estiaje y los 309 l/día como máximo posible. Aunque no se pueden identificar estas cifras con el consumo parece que encajan entre dotaciones que para el consumo urbano se establecen en el Plan Nacional de Abastecimiento y Saneamiento, en los Planes Hidrológicos y en los valores obtenidos en el Estudio sobre Uso Urbano del último Plan Hidrológico.

No obstante, excluida la capital, la disponibilidad media por habitante, oscila entre 82 y 170 l/día y esta disponibilidad queda muy por bajo de otros ámbitos territoriales; así en España la media por habitante está comprendida entre 1.080 l/día y 2.440 l/día y en la cuenca del Duero entre 1.340 y 2.260 l/día; bien es verdad que en el consumo urbano se incluyen también los consumos de las actividades económicas ubicadas en el núcleo, así como el riego de parques y jardines y, éste no es el caso, en general, de los núcleos rurales de Soria.

Esta disponibilidad media de agua por habitante se muestra también muy variable según los distintos grupos clasificatorios. Si exceptuamos los dos grupos de más de 5.000 habitantes, en que los consumos no domésticos adquieren importancia, estas disponibilidades por habitante descienden al aumentar el tamaño de los núcleos y oscila, tomando sólo los mínimos, entre los 181 l/día como media en los núcleos que no rebasan los 100 habitantes y los 33 l/día en el grupo comprendido entre 1.001 y 5.000 habitantes. Esta mayor disponibilidad de agua por habitante en los pequeños núcleos, puede que se deba a una mayor disponibilidad, a un tope mínimo por captación, a un descenso de su población o también a unas necesidades relativas mayores para atender usos ganaderos o pequeños regadíos.

Las disponibilidades por habitante en el medio rural soriano son bastante superiores en su cuenca del Duero que en la que vierte al Ebro; pero si se excluyese la capital, estas disponibilidades serían similares.

Consumo de Energía.

Las 234 captaciones registradas, en las cuales es preciso elevar el agua, exigen un consumo anual de energía que se eleva a 2.179 miles de Kwh., lo que supone un consumo medio por captación forzada que se sitúa en 9.312 ÊKwh. y contabilizando todos los habitantes, tanto los que se surten en captaciones de gravedad como forza-

das, saldría una media anual de 22,5 ÊKwh. por habitante; este último valor como indicador general que expresa en que medida ha de suministrarse la población con agua elevada es algo inferior al registrado en el ámbito nacional (27,7 ÊKwh.) y significativamente inferior al registrado en la cuenca del Duero (38,7 ÊKwh.)

Si descartamos la capital, el 89% del consumo de energía se centra en las captaciones de origen subterráneo (fuentes, pozos y sondeos); en todo el conjunto, las tomas de río suponen el 15% del consumo total de energía.

7.1.3. CONCLUSIONES Y PAPEL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

- 1º) La mayoría de las captaciones de agua (el 90% de todas) son autónomas o sea para uso exclusivo del núcleo urbano que atienden.
- 2º) En el sistema de captación (por gravedad o forzada) predominan las que conducen el agua por gravedad (el 53% de las captaciones).
- 3º) Quizás la característica más destacable es la que se refiere al origen de las captaciones: el principal es de los manantiales (el 69% de todas) y le siguen en importancia las efectuadas en pozos y sondeos (el 22%), y las tomas de río (el 6%). Se puede decir que dada la gran diseminación de esta población rural su abastecimiento se realiza con aguas de origen "local", fuentes, pozos o sondeos, y tomas de río. La construcción de sondeos se ha intensificado en las últimas décadas. Estos tipos juntos representan el 97% de todas las captaciones y abastecen al 98% de toda la población.
- 4º) De acuerdo con la conclusión anterior se destaca la importancia que cobra en el medio rural el uso de las aguas subterráneas para el abastecimiento urbano y ello está de acuerdo con la diseminación paralela de los acuíferos y de los núcleos de población y el predominio planar de los acuíferos. Considerando la de los manantiales como agua subterránea, se tiene que en la zona rural el 92% de los núcleos se suministran con recursos subterráneos, aunque ello suponga algo menos de la mitad de la población.
- 5º) Las diferencias por cociente entre los caudales de las captaciones, máximo posible y mínimo en estiaje, son significativamente más bajas en las tomas de depósitos, tanto de superficie (embalses) como subterráneos o acuíferos (pozos o sondeos) ya que ofrecen más seguridad de disponer de los caudales requeridos; por el contrario son más altas en las tomas de manantial y en las de río. La disponibilidad media en estiaje es 2'2 veces superior a la dotación media por lo que

ésta pudiera parecer asegurada; pero la variabilidad es alta según núcleos, según tamaños y según tipos de captación y en algunos casos, principalmente en los que se surten con agua de manantial, se han venido detectando dificultades de suministro en ciertos núcleos durante el estiaje. Se puede decir que los déficits no son preocupantes pues sólo afecta a algunas poblaciones concretas durante ciertos veranos. La labor realizada por parte de la Diputación Provincial de Soria en estos últimos años es digna de citarse pues ha solucionado el abastecimiento a 125 pueblos mediante sondeos, lo que ha ayudado a la supervivencia de estas pequeñas poblaciones.

6º) En la zona rural destacan los mayores caudales disponibles por habitante en el grupo de los pequeños núcleos que no rebasan los 100 habitantes. Puede ser que la pérdida de población que han experimentado estos núcleos en los últimos años, la ausencia de contadores o de control individual de los consumos familiares en la mayoría de los núcleos y otras de carácter presupuestario, pérdidas o de uso del agua, puedan explicar este hecho.

7º) Se demuestra que el abastecimiento mediante aguas subterráneas produce un gran beneficio social y económico, ya que, por una parte, la gran distribución espacial de los acuíferos ofrece el suministro con pequeñas inversiones a demandas puntuales relativamente reducidas y repartidas por todo el territorio. Ello ha mitigado el despoblamiento y ha mejorado el nivel de vida de la población rural y en definitiva el desarrollo sostenible que se propugna actualmente, pues el medio rural se identifica con la naturaleza. Por otro lado, las aguas subterráneas sustentan el abastecimiento a una gran parte de la población durante los meses de verano, pues ésta se traslada a estos pequeños núcleos.

7.2. EL USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN REGADÍOS, GANADERÍA E INDUSTRIA.

La tierra batida por los canales en Soria asciende a 18.000 Ha., que es una de las más bajas de España. El riego mediante pozos está muy poco extendido y no se emplea más de 3 hm³/año (1% del total). (SGOP, 1990).

El empleo del agua subterránea para la ganadería se limita casi exclusivamente a granjas de ganado porcino. El volumen captado mediante pozos y sondeos es relativamente importante; asciende a 13'5 hm³/año y supone mucho más que el abastecimiento urbano. (SGOP, 1990).

La mayor parte de las industrias se suministran de los ríos, aunque algunas de las más importantes se abastecen a través de sondeos. Se ha estimado en 4 hm³/año el volumen de agua utilizado para usos industriales de origen subterráneo. (SGOP, 1990).

7.3. DEMANDA FUTURA

En el horizonte de 10 años el uso de agua no va a aumentar significativamente. Habrá una concentración de la población en núcleos importantes, sin aumento significativo de la población en detrimento de pequeñas aldeas. Tampoco es de esperar un despegue industrial importante, ni un incremento de la superficie regada. Por otro lado, la cabaña porcina está estabilizada o crece muy lentamente desde hace algunos años.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Herrero, C.; de Pedro Herrero, F.; Sanz Bueno, G. y Burriel Martí, F. (1972-a). Geoquímica de fuentes y pozos de la Hoja Geológica de Berlanga de Duero (Soria). Revista de Geofísica, Vol. XXXI nº 1-4 pp. 211-229.
- Álvarez Herrero, C.; de Pedro Herrero, F.; Palacios Corvillo, M.A. y Burriel Martí, F. (1972- b). Geoquímica de fuentes y pozos de la Hoja Geológica de Berlanga de Duero (Soria). Parte occidental VII. Revista de Geofísica, Vol. XXXI. nº 1-4, pp. 231-253.
- Álvarez Herrero, C.; de Pedro Herrera, F.; Burriel Martí, F. y Gallego Rubio, M.M. (1973). Estudio hidrogeoquímico realizado sobre la parte oriental de la hoja geológica 406; Almazán (Soria) XII. Revista de Geofísica, Vol. XXXII, nº 3-4 pp. 387-422.
- Álvarez Herrero, C.; de Pedro Herrera, F. y Palacios Corvillo, M.A. (1975-a). Estudio analítico y geológico de las aguas correspondientes a la hoja núm. 349 de Cabrejas del Pinar (Soria) XIV. Revista de Geofísica, Vol. XXXIV nº 1 y 2, pp. 40-61.
- Álvarez Herrero, C.; de Pedro Herrera, F. y Burriel Martí, F (1975-b). Estudio Hidrogeoquímico de la parte oriental de Morón de Almazán (Soria). Hoja geológica nº 407. IX. Revista de Geofísica, Vol. XXXIV, nº 1 y 2, pp. 63-69.

- Álvarez Herrero, C.; Burriel Martí, F. y Sanz Bueno, G. (1976-a). Clasificación y representación gráfica de los datos analíticos de aguas de las hojas geológicas 405 y 349 II. *Revista de Geofísica*, Vol. XXXV, nº 1 y 2, pp. 97-127.
- Álvarez Herrero, C.; de Pedro Herrera, F. y Palacios Corvillo, M.A. (1976-b). Estudio Hidrogeoquímico de la parte occidental de la Hoja 406 correspondiente a Almazán (Soria) XIII. *Revista de Geofísica*, Vol. XXXV, nº 3 y 4, pp. 315-331.
- Aracil, E.; López Mencieta, F.; Sanz Pérez, E. y Savirón, L. (1993). La Falla de San Saturio (Soria). *Geogaceta* Nº 13. págs. 12-15.
- Archilla Aldeaneva, R. (1990). El régimen del río Duero en la provincia de Soria. *Celtiberia. C.E.S. (C.S.I.C.)* nº 79-80. pp. 7-34.
- Bentabol y Ureta, H. (1899). Las aguas de España y Portugal. Comisión del Mapa Geológico de España. Reedición de 1995 por Ediciones El Viso. (ITGE). 347 págs.
- Diputación Provincial de Soria. Diversos informes hidrogeológicos para realización de pozos de abastecimiento: Jaray, Hinojosa del Campo, Tajahuerce, Pozalmuro, Valdenarros, Almazán, Almantiga, Sta. M^a de Huerta, Iruecha, Torlengua, Torrevicente, Retortillo de Soria, Fresno de Caracena, Burgo de Osma, Cubilla, Tozalmoro, Torrearévalo, Garray, Las Fraguas, Sauquillo del Campo, Rello, Fuentes de Magaña, Cerbón, Matalebreras, Pinilla del Campo, Candilichera, Alconaba, Momblona, Coscurita, Montuenga de Soria, Medinaceli, Miño de Medinaceli, Yelo, Mezquetillas, Cañamaque, Alpanseque, Mazaterón, Mazalbate, Ojuel, Cubo de la Solana, Quintana Redonda, Cenebro, Peñalba de San Esteban, Cortos, Nieva, Las Casas.
- Fernández del Río; G. (1986). El Karst del Moncayo, posibilidad de regulación del manantial de Vozmediano (Soria). *Drenaje del mismo. Jornadas sobre Karst Euskady*. San Sebastián. pp. 397-410.
- Fernández del Río, G.; Sanz Pérez, E. y Coletto, I. (1989). Hidroquímica y calidad de las aguas subterráneas de Soria. III Congreso de Geoquímica de España. Soria. Septiembre. Libro de comunicaciones. Tomo III.
- Fernández del Río, G.; Sanz Pérez, E. y de la Peña Ortiz de Zárate, J. (1992). Las aguas subterráneas en Soria. V. Congreso Nacional de Hidrogeología. Alicante. pp. 55-65.
- Francés Cunchillos, D. (1974). Las Fuentes del Queiles. *Revista de Obras Públicas*. pp.281-287. Madrid.
- Gobierno de Navarra (1980). Presa de Cabretón (Resumen del estudio de viabilidad). (Inédito).
- Hernández Pacheco, F. (1954). Estudio hidrogeológico de las Termas de Alhama de Aragón. *Anales de la Real Academia de Farmacia*. nº 17. pp. 117-138. Madrid.

- I.G.M.E. (1960). Investigación de aguas en la zona de Añavieja (Soria). (Inédito).
- I.G.M.E. (1978). Plan Nacional de Investigación de Aguas subterráneas. Cuenca Alta del Duero. Sistema 10-bis. Sector Occidental. (Informe Inédito).
- I.T.G.E.-IRYDA (1974). Reconocimiento Hidrogeológico de las comarcas de Almenar de Soria y Tierras Altas de Soria.
- I.T.G.E. (1978). Informe técnico del sondeo para captación de aguas subterráneas realizado en Valdernalque (Soria). (Inédito).
- I.T.G.E. (1980). Estudio hidrogeológico del sistema acuífero nº 10. (Inédito).
- I.T.G.E. (1980). Informe hidrogeológico del subsistema Sierra del Solorio (Sistema acuífero nº 57). (Inédito).
- I.T.G.E. (1980). Estudio hidrogeológico de la depresión Calatayud-Montalbán. Plan PIAS. (Inédito).
- I.T.G.E. (1981). Los recursos subterráneos de los sistemas acuíferos de la margen derecha del Ebro. Sistemas 57, 58 y 59. Plan PIAS. (Inédito).
- I.T.G.E. (1984). Proyecto para la realización de estudios hidrogeológicos para abastecimiento a tres municipios de Burgos, Segovia y Soria y protección de los mismos. (Informe sobre la infraestructura hidrogeológica del Municipio del gran área de expansión industrial de Almazán (Soria) y protección del mismo). (Inédito).
- I.T.G.E. (1985). Hoja Hidrogeológica de Zaragoza, E. 1/200.000.
- I.T.G.E. (1992). Las aguas subterráneas en Soria. Memoria y plano. 20 págs.
- IRYDA (1988). Reconocimiento geofísico en Vildé. (Inédito).
- Junta de Castilla y León (1988). Consejería de Fomento. Dirección General de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente. Análisis del medio físico de Soria. 118 págs.
- Loperráez Corvalán, J. (1788). Descripción Histórica del Obispado de Osma. Tomo Primero. 653 págs. Madrid, Imprenta Real.
- López Palancar, J.J. y Sanz Pérez, E. (en prensa). Cálculo de la recarga natural de un acuífero a partir del hidrograma del manantial. Aplicación al manantial de Vozmediano. Estudios Geológicos.
- Ministerio de Obras Públicas. Asesoría Geológica (1929-1951). Informe acerca de los sondeos realizados en el emplazamiento de la presa del Pantano de Gormaz, de la Conf. Hidrog. del Duero.
- M.O.P.U. (D.G.O.H.) (1968). Viabilidad Técnico-Económica del plan de riegos del Queiles. Dirección General de Obras Hidráulicas. (Inédito).

- Palacios, P. (1990). Descripción Geológica y agrológica de la provincia de Soria. Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España. Madrid.
- Saavedra, E. (1853). Memoria descriptiva concerniente al proyecto de desecación de la Laguna de Añavieja y aprovechamiento de sus aguas para el riego. Dirección General de Obras Públicas. Soria.
- Sáenz García, C. (1953). Anecdotario geológico de los ríos sorianos. Celtiberia, nº. 6. C.E.S. Soria, pp. 201-218.
- Sáenz García, C. (1954). Pico Frentes. Celtiberia, nº. 10. pp. 245-27.
- Sáenz García, C. (1958). Miscelánea de la historia fluvial española. Notas y comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Núm. 50. pp. 149-180.
- Sáenz Ridruejo, C. (1985). Geología. En Historia de Soria. C.E.S. (C.S.I.C.). Soria, pp 25-85.
- Sáenz Ridruejo, C. (1985). Las escorrentías. En Historia de Soria. C.E.S. (C.S.I.C.)Soria. pp. 29- 31.
- Sáenz Ridruejo, C. y Sanz Pérez, E. (1985). Bibliografía de Soria: El Marco Geológico. En "Historia de Soria". Tomo II. C.E.S. (C.S.I.C.). pp. 209-224.
- Sáenz Ridruejo, C. y Sanz Pérez, E. (1988). La laguna de Añavieja. I Reunión sobre el Moncayo. Tarazona. Octubre. Libro de comunicaciones págs. 225-244.
- Sanz Pérez, E. y Medina Ferrer, J. (1984). Contribución al catálogo espeleológico de la provincia de Soria: Sifón y Cueva de la Fuentona de Muriel. Revista Celtiberia, Nº 68. C.E.S. (CSIC). págs. 301-308.
- Sanz Pérez, E. (1986). Aplicación del modelo SIMERO al manantial de Vozmediano (Soria). Boletín Geológico y Minero. T. XCVII, enero-febrero págs. 42-64.
- Sanz Pérez, E. (1986). El Karst del Sur y Oeste del Moncayo. Boletín Geológico y Minero T. XCVII- VII. Marzo-Abril, 1986. págs. 194-213. (Publicado también en la revista francesa de Karstologia Nº 7, págs. 31-35).
- Sanz Pérez, E. (1986). Aplicación de la curva de caudales clasificados del manantial de Vozmediano (Soria). Jornadas sobre el Karst en Euskady. San Sebastián. Libro de Comunic., págs. 89-102.
- Sanz Pérez, E. (1986). Estimación de la infiltración anual en la cuenca de alimentación del Manantial de Vozmediano (Soria). Jornadas sobre el Karst en Euskady. San Sebastián. Libro de Comunic., págs. 89-102.

- Sanz Pérez, E. (1986). Le Karst du Sud et de l'ouest du Moncayo (Cordillère Ibérique.Soria- Espagne). Karstología nº 7. pp. 31-36.
- Sanz Pérez, E. (1987). El Karst del Sur y Oeste del Moncayo. Boletín de Informaciones y Estudios del Servicio Geológico de Obras Públicas (Número monográfico). Nº 47. 159 pags. Madrid.
- Sanz Pérez, E. (1987). Regulación del Manantial de Vozmediano (Soria). III Reunión sobre Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Valencia, págs. 497-512.
- Sanz Pérez, E. (1987). La regulación de los manantiales y su incidencia en España.Boletín Geológico y Minero. T. XCVIII-VI. pp. 831-858.
- Sanz Pérez, E. y Medina Ferrer, J. (1987). Le siphon de la Fuentona de Muriel (Soria, Espagne). nº 9, pp. 27-31.
- Sanz Pérez, E. (1989). Estudio Hidrogeológico de los manantiales de Añavieja. (Conf. Hidrográfica del Ebro). Inédito.
- Sanz Pérez, E. (1990). El karst de la altimeseta soriana. I Congreso Nacional de Geomorfología. Teruel. Septiembre 1990. pp. 147-158.
- Sanz Pérez, E. y López Palancar, J.J. (1992). Modelo pluricelular englobado del manantial de Vozmediano. V Congreso Nacional de Hidrogeología. Alicante. págs. 157-169.
- Sanz Pérez, E. (1992). Las aguas subterráneas en el Parque Natural del Cañón del río Lobos (Soria- Burgos). Boletín Geológico y Minero. Vol. 103-2. págs. 117-137.
- Sanz Pérez, E.; Fernández del Río, G. y de la Peña Ortiz de Zárate, J. (1992). La relación aguas superficiales - aguas subterráneas en la cabecera del Duero. V Congreso Nacional de Hidrogeología. Alicante. 1992. págs. 403-413.
- Sanz Pérez, E. (1992). Los enclaves naturales más sobresalientes de la provincia de Soria. Reunión sobre la Cuenca del Duero. Soria.
- Sanz Pérez, J. y Sanz Pérez, E. (1994). Las captaciones de agua para abastecimiento urbano en la provincia de Soria. Tecnología del Agua. Nº 119. Enero. pp. 9-13.
- Sanz, J.; Sanz, E. y Yélamos, J.G. (1994). Introducción a los manantiales termales y mineromedicinales de la provincia de Soria. Boletín de Hidrología Médica. nº 3. pp. 147-155.
- Sanz Pérez, E. (1995). Captaciones y uso del agua para abastecimiento público en la zona rural de España. Revista de Obras Públicas nº 3345. pp. 67-86.
- Sanz Pérez, E. (1995). Consideraciones sobre la recarga en el karst a través del estudio de las filtraciones en cuevas. Geogaceta.

- Sanz Pérez, E. (en prensa). Application and simplification of the SIMERO model in the Vozmediano spring (Spain). *Hydrological Sciences Journal*.
- Sanz Pérez, E. (en prensa). Le Karst du Lobos (Espagne) *Karstologia*.
- Sanz Pérez, E. (en prensa). Caracterización de la recarga en los sistemas kársticos de Brieva de Cameros, Las Viniegras (La Rioja) y Fuente Negra (Burgos). IV Congreso Geológico de España. Julio, 1996. Alcalá de Henares. Madrid.
- Sanz Pérez, E. (en prensa). Efectos de la recarga artificial de un acuífero en su manantial. Aplicación al manantial de Vozmediano (Soria). *Estudios Geológicos*.
- S.G.O.P. (1982). Informe del ensayo realizado en un pozo con destino al abastecimiento de Burgo de Osma (Soria).
- S.G.O.P. (1982). Estudio de las posibilidades de utilización conjunta de los embalses superficiales y subterráneos de la Cuenca del Duero. Margen izquierda y cabecera. (Inédito).
- S.G.O.P. (1983). Informe abastecimiento a Torresuso mediante captación de aguas subterráneas. (Inédito).
- S.G.O.P. (1984). Informe abastecimiento a Abejar mediante captación de aguas subterráneas. (Inédito).
- S.G.O.P. (1984). Construcción de un pozo para abastecimiento de agua en Ágreda. (Inédito).
- S.G.O.P. (1984). Estudio hidrogeológico en la Cuenca del río Nágima, afluente del Jalón. (Inédito).
- S.G.O.P. (1984). Estudio Geofísico en Castejón del Campo. (Inédito).
- S.G.O.P. (1984). Reconocimiento Hidrogeológico en Cidones, (Soria). (Inédito).
- S.G.O.P. (1984). Estudio hidrogeológico para el abastecimiento con aguas subterráneas a Muro de Ágreda. (Inédito).
- S.G.O.P. (1987). Informe sobre el reconocimiento hidrogeológico realizado en los alrededores de Trévago (Soria).
- S.G.O.P. (1990). Estudio hidrogeológico de la provincia de Soria, Informe interno (inédito). Intervinieron: Gabriel Fernández del Río, Javier de la Peña, Eugenio Sanz y Eugenio Villanueva.
- Yélamos, J.G. y Sanz Pérez, E. (1994). Hidrogeoquímica de los manantiales sulfhídricos y ferruginosos de la facies Purbeck-Weald del Noroeste de la Cordillera Ibérica (Provincia de Soria). *Estudios Geológicos*, 50: 215-228.

TABLA 1**PRECIPITACIONES MEDIAS ESTACIONALES DE SORIA EN mm**

Número	Lugar	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
2005	Vinuesa (Santa Inés)	372	379	262	119
2006	Vinuesa	317	325	238	139
2011	Pantano Cuerda del Pozo	206	191	178	105
2017	Póveda de Soria (Pto. Piqueras)	311	230	257	153
2018	Almarza	235	191	186	116
2024	Garray (Arenalejo)	181	168	162	139
2030	Soria (Observatorio)	172	147	174	150
2034	Pozalmuro	152	125	167	124
2036	Cueva de Ágreda	216	169	207	125
2038	Almenar	113	105	152	114
2042	Aliud	158	131	182	144
2044	Lubia (C.E.N. CEDER)	166	171	163	91
2045	Almazán	150	137	176	111
2049	Coscurita	123	119	167	92
2057	Barahona	154	141	154	82
2058	Rello	92	80	136	79
2059	Riba de Escalote	99	112	136	80
2067	Arenillas	132	118	137	78
2071	Bayubas de Abajo (C F)	197	163	159	87
2073	Gormaz	140	128	156	89
2085A	Burgo de Osma (I L)	147	139	146	88
2090	Valdealvillo	177	187	165	93
2091	Torralba del Burgo	185	176	175	108
2107	Zayas de Torre	143	161	158	86
9184	Vizmanos	190	174	226	143
9341	Jubera	118	107	162	98
9348	Monteagudo de las Vicarías	82	73	124	74
9352	Almazul	109	99	146	98

TABLA 2

PRECIPITACIONES MEDIAS ANUAL EN LOS ACUIFEROS DE SORIA

	<i>Acuíferos</i>	<i>Area</i> (<i>km</i> ²)	<i>Precipitación media anual</i>	
			<i>mm.</i>	<i>hm</i> ³
02.09.1	Mesetas Terciarias Castillejo de Robledo	121	475	58
02.10.1	Oeste de la provincia	32	684	22
02.10.2	Acuífero del Ucero	129	677	87
02.10.3	Fuentona de Muriel	122	686	84
02.10.4	Avión	49	669	32
02.10.5	Sierra de Inodejo y río Andaluz	32	644	21
02.10.6	Fuentetoba y Tobazo	11	696	8
02.10.7	Izana	12	674	8
02.15.1	Cuenca del Rituerto	30	525	16
02.15.2	Cuenca del Morón			
02.15.3	Cúpulas del Duero y Ucero	19	548	11
02.15.4	Aluvial del Duero	274	562	154
02.16.1	Vildé y Gormaz	598	527	315
02.16.3	Meseta de Rello	162	516	84
02.16.3	Sierra de Pela	7	594	4
1	Caliza wealdenses de Soria	24	661	16
2	Acuif. carbonatado Soria	214	558	119
09.33.1	Cameros	45	992	44
09.36.1	Ojillos del Keyle	7	516	4
09.36.2	Vozmediano	74	641	47
09.39.1	Aranda de Moncayo	162	533	87
09.39.2	Manubles	36	487	18
09.47.1	Páramo Maranchón	381	426	162
09.47.2	Tierra Medinaceli	196	555	109
1	Añavieja	68	525	36
2	Deza	66	452	24
3	Radona y Aguaviva de la Vega	47	512	24
	Totales	2.818	565	1.594

TABLA 3

PROCEDENCIA Y NATURALEZA DEL INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

<i>Fuente de información</i>	<i>NATURALEZA</i>				<i>TOTALES</i>
	<i>Manantiales</i>	<i>Sondeos</i>	<i>Pozos</i>	<i>Sin espec.</i>	
SGOP (1989) Est. Hidrog. Soria	55	72	40	1	168
Archivo Delegación de Minas de Soria (hasta 1989)	167	259	279	258	963
I.T.G.E. (hasta 1989)	237	82	4	–	323
Totales	459	413	323	259	1.454

TABLA 4

POZOS EXPERIMENTALES (SGOP, 1989)

<i>POZOS</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>Cota (m)</i>	<i>PERFORACION</i>		<i>ENTUBACION</i>		<i>Longitud m</i>	<i>Cementac. m</i>
			<i>Tramo</i>	<i>D mm</i>	<i>Tramo</i>	<i>D mm</i>		
Burgo de Osma	150	950	0-41	640	0-150	350	40	0.8
			41-150	480				27-35
San Esteban de Gormaz	100	882	0-20	600	0-100	350	36	0-10
			20-100	500				
Quintanas de Gormaz	150	880	0-17	600	0-6	600	47	0-23
			17-150	570	6-67	500		
					67-150	350		
Vildé P-1	158	935	0-24	680	0-158	350	34,5	0-4
			24-158	580				23-27
Vildé P-2	206	905	0-206	550	0-206	350	48	0-10

TABLA 5
POZOS EXPERIMENTALES. CARACTERISTICAS TECNICAS
(SGOP, 1989)

Pozo	Acuífero	Tipo de bombeo	Fecha de bombeo	Duración horas	Caudales l/s.	NIVEL ESTÁTICO		DEPRESIÓN (m)		Caudal Esp. (l/s.m.)	TRANSMISIV. (m ² día)	
						Sondeo	Piezom.	Sondeo	Piezom.		Bombeo	Recuper.
Burgo de Osma P-3	Cúpulas calcáreas del Duero y Ucero	Escalonado	3, 4, 5-90(1)	12	3,5(2)	72,00	71,95	30,13	3,44	0,11	6,6	17,4
				4	4,2			16,45	0,56	0,09	4,9	2,2
				3,45	5(2)	73,22	-	6,21	-	0,8	42	70
				17	7,5			5,18		0,65		
				22	11			8,92		0,54		63
			5	18-15			28,47		0,30			
	Caudal		10-11,6-90	17	15-14,5(2)	75,32	-	46,68	-			
San Esteban de Gormaz P-2	Cúpulas calcáreas del Duero y Ucero	Escalonado	5-6,5-90	6 1/4	4(2)	7,3	7,69	28,43	0,87	0,14	4,3	1,26
				1 3/4	5,5-4			44,57	0,32	0,06		
					5							
Quintanas de Gormaz P-2	Acuífero de Vildé y Gormaz	Escalonado	6-8,6-90	3/4	25	1,32	2,765	1,14	0,015	15,92		8,700
				4	50			2	0,055	16,75		
				13	100			2,96	0,07	21,93		
				19	150			2,86	0,055			
				11	204			3,48	0,05			
Vildé P-2	Acuífero de Vildé y Gormaz	Escalonado	9-10,6-90	1/2	25			0,21		75,12		
				12	50	14,64		0,43		119		
				2 1/2	75			0,24			20,556	17,879

(1) Después de la acidificación (07-06-1990)

(2) Análisis químicos

TABLA 6

**RECURSOS DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS DE LA
PROVINCIA DE SORIA**

<i>CUENCA DEL DUERO</i>	<i>Superficie</i>	<i>Recursos estimados</i>
	<i>Km²</i>	<i>hm³/año</i>
UNIDAD HIDROGEOLOGICA 02.09. BURGOS-ARLANZA		
02.09.1 Meseta de Castillejo de Robledo	121	6
UNIDAD HIDROGEOLOGICA 02.10. ARLANZA-UCERO-AVION		
02.10.1 Parte Occidental de Soria	32	19
02.10.2 Ucero	129	40
02.10.3 Fuentona de Muriel	122	35
02.10.4 Avión	49	13
02.10.5 Sierra de Hinodejo	32	9,5
02.10.6 Fuentetoba y del Tobazo	11	5
02.10.7 Río Izana	12	4,5
UNIDAD HIDROGEOLOGICA 02.15. CUBETA DE ALMAZAN		
02.15.1 Cuenca del Rituerto	30	6
02.15.2 Cuenca del Morón	-	4,7
02.15.3 Cúpulas calcáreas del Duero y Ucero	19	15
02.15.4 Aluvial del Duero	-	-
02.15.5 Meseta de Castillejo de Robledo	-	30
UNIDAD HIDROGEOLOGICA 02.16. ALMAZAN-SORIA		
02.16.1 Vildé y Gormaz	598	110
02.16.2 Meseta de Rello	162	25
02.16.3 Sierra de Pela	7	1,5
ACUIFERO QUE NO PERTENECEN A NINGUNA UNIDAD		
02.00.1 Calizas Wealdenses de Soria	24	3
02.00.2 Carbonatado de Soria	114	8
SUMA	1.462	330,202

CUENCA DEL EBRO		Superficie	Recursos estimados
		Km ²	hm ³ /año
UNIDAD HIDROGEOLOGICA 09.36. QUEILES-JALON			
09.36.1	Manantial de Vozmediano	74	36
09.36.2	Ojillos del Keyles	7	1,6
UNIDAD HIDROGEOLOGICA 09.390. CALATAYUD-MONTALBAN			
09.39.1	Aranda del Moncayo	162	25
09.39.2	Acuífero del Manubles	36	11
UNIDAD HIDROGEOLOGICA 09.43.SIERRA DEL SOLORIO			
09.43.1	Páramo de Maranchón	381	39
09.43.2	Tierra de Medinaceli	196	21
ACUIFEROS QUE NO PERTENECEN A NINGUNA UNIDAD			
09.00.1	Manantiales de Añavieja	68	14
09.00.2	Deza	66	4
09.00.3	Radona y Aguaviva de la Vega	47	1,5
SUMA		1.037	153,1

TABLA 7
APORTACION DE LOS RIOS SORIANOS EN hm³

RIO	LUGAR	Año mas húmedo	Año medio	Año mas seco	
Revinuesa	Vinuesa (E-O)	114	63	33	(1)
Duero	Molinos de Duero (E-101)	152	85	31	(1)
Duero	Garray (E-2)	943	400	135	(1)
Duero	Gormaz (E-4)	1.616	718	223	(1)
Ucero	Burgo de Osma (E-5)	518	221	53	(1)
Cidacos	Yanguas (E-44)	130	62	20	(2)
Linares	San Pedro Manrique (E-43)	63	28	3	(2)
Alhama	Aguilar del Río Alhama (E-140)	171	53	13	(2)
Añamaza	Dévanos (E-49)	22	16	11	(3)
Bco. del Val	Los Fayos (E-90)	12	7	2	(2)
Queiles	Los Fayos Iberduero)	45	35	22	(4)
Deza	Embid de Ariza (E-57)	21	8	1	(2)
Nágima	Monreal de Ariza (E-147)	67	18	3	(2)
Jalón	Jubera (E-58)	59	25	6	(2)
Jalón	Cetina (E-7)	454	94	20	(2)
Blanco	Barrio Blanco (E-167)	17	11	7	(2)

(1) Valores de la serie 1940-41 a 1977-78 en régimen natural del P.H.

(2) Valores tomados directamente de los anuarios de aforo.

(3) Se ha sumado los 250 l/s derivados por el canal de San Salvador.

(4) Datos estimados por E. Sanz Pérez.

TABLA 8

RELACIONES AGUAS SUPERFICIALES-AGUAS SUBTERRANEAS

RIO	LUGAR	Aportaciones en hm ³			Aportac. Subterráneas (1989-90)	
		Año húmedo	Año medio	Año seco	hm ³ /año	%
Revinuesa	Vinuesa (E-0)	114	63	33	Despreciable	(1)
Duero	Molinos de Duero (E-101)	152	85	31	Despreciable	(1)
Duero	Garray (E-2)	943	400	135	Poca	(1)
Duero	Entre Garray y el embalse de Los Rábanos				28	70 (1)
Duero	Embalse de Los Rábanos		437		Sin determinar	
Duero	Entre Andaluz y San Esteban de Gormaz				140	(3)
Duero	Gormaz (E-4)	1.616	718	223	140	(1)
Rituerto	En la desembocadura				6	85 (3)
Andaluz	En la desembocadura				7	95 (3)
Escalote	Berlanga de Duero				8	88 (3)
Ucero	Ucero				65	91 (3)
Abión	Valdealvillo				28	83 (3)
Ucero	Burgo de Osma (E-5)	518	221	53		(1)
Cidacos	Yanguas (E-44)	130	62	20	Despreciable	(2)
Linares	San Pedro Manrique (E-43)	63	28	3	Despreciable	(2)
Alhama	Aguilar del Río Alhama (E-140)	171	53	13		(2)
Añamaza	Dévanos (E-49)	22	16	11		85 (2)
Añamaza	Mantiales de Dévanos				4,7	100 (3)
Bco. del Val	Los Fayos (E-90)	12	7	2	2,8	(2)
Queiles	Los Fayos (Iberduero)	45	35	22		(3)
Deza	Embid de Ariza (E-57)	21	8	1		(2)
Nágima	Monreal de Ariza (E-147)	67	18	3		(2)
Jalón	Jubera (E-58)	59	25	6		(2)
Jalón	Cetina (E-7)	454	94	20		(2)
Blanco	Barrio Blanco (E-167)	17	11	7		(2)
Mesa	Mochales				47	(3)
Tajuña	Aguilar de Anguita				12	(3)

(1) Valores de la serie 1940-41 a 1977-78 en régimen natural.

(2) Valores tomados directamente de los anuarios de aforo.

(3) Datos del estudio del SGOP (1990).

TABLA 9

**RELACIONES AGUAS SUPERFICIALES-AGUAS SUBTERRANEAS
CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS MAS IMPORTANTES DE LOS RIOS SORIANOS**

RIO	LUGAR	Aportaciones de los ríos sorianos (hm ³)			Aportac. Subterráneas (1989-90)		Curvas de agotamiento			Observaciones	
		Año húmedo	Año medio	Año seco	hm ³ /año	%	∞ 1	∞ 2	∞ 3		Volumen hidro- dinámico (hm ³)
Revinuesa	Vinuesa (E-O)	114	63	33	Despreciable					(1)	
Duero	Molinos de Duero (E-101)	152	85	31	Despreciable					(1)	
Duero	Embalse Cuerda del Pozo									(1)	
Duero	Garray (E-2)	943	400	135	Poca					(1)	
Duero	Entre Garray y el embalse de Los Rábanos				28	70				(1)	
Duero	Embalse de Los Rábanos		437,4		Sin determinar					(1)	
Duero	Entre Los Rábanos y Gormaz										
Duero	Entre Andaluz y San Esteban de Gormaz				140	Sin determinar				(5)	
Duero	Gormaz (E-4)	1.616	718	22	Sin determinar					(1)	
Rituerto	En la desembocadura				5,95	85	0,066			0,5	(5)
Andaluz	En la desembocadura				7,36	95	0,0022			6,3	(5)
Escalote	Berlanga de Duero				7,6	88	0,0034	0,025		8	(5)
Ucero	Burgo de Osma (E-5)	518	221	53	70	28	1/6 mes			77	(1)
Ucero	Ucero				65	91	0,008			27-42	(5)

RIO	LUGAR	Aportaciones de los ríos sorianos (hm ³)			Aportac. Subterráneas (1989-90)		Curvas de agotamiento			Volumen hidro- dinámico (hm ³)	Obser- vaciones
		Año húmedo	Año medio	Año seco	hm ³ /año	%	∞ 1	∞ 2	∞ 3		
Abión	Valdealvillo				28	83	0,0012	0,023	0,05	36	(5)
Cidacos	Yanguas (E-44)	130	62	20	Despreciable						(2)
Linares	San Pedro Manrique (E-43)	63	28	3	Despreciable						(2)
Alhama	Aguilar del Río Alhama (E-43)	171	53	13	Sin determinar						(2)
Añamaza	Dévanos (E-49)	22	16	11		85-90					
Añamaza	Mantiales de Dévanos		4,7		Sin determinar		0,0094			1	(5)
Bco. del Val	Los Fayos (E-90)	12	7	2	2,8 (2)	40					(2)
Queiles	Los Fayos (Iberduero)	45	35	22	99 (4)		25	0,003		Qt=75168.e	-0,003t (4)
Henar	Embid de Ariza (E-57)	21	8	1	4,6	57	2	0,0057	0,045	Qr=11666.e	-0,0057 (2)
Nágima	Monreal de Ariza (E-147)	67	18	3	Despreciable		Sin detm.				(2)
Jalón	Jubera (E-58)	59	25	6	16,3	65	12,3	0,0048	0,0186	0,1	Qt=59000.e -0,0048 (2)
Jalón	Cetina (E-7)	454	94	20	Sin detm.		10,2	0,009	0,047	0,118	Qt=92275.e -0,009 (2)
Blanco	Barrio Blanco (E-167)	17	11	1	11	100	16,8	0,0016		Qt=27000.e	-0,0016 (2)
Mesa	Mochales				47		Sin determinar				(6)
Tajuña	Aguilar de Anguita				12		Sin determinar				(6)

(1) Valores de la serie 1940-41 a 1977-78 en régimen natural del P.M.

(2) Valores tomados directamente de los anuarios de aforo.

(3) Se ha sumado los 250 l/s derivados por el canal de San Salvador.

(4) Datos estimados por E. Sanz Pérez (1984).

(5) Proyecto Hidrogeológico de Soria (1989).

(6) Según PIAS (1978-79-80).

TABLA 10

RESUMEN DE LAS CURVAS DE AGOTAMIENTO DE LA COMPONENTE SUBTERRANEA DEL RIO AÑAMAZA EN DEVANOS (Soria)

AÑOS	Q'o	Q't	t _o	t	At	Ln Qo	Ln Qt	∞	
1930-31	Distorsión por el canal de San Salvador								
1931-32	Idem								
1942-43	Idem								
1943-44	Idem								
1944-45	Idem								
1946-47	Idem								
1947-48	270	230	190	235	45	10,5	9,98	0,0115	Dévanos (*)
1948-49	Distorsión por el canal de San Salvador								
1949-50	60	48	290	360	70	8,55	8,33	0,003	Dévanos (*)
1950-51	Distorsión por el canal de San Salvador								
1951-52	500	350	150	225	75	10,67	10,3	0,0049	No fiable Q Altos
1952-53	500	410	40	165	125	10,67	10,47	0,0016	Añavieja- Dévanos
1953-54	420	400	75	235	160	10,50	10,45	0,0003	No fiable Q Altos
1954-55	250	200	50	100	50	9,98	9,06	0,018	
1955-56	35	20	280	325	45	8,01	7,45	0,0057	Dévanos (*)
	40	25	250	290	40	8,1	7,67	0,01	Dévanos (*)
1964-65	40	30	310	340	30	8,1	7,86	0,008	Dévanos (*)
1965-66	50	30	290	330	40	8,37	7,86	0,0127	Dévanos (*)
1966-67	40	20	280	320	40	8,14	7,45	0,0097	Dévanos (*)
1967-68	50	20	280	325	45	8,37	7,86	0,01	Dévanos (*)
1968-69	Distorsión por el canal de San Salvador								
1969-70	Idem								
1970-71	Idem								
1971-72	Idem								
1972-73	Idem								
1973-74	Idem								
1974-75	400	100	200	300	100	10,45	9,06	0,0139	(*)
MEDIAS(*)	109,4	61,4	263,3	313	51,1	8,73	8,18	0,00938	

TABLA 11

AFOROS EN LA CUENCA RIO ARANDA (en l/s) (P.I.A.S.)

RIO	AÑO	E	F	M	A	M	J	H	A	S	O	N	D
Río Isuela en Pujorosa	1979 1980 1981			100		106		290 43		30		76	
Río Isuela aguas arriba de Calcena	1979 1980 1981							0					
Río Isuela aguas abajo de Calcena	1979 1980 1981							348			336		
Río Aranda, Aranda (manantial)	1979 1980 1981			251		288		639 242		179		191	
Río Arandiga en desembocadura	1979 1980 1981	600		4.082 143	2.413	2	352 0	649 112		0	228	0	

TABLA 12

RESUMEN DE LAS CURVAS DE AGOTAMIENTO DE LA COMPONENTE SUBTERRANEA DEL RIO HENAR

AÑOS	Q'o	Q't	to	t	At	Ln Qo	Ln Qt	∞		
1945-46	200	55	270	320	50	9,75	8,46	0,0258	(*)	
1946-47	No se aprecian tramos rectilíneos									
1947-48	175	80	260	300	40	9,62	8,84	0,0195	(*)	
	140	120	330	365	35	9,4	9,24	0,0045	(*)	
1948-49	250	100	30	60	30	9,98	9,06	0,03	(*)	
	200	150	65	150	85	9,75	9,97	0,0033	(*)	
1949-50	250	175	80	185	105	9,98	9,62	0,0034	(*)	
	175	6	185	210	25	9,62	6,25	0,13	(*)	
1950-51	110	60	240	330	90	9,16	8,55	0,0067	(*)	

AÑOS	Q'o	Q't	to	t	At	Ln Qo	Ln Qt	∞	
1951-52	400	70	170	195	25	10,45	8,7	0,07	(*)
	300	40	225	250	25	10,16	8,14	0,08	(*)
	200	80	335	360	25	9,75	8,81	0,036	(*)
1955-56	400	40	257	320	63	10,45	8,14	0,036	(*)
	40	30	320	353	33	8,14	7,86	0,0084	(•)
1956-57	125	105	0	210	210	1,28	9,11	0,0008	(•)
1957-58	150	35	200	270	20	9,47	8,01	0,073	(*)
	120	40	230	250	20	9,24	8,14	0,055	(*)
1958-59	260	110	95	160	65	10,02	9,16	0,013	(•)
1959-60	30	18	195	225	30	7,86	7,35	0,017	(*)
	9	4	270	300	30	6,65	5,84	0,027	(*)
1960-61	20	8,5	90	210	120	7,45	6,6	0,007	(•)
	9	1	275	300	25	6,65	4,46	0,08	(*)
1961-62	450	300	210	360	150	10,56	10,16	0,0026	(•)
1962-63	15	10	15	90	75	7,16	6,76	0,0053	(•)
	18	10	150	240	90	7,35	6,76	0,0065	(•)
	20	15	240	300	60	7,45	7,16	0,0049	(•)
	25	18	310	365	55	7,67	7,35	0,0058	(•)
1963-64	600	200	30	210	180	10,8	9,75	0,0058	(•)
	150	120	210	300	120	9,47	9,24	0,0019	(•)
	150	120	300	360	60	9,47	9,24	0,0038	(•)
1964-65	60	30	0	72	72	8,55	7,86	0,0095	(•)
	65	45	90	135	45	8,63	8,26	0,008	(•)
	60	10	195	225	30	8,55	6,76	0,05	(*)
	15	8	285	360	75	7,16	6,53	0,0084	(•)
1965-66	300	20	260	350	90	10,16	7,45	0,03	(*)
1966-67	100	60	0	180	180	9,06	8,55	0,0028	(•)
	80	40	195	270	75	8,84	8,14	0,009	(•)
1967-68	150	50	60	120	60	9,47	8,37	0,016	(*)
	90	20	240	270	30	8,26	7,16	0,036	(*)
	20	10	270	365	95	7,45	6,76	0,0072	(•)
1970-71	No se aprecia tramo rectilíneo								
1971-72	450	150	180	150	70	10,56	9,47	0,015	(*)
1973-74	100	70	30	105	75	9,06	8,7	0,0048	(•)
	400	250	210	365	180	10,45	9,98	0,0026	(•)
1974-75	35	20	165	330	165	8,01	7,45	0,0033	(•)
Medias para ∞ Bajas (•)	135	79	156	253	30		0,005716		
Medias para ∞ Altas (*)	192	45,5	213	251	101				

TABLA 13

RESUMEN DE LAS CURVAS DE AGOTAMIENTO DE LA COMPONENTE SUBTERRANEA DEL RIO JALON EN JUBERA (Soria)

AÑOS	Q'o	Q't	t _o	t	At	Ln Q _o	Ln Q _t	∞		
1948-49	400	350	10	70	60	10,45	10,31	0,0023	(*)	
	300	250	270	330	60	10,16	9,98	0,03	(*)	
1949-50	300	200	0	40	40	10,16	9,75	0,01	(•)	
1959-51	500	300	80	92	12	10,67	10,16	0,042	(•)	
	450	300	100	120	20	10,56	10,16	0,02	(•)	
	650	350	250	260	10	10,93	10,31	0,06	(•)	
	450	350	270	300	30	10,56	10,31	0,008	(*)	
1951-52	600	400	50	120	70	10,85	10,45	0,0058	(*)	
	500	370	130	180	50	10,67	10,37	0,006	(*)	
	550	400	200	275	75	10,76	10,45	0,004	(*)	
1952-53	200	180	90	160	70	9,75	9,65	0,0014	(*)	
	250	110	195	240	45	9,98	9,16	0,01	(*)	
	190	130	280	300	20	9,70	9,32	0,019	(•)	
1953-45	300	100	0	210	210	10,16	9,065	0,005	(*)	
	300	250	230	290	40	10,16	9,98	0,0047	(*)	
1954-55	350	300	160	210	50	10,31	10,1	0,0042	(*)	
1955-56	600	550	110	190	80	10,85	10,76	0,001	(*)	
	700	400	205	230	25	11,01	10,45	0,017	(•)	
	900	500	240	265	25	11,26	11,67	0,02	(•)	
	800	400	270	285	25	11,14	10,45	0,023	(•)	
1956-57	No se aprecia tramo rectilíneo									
1957-58	No se aprecia tramo rectilíneo									
1958-59	No se aprecia tramo rectilíneo									
1959-60	1.200	700	220	315	95	11,55	11,01	0,0056	(*)	
1960-61	2.000	1.100	100	240	140	12,06	11,46	0,004	(*)	
	650	300	305	325	20	10,93	10,18	0,037	(•)	
1961-62	900	300	275	335	60	11,26	10,16	0,018	(•)	
1962-63	500	400	280	330	50	10,6	10,45	0,0032	(*)	
1963-64	1.100	600	75	130	55	11,46	10,85	0,01	(•)	
	1.100	300	260	340	80	11,46	10,16	0,0037	(•)	
1964-65	850	720	0	150	150	11,20	11,03	0,00113	(*)	
	1.050	380	225	280	55	11,41	10,40	0,018	(•)	
1965-66	2.000	1.200	150	180	30	12,06	11,55	0,017	(•)	
	1.000	700	225	240	15	11,36	11,01	0,02	(•)	
1966-67	240	190	210	290	80	9,94	9,7	0,003	(*)	

AÑOS	Q'o	Q't	to	t	At	Ln Qo	Ln Qt	∞	
1967-68	300	200	50	54	4	10,16	9,75	0,10	(+)
	300	250	61	63	2	10,16	9,98	0,09	(+)
	250	180	63	105	42	9,98	9,65	0,0078	(*)
	450	390	190	365	175	10,56	10,42	0,00068	(*)
1968-69	2.000	1.300	170	225	85	12,06	12,28	0,0025	(*)
1970-71	1.600	200	105	365	260	11,83	9,75	0,008	(*)
1971-72	600	400	190	270	80	10,85	10,45	0,005	(*)
1972-73								=0,1	(+)
								=0,1	(+)
								=0,1	(+)
	1.200	600	225	365	140	11,55	10,85	0,005	(*)
1973-74								=0,1	(+)
	2.500	800	215	265	50	12,28	11,14	0,0228	(•)
	800	680	265	365	100	11,14	10,98	0,0016	(*)
1974-75	750	450	0	125	125	11,08	10,56	0,0041	(*)
	750	650	140	200	60	11,08	10,93	0,025	(*)
1975-76	550	400	30	125	95	10,76	10,45	0,0032	(*)
	400	280	250	365	115	10,93	10,09	0,007	(*)
1976-77	700	580	300	365	65	11,01	10,82	0,0029	(*)
1977-78	900	700	280	365	85	11,26	11,01	0,0029	(*)
Medias									
(*)	683	497,7	161	293	87,48			0,0048	
(•)	705,6	447	197	230	33,8			0,0186	
(+)								0,1	

(*) Poca pendiente; (•) Bastante pendiente; (+) Mucha pendiente

TABLA 14

DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES
(Número de municipios con algún sistema de depuración)

<i>Conceptos</i>	<i>Con decantador</i>	<i>Con fosa séptica</i>	<i>Otros sistemas</i>	<i>Todos</i>
Número	20	69	16	105
<i>Punto vertido:</i>				
A arroyo, río o acequia	8	54	13	75
Otros	12	15	3	30
<i>Antigüedad:</i>				
Hasta 1980	4	39	14	57
Posterior a 1980	16	30	2	48
<i>Calidad del servicio:</i>				
Adecuada	17	58	13	88
Inadecuada o deficiente	3	11	3	17
<i>Problemas existentes:</i>				
Infradimensionada	3	11	2	16
Con vertidos indust. adicionales	–	2	–	–
Explotación incorrecta	2	–	–	2
Falta de elementos básicos	2	3	–	5
Falta de mantenimiento	1	4	–	5
No constan	12	49	14	75
Caudal de desagües (10 ³ m ³ /año)	351	833	749	1.933
Caudal tratado (10 ³ m ³ /año)	238	393	653	1.684

SEGUNDA PARTE

ESTUDIOS MONOGRÁFICOS DE ALGUNOS ACUÍFEROS

8. EL KARST DEL SUR Y OESTE DEL MONCAYO

RESUMEN

En el trabajo realizado se ha pretendido estudiar el karst de la cara occidental y meridional de la Sierra del Moncayo desde el punto de vista hidrogeológico. El objetivo principal es el manantial de Vozmediano (Soria), intentando cuantificar completa y detalladamente el macizo kárstico drenado por esta importante fuente de más de 1 m³/s. de caudal medio.

Para la explicación del funcionamiento del sistema se ha llevado a cabo un estudio hidrogeológico convencional de la zona. A ello hay que añadir la aplicación satisfactoria del modelo matemático SIMERO, modelo que posteriormente se ha simplificado significativamente, y del que se ha obtenido un balance hidráulico general, las diferentes curvas de agotamiento del manantial y la dependencia funcional entre pluviometría y recarga que ha sido comprobada mediante otro método diferente. Posteriormente se ha llegado a una aproximación a los balances, de las dos partes que constituyen el acuífero: el karst y el Paleozoico-Triásico.

Finalmente, se apunta el gran interés que supondría la regulación del manantial para atender las posibles demandas de agua para riego y otros usos.

8.1. INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra situada al este de la provincia de Soria, en sus límites con la de Zaragoza. El karst se desarrolla en gran parte de los materiales carbonatados del Jurásico marino que rodean las laderas paleozoicas y triásicas de las sierras del Moncayo por el sur y oeste, y las de Toranzo y Tablado por el norte. La zona que nos interesa está surcada por el río Araviana, perteneciente a la cuenca del Duero, y Queiles, Isuela y Keiles que son tributarios del Ebro.

El problema del origen del venero y su posible explicación quedó planteado por Sáenz García (1955 y 1958). La hipótesis de este autor, de la existencia de un dispositivo hidrogeológico de características relativamente especiales, como es el trasvase subterráneo de las aguas del valle superior del Araviana, perteneciente a la vertiente atlántica, a la del Mediterráneo, que es donde se encuentra el referido manadero, queda confirmada por el presente trabajo cualitativa y cuantitativamente.

La masa de nieve que blanquea las cumbres del Moncayo gran parte del año, y las frecuentes precipitaciones que se originan en las regiones más elevadas de esta montaña, alimentan copiosos raudales que se reparten desigualmente por una y otra vertiente, tocando en esta distribución la mayor parte a las comarcas aragonesas fronterizas, a donde descienden gran número de arroyos que llevan la fertilidad a las huertas y vegas de Los Fayos, Torrellas, Tarazona, etc. Esta circunstancia, y la versión muy generalizada que atribuye al Moncayo cierta influencia en la formación de las nubes tormentosas que suelen descargar asoladores pedriscos en las inmediatas comarcas de Soria y de Logroño, han inspirado el dicho tan conocido en aquel país: «Moncayo traidor, haces pobre a Castilla y rico a Aragón». Hidrogeológicamente, veremos que el Moncayo también “traiciona” a Castilla, dando la razón a la sabiduría popular y a Pedro Palacios –que es quien hacía este comentario en su obra sobre la descripción geológica de la provincia de Soria (Palacios, 1890)–, y quienes, sin conocer el transcurso lento de las aguas por el seno del gigante Castellano, barruntaban su funcionamiento hidrológico extraño y singular.

8.2. MARCO GEOLÓGICO

Desde el punto de vista geológico, la zona estudiada forma parte de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Comprende un zócalo hercínico, un tegumento posiblemente pérmico y triásico, y unas formaciones de cobertera constituidas por materiales del Jurásico marino y de las facies "Purbeck-Weald".

El zócalo está formado por una potente serie de materiales detríticos cámbricos y quizá ordovícicos. Discordantemente sobre ellos se disponen los pertenecientes al tegumento que comprende conglomerados, areniscas y limolitas del Buntsandstein, por encima de los cuales se encuentran los del Muschelkalk y Keuper, formados por arcillas y carbonatos, y arcillas, yesos, ofitas y posibles carbonatos, respectivamente.

El espesor que tiene el Buntsandstein es de 150 m. en la columna realizada en Beratón, aunque sobre este aspecto se sospecha que debe presentar una gran variabilidad, ya que en las sierras del Madero y Toranzo alcanza una potencia de 650 m. (IGME, 1973). El Muschelkalk está constituido por una serie reducida de potencia. Tiene 79 m. en la columna de Beratón, repartido en 36 m. de margas y arcillas versicolores y en una barra carbonatada de 43 m. El espesor del Keuper, como es de suponer, debido a la tectónica de despegue que lamina y desplaza las masas plásticas, es muy variable, observándose unos 36 m. en la columna de Beratón.

Todas las potencias observadas, excepto acaso los niveles carbonatados del Muschelkalk, pueden ser muy distintas de las reales en profundidad debido a causas tectónicas, y quizá a la posible disolución de niveles yesíferos en superficie. Así es como los materiales del Muschelkalk pueden desaparecer por completo debido a que su contacto con el Keuper puede estar tectonizado, como ocurre en los flancos O, N y SO del anticlinorio del Moncayo, apoyándose entonces las series jurásicas directamente sobre los materiales del Buntsandstein.

Siguiendo la diferenciación de los autores de las hojas geológicas a escala 1:50.000 núms. 319 (1981), 351 (1973) y 352 (1982), y en base también a observaciones propias, hemos separado para esta zona siete tramos dentro del Jurásico marino.

La unidad inferior corresponde a la conocida formación de carniolas constituida por dolomías masivas y oquerosas, que en Cueva de Ágreda alcanzan una potencia de más de 300 m., y de 140 m. en Beratón. Encima del conjunto dolomítico anterior, se encuentran unas calizas de grano fino azuladas y bien estratificadas de 400 m. de espesor en Cueva de Ágreda. Hacia la parte superior de esta litología empiezan a intercalarse, en progresivo aumento, niveles de margocalizas y margas que nos hacen diferenciar otro tramo, que culmina en otro con gran abundancia de niveles margosos y muy fosilíferos. Ambos tienen un espesor de 450 m. (IGME, 1973) y parecen perder su componente arcilloso hacia el norte. Apoyado sobre el último nivel se presentan unas calizas oolíticas bien estratificadas y con un espesor de 480 m. en Cueva de Ágreda. Sobre estas calizas se asientan otras detríticas que tienen una potencia variable entre 250 y 340 m., y sobre ellas se pasa bruscamente a unas calizas de ambiente recifal bien estratificadas, que llegan a desaparecer hacia el norte.

En continuidad estratigráfica con los materiales anteriores, se disponen otros pertenecientes a la facies «Purbeck-Weald», de los cuales están representados el grupo Tera, fundamentalmente detrítico, y el grupo Oncala, éste ya con considerables niveles calizos. Ambos tienen un espesor desconocido en nuestra zona.

En discontinuidad sobre todas las demás formaciones se apoyan los materiales detríticos terciarios y cuaternarios.

Es la litología carbonatada del Jurásico marino la que más nos interesa y en especial los tramos inferiores, por estar más o menos karstificados y constituir el acuífero del manadero de Vozmediano. Las margas o margocalizas pueden comportarse como acuitardos que separan quizá el embalse subterráneo en dos compartimentos durante un cierto espacio, pero como hacia el norte cambian lateralmente a calizas, ello hace que la conexión hidráulica se haga efectiva, con lo que se considera que hay un solo acuífero.

Las calizas pararrecifales, debido a su gran pureza litológica, su elevada densidad de fracturación y de estratificación, están altamente karstificadas, por lo que se comportan como un buen acuífero, aunque la escasa superficie de afloramiento impide que esté sobradamente alimentado. Está drenado para los manantiales de Vomitrosa en Ólvega, de no menos de 15 l/s. y de los Ojos del Keyles en

Ágreda, de más de 100 l/s., sin que se descarte la posibilidad de que esta última fuente pueda estar alimentada también por formaciones del Jurásico marino, aunque creemos que son independientes del karst de Vozmediano. La surgencia de los Ojos se localiza en el contacto de menor cota (940 m.) entre las calizas pararrecifales y los materiales impermeables del Grupo Tera.

Estructuralmente, se pueden distinguir tres grandes unidades: la zona estructural hercínica de Jarque-Tablado, el Anticlinorio del Moncayo y zona estructural Moncayo-Ólvega, y el sector norte de nuestra región. La falla inversa de Tablado pone en contacto la unidad Jarque-Tablado formada por materiales paleozoicos, con la fosa de Beratón, sinclinorio que estructura los materiales jurásicos marinos que limitan el flanco sur del anticlinorio del Moncayo. Por el flanco oeste del anticlinorio, el Jurásico marino se dispone en general monoclinamente, aunque también presentan algunos repliegues.

8.3. LA KARSTIFICACIÓN Y SUS FORMAS

Numerosos autores han estudiado la geomorfología del Moncayo, en especial la correspondiente a la vertiente septentrional aragonesa. Para no nombrar a todos, y a modo de ejemplo, citaremos a García Sáinz (1947), Mensua Fernández y Pellicer Corellano (1980), dentro de geomorfología general, Gómez de Llanera (1916), Martínez de Pisón y Arenillas Parra (1977), entre otros, sobre el glaciario; Pellicer Corellano (1980) sobre periglaciario, etc. Faltaba, sin embargo, un trabajo que diese a conocer el Karst que con notable desarrollo se instala en las series carbonatadas jurásicas de las laderas suroccidentales del Moncayo castellano, dando lugar a un acuífero importante que tiene una singularidad hidrogeológica destacable.

La karstificación se limita a los materiales carbonatados del Jurásico marino, en concreto a los tramos formados por las carniolas y calizas del Sinemuriense, Pliensbachiense y Toarciense. Para conocer la intensidad de la karstificación, hemos de tener en cuenta que los afloramientos carbonatados se encuentran en depresiones, o al menos a cotas inferiores a la de los terrenos menos permeables circundantes de las sierras de Tablado (1.747 m.), Toranzo (1.620 m.) y Moncayo (2.315 m.). Al haber en estas montañas precipitaciones relativamente elevadas de lluvia y nieve, recogen un abundante caudal

de aguas agresivas y dulces, provenientes de terrenos altos y de naturaleza silíceas. Éstas vienen a filtrarse en su mayor parte en las calizas y dolomías del acuífero de Vozmediano.

El polje del valle superior del río Araviana, en concreto, donde la litología de carbonatos permeables alcanza gran espesor y superficie de afloramiento, actúa como una zona de alimentación idónea. El mismo aplanamiento dificulta la concentración y ordenación de la red hidrográfica, lo que facilita la karstificación y la percolación de las aguas. El diaclasado no parece influir tanto como la estratificación, cuyo espaciado es pequeño y se dispone, generalmente, en dirección perpendicular a la de los cauces de los arroyos que bajan de los relieves montañosos, lo que favorece, lógicamente, la infiltración.

El valle superior del Araviana se instala sobre un accidente tectónico importante de dirección NO-SE, correspondiente a un sinclinal denominado Fosa de Beratón, truncado en su flanco sur por la falla de Tablado, que tiene la misma o parecida dirección. Esta fosa tiene ya originalmente una geometría que dificulta el drenaje y sobre ella se ha desarrollado un karst relativamente importante. El valle de Araviana es un polje kárstico abierto (fig. 8.1), ya que es una cuenca kárstica con drenaje subterráneo hacia el fontarrón de Vozmediano, y subaéreo mediante el río Araviana o Torambil, que logra una salida hacia el Duero, atravesando la alineación montañosa de Toranzo y Sierra del Madero por el llamado Estrecho de Araviana. Esto es así porque los arroyos provenientes de los bordes relativamente impermeables de las sierras de alrededor, constituyen el caudal del río Torambil, infiltrándose estas corrientes totalmente por numerosos sumideros, y tan sólo en avenidas de deshielos y lluvias logra salir del polje, aunque sea un río influente durante todo su recorrido. Los sumideros, a veces, están en puntos localizados (hemos contabilizado 25 de este tipo) y en otras se trata de pérdidas lentas a lo largo del cauce de los arroyos. Dependiendo del tiempo de su funcionamiento, los dividimos en permanentes, periódicos y accidentales. Los primeros, que son unos 14, se encuentran generalmente en los ríos y arroyos que bajan del Moncayo. Los periódicos en el interior del polje de Araviana y al pie de las Sierras de Toranzo y Tablado, y los sumideros ocasionales en la red de drenaje de los montes de Fuentes de Ágreda. Todos ellos se localizan preferentemente en los contactos litológicos entre los diferentes tipos de calizas y entre las carniolas y los materiales paleozoicos y/o triásicos.

Los valles epigeos que han dejado de funcionar a consecuencia de la karstificación en las zonas de sus cabeceras, se presentan en nuestra región como valles y barrancos secos en Fuentes de Ágreda y

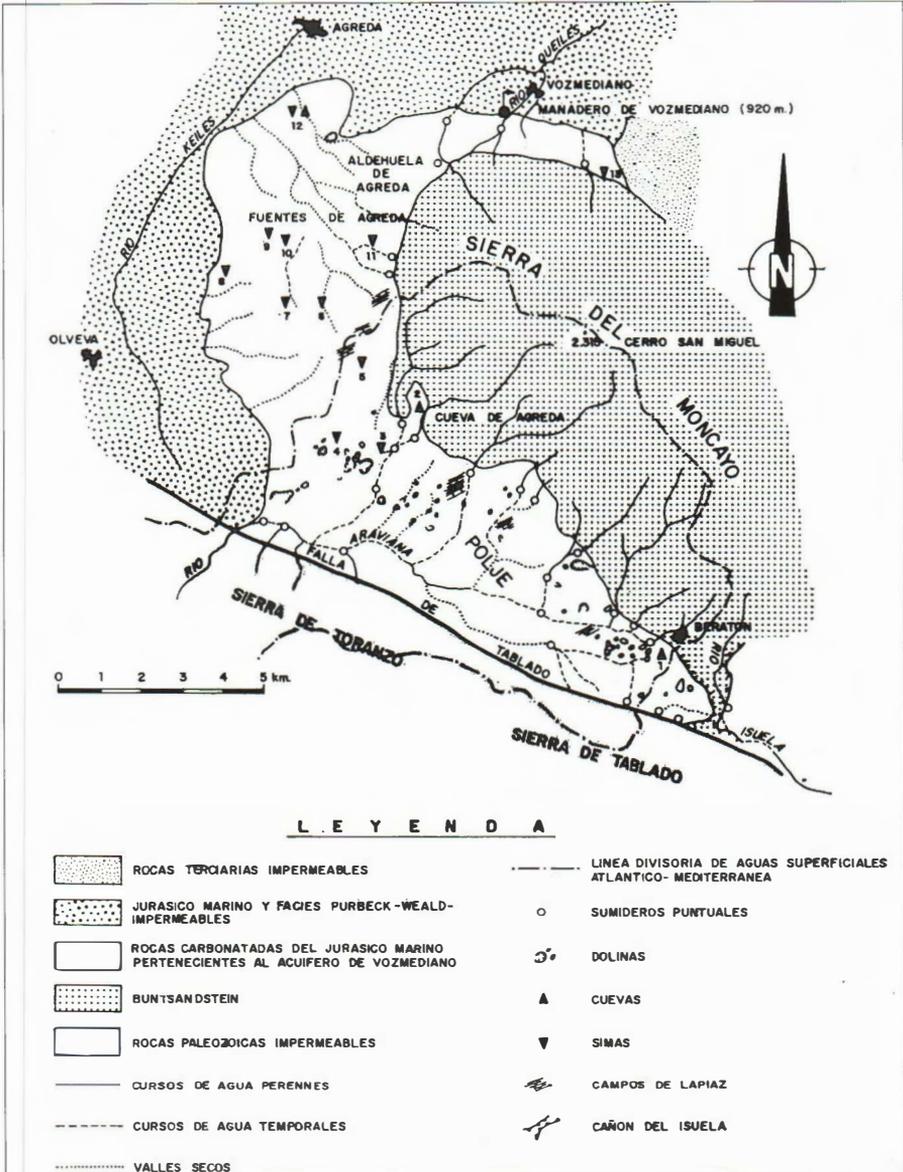


Fig. 8.1.—Acuífero de Voizmediano.

polje de Araviana. Seguramente son redes relictas de épocas más húmedas y actúan como formas de absorción, puesto que aún son susceptibles de funcionar durante grandes precipitaciones, según tenemos constancia, excepto la escorrentía que se recoge en la ladera norte de la Sierra de Tablado, que se pierde en las formaciones superficiales arenosas que se encuentran sobre las rocas carbonatadas, sin que ningún cauce de arroyo llegue con agua a confluir con el río Torambil.

En nuestra región se desarrollan campos de dolinas que se instalan sobre todo en las unidades litológicas formadas por las carniolas y las calizas del Sinemuriense. Se trata en su mayor parte de dolinas en forma de cubeta según la clasificación de morfológica de Cvijic (1893) y Sweeting (1972), aunque también las hay de hundimiento según la clasificación de Birot (1966), en las que se puede observar en alguna de ellas una débil subsidencia y algún caso de colapso. En este sentido, hace 35 años, se originó una torca de 20 m. de profundidad por desplome del terreno como consecuencia del movimiento sísmico que ocurrió el 4 de septiembre de 1961 con epicentro en Aguilar del río Alhama (Logroño). Por este motivo, el manantial de Vozmediano, situado a poca distancia del lugar y donde el terremoto alcanzó una magnitud de 5 en la escala de Richter, dejó de manar durante nueve horas.

Dependiendo de la forma de relieve en que se ubiquen podemos distinguir dolinas de penillanura, de vertiente, de valle y de hombrera. Algunas están capturadas por barrancos hoy sin funcionamiento, lo que hace pensar en una karstificación heredada e incluso de una edad de captura antigua también. Muchas dolinas se encuentran rellenas de arcilla de decalcificación, otras de clastos de roca, siendo alguna de ellas cultivables en su fondo. Otras se encuentran emplazadas bajo materiales de formaciones superficiales de tipo "raña", lo que demuestra el poco espesor que deben alcanzar estas formaciones, dando lugar a un karst cubierto en algunas zonas. La litología es el principal factor que influye en la distribución de las dolinas, apareciendo éstas, sobre todo, como se ha dicho antes, en las formaciones calcáreas, así como en el contacto, entre otros diferentes tipos de rocas carbonatadas, quedando la fracturación relegada a un papel accesorio.

Las formas menores de disolución o lapiazes son escasos en nuestra zona y los más importantes son los que aparecen en las cumbreras de la Sierra de Fuentes.

Por otra parte, se han localizado y explorado 12 cavidades entre cuevas y simas de escaso recorrido y profundidad, todas ellas inéditas, excepto la Cueva de Ágreda (Arenillas Parra e Higes Rolando, 1974).

En el extremo sureste de la zona, el río Isuela ha cortado los niveles de carniolas, Muschelkalk y del Keuper, formando un cañón de corto recorrido, pero que alcanza un desnivel de 200 m. La verticalidad de las paredes se limita a los bordes superiores del congosto, es decir, a las carniolas, cuyo fondo, simétricamente ataludado, tiene forma de V.

Mensik y Mertmann (1981), en su estudio de los restos mamíferos encontrados en tres yacimientos de la Sierra del Madero (Arancón, Aldealpozo y Ólvega), y en base también al trabajo nuestro sobre un yacimiento de vertebrados fósiles en Matalabreras (Sanz Pérez, 1983), todos cercanos a la zona estudiada y en formaciones carbonatadas jurásicas iguales a las del acuífero de Vozmediano, datan el proceso inicial de karstificación de las rocas, en el período comprendido entre el Plioceno-Pleistoceno hasta el Pleistoceno Superior (?).

8.4. HIDROGEOLOGÍA DEL ACUÍFERO

La cuenca de alimentación del manantial de Vozmediano tiene una superficie total de 130 Km², de los cuales 40 Km² pertenecen hidrográficamente al valle del Ebro y 90 Km² a la del Duero. Ella, a su vez, está formada por dos zonas perfectamente delimitadas: una kárstica de 70,5 Km² de extensión y en cuyo límite norte, a 905 m. de altitud, surge el manantial, y otra triásica-paleozoica de 59,5 Km² de extensión, que rodea a la primera por la parte este y sur y está formada, a manera de divisoria de aguas, por las laderas oeste del Moncayo y norte de Tablado y Toranzo (fig. 8.1). A su vez, el Karst se divide en el Polje de Araviana, con 37 Km² de extensión y perteneciente a la vertiente atlántica, y la Sierra de Fuentes, con 33,5 Km² de afloramiento acuífero.

El estudio hidrogeológico de esta cuenca y comportamiento del acuífero es el objeto principal de este trabajo. La información disponible sobre datos hidrológicos para hacer el balance ha obligado a un primer estudio del comportamiento global; pero en la última parte se intenta una aproximación al balance de cada una de las dos zonas.

8.4.1. Características y funcionamiento del acuífero

La geometría de los materiales acuíferos es de un sinclinorio en el Polje de Araviana, para pasar a una disposición monoclinal bordeando el oeste y norte del Moncayo. El Keuper es el nivel de base kárstico y por la parte superior queda limitado por el norte y oeste, por un techo impermeable confinante, que es un nivel dentro del Bathoniense. En el vallejuelo alóctono de Vozmediano, que es donde este contacto de litologías de diferente permeabilidad está a una cota más baja, brota el manantial del mismo nombre. Los terrenos acuíferos paleozoicos hacen de barrera por el sur mediante la falla de Tablado, falla de gran salto que interrumpe bruscamente la continuidad del acuífero en profundidad. Por el noreste está limitado por los materiales del Buntsandstein y Keuper.

La recarga se lleva a cabo a partir de la infiltración directa del agua de las precipitaciones que sobre los afloramientos del acuífero caen, tanto en los montes de Fuentes de Ágreda (Palacios, 1890), como en el Polje de Araviana, y de la infiltración indirecta de los numerosos arroyos y barrancos que de las áreas montañosas provienen, bien como escorrentía superficial, bien como de corrientes que nacen en fuentes en estos terrenos paleozoicos o triásicos, que al llegar a las calizas y dolomías jurásicas desaparecen.

Se ha realizado un inventario de más de 200 puntos de agua, extendido a las áreas cercanas a la cuenca por si hubiera nuevas salidas del sistema kárstico que se trata, habiéndose comprobado que no existe otra que la del susodicho manantial de Vozmediano, no hallándose ningún troplein propiamente dicho situado lejos o cerca del punto de emisión principal. Como hemos podido comprobar al hacer el inventario, las sierras paleozoicas de Toranzo y de Tablado son pobres en fuentes. En las dehesas y pasturajes que ocupan sus faldas occidentales manan algunos regajos, que casi se agotan durante los veranos secos y calurosos. Sin embargo, se hace observar la cierta importancia que adquieren algunos manantiales que brotan en el Buntsandstein, los cuales podemos dividir en dos tipos: aquellos que son la descarga de acuíferos de formaciones de areniscas, como los de la Dehesa, los Regachales, etc., que tienen un caudal considerable y de una gran regularidad, y aquellos otros que drenan los mantos de alteración que cubren las laderas del Moncayo, alimentando multi-

tud de fuentecillas o burdiales, que son de poca importancia, pero que en ocasiones pueden concentrarse en el mismo lugar muchas de estas fuentes formando reunidas un caudal nada despreciable. De todas formas, podemos considerar a nuestros efectos y en comparación con el acuífero de Vozmediano, que estos terrenos son relativamente impermeables, aunque no descartamos que puedan descargar subterráneamente al acuífero carbonatado, si bien el Keuper haría de pantalla impermeabilizadora entre ambas litologías. El Muschelkalk, por su reducida potencia y extensión de afloramientos, no adquiere importancia desde el punto de vista hidrogeológico, como tampoco lo tienen los grupos Tera y Oncala, por su carácter generalmente poco permeable, aunque se emplacen en ellos un cierto número de pozos de escaso rendimiento en Ólvega y Ágrede.

La descarga se efectúa a través de dos salidas naturales: la fuente de Vozmediano y el río Araviana. Las pequeñas fuentes que se localizan en la superficie de recarga del karst no representan sino los puntos de emisión de acuíferos colgados poco importantes sin relación con el flujo profundo del karst.

El manadero de Vozmediano es una surgencia permanente en la que brota por un solo conducto un caudal medio de 1,1 m³/s., lo que significa una aportación de 32 hm³ al año. Presenta una variabilidad en su caudal de 136 por 100 para un período considerado de 17 años de aforos diarios, lo que significa una gran regularidad natural, aunque podría modificarse significativamente para adaptarse a las necesidades estacionales explotando adecuadamente el acuífero, lo que beneficiaría el riego de la fértil vega navarro-aragonesa del Queiles.

La regularidad del manantial puede explicarse seguramente por ser un acuífero de una gran capacidad y por las características de sus parámetros hidráulicos. Secundariamente se podría pensar en que las nieves del Moncayo son reservas que recargan el acuífero en meses más secos, así como la existencia de otra salida por el río Araviana que resta las entradas en tromba, en las avenidas. Quizá también las formaciones superficiales detríticas que cubren parcialmente el Polje de la Araviana constituyen posiblemente un regulador hídrico de la zona seca del karst, puesto que el agua tiene que percolar por este sedimento yacente. La recarga de los arroyos del Moncayo es también bastante constante en su caudal, según hemos podido comprobar en los aforos realizados durante tres años.

La variación del caudal de un manantial durante la fase de agotamiento puede representarse por la expresión

$$Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha t} \quad [1]$$

siendo

Q_t = caudal del manantial en el momento t

Q_o = caudal en el momento t_o

α = coeficiente de agotamiento.

Esta es la expresión que representa la ley de disminución del caudal en manantiales que drenan acuíferos cautivos o libres de potencia considerable y con desagüe a nivel constante, tal como es el acuífero de Vozmediano. El coeficiente de agotamiento es constante y depende de las características geométricas del acuífero, de su transmisividad y coeficiente de almacenamiento (porosidad eficaz, si se trata de un acuífero libre).

El agotamiento del manantial de Vozmediano no puede asimilarse al rigido por la expresión [1], ya que ésta no puede utilizarse cuando existe recarga en el acuífero, tal como ocurre en nuestro caso, donde los arroyos del Moncayo y sierras circundantes al río Araviana lo están recargando durante todo el año, inclusive en estiaje. Es por ello que la expresión correcta debe ser

$$Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha t} + R (1 - e^{-\alpha t}) \quad [2]$$

donde R es la recarga del acuífero.

La expresión [2] sólo es aplicable para acuíferos cuya transmisividad y coeficiente de almacenamiento no varíen en la vertical y para recargas aproximadamente constantes. En primer lugar se ha aplicado la expresión [1], utilizando después la [2] con la recarga de los arroyos que se sumen en el acuífero, que ha dado los mismos resultados.

Se dispone de datos de 17 años con los caudales diarios aforados en el socaz de la central eléctrica Keyles II. La fiabilidad de estos datos para el fin que perseguimos, es suficiente.

Entre el manantial y la toma de agua del canal de la central no existen ganancias ni pérdidas a lo largo del cauce, ya que los materiales por los que circula el río son margas impermeables. Ello ha sido verificado en campo.

Para cada uno de los 17 años se han representado en papel semilogarítmico el hidrograma, buscando en los últimos meses del año hidrológico el tramo rectilíneo que es el que corresponde con la curva de agotamiento, tramos que resultan difíciles de localizar, ya que seguramente se han medido los caudales con poca precisión.

Dicho tramo rectilíneo, con sus dificultades de localización, se presenta para cada año en intervalos de días diferentes, por lo que en el cuadro de resultados se han indicado las fechas inicial y final del citado tramo y la longitud de dicho intervalo expresado en días. La fecha más temprana para comienzo de la curva de agotamiento es la que corresponde al 15 de junio del año 1978-79, y la más retrasada la del 3 de septiembre del año 1973-74. Los tramos finales de la curva están comprendidos entre el 3 de septiembre del año 1978-79 y el 22 de noviembre del año 1980- 81:

El valor de α viene expresado por

$$\alpha = \frac{\ln Q_0 - \ln Q_t}{t}$$

Los valores de Q en la ecuación 1 se han expresado en m³/día y t en días. Ahora bien, como los datos originales de caudales están expresados en l/seg., llamando a éstos Q' se tendrá:

$$Q = \frac{3600 \cdot 24}{1000} \cdot Q' = 86'4 Q'$$

De acuerdo con ello se ha formado la siguiente tabla:

Años	α
1962-63	0,00410
1963-64	0,00403
1964-65	0,00237
1965-66	No se aprecia tramo rectilíneo
1966-67	0,00382
1967-68	No se aprecia tramo rectilíneo (en 74 días es hontal.)
1968-69	No se aprecia tramo rectilíneo
1969-70	0,00295
1970-71	No se aprecia tramo rectilíneo
1971-72	No se aprecia tramo rectilíneo
1972-73	No se aprecia tramo rectilíneo
1973-74	0,00304

Años	∞
1974-75	0,00309
1975-76	0,00310
1976-77	No se aprecia tramo rectilíneo
1977-78	0,00209
1978-79	0,00289
1979-80	0,00630 (1)
1980-81	0,00257
1981-82	0,00491 (1)
Media	0,00302

(1) Se rechaza por atípico.

Como se observará, en algunos años no se han podido utilizar sus datos porque las precipitaciones habidas en los mismos no ha permitido poner de manifiesto la curva de agotamiento. Tampoco se tiene en cuenta el año 1978-79, por considerar que sus resultados son anómalos.

Si se dedujese el valor de ∞ en función de los caudales medios (870 l/s., el 1 de agosto, y 707 l/s. el 8 de octubre) para un incremento de tiempo medio de 70 días, se obtendría $\infty=0,00295$, y calculando el valor de ∞ como la media de los coeficientes de cada año, sale $\infty=0,00302$. Adoptamos para ∞ el valor medio de estos dos, o sea, $\infty=0,003$.

El caudal medio al comienzo de las curvas de agotamiento ha resultado ser de 870 l/s.= 75.168 metros cúbicos por día, y la fecha inicial media de dichas curvas se sitúa el 1 de agosto. Por tanto, la expresión que se obtiene para la curva de agotamiento, expresando los caudales en m³/día y el tiempo en días, contado a partir de la fecha 1 de agosto, es:

$$Q_t = 75.168 e^{-0,003 t} \quad [3]$$

De acuerdo con ella, se obtiene el siguiente valor para el agua almacenada por encima del nivel de drenaje (volumen hidrodinámico) en la fecha 1 de agosto:

$$V = \frac{Q_0}{\infty} = 25.065 \text{ hm}^3$$

El río Torambil representa la escorrentía superficial que sale del sistema kárstico. Aunque sólo se ha aforado estos últimos años, se sabe que no son muchos los días en que el tramo superior del Araviana logra tributar sus aguas al Rituerto, afluente éste del Duero.

En base al inventario de puntos de agua, a la geometría del acuífero y a la disposición y naturaleza de la estratificación, se deduce que las aguas dentro del acuífero kárstico, se desplazan desde el valle de Araviana hasta el manantial de Vozmediano bordeando el macizo del Moncayo. La fracturación no influye aquí de manera fundamental en el sentido de flujo de las aguas.

8.4.2. Datos hidrológicos de entradas y salidas

En lo que se refiere al registro y control de las observaciones meteorológicas y aforos de caudales, siendo éstas unas variables estocásticas, es necesario largos períodos de observación para poder obtener conclusiones fiables. Ha sido necesario, por tanto, basarse en la información disponible y únicamente, durante el corto período de realización de este trabajo, se ha ampliado esta información con aforos (durante 32 meses) de los arroyos del Paleozoico y Triásico, de los cuales no existía ninguna.

Sobre datos pluviométricos se han recopilado los correspondientes a 11 estaciones, de las cuales siete de ellas tienen influencia directa en la cuenca del acuífero y las restantes indirectamente, pues a través del grado de correlación con las primeras han servido para estimar algunas lagunas. Efectivamente, dentro del período de 34 años seguidos que abarcan estas observaciones, las de las distintas estaciones pluviométricas cubren etapas muy diversas y presentan frecuentes lagunas. Se han recopilado más de 14.000 datos primarios que corresponden, generalmente, a pluviometrías mensuales y se han calculado 20 correlaciones entre otros tantos pares de estaciones. Con ello se han completado datos anuales de las siete que tienen influencia directa en la cuenca, habiendo preocupado fundamentalmente la calidad de estas estimaciones y a este respecto se destaca que las series más largas y completas de datos primarios corresponden a estaciones con mayor grado de influencia en la zona.

Con todo, ha de tenerse presente que estos datos pluviométricos corresponden a observaciones puntuales y en base a ellas había

necesidad de inferir la pluviometría sobre toda la cuenca. Un primer paso fue determinar el grado de influencia de cada estación en la cuenca, mediante los polígonos de Thiessen; pero dado lo accidentado de su topografía, se pensó que dicho método había de ser perfeccionado mediante el de isoyetas (fig. 8.3). En él tenía especial significado el gradiente pluviométrico respecto a la altitud, tanto en la ladera norte como en la suroeste del Moncayo. Fue posible su determinación en base a los datos primarios de varias estaciones que dio una correlación muy satisfactoria y gradientes de 43 mm. y 37 mm. anuales por cada 100 m. de altitud (fig. 8.2).

Este método de isoyetas permitiría también el calcular la pluviometría en cada una de las dos zonas que comprende la cuenca.

Para las estimaciones mensuales se ha estudiado la variación estacional y cómo ésta variaba, bien según la localización espacial de las estaciones pluviométricas, bien según una clasificación de los años respecto a su volumen pluviométrico.

Todo ello ha permitido obtener unos valores pluviométricos mensuales que se piensa reflejan con aproximación suficiente la realidad.

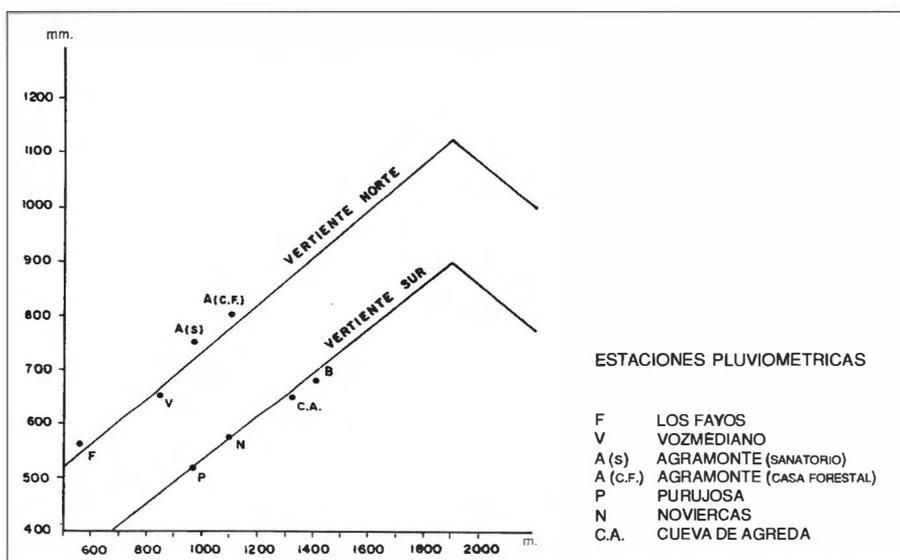


Fig. 8.2.—Variación de la pluviometría en función de la altitud en las vertientes Norte y Sur del Moncayo.

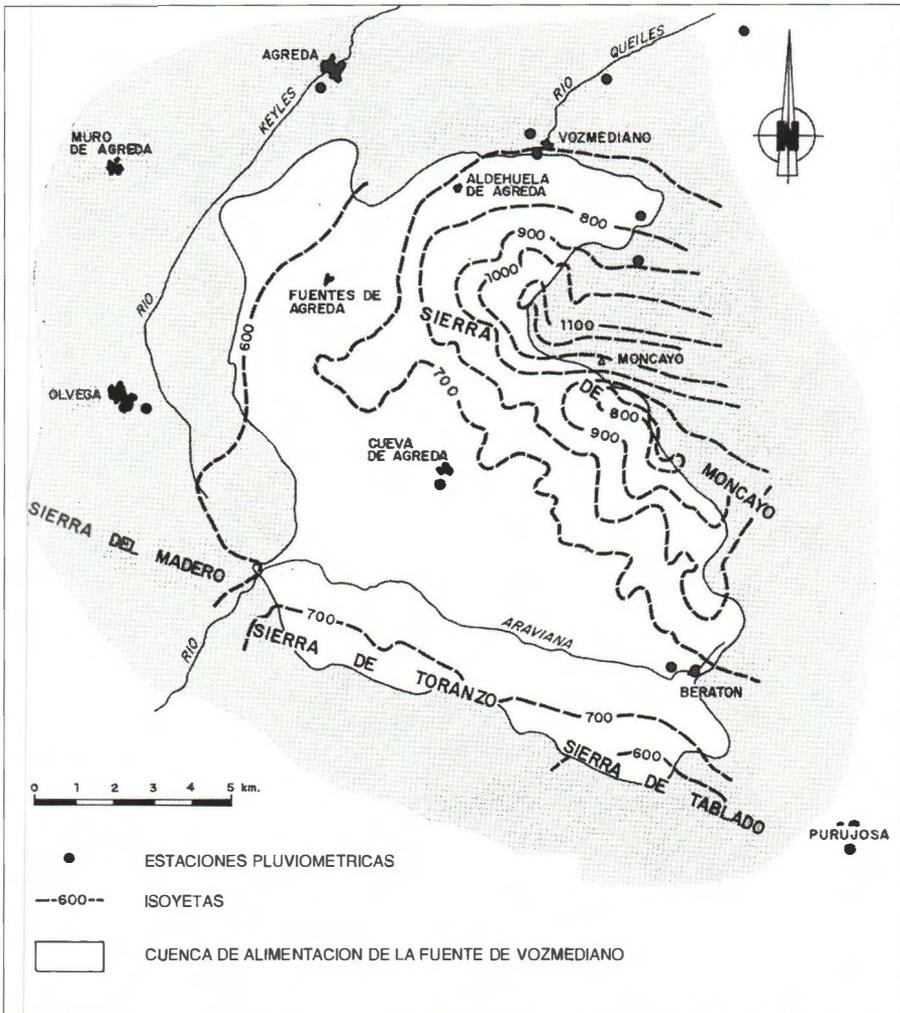


Fig. 8.3.-Mapa de curvas isoyetas (1938-1980).

Otra variable importante es la que hace referencia a las salidas de agua de la cuenca. Hay dos salidas de agua superficial, de no gran importancia (ríos de la Aldehuela y Araviana), y otra por el manantial de Vozmediano, que aporta más del 90 por 100 del total de salidas. La del río de la Aldehuela es regular (de unos 20 l/s.), por lo que su control ha resultado fácil y en todo caso su variación apenas influye en los cálculos. La del río Araviana que abandona la cuenca

por el Estrecho de su nombre, es intermitente y se ha podido comprobar que tiene lugar cuando el caudal del mismo rebasa la capacidad de filtración del karst, por el cual discurre antes de abandonar la cuenca. Esta capacidad de filtración se ha estimado en 500 l/s.

En las campañas de aforo que se han hecho, hemos podido observar que a caudales menores de 400 l/s., las pérdidas ocurrían sólo en los tramos de los arroyos que circulaban por encima de las carniolas, que son las primeras rocas que encuentran los arroyos después de abandonar los terrenos paleozoicos y triásicos. Ello quiere indicar que en las carniolas se filtran el 80 por 100 de estas aguas, y en las otras calizas el 20 por 100. Del total de 26,5 Km. de recorrido que estos arroyos tienen en el valle de Araviana sobre los sedimentos carbonatados, 9,5 Km. son sobre carniolas, y 17 Km. sobre los restantes. En los primeros se filtran 400 l/s. como máximo, en los otros 100 l/s., también como máximo, ya que si se sobrepasan los 500 l/s. logra salir del sistema por el Estrecho de Araviana. Esto equivale a que los cauces de los arroyos que pasan por las carniolas tienen una filtración máxima de 42 l/s/km. de cauce; siete veces más que en el resto de las calizas. Ello, desde luego, nos da una idea de la diferente permeabilidad de los tramos calcáreos.

Puesto que no se disponían de aforos fiables de las salidas por Araviana y Vozmediano, salvo en los 32 últimos meses de todo el período a que hace referencia este trabajo, ha habido necesidad de estimarlas como se dirá a continuación.

Respecto a la salida más importante, por el manantial de Vozmediano, los datos disponibles no se refieren a aforos directos, sino a caudales turbinados en la central Keiles-II situada a 3 Km. río abajo, que discurre por un barranco impermeable. Estos datos de caudales diarios turbinados tenían el inconveniente de no recoger siempre todo el caudal del río, y ello debido a dos motivos principales: uno, que pudo corregirse fácilmente y que por otra parte no suponían gran pérdida, hace referencia a la puesta en funcionamiento de uno, dos o los tres alternadores instalados en dicha central, pues había momentos en que el caudal excedía algo al funcionamiento de uno o dos alternadores y no compensaba poner en marcha otro; el otro hace referencia a la capacidad de transporte del canal que deriva el agua hacia la central con límite superior de 1.750 l/s., por lo que para caudales superiores a esta cota, el exceso quedaba sin controlar.

Por otra parte se tenía la ventaja de la gran cantidad de datos disponibles (más de 10.000), lo que permitía un buen análisis estadístico de dichas series con clasificaciones de años, según pluviometría. Ello se hizo en base a las curvas de caudales clasificados que no sólo permitió estimar las pérdidas debidas al tope de capacidad del canal, sino también las salidas de la cuenca por el río Araviana (fig. 8.4).

Con ello quedaba completado el volumen de salidas en lo que se podían considerar valores reales, tanto las aportadas por el manantial de Vozmediano, como las salidas superficiales (por los ríos de la Aldehuela y Araviana), que a los efectos de establecer el balance de la cuenca se han considerado como escorrentía.

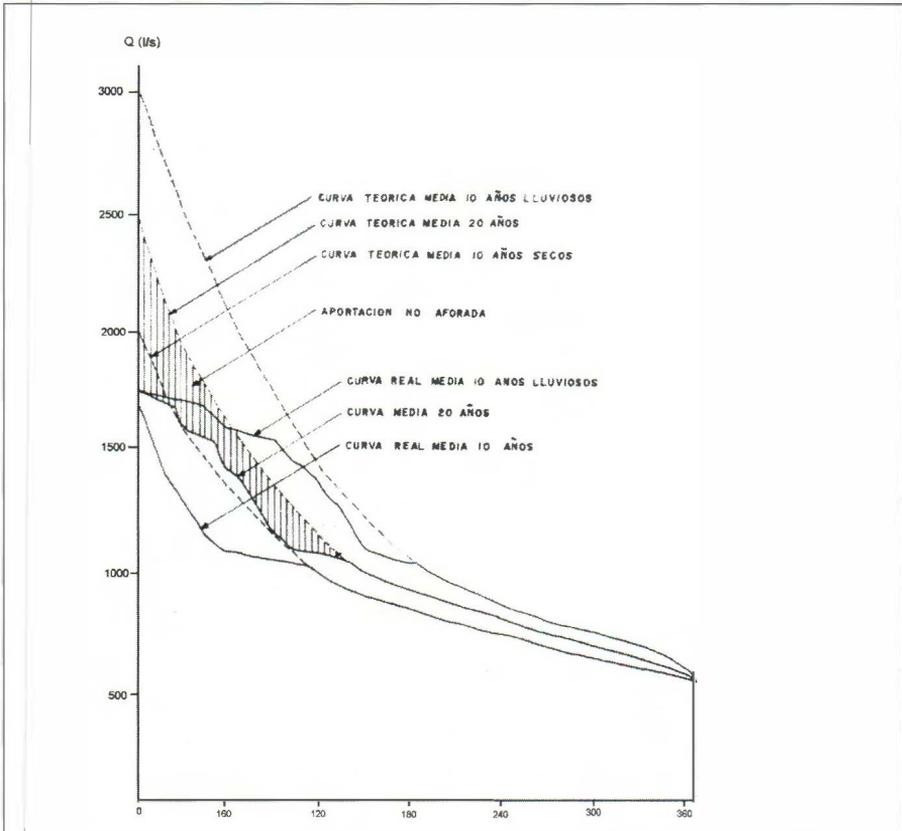


Fig. 8.4.—Curva de caudales clasificados.

Mayores dificultades ha tenido el cálculo de la evaporación real y respecto a la cual la información disponible hace referencia a la potencial en Agramonte (situado en los límites de la cuenca), en función de la temperatura. Y puesto que esta información correspondía a un año medio, para la variación entre los años que abarca el estudio, se tomó como referencia las medidas que se vienen haciendo en Soria capital. De todas formas, siendo esta variable de muy difícil control, se ha tratado posteriormente, y a la vista de los resultados obtenidos, de su eliminación como variable a considerar, estudiando la correlación múltiple entre recarga, pluviometría y temperatura. Con ello, el control de caudales queda bastante simplificado.

8.4.3. La recarga anual

Quizá el aspecto más destacable y esclarecedor de esta parte hidrogeológica sea la aplicación del modelo SIMERO para obtener una simulación del funcionamiento del acuífero. Pero antes, nos ha parecido de interés explicar la recarga anual a partir de la pluviometría, mediante una función lineal, y que entre otras aplicaciones, pudiera servir de contraste con los resultados de la primera parte del modelo SIMERO (denominada Balance). Ello era posible con los datos disponibles, pues se ha seguido un procedimiento en el que intervienen las variables de pluviometría y aportaciones del manantial y que ha sido aplicado a acuíferos kársticos (Sahuquillo, 1972, 1983). Es un método iterativo de aproximaciones sucesivas hasta conseguir un grado de correlación aceptable.

No nos detenemos aquí a explicar el fundamento teórico del método, tan sólo diremos que su aplicación al acuífero de Vozmediano (Sanz, 1987) ha resultado la recta de regresión y coeficiente de correlación siguiente:

$$I = 0'075P - 19'16; \rho = 0'919$$

donde P es la pluviometría anual en mm. e I la recarga anual en hm³, o bien expresando todo en lámina de agua para los 130 Km³ de cuenca:

$$I = 0'58 P - 147'4 [4]$$

Así obtenemos, como primer avance, los siguientes datos medios para toda la cuenca:

Pluviometría.....	714	mm.
Recarga.....	264,5	mm.
Coefficiente de infiltración	38,1	%

Y puesto que el 80 por 100 de los valores pluviométricos anuales varían entre 600 mm. y 900 mm. podemos concluir que el coeficiente de infiltración varía entre el 33 por 100 y el 41 por 100.

La fórmula [4] se verá confirmada más adelante siguiendo otro camino.

8.4.4. Aplicación del modelo Simero al acuífero de Vozmediano

La aplicación del modelo SIMERO (Degallier, 1972) al acuífero de Vozmediano exige un aporte de información, de cuya posesión dependerá el período de ajuste o simulación, la unidad de tiempo y la fase de tanteos para el ajuste de los parámetros y de los valores iniciales.

Respecto al período de tiempo para simular la explicación del modelo a través de las series históricas de entradas y salidas del acuífero, y en base a la información disponible sobre estas series históricas, se ha pensado que un período de 21 años seguidos (entre 1959-60 y 1979-80) puede ser suficiente y que para este período se puede conseguir información fiable, como se puede ver en los apartados correspondientes, tanto para la pluviometría, evaporación y escurriencia superficial, como para las salidas por manantial a efectos de contraste y ajuste del modelo a los parámetros del acuífero.

Ahora bien, si bien algunos de estos datos son de periodicidad diaria, el conocimiento de los demás corresponde a períodos mensuales y aun los de periodicidad diaria, como caudales aforados y pluviometría de algunas estaciones, no son directos y comprensivos de toda la cuenca del acuífero, por lo que, en base a ellos, se hace preciso recurrir a estimaciones.

Para la aplicación del modelo SIMERO se hace necesario utilizar una medida de tiempo, evidentemente más pequeña que el año, ya que durante esta unidad de tiempo se supone que la entrada es de flujo constante; pero ha de conjugarse el menor error posible que la discretización del tiempo pueda introducir en las fórmulas de flujo y el que pueda introducirse en los datos originales o finales de con-

traste al tener que ser éstos estimados. Teniendo en cuenta estos efectos en la calidad de los resultados se ha considerado prudente el adoptar el mes como unidad de medida del tiempo, con lo que el período de 21 años que va a abarcar la aplicación y contraste del modelo supondrá un total de 252 meses.

Por lo que se refiere a los parámetros del acuífero (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.), aparte de la heterogeneidad del mismo, no se dispone de medidas directas. Ahora bien, la geometría y geología del acuífero se conoce con bastante detalle como para inferir unos intervalos entre los que sea lógico esperar estén comprendidos los valores medios de estos parámetros y con ello facilitar u orientar la fase de tanteo. Incluso se pueden inferir las líneas de flujo para el estudio de la tercera capa o manto freático. De todas formas, en esta fase de tanteo, se hace una aplicación del modelo, con cálculo manual, a lo que ha sido el año medio del período de 21 años, pensando que su ajuste puede ser significativo.

Para su introducción en el programa se recopilan y ordenan las variables de entrada, así como las de salida con periodicidad mensual; se hace una aplicación al año medio que da una primera aproximación de los parámetros, se hace una simplificación del esquema operativo que se traduce a lenguaje de programación y mediante un ordenador se ejecuta el programa. Después de unos tanteos de calibrado se adoptan unos valores finales para los parámetros y se obtienen unos resultados que reflejan con bastante aproximación las series históricas de caudales.

Dichos resultados se analizan con detalle, pero aquí reflejaremos a modo de síntesis el balance del año medio:

			Fecha del tiempo	Desviación relativa
	mm	%	Medio	
Precipitación	714,2	100,0	18-3	18%
Escorrentía	35,6	5,0	25-2	40%
Evaporación real	404,9	56,7	15-2	67%
Infiltración gravífica	273,7	38,3	13-2	67%
Infiltración llegada al manto (recarga)	273,7	38,3	21-2	60%
Salidas manantial	273,7	38,3	1-5	13%

Respecto a las curvas de agotamiento que proporciona el modelo se tienen los siguientes resultados:

Capas del acuífero Reserva	Coeficientes de agotamiento (día ⁻¹)	Semivida (meses)	Aportación media anual		Reserva diná- mica media en mayo (hm ³)
			hm ³	%	
Capa profunda	0,0037	6,23	29,7	85,1	26,8
Capa intermedia	0,0185	1,27	5,0	14,3	1,1
Capa somera	0,0925	0,27	0,2	0,6	0,01
			34,9	100,0	100,0

Con los resultados de la recarga (infiltración gravífica) se ha vuelto a calcular la dependencia entre los valores anuales de pluviometría y dicha recarga, obteniéndose:

$$I = 0'59P - 150'6; \rho = 0'924$$

que coincide prácticamente con los obtenidos en el punto anterior. (4)

Pero, lo que creemos más importante, se ha calculado la correlación múltiple entre los valores mensuales de pluviometría, temperatura, y racarga, obteniéndose los siguientes resultados:

$$I = 0'6P - 2'7 \cdot T + 11'7; R_{I \cdot PT} = 0,900$$

donde I y P vienen expresados en láminas de agua (mm.) y T en grados centígrados.

La importancia de este plano de regresión es que la recarga se puede calcular fácilmente en función de dos variables (precipitación y temperatura), que son de fácil y más corriente control, con lo que el modelo SIMERO puede quedar muy simplificado en la parte más laboriosa y de más difícil control como es el Balance, al prescindir de las variables de entrada, «evapotranspiración» y «escorrentía» y de su detallado esquema operativo.

De acuerdo con ello, un modelo SIMERO simplificado, que explica las aportaciones mensuales del manantial (U), en función de las dos variables únicas de entrada, precipitación (P) y temperatura (T), puede quedar así:

$$S(I) = 0'6P(I) - 2,7 \cdot T(I) + 11'7$$

$$T'(I) = 0'6 \cdot S(I) + 0'4 \cdot S(I-1)$$

$$U(0 \bullet I) = 0'8949.[0'1.T(I) + U(0.I-1)]$$

$$U(1 \bullet I) = 0'574.[0'1.T(I) + U(1.I-1)]$$

$$U(2 \bullet I) = 0'0623.[0'1.T(I) + U(2.I-1)]$$

$$U(I) = U(0.I) + U(1.I) + U(2.I)$$

modelo que daría como fórmula final para los caudales del mes I, expresados en láminas de agua:

$$U(I) = 0'055 P(I) + 0'037 P(I-1) - 0'248 T(I) - 0'165 T(I-1) + 0'4949 U(0,I-1) + 574 U(1,I-1) + 0'0623. U(2,I-1) + 1'792$$

Teniendo en cuenta que la contribución media de la aportación de caudales de cada una de las tres capas en el caudal total está en la proporción de 85 : 14 : 1, una aceptable simplificación de los tres últimos sumandos de la expresión última sería:

$$[0'8949.0'85 + 0'574.0'14 + 0'0623]. U(I-1) = 0'830 U(I-1)$$

y dicha expresión quedaría simplificada así:

$$U(I) = 0'055 P(I) + 0'037 P(I-1) - 0'248 T(I) - 0'165 T(I-1) + 0'83 U(I-1) + 1'79$$

Se hace una interpretación de los sumandos que componen el caudal total en esta fórmula: El primer componente, suma de los cuatro primeros sumandos, es el «efecto próximo de la infiltración gravífica» que, a su vez, depende de las pluviometrías y temperaturas del mes actual y del anterior; esta aportación supone, por término medio, el 8,6 por 100 del caudal anual. El segundo componente, 0,83 U (I-1) representa el «caudal básico» (el 83,4 por 100 del total anual) y está en función del reservorio. El tercero es el denominado “caudal permanente”, y representa el 8 por 100 del total anual medio.

Se ensaya esta fórmula para el año medio y sus resultados apenas difieren de los reales y de los obtenidos con el modelo SIMERO completo.

Esta fórmula simplificada puede usarse cómodamente para completar medias hidrométricas, para prever los efectos de años excepcionales de gran pluviosidad o de prolongada sequía con ciertos supuestos sobre las variables de entrada, para cuantificar alternativas de regulación o modificación del régimen estacional del manantial y aun para hacer previsiones a corto plazo según las distribuciones aleatorias que pueda preverse para las dos variables de entrada y partiendo del caudal registrado en el mes inicial.

8.4.5. Aproximación al balance del Pérmico-Triásico y a la recarga del karst

Toda la cuenca del acuífero se divide en dos zonas perfectamente diferenciadas y con características hidrogeológicas diferentes:

a) Zona del Permotriásico, situada al este y sur por cuyos laterales constituye una divisoria de aguas. Es la de mayor altitud e hidrológicamente es una zona no influenciada. Tiene mayor precipitación (parte en forma de nieve), mayor escorrentía y la salida de sus aguas, tanto de escorrentía superficial como de manantiales, es con destino a la zona kárstica.

b) Zona kárstica, que limita el acuífero por la parte norte y oeste, mediante capas impermeables. Es de menor pluviometría y sus salidas son el manantial de Vozmediano (al norte), para el agua subterránea, y el río Araviana (al O), para el agua superficial. No da escorrentía superficial propia y aun la del Araviana proviene en su totalidad del Permotriásico. Además de la recarga de pluviometría, recibe toda el agua de la zona, y cuando esta última llegada excede de su capacidad de infiltración, presenta unos excedentes superficiales intermitentes que abandonan el sistema acuífero por el río Araviana.

Las extensiones superficiales de ambas zonas son:

	km ²
Zona kárstica	70,5
Zona permotriásica	59,5
Total cuenca	130,0

Puesto que la zona permotriásica es una zona no influenciada, al formular el propósito de este estudio, se iniciaron medidas de aforos de sus arroyos, como básicos para el estudio hidrológico de la misma. Y aunque la información conseguida es más bien corta, en este apartado se ha intentado una aproximación que esperamos pueda afinarse cuando se disponga de series más largas.

Por otra parte, se piensa que, después del estudio hecho en los apartados anteriores, y que hacen referencia a todo el acuífero, y como consecuencia de este conocimiento de la zona del Permotriásico, se pueden deducir algunas conclusiones propias de la zona kárstica.

Para la zona del Permotriásico y para un período de 32 meses se ha conseguido información, que ha permitido deducir datos mensuales sobre pluviometría, caudales de los manantiales, escorrentía y salidas por el estrecho de Araviana. De ellos se ha deducido el coeficiente de agotamiento de los manantiales ($\alpha=0,006 \text{ día}^{-1}$) y a continuación el cálculo de la recarga según un procedimiento original que supone el proceso inverso al establecido por el modelo SIMERO para la circulación del agua por la tercera capa o manto freático y que seguidamente comentamos.

El método seguido representa, como se ha dicho, un proceso inverso al establecido por el modelo SIMERO (Sanz Pérez, 1986) para la circulación del agua por la tercera capa y simplificado con el uso de sólo el primer factor exponencial que es el que proporciona la casi totalidad de los caudales.

A través de la curva de agotamiento ha quedado determinado, en el punto anterior, el coeficiente de agotamiento $\alpha=0'006 \text{ días}^{-1} = 0'18 \text{ mes}^{-1}$.

Por otra parte, sabemos que, en el modelo SIMERO, es:

$$K(0) = e^{-\alpha} = \exp \cdot \frac{-\pi^2 \cdot D(3)}{8 \cdot X'} = 0,835 \quad [5]$$

$K(0)$ un coeficiente exponencial de la tercera capa. Siendo $D(3)$ factor reductor de dimensión de caudales para la tercera capa. X' longitud media de las líneas de corriente.

Al objeto de deducir, de la igualdad anterior, el parámetro $D(3)$, se ha estimado el valor medio de X' , o sea de la longitud media de las diversas líneas de corriente; éstas guardan cierto paralelismo y se extienden desde la proximidad a las cimas respectivas hasta donde afloran los manantiales, que por regla general lo hacen antes de terminar las laderas y de su llegada al karst, si bien no son fuentes únicas para cada arroyo. Dada la geometría de la zona se ha tomado $X'=3 \text{ Km}$.

De acuerdo con este valor sale, despejando de [5]:

$$D(3) = \frac{8X' \cdot \alpha}{\pi^2} = 4337'7$$

Respecto a C (2), o factor corrector para caudales en tercera capa, se deduce la ecuación

$$C(2) \cdot D(3) \cdot \frac{1-K(0)}{K(0)} = X'$$

con lo que se obtiene el valor $C(2) = 1,354$.

Por otra parte, los valores reducidos [Z(I)] de la recarga [T(I)] llegada al manto, divididos por X' para expresarlos en mm., como los caudales, serán:

$$Z(I) = \frac{T(I) \cdot C(2) \cdot D(3)}{3.000} = 0'1975 \cdot T(I) \quad [6]$$

Z(I) lámina de agua llegada a la tercera capa reducida para caudales.

T(I) lámina de agua llegada al manto.

Pues bien, si U(I) son los caudales, expresados en láminas de agua (mm.), de la serie recurrente que usa el modelo SIMERO para un sólo término exponencial

$$U(I) = [U(I-1) + Z(I)] \cdot K(0)$$

se deduce que

$$Z(I) = \frac{U(I)}{K(0)} - U(I-1)$$

o sea, en nuestro caso,

$$Z(I) = \frac{U(I)}{0,835} - U(I-1) \quad [7]$$

fórmula recurrente que nos permite calcular los valores de Z(I) a partir de los de U(I).

Y puesto que de la fórmula [6] se deduce que $T(I) = 5,062 \cdot Z(I)$, la [7] quedará así:

$$Z(I) = \left[\frac{U(I)}{0'835} - U(I-1) \right] \cdot 5'062$$

o bien

$$T(I) = 6'06 U(I) - 5'06 U(I-1) \quad [8]$$

Aplicada esta fórmula de recurrencia a los datos mensuales disponibles de caudales U(I) para 31 meses, se obtienen los resulta-

dos para la recarga llegada al manto T (I) de 30 meses. Es de notar que los valores de T (I) para algún mes son negativos y que corresponden a los meses con déficit pluviométrico.

A partir de estos valores de T (I) han de calcularse los de infiltración gravífica S (I) resultante del balance. Ello se ha hecho por estimación de cada mes, admitiendo un retraso medio de un mes para la percolación del agua a través de la capa no saturada y teniendo en cuenta que $S(I) \leq P(I) - E(I)$, lo cual ha sido posible, pues se conocen los datos mensuales de pluviometría, P(I), y de escorrentía superficial, E (I).

Con el mismo objeto de simplificar el balance de esta zona y conscientes de que el período de observación ha sido corto, lo cual puede restar precisión a los resultados, se intenta establecer la dependencia funcional, de tipo lineal, entre la recarga, pluviometría y temperatura.

Ya ha quedado explicado como se han obtenido los datos básicos de pluviometría y recarga para el período de treinta y un meses. Únicamente añadir que los de temperaturas medias mensuales han sido proporcionados por el observatorio meteorológico de Soria y corresponden, por tanto, a las habidas en dicha estación.

Dichos resultados, si bien con un grado de significación mediano, ya que $R_{s.PT}=0,6$, se sintetizan en el plano de regresión

$$S = 0'4P - 1'4T - 7'4 \quad [9]$$

donde P (precipitaciones) y S (infiltración gravífica) están expresados en mm y T (temperaturas medias mensuales) en grados centígrados, correspondiendo éstas a la estación de Soria.

La recta que limita los valores positivos y negativos de la recarga es:

$$0'4P - 1'4T + 7'4 = 0$$

La recarga media dada por esta regresión [9], sin atender los déficits pluviométricos, o sea sin considerar los valores negativos de julio y agosto, sale 20'5 mm. mensual, lo que da para el coeficiente de infiltración un valor del 31'1 por 100 de la pluviometría. Este valor es inferior en ocho puntos al que sale como media (39'5%) para toda la cuenca, y en ello influye principalmente la mayor escorrentía favorecida por la mayor impermeabilidad del terreno y por las fuertes pendientes topográficas.

De esta regresión múltiple se puede deducir la regresión simple entre valores anuales de precipitación y recarga, suponiendo que todos los años son como el año medio en cuanto a temperaturas. Con este supuesto y sumando la recarga negativa de julio y agosto para considerar solamente la infiltración gravífica, queda

$$\sum_{i=1}^{12} S_i = 0'4 \cdot \sum_{i=1}^{12} P_i - 1'4 \cdot \sum_{i=1}^{12} T_i + 7'4 \cdot 12 + 12'2$$

y expresando con

$$S' = \sum_{i=1}^{12} S_i \text{ y } P' = \sum_{i=1}^{12} P_i$$

o sea los valores anuales de estas variables, queda

$$S' = 0'4 \cdot P' - 70 \quad [10]$$

Para una pluviometría media de 793'4 mm. sale una recarga de 246'4 mm, o sea el 31'2 por 100, y puesto que el 80 por 100 de los valores pluviométricos oscilan entre 650 mm. y 1.000 mm., podemos concluir que dicho coeficiente de infiltración oscila entre el 29 por 100 y el 33 por 100.

LA RECARGA EN LA ZONA KÁRSTICA

Se pretende deducir, por diferencia entre toda la cuenca y la zona del permotriásico, la recarga de la zona kárstica.

La parte más insegura del balance corresponde a la escorrentía superficial del permotriásico, ya que los aforos efectuados durante treinta y dos meses han correspondido a un período de sequía y el porcentaje del 18'7 por 100, respecto a los caudales de las fuentes, que sale para dicho período, ha de considerarse bajo, ya que la escorrentía se nutre de la lluvia y la nieve, que ha sido escasa, y en los manantiales influyen además las reservas de los acuíferos.

Ahora bien, puesto que en la regresión obtenida para toda la cuenca, entre recarga (S) y pluviometría (P) anuales,

$$S = 0'6P - 146 \quad [11]$$

está incluida en S', la recarga del karst, puesto que es agua que no sale de la cuenca y va al acuífero, a la recarga deducida en el punto

anterior para el permotriásico ($S=0.4 P-70$), y a los efectos de deducir la recarga en el karst por resta con la recarga deducida de [11] habrá que añadir dicha escorrentía que no sale de la cuenca por el Aravianna, lo cual supone un 74 por 100 de S_t .

Con ello se tendrá, teniendo en cuenta las superficies de las zonas

$$130 \cdot S = 59'5 - 1'074 S_t + 70'5 S_k$$

y poniendo para la recarga S_k en el karst

$$S_k = m P_k - n$$

Las fórmulas respectivas para S y S_t y expresando todo en función de la pluviometría media (P) de la cuenca será:

$$130 (0'6 P - 146) = 59'5 \cdot 1'074 (0'4 \cdot 1'11 P - 70) + 70'5 (m \cdot 0'907 p - n)$$

o sea,

$$78 P - 18980 = (28'37 + 63'9 \cdot m) P - (4473'2 + 70'5 \cdot n)$$

y de esta identidad se deduce que

$$78 = 28'37 + 63'9 \cdot m$$

$$18980 = 4473'2 + 70'5 \cdot n$$

de las cuales sale que

$$m = 0'77 \quad n = 205$$

con lo que la regresión entre pluviometría media de la zona kárstica será

$$S_k = 0'77 P_k - 205 \quad [12]$$

expresión que para una pluviometría media en dicha zona de 648 mm. corresponde una recarga de 294 mm. y un coeficiente de infiltración del 45'3 por 100.

BALANCES HIDRÁULICOS

Con los resultados de los puntos anteriores se pueden establecer los balances hidráulicos de cada zona y de toda la cuenca.

Zona del permotriásico:

Superficie: 59'5 Km².

Pluviometría media: 793'4 mm. año.

Regresión: $S_T = 0'4 P_T - 70$ (en mm. anuales).

Balance año medio:

<i>Partidas</i>	<i>mm</i>	<i>hm3</i>	<i>%</i>
Pluviometría	793'4	47'2	100
Evaporación	484'1	28'8	61'2
Recarga	247'4	14'7	31'2
Ecorrentía.....	61'9	3'7	7'8

Destino:

Recarga + escorrentía	309'3	18'4	100
Salidas Araviana (1)	43'7	2'6	14'1
Salidas Aldehuela (2)	20'2	1'2	6'5
Recarga al Karst	245'4	14'6	79'4

(1) Procede de escorrentía

(2) Procede de infiltración

Zona kárstica:Superficie: 70'5 Km².

Pluviometría media: 648'2 mm/año.

Regresión: $S_K = 0'77 P_K - 205$ (en mm. anuales).**Balance año medio:**

<i>Partidas</i>	<i>mm</i>	<i>hm3</i>	<i>%</i>
Pluviometría	648'2	45'8	100'0
Evaporación	353'2	25'0	54'6
Recarga	294'0	20'8	45'4
Ecorrentía	—	—	—
Entradas	501'1	35'4	100'0
Recarga	294'0	20'8	58'7
Recarga de permotrásico.....	207'1	14'6	41'3
Salidas Vozmediano.....	505'1	35'4	100

Toda la cuenca (fig.8 5)Superficie: 130 Km².

Pluviometría media: 715'3 mm/año.

Regresión: $S_K = 0'6 P - 146$ (en mm. anuales).

Balance año medio:

<i>Partidas</i>	<i>mm</i>	<i>hm³</i>	<i>%</i>
Pluviometría.....	715'3	93	100
Evaporación.....	413'8	53'8	57'8
Escorrentía superficial (1).....	20'0	2'6	2'8
Recarga.....	281'5	36'6	39'4
<i>Destino de la recarga:</i>			
Vozmediano.....	272'3	35'4	97'0
Aldehuela.....	9'2	1'2	3'0

(1) Salidas por el Araviana

Se parte del principio que los dos dispositivos hidrogeológicos descritos, el kárstico y el Permotriásico, están aislados uno de otro por el nivel impermeable del Keuper, por lo que no existe transferencia subterránea.

En lo que respecta a la zona del Permotriásico, ésta tiene una precipitación de 47'2 hm³ y una evapotranspiración de 28,8 hm³. El caudal saliente se efectúa por medio de escorrentía superficial (3,7 hm³) y manantiales (14,7 hm³). Del total de esta escorrentía (3,7+14,7=18,4), 14,6 hm³ se recargan, por sumideros, al karst y 3,8 hm³ salen supelficialmente del sistema por los ríos Araviana (2,6 hm³) y Aldehuela (1,2 hm³). (Fig. 8.5).

La zona kárstica tiene una precipitación de 45,8 hm³. No existe escorrentía superficial; la infiltración es de 20,8 hm³. La descarga se efectúa por el manantial de Vozmediano (35,4 hm³), que representa la suma de la recarga en la zona kárstica y la recarga superficial del Permotriásico.

De este balance y considerando la superficie de la cuenca del Polje de Araviana, se puede deducir fácilmente que, aproximadamente el 75 por 100 de la alimentación del manantial de Vozmediano proviene de la cuenca del Duero, es decir, del polje y su cuenca circundante, y que tan sólo la cuarta parte es de la del Ebro, con lo que resulta evidente el trasvase subterráneo de agua de la vertiente atlántica a la del mediterráneo. Aparte de que actualmente existe una labor superficial de zapa por parte del Isuela y del Keyles en la cabecera del Araviana, la cuenca alta de este río (90 Km²), se encuentra capturada, si no hidrográficamente sí hidrogeológicamente, ya que tan sólo un 10 por 100 de la aportación hídrica que recoge la tributa al Duero, y el 90 por 100 restante va subterráneamente al Ebro.

8.4.6. Hidroquímica y calidad de agua

De los análisis químicos realizados en muestras de agua correspondientes al acuífero del Permotriásico y kárstico (Manantial de Vozmediano), queda de manifiesto las diferentes composiciones de agua de una y otra zona: mientras que las aguas del Triásico y Pérmico son frías, dulces, agresivas y con una débil mineralización, las de Vozmediano son algo más duras y más mineralizadas. Este manantial es potable para bebida y no representa problemas importantes para su utilización en regadíos o industria.

8.4.7. Aspecto práctico del estudio

No se pretende aquí estudiar en profundidad la aplicación práctica de este estudio, ya que la gestión del acuífero exigiría estudios y colaboraciones de otro carácter. Sólo queremos resaltar la importancia de la utilidad que puede tener este acuífero y apuntar algunas ideas sobre este tema.

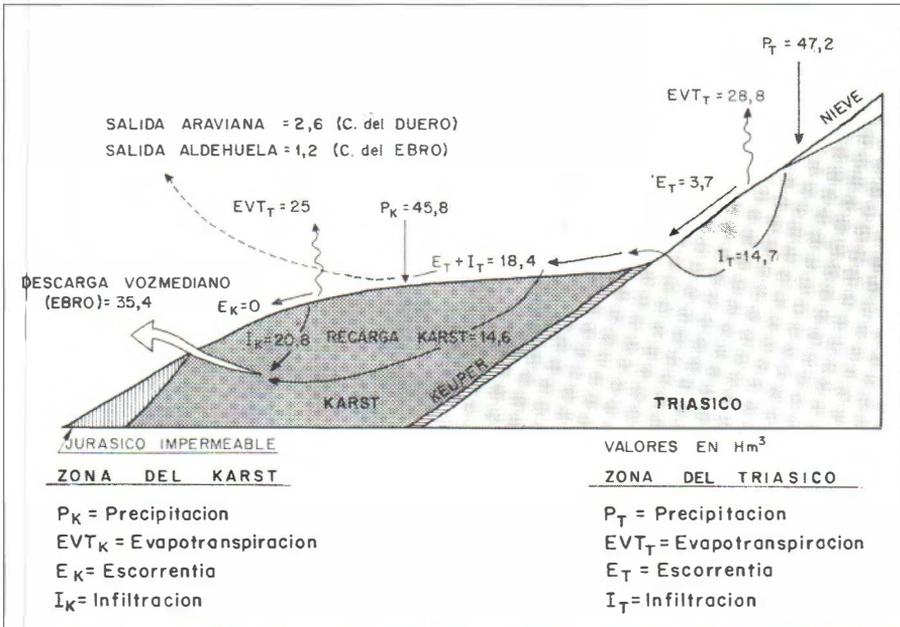


Fig. 8.5.—Balance hídrico.

El aspecto más práctico que vemos en la explotación del acuífero de Vozmediano es la regulación del manantial que lo drena. La regulación para ciclos de uno o más años beneficiaría la huerta de la vega del Queiles, aumentando y mejorando su superficie regable, pudiendo suplir, quizá, el papel que desempeñaría la presa de Los Fayos de Tarazona, pero con muchos menos coste de obra, ya que bastaría la realización de pozos de captación, y aún éstos serían muy posiblemente artesianos en las inmediaciones de Vozmediano, con el consiguiente ahorro total o parcial de energía. Al menos, la regulación del manantial podría combinarse con la gestión de aquel embalse. Dejamos aparte las sabidas ventajas que de por sí tienen los embalses subterráneos sobre los de superficie: ausencia de evaporación y soterramiento, vida ilimitada del embalse, etc. Los 200 l/s. que tiene el Val serían los únicos que no entrarían en la regulación subterránea y sí interesaría embalsarse.

En cuanto a la calidad química del agua para su utilización en regadío no presenta problemas, según vemos por los análisis efectuados. Reúne también las condiciones necesarias de potabilidad.

No vemos que la regulación del manantial pueda afectar negativamente a los saltos hidroeléctricos ubicados aguas abajo del manantial, entre Vozmediano y Los Fayos de Tarazona, aprovechando el fuerte desnivel existente. En estiaje se podría bombear seguramente un gran caudal, lo que mantendría las centrales en su máxima producción durante los meses en que desciende dicha producción de energía y es más cara.

Sáenz Ridruejo (1968) ya pensó que si el Araviana tuviese un caudal importante, éste podría incorporarse al Ebro, vía acuífero de Vozmediano. Su aportación, que posteriormente se ha comprobado que para un año medio asciende a 2,2 hm³, podría, desde luego, recargarse artificialmente de una manera fácil y económica en el Polje de Araviana.

Una utilización secundaria podría ser el abastecimiento de agua a Ólvega, tal como ha hecho recientemente la villa de Ágreda realizando el único pozo existente en el acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

- Arenillas Parra, M. e Higes Rolando, V. (1974): Contribución al catálogo espeleológico de la provincia de Soria (Cuevas de Villaciervos y de Cuevas de Ágreda). *Celtiberia*, número 48, C. E. S., Soria.
 - Birot, P. (1966): *Le relief calcaire*. C. D. U., 283 pp., París.
 - Cvijic, J.(1893): *Das Kartsphanomen*. *Geogr. Abh.*, V, pp. 217-230, Berlín.
 - Degallier, R. (1972): Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains: le modèle SIMERO. *Bulletin du B. R. G. M. (Deuxieme serie)*. Section III, núm. 3, pp. 23-42, 6 tabl.
 - García Sáinz, L. (1947): El clima de la España cuaternaria y los factores de su formación. Discurso leído en la solemne apertura del curso académico 1947-48, p. 41. Valencia.
 - Gómez de Llarena, J. (1916): Excursiones a las sierras de la Demanda, Urbión y Moncayo. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, núm. 16. Madrid.
 - Instituto Geológico y Minero de España (1973): Memoria explicativa de la Hoja núm. 351 del Mapa Geológico de España, escala 1:50.000 (Ólvega).
 - Instituto Geológico y Minero de España (1981): Memoria explicativa de la hoja núm. 319 del Mapa Geológico de España, escala 1:50.000 (Ágreda).
 - Instituto Geológico y Minero de España (1982): Memoria explicativa de la Hoja núm. 352 del Mapa Geológico de España, escala 1:50.000 (Tabuena).
 - Martínez de Pisón, E. y Arenillas Parra, M. (1977): La morfología glaciar del Moncayo. *Tecniterrae*, núm 18, pp. 132-134 Madrid.
 - Mensua Fernández, S. y Pellicer Corellano, F. (1980): El Piedemonte del Moncayo. *Cuadernos de Estudios Borjanos*, VI, pp. 109-135. Borja.
 - Palacios, P. (1890): Descripción física, geológica y agrológica de la provincia de Soria. Comisión del Mapa Geológico de España. Madrid.
 - Pellicer Corellano, F. (1980): El periglaciarismo del Moncayo. *Geographica*, núms. 7-8. Zaragoza.
 - Sáenz García, C. (1953): Anecdotario geológico de los ríos sorianos. *Celtiberia*, núm. 6 C. E. S. Soria.
- Sáenz García, C. (1958): *Miscelánea de la historia fluvial española*. Notas y Comunicaciones del IGME, núm. 50, pp. 149-180. Madrid.
- Sáenz Ridruejo, C. (1968): Estudio de la viabilidad técnico-económica del plan de riegos del Queiles. 1.- etapa. *Direcc. General de Obras Hidráulicas*. Madrid.

- Sanz Pérez, E. (1983): Un yacimiento de vertebrados fósiles en el término de Matalebreras (Soria). Boletín de Informaciones y Estudios del Servicio Geológico de Obras Públicas, núm. 42, pp 139-146. Madrid.
- Sanz Pérez, E. (1984): El karst del sur y oeste del Moncayo. Inédita. Tesis Doctoral. Univ. Complut. Madrid.
- Sanz Pérez, E. (1985): Un modelo SIMERO de simulación de la escorrentía superficial y subterránea. Boletín Geol. y Min., T. XCVI, nov.-dic., pp. 54-74.
- Sanz Pérez, E. (1986): Aplicación del modelo SIMERO al manantial de Vozmediano. Boletín Geológico y Minero, Tomo . XCVII, enero-febrero, pp. 42-64.
- Sanz Pérez, E. (1986). El Karst del Sur y Oeste del Moncayo. Boletín Geológico y Minero. T. XCVII-II pp. 194-213.
- Sweeting, M.M. (1972): Karst Landforms. The Macmillan Press, p. 362. Londres.

9. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL KARST DEL CAÑÓN DEL RÍO LOBOS

RESUMEN

En el presente trabajo se describen las características generales del funcionamiento hidrogeológico del acuífero de Uceró. Seguidamente se hace un detallado análisis del modelo matemático de precipitación-escorrentía CREC, el cual se aplica al manantial de La Galiana, principal drenaje de aquel acuífero. (Sanz, 1992).

9.1. EL ACUÍFERO DE UCERO

9.1.1. FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

La escorrentía subterránea del Mesozoico situado en la mitad norte de la provincia de Soria, se efectúa por el río Uceró, Avión, Sequillo, Andaluz, Izana, Mazos, Golmayo, Perales y Vilde. De todos estos ríos, el más importante es el de Uceró. Toma este nombre a partir del manadero de La Galiana, situado a la salida del cañón del río Lobos, en el término municipal del pueblo de igual denominación. (Fotos 9 y 10)

El manantial de La Galiana brota de una cueva sumergida que ha sido explorada en un corto tramo por espeleo-buceadores, sin que se haya podido continuar. Antiguamente, este manantial brotaba en la cueva baja de La Galiana, situada unos pocos metros por encima. En algunos tramos de la cavidad circula a veces agua y presenta varios lagos subterráneos de pequeña entidad. En la cueva del Lago, justo al lado, se puede ver la situación del nivel freático. Se tiene noticia que durante el terremoto de Lisboa del siglo XVIII la fuente dejó de manar durante unas horas.

El acuífero queda definido por una sucesión de niveles calizo dolomíticos que tienen una potencia total del orden de los 250-300 m. Hay algunas intercalaciones margosas, en general de poco espesor respecto al conjunto, por lo que todo él puede considerarse como una única unidad hidrogeológica. Este acuífero descansa sobre los niveles margosos del Cenomanense, comportándose como libre cuando aflora y pasando a confinado al quedar cubierto por los sedimentos terciarios (fig. 9.1).

Los materiales acuíferos se extienden en una superficie aproximada de 129 kilómetros cuadrados, y su geometría es bastante sencilla. El Cretácico se dispone buzando suavemente hacia el norte dentro de un amplio sinclinal, estructurado luego a anticlinal en Ucero. El Jurásico cabalga en San Leonardo de Yagüe sobre el Cretácico.

El Lobos, principal afluente de cabecera del Ucero, viene de la provincia de Burgos, donde recoge las escorrentías y drenajes también subterráneos de los materiales detríticos del Wealdense y de alguna pequeña fuente kárstica. Se alimenta el Lobos de pequeños arroyos que drenan estos sedimentos wealdicos y que en época de estiaje llevan unas pocas decenas de litros por segundo.

Al llegar a las calizas cretácicas de la alineación de la Sierra de Cabrejas, el río se encañona en un angosto cañón, que se prolon-

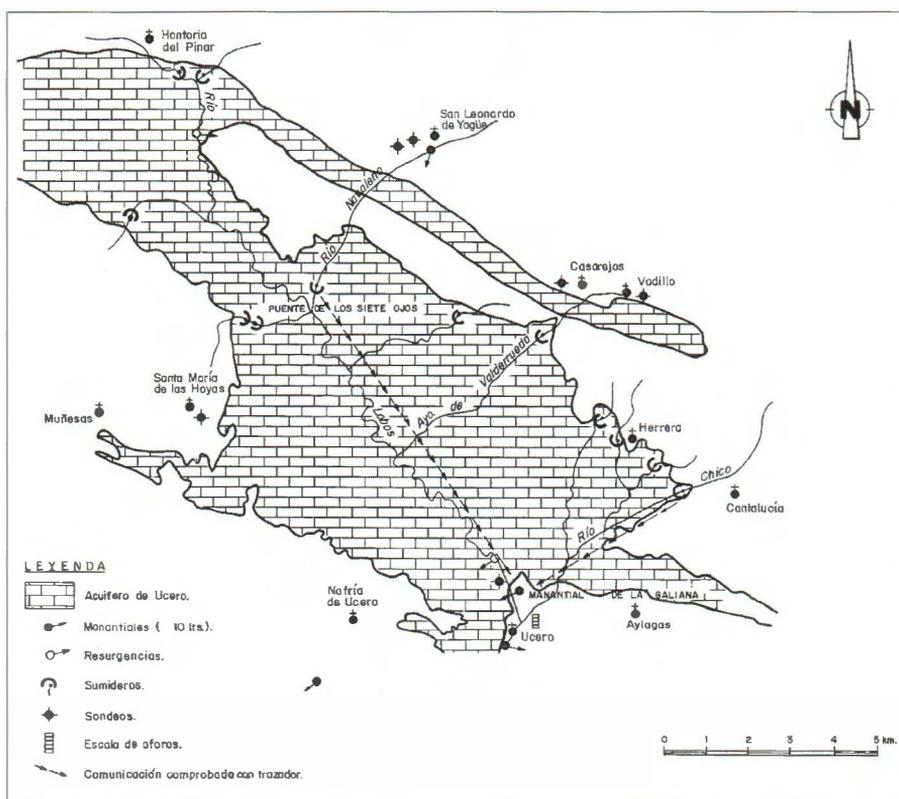


Fig. 9.1.—El acuífero del río Lobos.

ga durante 25 Km. por las provincias de Burgos y Soria hasta el mencionado pueblo de Utero (Foto 4). En el comienzo del cañón, el río Lobos se pierde cuando se encuentra en régimen de estiaje y baja ya seco hasta la ermita de San Bartolomé. Esta circunstancia ha quedado reflejada en mapas antiguos, como el de Loperráez (1788) (Fig. 9.2) donde se observa como el trazado del río Lobos queda cortado en la zona donde se producen las pérdidas de agua. El Lobos se filtra entre los acarreo del cauce y en sumideros situados en la orilla. Es bastante llamativo el sumidero del “Apretadero” donde hay una pequeña sima en la orilla rocosa por la que se puede llegar a infiltrar más de 300 l/s. (Foto 5)



Fig. 9.2.—Mapa geográfico de Loperráez.

Sin embargo, el nivel freático aflora en algunas partes de su cauce, que permanece a modo de charcas o pozos que nunca se secan. Dependiendo del caudal que lleve el Lobos a la entrada del cañón y la situación del nivel freático, el río puede perderse más arriba o más abajo en la faja de calizas, hasta el punto que cuando el caudal es suficientemente alto se le ve correr con agua por todo su lecho. Otras veces hay tramos con agua, aguas arriba o aguas abajo, indistintamente.

Durante el profundo estiaje y posterior temporada de intensas lluvias ocurridas entre 1995 y 1996, el nivel freático observado en un sondeo ubicado en el Puente de Siete Ojos subió en una semana, desde 17 m. de profundidad hasta situarse al ras del thalweg del río Lobos.

En épocas lluviosas aparecen varias surgencias. La más grande (hasta 400 l/s) se denomina Las Raideras y se encuentra en la margen derecha del río Lobos, a mitad de camino entre Hontoria del Pinar (Burgos) y el Puente de "Siete Ojos". Este brote suele manar durante varios días, semanas o incluso pocos meses, dependiendo de la intensidad de las lluvias caídas. Hay otros brotes más modestos que éstos, que nacen en el fondo del cañón, como los que están junto al bar de entrada a la Hoz o en el aparcamiento cercano a la Ermita. En Valdeabellano de Ucero brota también un manantial (La Hue Seca, de hasta 100 l/s) de una cueva subhorizontal que puede ser recorrida en un tramo de 400 m, pero que queda completamente inundada y en carga por el río subterráneo que origina el manadero tras chubascos intensos (Foto 13). Pero el caso quizá más llamativo y espectacular es la sima también denominada de la Hue Seca, en Santa María de las Hoyas. Se trata de una estavela de 8 a 11 m. de profundidad, habitualmente seca o con agua en su fondo, circunstancia ésta última que fue aprovechada hace dos décadas para la instalación de un sistema de bombeo, utilizándose el agua extraída de este pozo natural para regar varias hectáreas del término municipal de Santa María de las Hoyas y de Rejas de Ucero. Parece ser que este bombeo afectó al manantial templado de Fuencaiente del Burgo, que disminuyó su caudal. En períodos excepcionalmente lluviosos, el nivel freático puede subir de tal manera que el agua brota por la boca de la sima, originando una corriente de agua que puede llegar a tener un caudal superior a 200 l/s. Normalmente, esta situación suele durar unos pocos días (Fotos 11 y 12). En cuanto a

surgencias permanentes a parte de La Galiana, sólo hay cinco, muy pequeñas y repartidas a lo largo del cañón.

En estiaje, el río suele llevar agua desde la ermita de San Bartolomé, tal y como hemos dicho. En las paredes rocosas del cañón queda visible la marca hasta dónde llega el río y de la cual también es testigo la ermita románica de San Bartolomé, sita precisamente a la altura conveniente para que las máximas avenidas del río no las afecten. En el invierno de 1995-1996 se produjo una extraordinaria crecida en la que se llegó a aforar un caudal máximo aproximado en Ucero de 30 m³/s. El río Lobos inundó toda la llanura del fondo de la Hoz, llegando el agua a tocar las paredes rocosas de ambas vertientes (Foto 7).

El río Lobos tiene un afluente por su izquierda importante. Se trata del río Navaleno, que proviene de San Leonardo de Yagüe, donde tiene su nacimiento en pequeños pero permanentes arroyos que drenan el Weald (unas pocas decenas de l/s. en estiaje), pero que engrosa su caudal con la fuente kárstica de San Leonardo (60 l/s.-100 l/s. de caudal medio), alimentada por las alineaciones carbonatadas del Jurásico, independizado aquí del Cretácico. El Navaleno llega al Lobos con todo su caudal y en su confluencia se pierde totalmente en épocas de estiaje, precisamente donde empiezan los afloramientos importantes calcáreos del Cretácico (Foto 6). Si lleva algo más de caudal puede superar este sumidero pero vuelve el agua a perderse en otro situado unos 2 Km. aguas abajo ya en el cauce del río Lobos, y donde abundan las dolinas y simas en los alrededores.

Otros afluentes dignos de mención son el río Chico y el arroyo de Casarejos. Este último, en situación de estiaje, baja con la poca agua que recoge de los rezumes subterráneos del Weald (10 l/s. en estiaje); se infiltra más abajo del pueblo. Con algo más de caudal, este río se pierde 0,5 Km. antes de su confluencia con el río Lobos.

El Chico tiene más agua: unos 30/40 l/s en estiaje. Antiguamente había varios molinos que aprovechaban el caudal del río a lo largo de todo su cauce, y que podían moler gracias a que tapaban las simas y perdederos que había (también lo hacían para poder regar aguas abajo), logrando que el agua llegase hasta el Ucero. Hoy día, sin embargo, pocas son las veces que el Chico llega a confluir con el Ucero, cosa que sólo se consigue cuando el río va muy crecido. Es muy frecuente encontrarlo seco a la altura de Cantalucía.

El arroyo que baja del término municipal de Santa María de las Hoyas se mete en una cueva-sumidero llamada El Chorrón, donde prácticamente muere el cauce superficial del arroyo. Esta cueva tiene 20 m. de longitud y su fondo se estrecha de tal manera que se hace impenetrable. (Foto 8).

Existen desde luego otros sumideros temporales u ocasionales menos importantes que dependen del caudal que lleven los arroyos.

El río Ucero tiene algunos manantiales no muy importantes algo más abajo del pueblo de Ucero (manantial de abastecimiento al pueblo y en el contacto con las calizas del Cretácico y el Terciario impermeable). Hasta Burgo de Osma el río no aumenta mucho su caudal subterráneo, pues circula por terrenos poco permeables del Terciario. Al llegar a la cúpula cretácica de Osma, recibe las aportaciones del río Avión por la izquierda.

Con el fin de controlar lo mejor posible las aportaciones subterráneas del sistema, se instaló una escala de aforos en el pueblo de Ucero (donde se evita la escorrentía superficial de la cuenca terciaria del Ucero). La estación actual de aforos del MOPU se encuentra en Burgo de Osma y mide también las aportaciones del río Avión (aunque no del Sequillo).

La recarga del acuífero se lleva a cabo a partir de la infiltración directa del agua de las lluvias y nieves que caen sobre los afloramientos, así como de las filtraciones de los ríos que se pierden en él, tal como se ha descrito anteriormente. Los recursos los estimamos en unos 40 hm³ por año (según la precipitación media del acuífero - 677 mm/año- y según los aforos de la estación de Burgo de Osma (Candil Gonzalo y López Vílchez, 1979). Esta cifra hay que tomarla como orientativa y como una primera aproximación.

Las pruebas con trazadores

La circulación detallada del agua subterránea es desconocida porque se carecen de puntos de agua suficientes como para dibujar el mapa de isopiezas. Desde luego va dirigida hacia el manantial de La Galiana y hacia la parte baja del río Lobos. La fuente de Galiana se sitúa en el límite permeable-impermeable (margas turonenses y cenomanienses) de menor cota. Es por ello que la utilización de trazadores es una herramienta importante en este sentido. A continuación describimos brevemente las pruebas realizadas.

En agosto de 1967, dentro de una campaña de investigación de acuíferos kársticos del Centro de Estudios Hidrográficos, se realizó una prueba de coloración en el río Navaleno. El colorante tardó unos seis días y medio en salir por la surgencia de La Galiana, por lo que teniendo en cuenta que la distancia en línea recta es de 9.500 m., la velocidad fue de unos 60 m/h.

Aparte de esta primera experiencia con trazadores, posteriormente se han hecho otras por parte de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, habiéndose inyectado fluoresceína en los siguientes puntos:

–Sumidero del río Navaleno en Arganza, cerca de la confluencia con el río Lobos, situado a 9,5 Km. en línea recta de la Galiana.

–Sumidero “El Apretadero”, en el río Lobos, situado a unos 12 Km. en línea recta del manantial de la Galiana.

– Sumidero en el Ayo. de Casarejos (o de Valderrueda), cerca de la confluencia con el río Lobos, a 4,5 km. de la Galiana.

–Torca de Valdecea, en cuyo fondo aflora el nivel freático, y que está situado a 4 km. en línea recta de la Galiana.

–Sumidero del río Chico, en Cantalucía, situado a 6 km. de La Galiana.

Las pruebas han sido realizadas en periodo de estiaje y en aguas altas, aprovechando precisamente la profunda sequía de 1995 y las fuertes precipitaciones de 1996. En algunas ocasiones se ha repetido la prueba en un mismo punto. Con la información proporcionada de estas experiencias, podemos adelantar algunos resultados significativos:

- 1º. La velocidad del agua en aguas bajas (estiaje) es de unos 40 a 60 m/h. en zonas alejadas del manantial.
- 2º. En aguas altas la velocidad aumenta considerablemente, pasando a 90 m/h. en zonas alejadas al manantial, y de 700 m/h. en zonas próximas, por lo que se constata la existencia de régimen turbulento y la presencia de un río subterráneo en los alrededores de La Galiana.
- 3º. La Galiana es el principal punto del drenaje subterráneo y hacia donde convergen las líneas de flujo, aunque el río Lobos puede actuar también de ganador en períodos de aguas altas en los sectores del acuífero proximos al Cañón.

9.2. APLICACION DEL MODELO CREC AL MANANTIAL DE LA GALIANA.

9.2.1. PROPÓSITO

El modelo CREC, que pretende cuantificar una aproximación global del vaciamiento de un acuífero mediante manantiales, ha sido elaborado en el laboratorio de hidrogeología matemática de Montpellier (Cormary y Guilbot, 1969). Se ha empleado para el estudio de numerosos acuíferos en hidrología de superficie y en hidrogeología, y ofrece una buena adaptación a los acuíferos kársticos.

En el presente estudio, además de su exposición y justificación, se ha pretendido explicitar, tanto las funciones que en él intervienen como el significado de los valores iniciales y parámetros que han de cuantificarse para su calibración, al objeto de facilitar su aplicación. Con esta misma idea de facilitar su aplicación se ha elaborado un esquema operativo y el correspondiente programa para su tratamiento en ordenador.

9.2.2. EL MODELO CREC

1. Presentación y resumen

La circulación del agua, a partir de una lluvia, es simulada por la transferencia de la lámina de agua a través de tres reservorios: S, H y G.

El reservorio S corresponde al suelo. A este nivel se descuenta parte de la evapotranspiración real y se calcula la lluvia eficaz.

Los depósitos H y G están situados en la zona profunda. El vaciado del depósito H (no saturado) no es lineal y el de G (saturado) es lineal. Se puede descomponer el funcionamiento de este modelo de la manera siguiente (Fig. 9.3).

–La escorrentía superficial, cuando existe, es descontada directamente de la lluvia.

–La parte de producción del modelo asegura el cálculo de la lluvia eficaz, es decir, de la lámina de agua que recarga la capa H.

Esta función de producción está reglada por dos parámetros, X_3 y X_4 . La reducción de la evaporación potencial a la evaporación real se realiza con la intervención de un parámetro X_7 .

–Las funciones de transferencia permiten la repartición del exceso de agua con relación a la saturación del suelo, entre los depósitos H y G, y determinan los caudales de escorrentía hipodérmica, turbulenta y subterránea laminar.

Se advierte que la alimentación del depósito G no se hace directamente por la lluvia eficaz, sino por medio del depósito H con un umbral de alimentación X_5 .

Este modelo está regulado por siete parámetros. Ha sido utilizado con paso de tiempo diario. El ajuste de la serie de parámetros se hace mediante un cálculo iterativo.

Los siete parámetros que regulan el modelo son los siguientes:

- X_3 y X_4 son los dos parámetros de producción.
- X_1 y X_2 regulan el agotamiento de los depósitos que esquematizan las capas H y G.
- X_5 y X_6 aseguran la alimentación del depósito G por H.
- X_7 es el parámetro de reducción de la evapotranspiración potencial.

Se puede igualmente añadir dos parámetros, X_8 y X_9 , que determinan la infiltración potencial. Se pueden fijar de manera que sólo una lluvia superior a cierto límite (1100 mm/día, por ejemplo) provoque una escorrentía superficial.

2. Los datos

Emplea los siguientes datos de entrada:

a) *Caudales diarios*

Es preciso disponer de largas series de observaciones, cuatro años al menos, para el ajuste del modelo, y algunos años para verificar la estabilidad del ajuste.

b) *Las temperaturas*

Las temperaturas medias mensuales permiten el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual, por el método de Thornth-

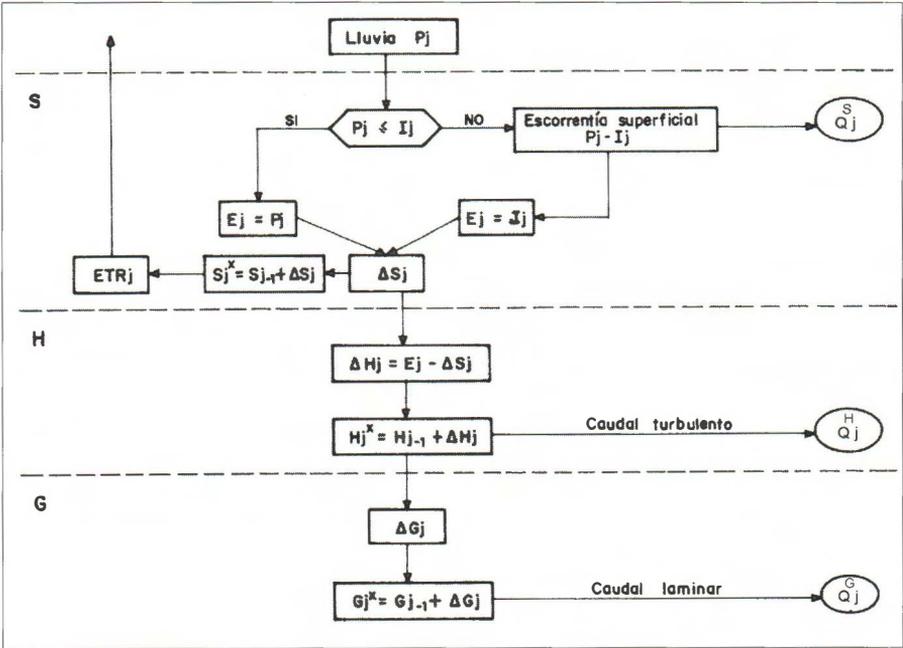


Fig. 9.3.—Esquema gráfico del modelo CREC.

waite. En todo caso, se pueden sustituir por las evaporaciones potenciales diarias.

c) Las lluvias

De ellas es necesario disponer de los correspondientes datos suficientes y precisos a tiempo diario.

3. Contrastes físicos y numéricos impuestos a los parámetros

Han de eliminarse ciertos valores de los parámetros, ya sea porque ellos hagan los cálculos imposibles, ejemplo $\lg(-n)$, o por evitar resultados intermedios, físicamente absurdos.

Por lo demás, el conocimiento de ciertos elementos del terreno, o el comportamiento del suelo o la vegetación o de la capa, pueden inducir al operador a imponer contrastes suplementarios. Se fija entonces, para cada parámetro, un límite inferior y otro superior, como pueden ser los que figuran en el punto 10 a).

4. La parte de producción del modelo

El grado de humedad del suelo está representado por una variable, S_t , que significa el nivel del depósito S.

Esta variable S_t determina, por una parte, una velocidad de infiltración potencial en superficie y, por otra, la cantidad de agua que participa en la recarga del déficit de humedad.

La velocidad de infiltración potencial en superficie (velocidad máxima) se escribe así:

$$f_t = B \cdot C \cdot \sqrt{S_t} \text{ (en mm / } \Delta t) \quad [1]$$

Si la precipitación diaria, P_t , es superior a f_t (lo que ocurre muy raramente), la diferencia $P_t - f_t$ escurre superficialmente hasta el río y sólo la cantidad f_t es infiltrada. Esta formulación permite la reconstrucción de las crecidas que siguen a precipitaciones de fuertes intensidades, acaecidas particularmente en verano.

Si la precipitación diaria, P_t , es inferior a f_t , lo cual es el caso general, P_t es infiltrada. A esta cantidad de agua infiltrada la denominaremos E_t (lluvia útil).

La expresión [1] de la velocidad potencial de infiltración superficial es prácticamente equivalente a las formuladas para la infiltración obtenida en laboratorio cuando un exceso de agua se encuentra encima de una columna de suelo cuyo contenido inicial de humedad es homogéneo. Con unos valores convenientes de los parámetros, Guilbot (1975) demuestra una gran aproximación a las fórmulas clásicas establecidas por Kostiaikov (1931), Kirkham y Feng (1949) y Philip (1975), si bien en la adoptada por el modelo CREC sólo aparece explícita la variable S_t , en cada instante t . Una vez tratados estos casos particulares de escorrentía superficial, se aborda la recarga de humedad del suelo. Y para ello se define una moción de capacidad, no de infiltración sino de absorción, es decir, de recarga de humedad del suelo.

La lluvia útil infiltrada (E_t) tiene los tres destinos siguientes:

- Atender la evapotranspiración real (ETR_t).
- Alimentar el depósito H de la capa no saturada (H_t).
- Variación de existencias en S ($S_t - S_{t-1}$), o sea del grado de humedad del suelo.

Por lo tanto, se verificará

$$E_t = ETR_t + \Delta H_t + (S_t - S_{t-1})$$

Ahora bien, para la dinámica de estos tres destinos, expresados según el grado de humedad del suelo (S_t), interesa definir el concepto ya anunciado de capacidad de absorción o de recarga de humedad del suelo (ΔS_t^x), que influirá en la ETR_t . El exceso de esta capacidad ($E_t - \Delta_t^x$) dará ΔH_t o sea, la recarga del depósito H . Adviértase que el nivel final del depósito S_t se obtendrá restando ETR_t :

$$S_t = S_{t-1} + \Delta S_t^x - ETR_t$$

La expresión adoptada para esta capacidad de absorción del suelo, perfectamente empírica y en función de S_t se ha escrito así:

$$\Delta_t^x = E_t \cdot a \cdot e^{-bS_{t-1}}$$

o bien

$$\Delta S_t^x = E_t \cdot (X_3 \cdot e^{X_4 S_{t-1}})^{-1}$$

Se ha comprobado que esta fórmula muestra una gran aproximación con las dadas por Horton, Holtan, Philip y hasta por la formulada por Koher en 1963, a partir de la de Horton, con otras variables, pues la que aquí se adopta está en función de S .

Esta parte de producción se completa teniendo en cuenta los fenómenos de evaporación.

El nivel del depósito S se disminuye a cada paso del tiempo, por un valor de evapotranspiración, valor calculado a partir de un índice de evapotranspiración potencial y en función del estado de humedad del suelo.

Independientemente de los fenómenos de transpiración, la forma de la curva: Evaporación/Evaporación potencial, ha sido experimentalmente determinada en función del grado medio de agua de la muestra.

Si se llama \varnothing_k al grado de agua correspondiente a la evaporación potencial (es decir, la capacidad de retención) y \varnothing_0 el grado de agua para el cual la evaporación es nula (punto de marchitez), la curva presenta la forma de la figura 9.4. Suponiendo que la transpiración varíe, aproximadamente como la evaporación, una expresión bastante general ha sido formulada, permitiendo la reconstrucción de este tipo de curva sin introducir la variable umbral.

$$\frac{ETR}{ETP} = 1 \cdot e^{-\beta \cdot St}$$

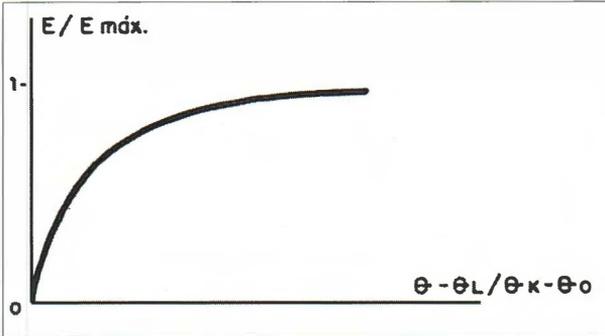


Fig. 9.4.

5. La parte de transferencias del modelo

El hidrograma observado a la salida de una cuenca está formado por:

- La escorrentía superficial. Su contribución es despreciable a la escala de una cuenca, con relación a la escorrentía hipodérmica, salvo en casos muy particulares de lluvias estivales intensas.

- La circulación hipodérmica proveniente del agua que se infiltra y circula lateralmente en el horizonte superior, que será captada por los pequeños cursos de agua a lo largo de su desplazamiento que pueden incrementar la escorrentía superficial o ser infiltrada.

- La circulación subterránea, componente de base del hidrograma.

Otras circunstancias (propagación de las crecidas, precipitaciones sobre charcas y cursos de agua) añaden complejidad al fenómeno; pero se induce a proceder hacia una aproximación global que se intenta a través de unos depósitos.

Es importante indicar que los diferentes tipos de transferencia lineal invariantes encontrados en la bibliografía (depósitos, isocronos, convolución, propagación, ecuaciones diferenciales de stocajes...) son perfectamente equivalentes (con la discretización precisa) a los grupos «tiempo variación lineal» y a los modelos no lineales de utilización más reciente.

En este modelo CREC, la infiltración se transfiere por el paso de dos depósitos lineales de ecuación:

$$Stock = m \cdot Q$$

Esta ecuación, combinada con la ecuación de continuidad

$$P = \frac{ds}{dt} + Q = m \cdot \frac{dQ}{dt} + Q$$

conduce, una vez discretizada, a:

$$Q_{tn} = \frac{\Delta t}{2m + \Delta t} \cdot (P_{t+1} - P_t) + \frac{2m - \Delta t}{2m + \Delta t} \cdot Q_t \quad [2]$$

(para un depósito)

Conocido a cada paso de tiempo, la fracción de agua, ΔS_t^* precipitada que sirve para completar el déficit de humedad, la fracción restante, $P_t - \Delta S_t^*$ - Escorrentía superficial, es considerada como «lluvia eficaz», y es la que participa en la circulación hipodérmica y subterránea.

Este exceso de agua alimenta una zona intermedia H, que juega un doble papel.

– Vaciado no lineal, de la forma $H=c Q_H^{1/2}$ que corresponde a lo que ha sido definido como escorrentía hipodérmica.

– Percolación hacia la zona subterránea G, cuando un umbral de almacenamiento potencial (H_0) ha sido atendido:

$$Q_{percolación} = d (H - H_0)$$

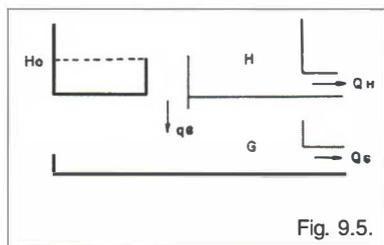
– La zona subterránea G es asimilada a un depósito lineal de ecuación $G=e Q_G$. Su vaciado responde a una expresión equivalente a la [2], o sea (ver fig. 9.5):

$$Q'_G = \infty Q_G'^{-1} + (1 + \infty)q_G$$

Con todo ello, las fórmulas adoptadas para esta parte de transferencias, usando la nomenclatura del esquema operativo, son las siguientes:

a) Caudal turbulento en H:

$$Q_j^H = (X_j \cdot H_j^2)$$



b) Percolación de H en G:

$$\Delta Q_j^x = [H_j^x - X_6] / X_5$$

c) Caudal básico:

$$Q_j^G = X_2 \cdot Q_j^{G-1} + (1 - X_2) \cdot \Delta G_j^x$$

Todas estas fórmulas de caudales por unidad de tiempo vienen expresadas como el grosor, en altura, de una lámina de agua extendida sobre toda la cuenca. En los apartados 7, 8 y 9 se da una justificación de las mismas, así como de los parámetros que en ellas intervienen.

6. Notas sobre la utilización de este modelo en un medio fisurado

A priori no hay ninguna razón para que las expresiones de las leyes de producción no se adapten a una región calcárea recubierta de vegetación mediterránea.

Por el contrario, conociendo que el Karst es un medio discontinuo, la parte de transferencia del modelo puede parecer elemental.

Se sabe que la circulación del agua en las calizas fisuradas se efectúa a través de dos tipos de redes de drenaje:

–La red de conductos de dimensiones importantes, donde la circulación es rápida y turbulenta.

–La red de fisuras finas, donde la circulación es lenta y laminar.

Esta presentación es análoga con la esquematización propuesta para el modelo: La primera caracteriza la circulación rápida y turbulenta, en respuesta inmediata a una lluvia; esta circulación corresponde a un vaciado no lineal del depósito H. La segunda coincide con una circulación retardada, considerada como laminar y es posible estimar que el depósito G representa esta zona.

En efecto, la aproximación de la ligazón lluvia-caudal está en consonancia con las experimentaciones realizadas por Archambault, Boorguet, Vailloux, Guilbot, etc.

7. Notas sobre las funciones de producción en S

a) Funciones de producción

Estas funciones de producción son las siguientes:

– Capacidad de infiltración o tope máximo del suelo para filtrar agua de lluvia. Ella se expresa en función del grado de humedad del suelo S, grado que se mide en mm. de altura del depósito S (suelo):

$$I_{max} = X_8 - X_9 \cdot \sqrt{S} \quad E = P$$

o bien:

$$E = I_{max} \text{ si } P > I_{max}$$

– Lluvia útil o cantidad de agua “absorbida” por el suelo y que tendrá su destino para atender el déficit de humedad del suelo y el resto para su percolación al depósito H (no saturado). Se denomina ΔS y está en función de la lluvia E (no escurrida en superficie) y de S según la expresión:

$$\Delta S = E \cdot (X_3 \cdot e^{X_4 S})^{-1}$$

– Evapotranspiración real, que incrementa el déficit del suelo. La lluvia útil, atendida la evapotranspiración y el incremento de nivel de S (déficit del suelo) nos proporcionará la “lluvia eficaz” o lluvia que transitará a las capas subterráneas y posteriormente a los depósitos. Su expresión (ETR) es función de la evaporación potencial (ETP) y del nivel de humedad (S) del suelo:

$$ETR = ETP \cdot (1 - e^{-S/X_7})$$

El nivel S_j (humedad del suelo) quedará así:

$$S_j = S_{j-1} + \Delta S_j^x - ETR_j$$

La diferencia entre E y ΔS se denomina “lluvia eficaz”, (ΔH), que tendrá por expresión:

$$\Delta H_j = E_j - \Delta S_j^x$$

Estas tres funciones de producción han sido establecidas, como se ha dicho, en base a fórmulas empíricas clásicas, si bien todas ellas han sido adaptadas para que (aparte de los datos de entrada, P y ETP) no aparezca más que la variable S. Al discretizarlas, el tiempo aparece como subíndice. Con unos valores convenientes de los parámetros se demuestra una gran aproximación a dichas fórmulas clásicas (Gilbot, 1975).

b) Notas sobre las funciones de producción: Parámetros y valores iniciales

b.1) Capacidad de infiltración del suelo

Si se sabe que no hay escorrentía superficial se puede empezar el modelo con $E_j = P_j$. Se eliminan así los parámetros X_8 y X_9 . En todo caso, si esta escorrentía superficial se ha producido en alguna ocasión, entonces se podría poner

$$P_j' = P_j - \text{Escorrentía superficial}$$

En los acuíferos kársticos es infrecuente, y puede haberla en algún año con fuerte tormenta de verano.

Los autores del modelo sólo citan en una aplicación esta capacidad de infiltración tomando los valores $X_8 = 120$ y $X_9 = 1$. Con ellos se tiene el tope de 120 mm., ya que el valor de \sqrt{S} influye poco; por ejemplo, tendría que ser $S = 400$, $\sqrt{S} = 20$ para que el tope quedase en 100 mm., y con estos datos la lluvia que en un día ascendiese a 120 mm. daría una escorrentía superficial de 20 mm.

9.6.2. RELACIÓN ENTRE ETR Y ETP

La función $e^{-S X_7}$ es una exponencial decreciente que varía entre 1 (para $S = 0$) y 0 (para $S = \infty$), luego $1 - e^{-S X_7}$ es creciente que arranca de cero (para $S = 0$) y tiende asintóticamente a 1. Se trata,

por tanto, de un coeficiente reductor que denominaremos Cr. En la figura 9.6 se representa su variación en función de S para $X_7 = 40$. Para darnos idea de su magnitud, veamos algunos valores de Cr en función de S (humedad del suelo) y de X_7 (parámetro reductor de S).

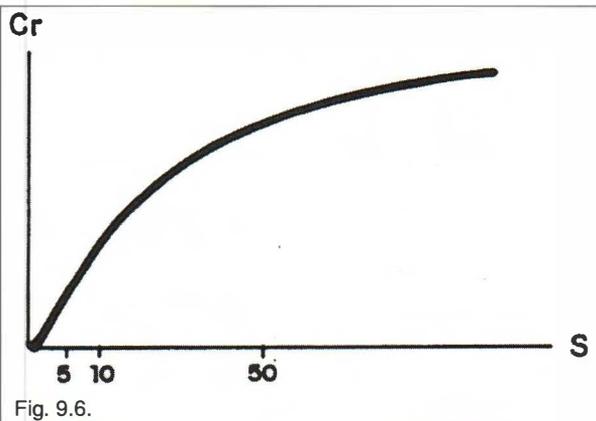


TABLA 1

Valores de $Cr = 1 - e^{-S/X_7}$

$X_7/S - S_m$	2	5	10	20	40	50	100	500	200
0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	0,92	0,63	0,40	0,22	0,12	0,10	0,05	0,03	0,02
10	0,99	0,86	0,63	0,40	0,2	0,18	0,10	0,06	0,05
20	1	0,98	0,86	0,63	0,40	0,33	0,18	0,13	0,10
40	1	0,99	0,98	0,86	0,63	0,55	0,33	0,23	0,18
50	1	1	0,99	0,92	0,71	0,63	0,39	0,28	0,22
100	1	1	1	0,99	0,92	0,86	0,63	0,49	0,39
500	1	1	1	1	0,99	0,99	0,99	0,96	0,92

Aquí se pondrá para Cr la expresión siguiente:

$$Cr = 1 - e^{-(S-S_m)/X_7}$$

o sea, que se adopta un umbral inferior S_m (punto de marchitez) para el cual $Cr = 0$, y se impondrá la condición por la que para $S \leq S_m$ ha de ser $Cr = 0$, eliminando con ello los valores negativos de Cr. Este valor de S_m se concreta en el punto siguiente.

b.3) Relación entre lluvia y lluvia útil

El factor por el que se multiplica E para obtener ΔS ha de ser un factor reductor y positivo (Fr), es decir:

$$0 \leq (X_3 \cdot e^{X_4 \cdot S})^{-1} \leq 1$$

o sea,

$$-\infty \leq -(1_n X_3 + X_4 \cdot S) \leq 0$$

luego ha de ser:

$$1_n X_3 + X_4 \cdot S \geq 0$$

Si contemplamos esta desigualdad en función de S será:

$$S \geq \frac{-1_n X_3}{X_4}$$

es decir, que los valores de los parámetros X_3 y X_4 condicionan unas cotas inferiores de S , salvo que se admitan valores negativos para ΔS . Este valor mínimo de S vendrá definido por la igualdad:

$$S_m = \frac{-I_n X_3}{X_4} \quad [3]$$

Puesto que $X_3 < 1$ el segundo miembro es siempre positivo y nunca podrá ser $S=0$, salvo en el caso límite de $X_4 = \infty$.

La función [3] de dos variables es: a) hiperbólica decreciente con asíntota horizontal $S_0 = 0$, para valores fijos de X_3 (de la forma de la fig 9.7). También decreciente para valores fijos de X_4 , (fig. 9.8).

Al objeto de tener una idea sobre estos valores mínimos (S_m) de S , a continuación se refleja una tabla de doble entrada para valores de X_3 y X_4 , que pueden presentarse.

TABLA II

Valores de S_m (cotas inferiores de los valores de S)

X_3/X_4	0,2	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
0,1	16	23	24	25	27	28	30	32	35	39	46
0,05	32	46	48	51	53	57	60	65	70	78	92
0,04	40	58	60	63	67	71	75	81	88	98	115
0,03	54	77	80	84	89	94	100	108	117	131	154
0,02	81	115	121	126	133	141	150	161	175	196	230

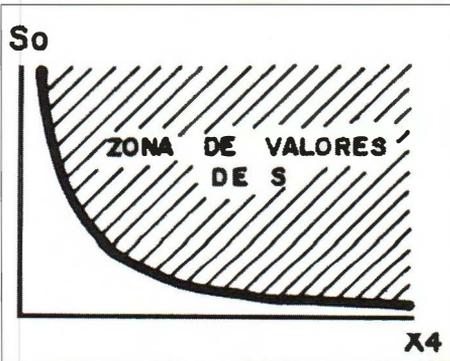


Fig. 9.7

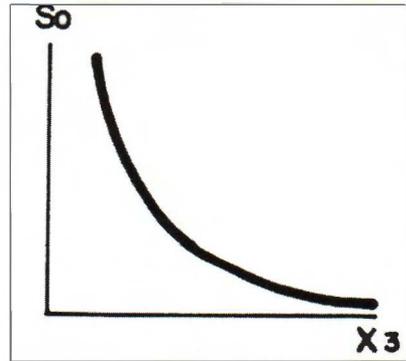


Fig. 9.8

X_3/X_4	0,2	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
0,015	107	154	161	168	178	188	200	215	234	261	307
0,01	161	230	241	253	266	282	300	322	351	391	461
0,0075	215	307	321	337	355	376	400	430	468	522	614
0,005	322	461	482	505	532	563	600	644	702	783	921

Estos valores de S han de tenerse en cuenta no sólo para el valor inicial S_0 de S ($S_0 > S_m$), sino también para fijar el punto de marchitez (S_m) en el que la ETR es nula.

El factor reductor

$$F_r = \frac{\Delta S}{E} = \frac{1}{X_3} \cdot e^{-x_4 \cdot S}$$

es una función exponencial decreciente en S. Así, para $X_3 = 0,1$ y $X_4 = 0,02$ se tendrían los siguientes valores para F_r (en %) y para su complementario ($1 - F_r$), que sería el coeficiente de infiltración. (Fig. 9.9).

8. Notas sobre las funciones de transferencias en H. Parámetros y valores iniciales

Este depósito está comprendido entre el suelo y el acuífero y supone un tránsito del agua, a través de un medio no saturado y sin pérdidas de agua, por lo que las entradas serán iguales a las salidas ± variación de existencias.

Para esta percolación del agua en el depósito H se suponen dos tipos de flujo:

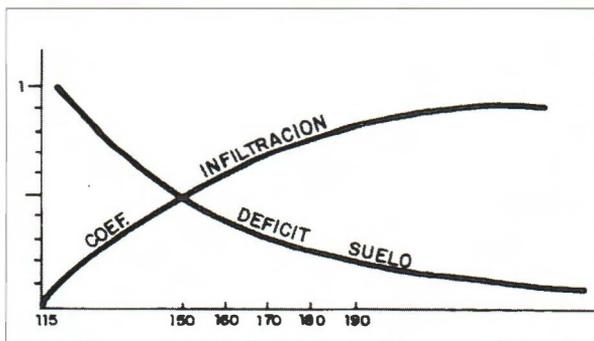


Fig. 9.9

–Uno de carácter turbulento que proporciona un caudal de salida al exterior, expresado por:

$$Q^H = (X_I \cdot H_j^X)^2$$

El tránsito turbulento es acelerado y por unidad horizontal del flujo puede entenderse como un

producto de la velocidad de Darcy, que por unidad vertical daría $V = k \cdot \Delta h = k \cdot H_j$, y de una altura media de las fisuras o grietas (m) que expresaremos como fracción del nivel de la capa H sea $m = k \cdot H$. Luego el caudal total por unidad de superficie sería:

$$Q_j^H = V \cdot m = k \cdot k' \cdot H_j^2 = (X_1 \cdot H_j^X)^2$$

$$\text{donde } k \cdot k' = X_1^2$$

Luego $X_1 = \sqrt{k \cdot k'}$ es la media geométrica del gradiente de Darcy (k) y de la altura, relativa a H, de las grietas y fisuras (m/H). Su valor, en general suele ser inferior a 0,1.

– El otro flujo es de dirección vertical y conduce el agua al depósito G. Su expresión es de tipo lineal, como la ley de Darcy, y su efecto es el de producir un retraso de llegada.

$$\Delta G_j = \frac{H_j - X_6}{X_5} = \frac{1}{X_5} \cdot H_j - \frac{X_6}{X_5}$$

Esta función tiene dos parámetros:

Uno X_6 , que se resta de H y puede representar el agua de retención en el depósito H (adherencia a superficies, llenado de huecos y sifones sin salida vertical, agua de composición de ciertas litologías, etc., o sea, agua para la que la gravedad está anulada). Este parámetro es muy variable y puede oscilar entre 0'001 y 10, dependiendo de la altura de la capa y de su estructura.

El otro parámetro, X_5 , representa la fracción H_j que saldrá para G por unidad de tiempo, y debe estar relacionado con la velocidad de filtrado de la capa H por unidad de presión. Puede oscilar entre 1 y 30. Es el coeficiente de Darcy para una circulación vertical.

La función $Q_j^H = (X_1 \cdot H_j)^2$ da siempre valores positivos y únicamente será 0 para $H_j = 0$.

Por el contrario, deberá ser:

$$\Delta G_j = \frac{H_j - X_6}{X_5} \geq 0$$

y esto se verificará cuando $H_j \geq X_6$, que será siempre, salvo algún caso excepcional. En todo caso se podría admitir algún valor negativo de ΔG_j interpretándolo como un déficit que ha de cubrirse con las nuevas llegadas ΔH_j .

Puesto que el método establecido siempre asegura el balance

$$Q_j^H + \Delta G_j = \Delta H_j + (H_j - H_{j-1})$$

puede resultar interesante comprobar, por el hidrograma del manantial, si los dos tipos de caudales, Q_j^H y Q_j^G , se detectan en él. Sobre todo interesa el Q_j^H (de régimen turbulento y reacción rápida a la lluvia), y en caso de discrepancia tratar de ajustar modificando el parámetro X_5 .

Si hubiese desfases de tiempo en los caudales básicos habría que modificar, principalmente, el parámetro X_5 .

9. Notas sobre las funciones de transferencias en G. Parámetros y valores iniciales

a) La fórmula del caudal Q^G

La expresión

$$Q_j^G = X_2 \cdot Q_{j-1}^G + (1 - X_2) \Delta G_j^x \quad [4]$$

es una discretización de la fórmula empleada para el caudal que proporcionan los acuíferos que tienen unas recargas regulares, o sea:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} + (1 - e^{-\alpha t}) \cdot R$$

donde α es el coeficiente de agotamiento y R la recarga.

Para el transcurso de un día se tendría:

$$Q_t = Q_{t-1} \cdot e^{-\alpha} + (1 - e^{-\alpha}) \cdot R$$

y si en ella se pone $X_2 = e^{-\alpha}$, $R = \Delta Q_j^x$ se tendrá:

$$Q_t = X_2 \cdot Q_{t-1} + (1 - X_2) \cdot \Delta G_j^x$$

que es la fórmula empleada.

De ella se deduce que:

a)

$$X_2 = e^{-\alpha}$$

o bien

$$\alpha = -\ln X_2$$

lo cual, además de dar un significado al parámetro X_2 , proporciona un medio de cálculo del mismo, si a través del hidrograma del manantial se ha podido determinar el valor de α .

b) En régimen de agotamiento del acuífero, o sea, con $R=0$, quedaría:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\infty t}$$

y se verifica que el volumen de agua por encima del nivel de drenaje tiene la siguiente expresión para $t=0$:

$$V_0 = \frac{Q_0}{\infty}$$

Puesto que aquí estamos considerando los caudales Q como la altura de una lámina de agua extendida sobre todo el acuífero, el caudal en volumen sería $Q_0' = Q_0 \cdot S$ si S es la superficie del acuífero. El volumen sería:

$$V_0 = \frac{Q_0}{\infty} = \frac{Q_0 \cdot S}{\infty}$$

Luego

$$\frac{V_0}{S} = \frac{Q_0}{\infty}$$

pero esta expresión V_0/S es la que estamos empleando para G , o sea, que sería:

$$G_0 = \frac{Q_0}{\infty}$$

donde ∞ , por tanto, viene referido a $(\text{día})^{-1}$.

Por tanto,

$$G_0 = \frac{Q_0}{-I_n X_2}$$

o sea, se tiene una relación que liga los valores iniciales G_0 y Q_0 si en este momento el manantial funciona en régimen de agotamiento.

b) *Valores de G_0*

La expresión de G es

$$G_j = G_{j-1} + \Delta G_j^x - Q_j^G$$

y pudiera inducir a pensar que tomara valores negativos puesto que tiene el sustraendo Q_j^G . Esto no tendría significado físico si ha de ser $Q_j^G \geq 0$.

Veamos que ello no se verificará si se supone que $X_2 < 1$, que $\Delta_j \geq 0$, y se adopta un valor conveniente para G_0 .

Puesto que $G_i \geq G_{j-1} - Q_j^G$ se tendrá que

$$G_j \geq G_{j-1} - Q_j^G \quad [5]$$

El segundo miembro de [5] sería el valor de G_j en el régimen de agotamiento del manantial. Para los sucesivos valores de j se tendría:

$$Q_1 \geq G_0 - Q_1^G$$

$$Q_2 \geq G_1 - Q_2^G$$

.....

$$Q_j \geq G_{j-1} - Q_j^G$$

que sumadas y eliminando términos comunes daría:

$$\sum_{j=1}^t Q_j^G = G_0 - G_t$$

En el supuesto régimen de agotamiento, pasando a variables continuas y haciendo $t \rightarrow \infty$, sería:

$$Q_\infty \geq G_0 - V_0 = G_0 - \frac{Q_0}{\infty}$$

y para que esto se cumpla ha de ser $G_0 \geq (Q_0) / \infty$, o sea:

$$Q_0 \geq \frac{G_0}{-I_n X_2}$$

lo cual es cierto según el valor de G_0 propuesto en el punto anterior.

Conservación de caudales

a) En producción

Para cada período de tiempo deberá cumplirse la igualdad siguiente:

$$E_j = ETR_j + \Delta H_j^x + (S - S_{j-1})$$

Efectivamente, el segundo miembro de esta igualdad vale:

$$\begin{aligned} ETR_j + (E_j - \Delta S_j^x) + (S_j^x - ETR_j - S_{j-1}) &= ETR_j + (E_j - \Delta S_j^x) + \\ + (S_{j-1} + \Delta S_j^x - ETR_j - S_{j-1}) &= E_j \end{aligned}$$

luego siempre se cumple la igualdad.

b) *En transferencias de H*

Debe ser

$$\Delta E_j^x = Q_j^H + \Delta G_j^x + (H - H_{j-1})$$

Pero el segundo miembro vale

$$Q_j^H + \Delta G_j^x + (H_j^x - Q_j^x - \Delta G_j^x - H_{j-1}) = H_j^x - H_{j-1} = \Delta H_j^x$$

o sea, como el primer miembro.

c) *En transferencias de G*

Debe ser

$$\Delta G_j^x = Q_j^G + (G_j - G_{j-1})$$

Este segundo miembro vale:

$$Q_j^G + (G_j^x + Q_j^G - G_{j-1}) = Q_j^G + (G_{j-1} + \Delta G_j^x) - Q_j^G - G_{j-1} = \Delta G_j^x$$

o sea, igual que el primero.

11. Esquema operativo y variables

Adjunto se acompaña el esquema operativo. Es un método iterativo para cada período de tiempo j que comienza con $j=1$ en base a unos datos iniciales para $j=0$, y continúa para $j=2, j=3, \dots$ hasta $j=F$.

a) *Variables y funciones*

Las variables y funciones utilizadas son las siguientes:

- $j = 1, 2, 3, \dots, F$ (orden de los días).
- P_j (lluvia diaria).
- I_j (infiltración potencial) = $X_8 - X_9 \cdot \sqrt{S}$
- E_j (lluvia infiltrada) = P_j si $P_j \geq I_j$ o bien I_j si $P_j < I_j$
- ΔS_j^x (alimentación del depósito S) = $E_j \cdot (X_3 \cdot e^{X_{4S} \cdot j-1})^{-1}$
- S_j^x (nivel de S antes de la ETR $_j$) = $S_{j-1} + \Delta S_j^x$
- ETR $_j$ (evaporación real) = $ETP_j \cdot (1 - e^{-S_j^x \cdot S_m / X_7})$
- S_j (nivel de S o grado de humedad) = $S_j^x - ETR_j$
- $Q_j^s = P_j \cdot I_j$ si $P_j > I_j$ o bien = 0 si $P_j < I_j$ (escorrentía superficial)

c) Valores iniciales

Los valores iniciales a introducir en el programa son los siguientes:

- S_0 : Nivel de humedad del suelo.
- S_m : Nivel de marchitez cuando cesa la ETR.
- H_0 : Nivel del depósito H.
- G_0 : Nivel del depósito G.
- Q_0^G : Caudal laminar.

Sobre estos valores iniciales se hacen las siguientes advertencias:

– S_0 dependerá de los parámetros X_3 y X_4 escogidos y su valor no puede ser inferior al que figura en la tabla del punto 7.b.3), o sea:

$$S_0 > \frac{I_n X_3}{X_4}$$

– S_m . Para este valor se puede tomar el siguiente:

$$S_m = \frac{I_n X_3}{X_4}$$

– H_0 . Si por la gráfica inicial del hidrograma del manantial se puede determinar el caudal turbulento, Q_0^H , se tendrá que:

$$H_0 > \frac{1}{X_4} \cdot \sqrt[3]{Q_0^H}$$

– Q_0^G . Se determinará por el arranque inicial del hidrograma del manantial si en él se ha podido determinar el caudal laminar.

– G_0 . Este valor vendrá dado por la igualdad

$$G_0 = \frac{Q_0}{-I_n X_2}$$

Véase en el punto siguiente, sobre parámetros, la determinación de X_2 .

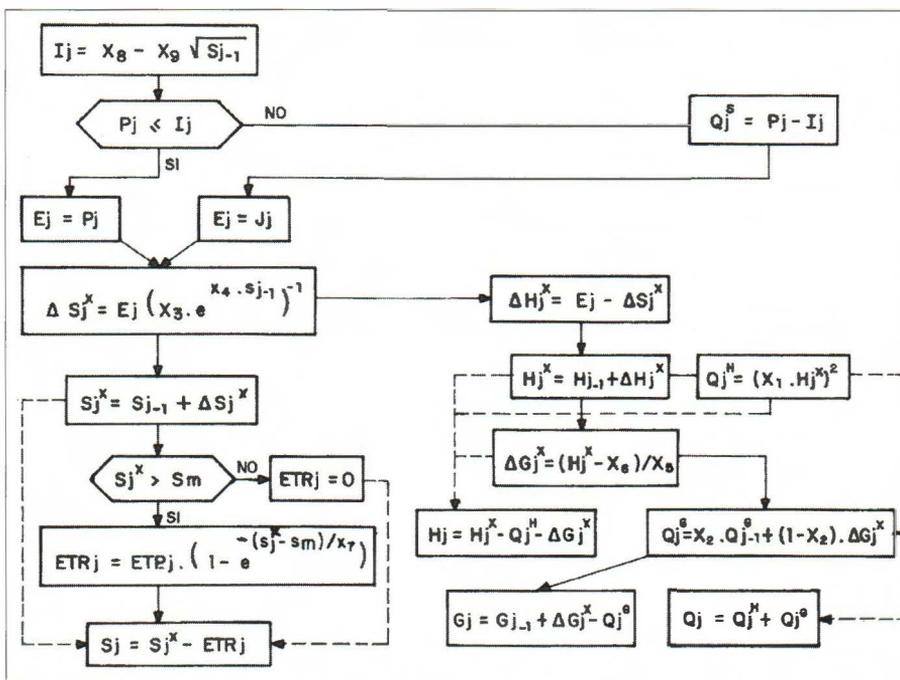


Fig. 9.10.

d) Parámetros

Los parámetros utilizados son los siguientes:

Signatura	Denominación	Variación
En la producción:		
X8	Tope superior de infiltración superficial	X8>100
X9	Coefficiente reductor de	X9<1
X7	Factor reductor exponencial ETP	0,01<X7<100
X3	Factor reductor Ej Alimentación de S	0,001<X3<1
X4	Factor reductor S Alimentación de S	0,001<X4<1
En transferencias:		
X6	Nivel de percolación de H en S	0,001<X6<30
X5	Factor reductor de percolación de H en G	1<X5<30
X2	Vaciado del depósito G	0,5<X2<0,999
X1	Vaciado del depósito H	0,001<X1<0,999

Veamos cada uno de ellos en particular:

- X₉ y X₈. Para la capacidad de infiltración potencial del suelo. Basta con lo dicho en el punto 7.2.1.
- X₇. Factor reductor exponencial de ETP.

En la tabla del punto 7.2.2. se combinan valores de X₇ y S-S_m para obtener un valor reductor de la ETP. Antes será necesario determinar el valor de S₀ y S_m en función de los parámetros X₃ y X₄ (7.b.3) para eliminar la parte de esta tabla que corresponda a S < S₀.

Nótese que este coeficiente reductor (Cr) disminuye al aumentar X₇ o, al revés, la ETR aumenta al disminuir X₇.

- X₃ y X₄. Alimentación del depósito S.

Estos parámetros determinan S₀ (ver punto 7.b.3) y S_m.

La función

$$\Delta S_j^x = E_j \cdot \frac{1}{X_3} \cdot e^{-X_4 S_{j-1}}$$

nos dice que:

a) La variación de ΔS_j^x respecto a X₃ es lineal inversa, y así, por ejemplo, al duplicar X₃ se reduce a la mitad ΔS_j^x .

b) La variación de ΔS_j^x respecto a X₄ es exponencial inversa, y así, por ejemplo, si se duplica X₄ el factor reductor Fr queda elevado al cuadrado (pasaría, por ejemplo, de 0,4 a 0,16).

– Producción. Sería interesante, en esta fase de producción, examinar el coeficiente de infiltración de la simulación, o sea,

$$C.I. = \sum \Delta H_j^x / \sum E_j$$

coeficiente del que ya se tiene idea sobre su valor. De acuerdo con este contraste, proceder en consecuencia.

– X₄. Es el nivel mínimo del depósito H para que haya percolación al depósito G. Puede variar entre 0,01 y 30, según el espesor de la capa H y su estructura.

Si el régimen turbulento desaparece rápidamente, ello indica que el valor de X₆ es pequeño.

– X₅. Factor reductor de la percolación de H en G y representa la fracción de H_j que saldrá para G por unidad de tiempo, y está

relacionado con la velocidad de filtrado de la capa H por unidad de presión. Puede oscilar entre 1 y 30, según la regularidad del manantial.

Si se observasen retrasos de llegada al manantial en la simulación respecto al hidrograma real, se pondría un valor más pequeño. Y al revés.

– X2. Vaciado del depósito G. Su valor teórico es:

$$\Delta z = e^{-\infty}$$

siendo ∞ el coeficiente de agotamiento del manantial. Este sería el caso de que dicho manantial sólo tuviese una curva de agotamiento y el resto del caudal fuese turbulento. Por ello se considerará más bien la desigualdad

$$\Delta z \leq e^{-\infty}$$

Su valor puede variar entre 0,5 y 0,999.

– X1. Vaciado del depósito H.

En el punto 9.a. se explica su significado y puede variar entre 0,001 y 0,99.

– Transferencias. Sería interesante analizar si en el hidrograma del manantial se detectan los dos tipos de caudales aquí considerados, el turbulento de reacción rápida a la lluvia (Q_j^H) y el básico (Q_j^e), y en caso de discrepancia con la simulación, introducir las modificaciones que procedan a estos cuatro parámetros.

e) Precisión de los resultados

Se puede adoptar alguna medida sobre la precisión de los distintos calibrados, como, por ejemplo, el error cuadrático standar o desviación media entre los caudales reales y los simulados.

9.3. APLICACIÓN DEL MODELO CREC AL MANANTIAL DE LA GALIANA

Se ofrece la aplicación del modelo CREC al acuífero del río Lobos que registra dos circunstancias especiales. Una estructural, ya que este acuífero kárstico ofrece la particularidad por la que aunque

la recarga global sobre su cuenca está originada solamente por la lluvia, la circulación del agua no sólo es subterránea, sino que dentro de su cuenca hay surgencias que originan pequeños cauces superficiales, que vuelven a infiltrarse. La otra afecta al período de datos disponibles, que comienzan en febrero de 1989, después de varios meses de sequía, y con un caudal excepcionalmente bajo, y terminan a primeros de agosto, después de una primavera con pluviometría más bien alta. Esta circunstancia ha originado el que parte de las entradas se hayan destinado a incrementar las reservas del acuífero, hecho que pone de manifiesto el modelo, ya que proporciona los niveles freáticos de la tres capas que en él se consideran.

9.3.1. DATOS DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN

Estos datos de entrada se reducen a series diarias, para las tres variables siguientes: Pluviometría, Evaporación potencial y Caudales aforados, y se expresan en mm., como una capa extendida sobre los 344 kilómetros cuadrados que abarca la cuenca.

Ellos presentan dos particularidades que no podemos dejar de reseñar: Una se refiere a la amplitud del período de tiempo considerado, desde el 1 de febrero hasta el 8 de agosto de 1989, a sea, algo más de medio año; sin embargo, para la estabilidad del modelo, con los parámetros aceptados para el acuífero, se considera prudente el tratamiento de períodos más largos, hasta de cuatro años; no disponiendo de más información que la utilizada, estos resultados habremos de calificarlos como provisionales.

La otra se refiere a la calidad de los datos y que incide también en el calificativo de provisionales, dado los resultados. No se tiene seguridad de que los aforos del manantial, deducidos a través de una escala y con una curva de gastos apoyada en pocos puntos, reflejen con buena aproximación la realidad. Los datos de evaporación potencial, si bien son fiables, corresponden a la estación meteorológica de Soria capital, situada a unos 50 kilómetros del acuífero. Finalmente, para los datos de pluviometría, los de enero han sido estimados con los de estaciones fuera del acuífero y para el resto se han tomado los de una sola estación, la situada en San Leonardo de Yagüe. Se cree que una extensión tan grande de la cuenca del acuífero (344 kilómetros cuadrados) exige más puntos de observación.

- X₆ (tope de percolación de H en G), 2.
- X₇ (factor reductor exponencial de ETP), 10.
- X₈ (tope superior de infiltración superficial), 100.
- X₉ (coeficiente reductor de \sqrt{S}), 1.

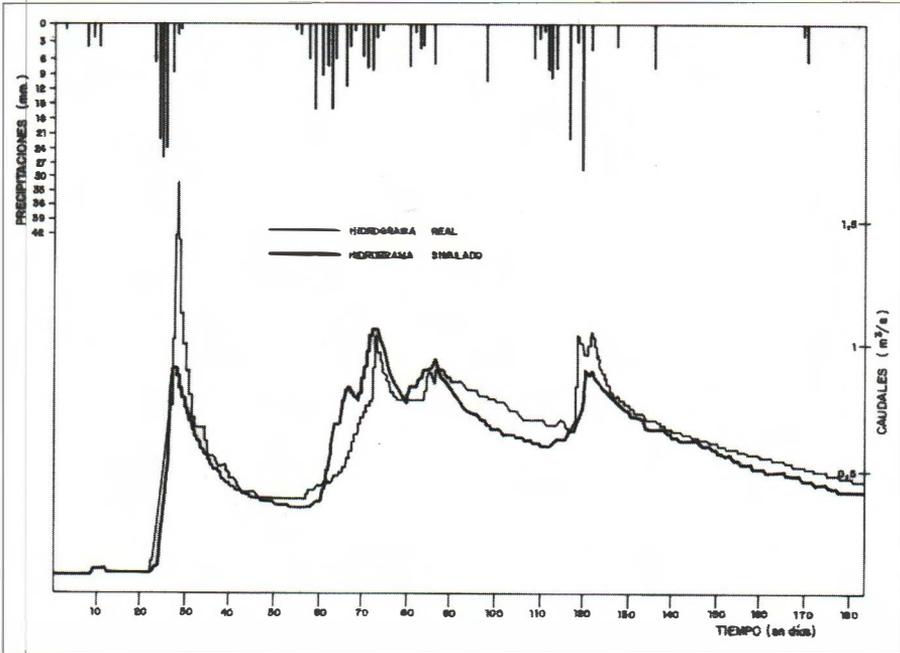


Fig. 9.11.—Hidrograma real y simulado del nacedero de La Galiana.

Respecto a los valores iniciales se hacen las siguientes precisiones: el manantial funcionaba en régimen de agotamiento después de una prolongada sequía. Con el hidrograma del manantial se calculó ∞ y en base a él y a Q_0^G se calculó G_0 . Teniendo en cuenta esta sequía precedente y la fecha del año, se puso $H_0 = X_6$.

Después de calcular los parámetros X_3 y X_4 se dedujo

$$S_m = 1_n X_3 / X_4 \text{ y } S_0 > S_m$$

y respecto a los parámetros las siguientes:

Interesó en los primeros tanteos fijar los parámetros X_3 y X_4 para que se obtuviese un coeficiente de infiltración que estuviese en

consonancia con la suma de caudales aforados más la variación de existencias en los reservorios H y G, principalmente el G, por su mayor volumen, y que podía inferirse en base a Q_o^G , Q_F^G y ∞ . Esto también orientó en la aproximación del parámetro X7.

El parámetro X2, se tomó ligeramente superior a e^{-x} , y para el X1 se tuvo en cuenta el desglose que se hizo sobre el hidrograma de lo que podía corresponder a caudal laminar y turbulento, según las llegadas ΔH al depósito H. Este mismo hecho, junto con los retrasos en la reacción del manantial a la pluviometría, orientó en la fijación del parámetro X5 y del X6.

Los parámetros X8 y X9 se fijaron para eliminar la escorrentía superficial, ya que ésta era nula.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Analicemos por partes los resultados obtenidos:

a) Fase de producción (en el depósito S)

Esta fase ha dado el siguiente balance para todo el período considerado:

Concepto	mm	hm³	%
<i>Entradas:</i>			
Pluviometría	430	147,9	100
<i>Salidas:</i>			
Evapotranspiración	292,2	100,4	67,9
Alimentación			
depósito H	141,2	48,6	32,8
Nivel depósito S	-3,2	-1,1	-0,7

El coeficiente medio de infiltración para todo el período (primavera y parte de invierno y verano) ha sido del 32,8 por 100. Queda un 67,9 por 100 de la pluviometría que se ha evapotranspirado, menos un 0,7 por 100 de descenso en el depósito S.

El depósito S (nivel de humedad del suelo) que comenzó con 250 mm. acabó el 8 de agosto con 246,8 mm., o sea 3,2 mm. inferior, después de haber pasado por un máximo de 294,9 mm. el 27 de febre-

ro coincidiendo con unas lluvias intensas y alcanzando el punto de marchitez (230 mm.) durante 26 días de julio que no llovió.

La evapotranspiración real, que durante el periodo ascendió a 292,0 mm., alcanzó su punto máximo diario el 7 de agosto, que tomó el valor de 7,7 mm. a continuación de una fuerte lluvia.

b) Fase de transferencia

El balance de los depósitos H y G para todo el período considerado fue así:

Concepto	mm	hm³	%
En H (no saturado)			
<i>Entradas:</i>			
Procedentes de S	141,2	48,6	100,0
<i>Salidas:</i>			
Caudal turbulento	26,5	9,1	18,8
Alimentación			
depósito G	112,1	38,6	79,4
Incremento nivel de H	2,6	0,9	1,8
En G (saturado)			
Entradas procedentes de H	112,1	38,6	100,0
<i>Salidas:</i>			
Caudal laminar	77,3	26,6	69,0
Incremento nivel G	34,8	12,0	31,0

En la capa no saturada (depósito H) entraron durante todo el período 141,2 mm. de agua, de los cuales el 18,8 por 100 salieron de ella como caudal turbulento y el 79,4 por 100 percoló en el manto acuífero. Este depósito se inició con un nivel de 2 mm. y terminó con 4,6 mm., pues aunque en el mes de julio su nivel descendió por debajo de los 3 mm. unas lluvias de primeros de agosto originaron una pequeña subida. Alcanzó su nivel máximo (45,5 mm.) el 28 de febrero, como consecuencia de unas fuertes lluvias precedentes. Por supuesto que en el día anterior alcanzó también su máximo el caudal turbulento, caudal que durante 4 días llegó a superar al laminar básico. Este caudal turbulento fue prácticamente nulo en la primera semana de enero y febrero, y durante todo el mes de julio.

De los 112,1 mm. de agua que entraron en el manto acuífero durante todo el período sólo el 69 por 100 de los mismos salieron de él por el manantial. El 31 por 100 restante se destinó a incrementar el stock de dicho depósito, que pasó de un nivel inicial de 10 mm. a otro final de 44,8 mm., cifras éstas que están en proporción con los caudales inicial y final, ya que en ambas fechas el manantial funcionaba en régimen de agotamiento. Es de destacar este significativo incremento en el nivel del depósito G, que ascendió a 34,8 mm., y que está en consonancia con la circunstancia que se comenzó el control después de una prolongada sequía y se terminó mes y medio después de una primavera con lluvias altas. El nivel de este depósito alcanzó sus cotas más altas durante el mes de junio, donde hay varios días que se superan los 68 mm. A finales de abril se superó los 60 mm., y ya no descendió de este nivel hasta el 9 de julio. El coeficiente de agotamiento toma el valor de $\alpha = 0,01$ (día)⁻¹.

c) Balance general

Este balance en todo el período puede presentarse así:

Concepto	mm	hm³	%
Pluviometría	430	147,9	100
EVR	292	100,4	67,9
Caudal turbulento	26,5	9,1	62
Caudal laminar	77,3	26,6	18,0
Incrementos depósitos	34,2	11,8	7,9

De él destacaremos, además del fuerte incremento de los depósitos ya comentados, el que de un total de 103,8 mm. evacuados por el manantial durante el período, aproximadamente el 25 por 100 corresponde a aportaciones del depósito H en forma de caudal turbulento, y el 75 por 100 restante proviene del depósito G en forma de caudal laminar. Esta alta participación del caudal turbulento no debe interpretarse como característica del manantial en períodos largos, sino como su reacción a las circunstancias pluviométricas de estos seis meses, que incluyen una primavera de lluvias más altas que lo normal. Téngase en cuenta que las salidas del depósito H muestran una menor proporción del caudal turbulento con relación a las efectuadas al manto acuífero, ya que este caudal supone un 18,8 por 100 respecto al total salidas.

En el hidrograma de la figura 9.11 puede observar se cierto retraso en la reacción del manantial a las recargas por las lluvias, retraso que oscila alrededor de los cinco días. Resulta significativo que este retraso ya fue observado por Pedro Palacios (1886) en el siglo pasado y confirmado también de alguna manera en el desfase existente entre las lluvias y su respuesta en el hidrograma del drenaje medido en las estalactitas de la Cueva Baja de la Galiana (Figura 9.12).

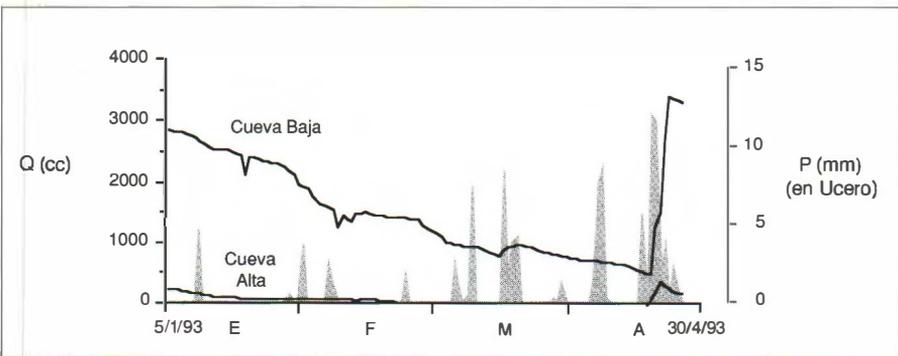


Fig. 9.12.—Hidrogramas de las estalactitas de las Cuevas Baja y Alta de La Galiana (Ucero).

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos dejar constancia de nuestro agradecimiento al personal del Parque Natural del Cañón del río Lobos, así como a su director, don José Manuel Meneses, por el apoyo prestado en la realización de las pruebas con trazadores.

REFERENCIAS

- Candil Gonzalo, Y. y López Vílchez, L. (1979): Estudio hidrogeológico del Cretácico situado entre Santa María de las Hoyas y el Alto de Peña Cruz (Soria). Jornadas Minero- Metalúrgicas, pp. 99-119. Huelva.
- Cormary, Y., et Guilbot, A. (1969): Modeles déterministes de relation pluie - débit sur la Siouls. Note 30/69 Laboratoire D'hydrologie Montpellier/EDF/LNH. Rapport DGRST núm. 30, 35 pages, 26 planches.
- Gdalia, L. (1980): Application d'un modele mathematique conceptuel a plusieurs aquiferes karstiques de la bordure mediterrannee française. Academ. de Montpellier.
- Guilbot, A. (1975): Modélisation des écoulements d'un aquifere karstique (liaisons pluie - débit). Application aux bassins de Saugras et du Lez. These d'Université. USTL Montpellier, 110 pages.
- Hernanz López, A. y Navarro Latorre, J. M. (1973): La Cueva de La Galiana, Ucero (Soria). Revista Celtiberia (C.E.S.), núm. 19, pp. 87-92.
- Kirkham, D. y Feng, C.L. (1949): Some tests of the diffusion theory and laws of capillary flow in soils. Soil Sci., 67, 29-40.
- Kostiakov, A.N. (1932): On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. t. h. Comm. Int. Soc. Soil. Sci. Russian Pt. A-15-21.
- Palacios, P. (1886). Descripción física, agrológica y geológica de la provincia de Soria. (Comisión del mapa geológico de España).
- Philip, J.R. (1957): The theory of infiltration: the infiltration equation and its solution. Soil Sci., 83, 395-357.
- Sanz, E. (1992). Las aguas subterráneas en el Parque Natural del Cañón del río Lobos (Soria-Burgos). Boletín Geológico y Minero. Vol. 103-2, 309-329.

10. LA FUENTONA DE MURIEL

10.1. INTRODUCCIÓN

EL manadero de la Fuentona de Muriel u ojo de Mar, se encuentra al pie del borde Sur de las parameras que se extienden al occidente de la Sierra de Cabrejas, en el término de Muriel de la Fuente, a un kilómetro al Norte del pueblo (Fotos 14 y 15). Da lugar al nacimiento del arroyo de Muriel, aportando la mayor parte del caudal que lleva el río Avión, siendo éste a su vez afluente del Ucero. (Foto 16)

Pocas son las citas bibliográficas que hemos encontrado sobre este imponente manantial kárstico. Aparte de la breve descripción hecha por Palacios (1890)⁽¹⁾ y la sucinta referencia de Sáenz García (1956)⁽²⁾, hay un estudio hidrogeológico general de los materiales carbonatados mesozoicos de esta parte de la provincia de Soria, incluyendo no solo los pertenecientes al área de alimentación de la fuente de Muriel, sino también los macizos cretácicos de Ucero y zonas próximas (Candil Gonzalo, J. y López Vílchez, 1974).

El descubrimiento del conducto de salida del manantial y la exploración que del mismo ha llevado a cabo durante varios años, y aún sin finalizar, el grupo de espeleobuceo Standar, ha revelado la existencia de un sistema de sifones muy característicos. (Sanz y Medina, 1984; Molinero, 1990).

(1) Pedro Palacios, en la pág. 81 de su obra "Descripción física, geológica y agrológica de la provincia de Soria (1890) cita textualmente refiriéndose al manantial de la Fuentona:

—“Siguiendo hacia poniente las vertientes de la misma cadena, se halla entre las derivaciones de la Sierra de Cabrejas La Fontona de Muriel, manantial muy celebrado en aquella comarca por la abundancia y calidad de las truchas que se crían en el arroyo que origina. Nace en el fondo de una charca de 10 metros de diámetro, dentro de un barranco que corta los bancos de calizas en abruptas escarpadas de más de 100 metros de elevación. A poca distancia de su nacimiento, sus aguas se detienen en una laguna cerca de una hectárea de superficie, a la que afluyen además las de otras fuentecillas que brotan en sus inmediaciones, para correr después todas reunida en el río Avión. El caudal de la fuente no baja ordinariamente de 650 l/s., pero sufre grandes variaciones en las distintas épocas del año, y en sus mayores crecidas, que siguen de cerca a temporales lluviosos, las aguas invaden toda la anchura del barranco que las encauza, hasta el punto de hacer imposible el acceso al sitio de su nacimiento”.

(2) En el “Anecdotario geológico de los ríos sorianos” (1956), Sáenz García comenta acerca de la fuente lo siguiente:

—“Manadero también muy importante es el ojo de La Fuentona de Muriel: tiene relación con las perdidas de agua de los páramos de encima de Calatañazor; más al Este se ven en los de Villaciervos diversos sumideros, entre otros el simarro del Son del agua a kilómetro y medio al Norte del poste 191 de la carretera de Valladolid, mostrándose también, como fenómeno kárstico a estudiar, la conocida cueva del monte del pueblo antes citado”.

10.2 Esquema geológico e hidrogeológico

La zona se encuentra en el flanco septentrional de la cuenca terciaria del Duero y Almazán, donde aflora una orla mesozoica al Sur de la Sierra de Cameros. Tomando los datos de las memorias de las hojas geológicas a escala 1:50.000 números 348 y 349, describiremos brevemente las series estratigráficas que aparecen en el área desde el Jurásico hasta el Terciario.

El Jurásico marino es eminentemente carbonato y tiene un espesor de unos 250 metros. En aparente concordancia sobre él, y en transición con el Cretácico, se disponen los sedimentos pertenecientes a la facies "Purbeck-Weald", de naturaleza detrítica y de unos 60 metros de potencia. El Weald, ya en el Cretácico, es también detrítico y tiene alrededor de 300 metros. Sigue luego la facies Utrillas, constituida por 150 metros de depósitos terrígenos silíceos. Sobre el tramo anterior yacen unas margas grises cenomanenses de 15 a 25 metros de potencia. Siguen 50 metros de margas y 20 de margocalizas turo-nenses. Concordante con el Turonense se encuentran 100 metros de calizas nodulosas coniacienses que, junto con las calizas masivas santonenses-campanienses de 120 metros de potencia, resaltan morfológicamente en el relieve, dando lugar a los acantilados de los cañones de la región, como el del río Lobos. Por encima se sitúan 25 metros de margas grises y 30 metros de caliza de aspecto carnioloide, de edad Campaniense y Campaniense-Maestrichtiense, respectivamente. Posteriormente y en concordancia con los anteriores materiales se encuentra la facies Garumnense, ya en transición con el Terciario. Está representada por 100 a 200 metros de margas, areniscas y calizas. En discordancia sobre los demás sedimentos descritos, se disponen los materiales paleógenos, formados por 50 metros de conglomerados, areniscas y arcillas. En discordancia sobre el Paleógeno existe un Mioceno detrítico rojizo de unos 100 metros de potencia. El Cuaternario es de poca importancia y no está apenas representado.

Dentro de la litología anteriormente referida, destacan por su elevada permeabilidad, los materiales calcáreos coniacienses y santonenses-campanienses. Son ellos los que definen, en la mayor parte de los casos, los acuíferos importantes de la comarca.

En concreto, el acuífero drenado por la Fuentona de Muriel está constituido por estos materiales. Tienen de 200 a 250 metros de espesor y se extienden unos 160 km², desde cerca de Fuentetoba hasta Muriel Viejo. La geometría de los materiales acuíferos es de un

sinclinorio de dirección Este-Oeste. Las margas turonenses y coniacienses son el nivel de base kárstico y barrera impermeable que rodea el sinclinorio por todas las partes, estando el flanco meridional a menor altura. Allí donde este límite se sitúa a menor cota es donde brota el manantial de Muriel (a los 1.020 metros aproximadamente).

La recarga se lleva a cabo a partir de la infiltración directa del agua de las precipitaciones que caen sobre los afloramientos del acuífero libre. Aunque prácticamente toda la recarga se efectúa de esta manera, hay que contar además con las pérdidas que sufre en estiaje el arroyo de Cabrejas del Pinar cuando abandona su cuenca impermeable y penetra en los afloramientos calcáreos. Si este río va crecido, entonces circula con agua hasta su confluencia con el de la Fuentona. La descarga se efectúa a través del manadero de Muriel y de los brotes que pueda haber en el cauce u orillas del arroyo, aguas abajo del pozo, como la fuente del Cura, de 50 litros por segundo. El acuífero tiene otras descargas permanentes más alejadas y que aquí no vamos a ver. Nos referimos a los manaderos de Fuentetoba, nacimiento del río Golmayo; Cueva Pachón, nacimiento del río Izana; los ojos de Blacos y Torreblacos, en los ríos Milanos y Avión, y en otras surgencias cercanas a la Cuenca.

En aguas altas, y tras períodos muy lluviosos y como consecuencia de la elevación general del nivel freático, aparecen surgencias nuevas muy llamativas. Así, en Cabrejas del Pinar nacen a media ladera los manaderos de el Chorrón (de hasta 300-400 l/s) y otros tres o cuatro, entre los que se encuentra el manantial del antiguo abastecimiento público, el cual sale de un río subterráneo que circula por una galería que ha sido reconocida por espeleólogos hace relativamente poco tiempo.

Las elevaciones mayores de la Sierra de Cabrejas entre Cabrejas del Pinar y Abejar, drenan subterráneamente en períodos lluviosos hacia el Sur a través de 4 ó 5 manantiales efímeros. El bello paraje de las Tres Fuentes constituye un anfiteatro kárstico en plena altiplanicie donde se reúne el caudal de tres o cuatro brotes que juntos pueden llegar a superar los 200 l/s. Se precipitan en cascada y rápidos a media ladera, dejando en el lecho una cortina de toba, como ocurre también con el Chorrón de Cabrejas, Cueva Pachón o Fuentetoba. Se ve como la capacidad de drenaje vertical de acuífero ante una recarga muy importante es limitada y resulta obligado que este drenaje salga lateralmente. Los manantiales dan lugar a arroyos que

circulan por el replano de la meseta, volviéndose a infiltrar rápidamente, y alimentando al manantial de la Fuentona. Se ha comprobado mediante pruebas con trazadores la interconexión entre esta fuente y los sumideros y que la velocidad del flujo subterráneo en estas situaciones es de unos 2-3 Km/día.

En el sondeo de apoyo al abastecimiento a Villaciervos se ha observado que el nivel freático puede sufrir una oscilación de más de 20 m., llegando aquí a brotar un manantial de hasta 200 l/s que vuelve a perderse varios kilómetros más abajo, en un sumidero cercano a la vía romana de Clunia a Numancia.

Junto a la cascada que forma el arroyo de Cabrejas cerca de la Fuentona, aparece otra surgencia temporal bastante importante.

No se tienen datos de aforo del manantial, aunque puede estimarse, según apreciaciones basadas en la extensión y precipitación media de su cuenca, análisis de hidrogramas del río Ucero y de alguna medida directa ⁽¹⁾, que el caudal ha de oscilar alrededor del metro cúbico por segundo.

No existe una morfología kárstica externa importante, escaseando las dolinas u otras formas de absorción significativas. Cuenta sin embargo con un pequeño y pintoresco cañón poco profundo, con paredes verticales entre 50 y 100 metros de altura. Termina la Hoz en un anfiteatro kárstico, en cuyo fondo, en un ojo, brotan las limpi-simas aguas que reflejan, como un espejo, el cielo y los enebros que crecen por las peñas de las orillas. Al pie de los acantilados, ataludándolos, se han desarrollado unos depósitos de grezes-litees.

Las parameras y bosques de enebrales de arriba constituyen un mal país, aunque no llega a formarse un verdadero lapiaz, al menos en las proximidades de la fuente.

La morfología subterránea tiene, por contra, una importante manifestación representada por dos sifones y galerías aéreas que lo prolongan. Hay otra serie de simas y cuevas cercanas, como la cueva de Don Quijote, situada próxima a la Fuentona y de un kilómetro de recorrido, cueva del Manzano y simas de Simancos, Los Ailones, Los Murcielaguillos y del Gato. La descripción de los sifones y galerías aéreas se puede seguir en la figura 9 de la primera parte del libro.

(1) En el húmedo mes de mayo de 1984 hicimos un aforo directo con molinete, dándonos un caudal de 1.500 l/s. En el año 1989 se obtuvo un caudal de 2 m³/s. en el río Avión en Valdealbillo, donde se recogen también los aporte s hídricos del Milanos y de las surgencias de Blacos y Torreblacos.

10.3 Sifones y galerías aéreas (fig. 9 pág. 46)

El primer sifón

Como decíamos, el caudal de agua brota en un ojo en forma de embudo de nueve metros de profundidad y treinta de diámetro. El manantial es permanente y sifonante y el agua surge tranquila y mansamente, sin carga hidrostática, por una pequeña apertura en la pared rocosa del pozo, aunque cuando hay grandes crecidas la velocidad del agua es tal que impide la entrada a los buceadores.

Yendo a contracorriente por el sifón, vamos descendiendo con una inclinación de 25° hasta 52 metros de profundidad. A partir de aquí el conducto se recoda y sube casi verticalmente hasta la superficie subterránea del agua. Es este el comienzo del sifón y en él se inicia una cueva no inundada debajo de la cual se sitúa otra por la que discurre estrepitosamente un río subterráneo. Se trata de un sifón sensu-stricto, magnífico ejemplo de cueva viviente, tal como puede ser muchas otras surgencias kársticas y que este ha podido ser buceado en su totalidad (fotografía 18).

Vamos a describir el sifón desde el manantial hasta su comienzo.

La boca, a 9 metros bajo el nivel del agua, tiene forma de arco de medio punto, de un metro y medio de altura y semiobstruida por un bloque. Tras ella se abre una galería inundada de unos 100 metros de longitud y 25° de inclinación que sigue casi exactamente la dirección de buzamiento de los estratos (25° a 30° hacia el NE) y es prácticamente rectilínea. La orientación coincide también con la dirección de la familia de diaclasas más importantes, por lo que pensamos que el conducto del sifón se ha desarrollado a favor de estos dos planos de discontinuidad. Durante toda esta parte del sifón no se han apreciado huellas de erosión en las paredes.

En los primeros quince metros la sección es rectangular, algo lenticular, con una altura de 5 o 6 metros y una altura de metro y medio. El techo es plano y liso; el fondo está cubierto de bloques parapipédicos desprendidos del techo. Más adelante, a 25 metros de profundidad, la galería tiene una sección cuadrada de 5 a 6 metros de lado. Un manto de arena y grava tapiza el suelo. Al término de

este tramo, a 30 metros de profundidad, la galería se estrecha y justo antes, en el lado Noroeste, parte un conducto que no había sido explorado con detenimiento y que en el plano que presentamos se ha cartografiado parcialmente. Esta derivación logra comunicar también con la sala más profunda del sifón.

Pasada la angostura y durante quince metros, la galería presenta un techo abovedado e irregular y un suelo de gravas. Tiene 3 metros de altura en la parte central y una anchura de 6 metros. Antes de llegar al codo del sifón, la sección es rectangular, de 2 metros de altura por 6 o 7 metros de anchura. El techo es otra vez plano y liso, sin apenas escaloncillos con frente hacia abajo como puede haber en los demás tramos descritos. Hay también depósitos de arenas y gravas en el fondo.

A continuación y tras un paso estrecho, entramos en una gran sala situada ya a los 52 metros. El tiempo que nos es permitido permanecer buceando a esta profundidad es corto y apenas da tiempo a tomar unas breves notas. La forma es cúbica con lados de 15 a 17 metros; las paredes verticales con superficies algo rugosas por efecto de la decalcificación. Enormes bloques de hasta 20 m³, se encuentran en un ángulo del salón procedentes de un derrumbamiento del techo; el resto está cubierto de arena con estructuras de rizaduras de corriente (ripple-marks).

A partir de aquí la galería asciende en rampa con una inclinación de treinta grados. En 35 metros la sección es rectangular y se mantiene constante en todo su trayecto. Tiene 3 metros de altura por 4 de anchura. El fondo está cubierto de bloques de forma irregular de 0,5 - 1 m³, arena y limo. Las paredes son muy lisas y pulidas por la erosión del agua. Posteriormente, aumenta rápidamente la inclinación hasta alcanzar los 70°. La forma es elipsoidal horizontal producto seguramente de la intersección de dos diaclasas, con 10 metros de eje menor y 20 metros de eje mayor. En una de las paredes se observan las huellas de erosión en forma de crestas paralelas transversales de 10 o 15 cms. muy juntas y perpendiculares a la dirección de la corriente. A 5 metros bajo el nivel del agua aparecen por un lado, un caos de bloques grandes paralipepédicos desprendidos del techo. Es por este bloquerio por donde entra el agua en el sifón proveniente de un río subterráneo. Salimos a la superficie y ante nosotros se abre una gran cueva en la que nadie antes había pisado.

Las galerías aéreas

La galería superior tiene 130 metros de longitud y su orientación es Este-Oeste.

Aparece primeramente una gran sala de unos 45 metros de longitud y de 5 a 15 metros de altura. El techo es un plano de estratificación completamente liso y plano con un buzamiento de 30° según la dirección de la cueva. No aparecen formas parietales. El suelo es un caos de bloques de 4 m³, de tamaño medio aunque los hay de hasta 100 m³. Por entre las piedras, en la parte baja, se ve correr el río.

Luego hay una rampa con suelo muy liso que tiene las mismas formas de erosión que las del sifón, lo que hace sospechar que por esta parte circula agua ocasionalmente o lo ha solido hacer hasta hace relativamente poco tiempo. Al final de la cueva hay una sima vertical de poca caída que baja a una galería por la que va un río subterráneo. La sima tiene forma arrosariada y con las paredes desgastadas por el agua. Es posible que se trate de un trop-plein en las crecidas del río, rebosando entonces el agua por la rampa de la cueva.

La galería por la que circula el río ha sido recorrida en una longitud de 50 metros. Tiene de 4 a 5 metros de altura y es de trazo rectilíneo. El río lleva una gran velocidad y ha labrado el lecho rocoso y unas crestas afiladas decimétricas paralelas a la corriente. Al término de la galería hay un nuevo sifón. Se puede continuar la cueva de arriba, una vez pasada la sima, por una entrada a media altura, de la pared de terminación de unas salas grandes. Esta prolongación supone un cambio de aspecto y de dimensión ya que se estrecha y aunque el techo sigue siendo plano y con inclinación de 30°, el suelo está cubierto de arcilla. En la parte final, la cueva se estrecha mucho, y tanto el suelo, como el techo y las paredes carecen de formas parietales, estando cubiertos de arcilla de decalcificación. La cueva termina en dos pozos pequeños, a 80 metros por encima del nivel de la Fuentona de Muriel y allí se descubren raíces de árboles que nos indican la proximidad del suelo exterior, aunque no se note circulación de aire.

Donde comienza el segundo sifón está también el arranque de la segunda cueva aérea en forma de arco tanto en planta como en alzado. Tiene un desarrollo de unos 200 m. y en su fondo aflora el nivel freático que se sitúa a la cota +23 respecto al nivel de la Fuentona.

11. HIDRODINÁMICA E HIDROGEOQUÍMICA DE LOS PRINCIPALES MANANTIALES TERMALES DE LA PENÍNSULA IBÉRICA: LOS MANANTIALES DE ALHAMA DE ARAGÓN Y DEZA (*)

RESUMEN

Los manantiales termales de Alhama de Aragón son las principales surgencias termales (temperatura de 33° C y caudal de 440 l/s) de toda la Península Ibérica. Constituyen la principal descarga del llamado "Acuífero de Alhama". Este viene constituido por una banda de calizas cretácicas de especial geometría: 100 km de largo, 1.3 km de ancho y varios cientos de metros de espesor.

Intregando distintos datos de partida como: (1) geometría en profundidad (en base a geofísica profunda) y en superficie (cartografía geológica convencional) (2) análisis de hidrogramas de la descarga del acuífero (3) estudio de la recarga por métodos hidrometeorológicos clásicos y (4) hidroquímica convencional e isotópica, se elabora un modelo sencillo y global del acuífero. Este modelo, además de permitir obtener valores de parámetros hidráulicos, explica el termalismo de los manantiales de Alhama mediante una simple circulación profunda (cercana a los 1.000 m) con un gradiente geotérmico normal (3° C/100 m), sin necesidad de que las aguas entren en contacto con un foco de calor en la base del acuífero.

1. INTRODUCCIÓN

Los manantiales de Alhama de Aragón (32-35° C) son las surgencias termales de baja temperatura (32-35° C) con mayor caudal de España (440 l/s). En este trabajo se presenta una investigación sobre el origen de estas surgencias y las características del acuífero que las alimenta. El estudio se apoya e interrelaciona datos de distinta procedencia: geometría del acuífero (geología superficial y prospección geofísica profunda), hidrogeoquímica convencional e isotópica (tritio y oxígeno-18), análisis de hidrogramas en curvas en cursos superficiales y recarga del acuífero en base a datos hidrometereológicos.

(*) Capítulo redactado por Eugenio Sanz Pérez y Javier G. Yélamos

Se elabora un modelo conceptual del acuífero, coherente con las distintas fuentes de información, en el que el termalismo de los manantiales de Alhama de Aragón se explica por circulación profunda (hasta 1000 m de profundidad) pero sin recurrir a la existencia de una anomalía geotérmica positiva.

El considerable caudal de los manantiales de Alhama de Aragón ha sido aprovechado por importantes balnearios especialmente desde el siglo XIX. Actualmente existen cuatro establecimientos: Cantarero, Guajardo, Termas Pallares y Baño Viejos de San Roque. Este último con una galería de baños datada en 1112 (Suárez, 1992).

La tabla 11.1 recogen los valores de temperatura y caudal para los principales manantiales termales de Península Ibérica (caudal mayor de 10 l/s, y temperatura mayor de 30° C). En la elaboración de la tabla 11.1 se han consultado cerca de medio centenar de publicaciones, no solo los trabajos que aparecen indicados en la columna del origen de la información. También se revisó el Archivo de Aguas Minerales y Mineromedicinales del (ANPAM), los manantiales del Inventario General de Puntos de Agua (también del ITGE), así como los apartados de hidrogeología de las memorias de 150 mapas geológicos a escala 1:50.000.

La información recogida en la tabla 11.1 indica que existen manantiales con el doble de temperatura que los de Alhama de Aragón, como las Burgas de Orense, La Toja o las Caldas de San Pedro do Soul, pero en ningún caso su caudal supera los 40 l/s: menos del 10% del caudal total del grupo de manantiales que nos ocupan. Además, los manantiales de Alhama de Aragón descargan el doble de agua que otras surgencias mesotermales (30-35° C) como es el caso de Sierra Elvira o los Baños de Zújar, los cuales serían los segundos en importancia.

Tabla 11.1

Principales manantiales termales de la Península Ibérica con caudal mayor de 10 l/s y temperatura mayor de 30°C..

<i>Manantial termal</i>	<i>Provincia</i>	<i>Temperat. °C caudal (l/s)</i>		<i>Referencia</i>
ESPAÑA				
Arteixo	La Coruña	42	35	ITGE (1993), pp.167)
La Toja	Pontevedra	37-60	37	ANPAM
Las Burgas	Orense	64	30	ITGE (1993, pp.167)

<i>Manantial termal</i>	<i>Provincia</i>	<i>Temperat. °C</i>	<i>caudal (l/s)</i>	<i>Referencia</i>
S. Juan de baños	Orense	47	20	ANPAM
Prexigueiro	Orense	39	15	ANPAM
Carballino/Partovia	Orense	37	120	Sánchez (1992)
Baños del río Caldo	Orense	67	17	IGME (1972)
Caldas de Besaya	Santander	35-37	11.6	Armijo (1968, pp.393)
Puente Viesgo	Santander	35	15	ANPAM
La Hermida	Santander	46	10	Hoja 1605
Unidad Mofrechu	Asturias	30	30	ITGE (1993, pp.179)
Fitero	Navarra	46	40	SGOP-DFN (1982)
Arnedillo	La Rioja	52.5	20	Coloma et al. (1995)
Caldas de Montbuy	Barcelona	55-70	20	ANPAM
Alhama de Almería	Almería	45	15	ANPAM
Sierra Alhamilla	Almería	57	14	IGME (1985-b, pp.194)
Alhama de Granada	Granada	47-49	86	Yepes (1990)
Sierra Elvira (*)	Granada	32	200	Cruz et al. (1979)
Alicún de las Torres	Granada	34	80	Cruz et al. (1979)
Baños de Zujar	Granada	38	180	Cruz et al. (1979)
Archena	Murcia	52	41	Armijo (1968, pp.392)
Fortuna	Murcia	45	14	IGME (1953)
Baños de Mula	Murcia	36	83	ANPAM
Mina Feli	Salamanca	35	30	IGME (1985-a)
Jaraba	Zaragoza	29-34	17	IGME (1985-a)
Alhama de Aragón	Zaragoza	32-35	440	This study

PORTUGAL

Caldas Monchique	Faro	27-32	11.8	Lopes Paradela et al. (1982, pp.14)
Caldas da Rainha	Leiria	33	20	Lopes Paradela et al. (1982, pp.19-20)
S. Pedro do Sul	Viseu	37-68	10	Lopes Paradela et al. (1982, pp.54)

(*) Actualmente el manantial está seco (Cerón y Castillo, 1996)

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Marco geológico general

La zona de estudio se encuentra en el centro de la Península Ibérica, dentro de la cordillera de origen alpino denominada Cordi-

llera Ibérica. En este sector la Cordillera se divide en dos unidades representadas en el esquema de la figura 11.1:

a) Rama Aragonesa, constituida por un zócalo paleozoico y una cobertera de edad triásica y cretácica.

b) Rama Castellana, formada fundamentalmente por sedimentos del Triásico y Jurásico.

La separación de la Cordillera Ibérica en dos unidades no es debida a importantes diferencias de estructura y litología, como a que se encuentran separadas por la Cuenca sedimentaria de Almazán. Esta cuenca es una cubeta rellena de sedimentos Paleógenos y Neógenos. El acuífero de Alhama de Aragón se encuentra en el límite entre la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica y la Cuenca de Almazán.

2.2. Litología, estratigrafía y estructura del Acuífero de Alhama

Los manantiales de Alhama están asociados a la Falla de Alhama que pone en contacto el Terciario del borde noreste de la Cuenca de Almazán con una banda calcárea cretácica de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (Fig. 11.1). Relacionados con esta misma falla o con los materiales cretácicos hay otros grupos de manantiales termales: Embid de Ariza, San Roquillo y Deza. La dirección NO-SE de esta falla y del afloramiento cretácico carbonatado coincide con las directrices geológicas de la Cordillera Ibérica por lo que esta circunstancia y la topografía condicionan la orientación principal del flujo del agua subterránea, del NO. al SE., desde la altimeseta soriana (Cuenca hidrográfica del Río Duero) hasta el Valle del Jalón (Cuenca hidrográfica del río Ebro).

El Cretácico está constituido de base a techo por unas areniscas cuarcíferas en facies Utrillas sobre las que se apoyan 40 m. de arcillas y calizas cenomanienses de carácter poco permeable. Encima aparecen 335 m. de calizas permeables del Cenomaniense, Turonienso y Senoniense (Lendínez y Ruiz 1991, Lendínez y Martín, 1991, Navarro 1991-a y 1991-b) y que son las que constituyen el Acuífero de Alhama. La Facies Utrillas se sitúa en discordancia sobre materiales Triásico en facies germánica (Keuper arcilloso y yesífero, Muschelkalk dolomítico y Buntsandstein formado por areniscas y lutitas) (Rey y Ramos, 1991).

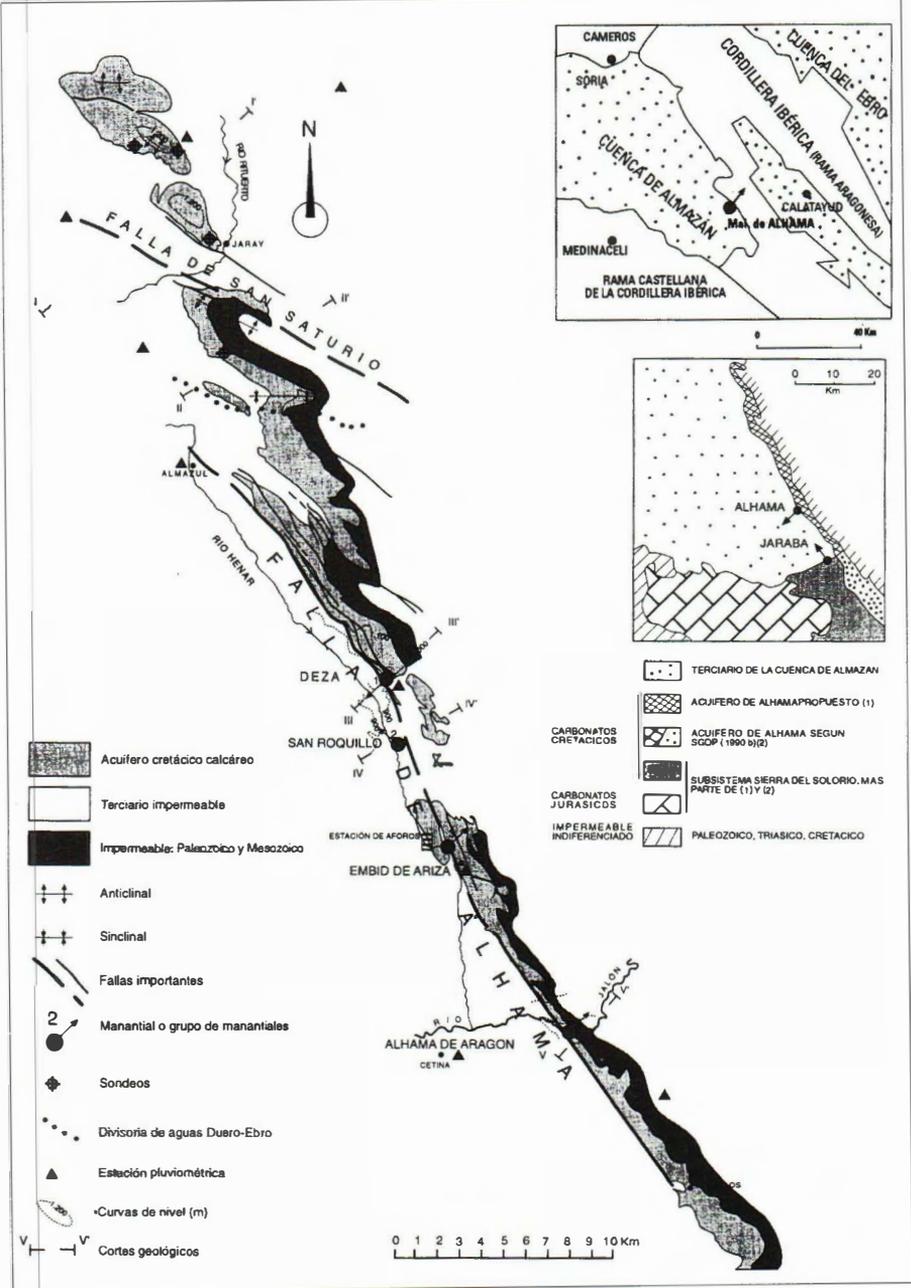


Fig. 11.1.—Acuífero de Alhama de Aragón

El Paleógeno está constituido por conglomerados, arcillas, areniscas, calizas, margas y yesos, con unos 1.000 m. de espesor total. Se dispone en discordancia progresiva sobre las calizas cretácicas (Guisado et al., 1988) aunque el contacto entre el Cretácico y el resto de las formaciones Terciarias es en otros casos mediante la importante Falla de Alhama.

El Paleogeno en conjunto ha de considerarse como bastante poco permeable y las litologías más impermeables suelen estar en contacto con el Cretácico calcáreo. Según el amplio inventario de puntos de agua realizado en el Terciario (Delegación Provincial de Minas, SGOP-1990, Junta de Castilla y León, 1991) los sondeos perforados en el Paleógeno de la región noreste de la Cuenca de Almazán suelen tener una profundidad media de 100 m. y un caudal inferior a 0'5 l/s, aunque también hay otros que están secos o tienen un caudal insignificante, como ocurre en algún sondeo de 400 m. de profundidad.

El Neógeno está constituido por materiales arcillosos de gran espesor. En base a esos mismos inventarios de puntos de agua e informes, el pequeño caudal de los escasos sondeos perforados en esta litología confirman su baja permeabilidad. Dentro de los sedimentos del Neógeno, localmente aparecen calizas interestratificadas con permeabilidad por karstificación.

El Cretácico está dispuesto en sucesivos y apretados pliegues concéntricos de dirección NO-SE, muchos de los cuales están afectados por cabalgamientos con vergencia al NE. Estas fallas dividen y compartimentan la banda cretácica calcárea aunque no llega a perder su continuidad (Fig. 11.1 y 11.2). Las dos fallas más importantes de la zona son del mencionado estilo: Falla de Alhama y Falla de San Saturio (Aracil et al., 1992) donde el nivel de despegue principal es el Keuper y, secundariamente, la facies Utrillas. La banda de calizas cretácicas del acuífero de Alhama se prolonga 60 km. hacia el NO., donde se introduce bajo el Terciario, aunque surge de él en forma de dos cúpulas anticlinales una vez pasada la importante Falla de San Saturio. Hacia el sureste de los manantiales de Alhama, el acuífero se extiende otros 20 km. conservando la misma disposición estructural. Los cortes geológicos que se presentan en la Fig. 11.2 están apoyados en una prospección geofísica realizada en la zona (Aracil et al., 1993), en la que se ha detectado la Falla de Alhama que se prolonga a más de 1.500 m. de profundidad.

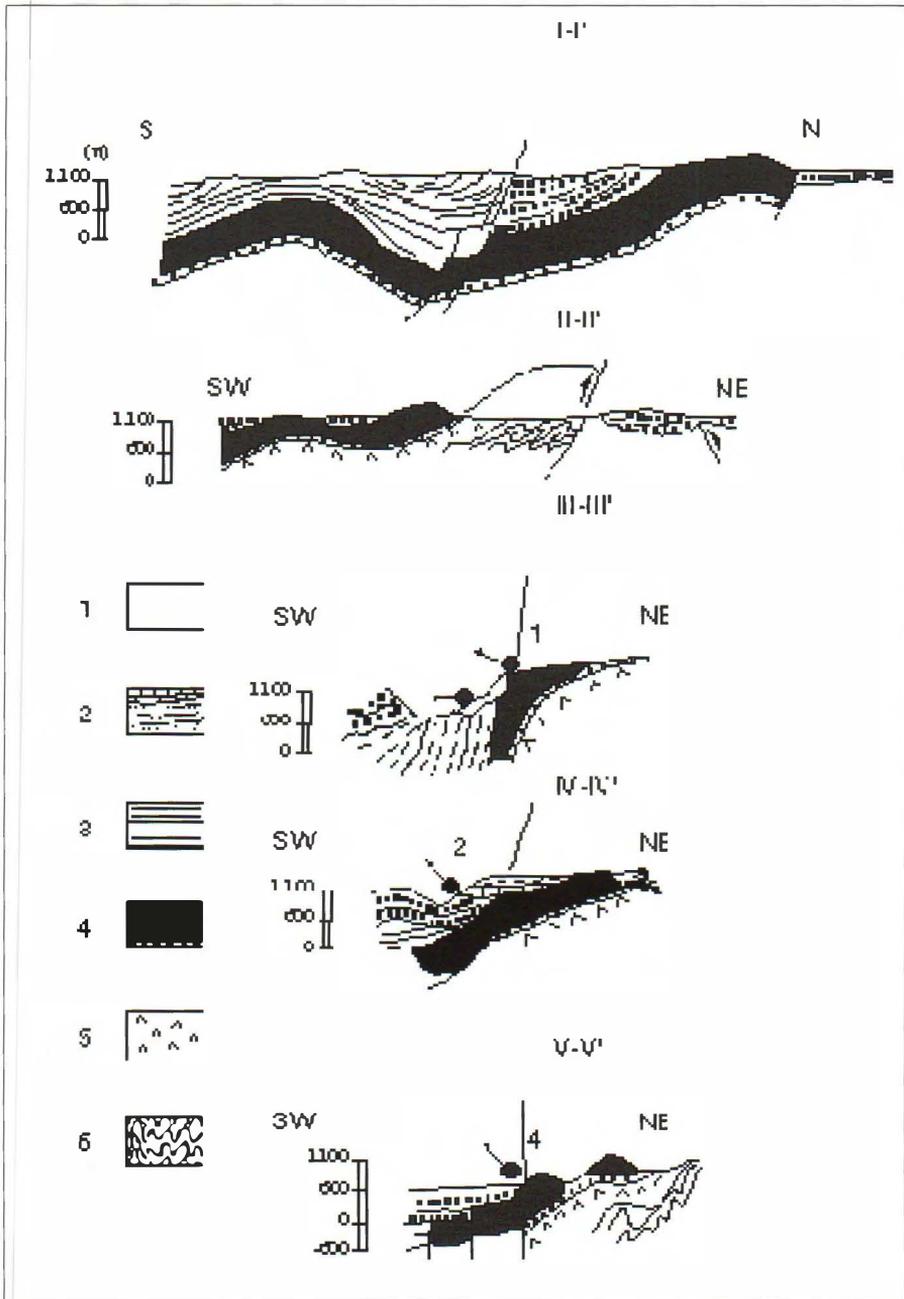


Fig. 11.2.—Cortes geológicos del Acuífero de Alhama.

3. ANTECEDENTES

El primer estudio de carácter hidrogeológico y el único que se centra exclusivamente en el acuífero de Alhama de Aragón, es el de Hernández-Pacheco (1954). Para explicar el origen de los manantiales termales propone un esquema simple a gran escala de acuerdo con los conocimientos hidrogeológicos de la época. Todos los materiales calcáreos de la Cordillera Ibérica (tanto Cretácicos como Jurásicos) formarían un único acuífero. La base impermeable del acuífero la definirían los materiales paleozoicos (pizarras, esquistos, grauwacas, etc). Este único acuífero calcáreo estaría confinado debajo de los sedimentos terciarios de la cuenca de Almazán, pero sus aguas emergerían en superficie por la barrera impermeable que haría el afloramiento de materiales paleozoicos asociados a la falla de Alhama. El mismo autor indica dos sentidos generales del flujo de las aguas subterráneas: **a)** principal, responsable de las aguas termales, de sentido oeste a este, desde la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica hacia la Rama Aragonesa **b)** secundario, dentro de la banda de materiales cretácicos asociados a la falla de Alhama, de sentido general noroeste a sureste.

El modelo de Hernández-Pacheco suponía implícitamente que la recarga del acuífero se efectuaba sobre grandes superficies del orden de cientos de km². Sin embargo son suficientes los 100 km² de la banda de calizas cretácicas de la figura 11.1, para justificar los caudales de los manantiales de Alhama, tal como se demuestra en el apartado 4.1. Por otro lado, recientes investigaciones de geofísica en la cuenca de Almazán (Bond, 1996) revelan que las calizas situadas bajo los sedimentos terciarios se encuentran fracturadas y desplazadas en una serie de horst y grabens, de forma que parece poco probable la continuidad hidráulica desde la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica hasta la Aragonesa.

Desde el trabajo de Hernández Pacheco hasta la actualidad no hay ningún estudio que, o bien se centre en el acuífero de Alhama, o bien reconozca explícitamente que la banda de materiales cretácicos de la figura 11.1 es la responsable del importante caudal y el termalismo de los manantiales de Alhama.

Los estudios a gran escala del PIAS incluyen al sector suroeste del acuífero de Alhama como parte del gran sistema acuífero denominado "Sierra del Solorio" (IGME, 1982) formado por gran superficie de calizas de edad cretácica y jurásica de la Rama Aragonesa

de la Cordillera Ibérica. En otros trabajos, de mayor detalle, pero limitado a la hidrogeología de la provincia de Soria (ITGE, 1989, SGOP, 1990) al tercio más oriental del acuífero se le denomina acuífero de Deza o de Sierra Miñana, asignándole (solo ese sector) unos recursos de 3 hm³/año. En estos trabajos ya se abandona el modelo de Hernández-Pacheco, limitando el acuífero a su extensión en planta y también se reconoce que el sentido principal del flujo subterráneo es del noroeste hacia el sureste.

El único trabajo previo en el que se reconoce de forma explícita la relación entre los manantiales termales de Alhama y la banda de materiales cretácicos, es el breve apartado de hidrogeología del mapa geológico a escala 1:50.000 n° 436 (Lendínez y Martín, 1991) donde además se indica un aforo puntual de los manantiales termales de Alhama (julio de 1980) con el valor de 550 l/s.

En lo relativo a estudios hidroquímicos pueden citarse los trabajos de Alvarez et al (1983) y López Azcona (1983) que incluyen análisis químicos de varios manantiales del acuífero de Alhama. En el primero apenas se hace una somera interpretación hidroquímica, mientras que el segundo está enfocado a los aspectos de hidrología médica.

Merece destacarse el estudio geotérmico preliminar, en base a la hidroquímica, tanto de los manantiales termales de Alhama de Aragón, como los vecinos de Jaraba, recogido en IGME (1985). Los análisis de isótopos ambientales estables (¹⁸O y ²D) indican que se trata de agua de origen meteórico y sin fraccionamiento isotópico por intercambio con la roca. El bajo contenido en tritio informa que se trata de aguas infiltradas con anterioridad al inicio de las explosiones nucleares atmosféricas. La aplicación de geotermómetros clásicos (sílice, alcalinotérreos) arroja temperaturas de base entre 50 y 110° C.

Un estudio muy detallado de la aplicación de los diferentes geotermómetros a los manantiales termales de Alhama y Jaraba es presentado por Tena et al. (1993). Los geotermómetros clásicos indican dos máximos de temperatura de base (cerca de 45° y 80-100° C) mientras que geotermómetros específicos para rocas carbonatadas (calcita-dolomita, anhidrita-fluorita) no dan resultados válidos: temperaturas negativas o por debajo de la temperatura de surgencia. En general los autores muestran un cierto escepticismo sobre la aplicación de los geotermómetros a acuíferos de naturaleza carbonatada como es el caso del de Alhama.

4. FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

4.1. El área de recarga

Las calizas cretácicas del Acuífero de Alhama constituyen un afloramiento de dirección general noroeste-sureste, casi continuo y bastante estrecho. Tiene 100 km². de superficie, 80 km. de longitud, 1.660 m. de anchura media y 370 m. de anchura mínima en Alhama de Aragón, que es donde surgen los manantiales en la zona de menor altitud. En el extremo noroccidental se desgajan del cuerpo principal varias cúpulas anticlinales separadas superficialmente por su recubrimiento de sedimentos Neógenos pero interconectadas hidráulicamente en profundidad, a través de las calizas.

El Acuífero de Alhama puede dividirse en dos sectores, en función del sentido general del flujo de las aguas subterráneas: (1) sector noroeste, al norte del río Jalón (flujo NW a SE), y (2) sector sureste al sur del Río Jalon, con el sentido al contrario.

En el sector del NO del Acuífero de Alhama, se tiene una superficie de 80 km². y la altitud media del área se encuentra alrededor de 1.100 m. El 79% de la superficie de recarga se encuentra por encima de los 1.000 m. de altitud, el 67% entre 1.000 y 1.200 m., a una distancia media del punto de drenaje de unos 40 km. Corresponden a las zonas más alejadas y situadas en el valle del río Rituerto (Cuenca del Duero). Las áreas más próximas a los manantiales de Alhama es donde se concentra el 21% restante de afloramientos, que están situados entre 1.000 y 560 m. de altitud. Estos afloramientos rocosos calcáreos o no tienen suelo o tienen una débil capa arcillosa pobremente desarrollada. El 30% de su superficie está cubierto de arbolado (encinas); el resto de la superficie es monte erial, sin cultivar. Las calizas se encuentran casi siempre a cotas topográficas superiores respecto a los terrenos impermeables circundantes y ello ha sido así desde el Mioceno (Navarro, 1991-a), pues constituyen relieves en inselbergs. No hay manantiales importantes en el contacto Terciario-Cretácico a pesar de las grandes llanuras que se extienden en la Cuenca del Duero. Ello supone que la mayor parte de la recarga ha sido y sea actualmente de tipo autógeno, difusa, con predominio del régimen laminar, acorde con el poco desarrollo de la karstificación como demuestra la ausencia de formas exokársticas y endokársticas importantes. La recarga se verifica por lo tanto a par-

tir de la infiltración de las precipitaciones, atravesando la zona no saturada que tiene un espesor medio comprendido entre 150 y 200 m (SGOP, 1990).

La precipitación media anual es de 643 mm y la temperatura media anual de 10.2°C. La determinación de la pluviometría media en la zona de recarga se ha hecho en base al mapa de isoyetas medias anuales elaborado a partir de las series de precipitaciones homogeneizadas de las estaciones existentes en la zona en el período 1940-41 a 1985-86. El 51% de las precipitaciones se efectúa en los seis meses de temperatura más baja, habiendo dos máximos que corresponden al Otoño y a la Primavera; esto evita que la evaporación sea mayor. En el diagrama de la figura 11.3 se representa la pluviometría y la temperatura mensuales de un año medio, así como la recarga (R, en mm) obtenida a partir de la regresión múltiple:

$$R = 0.6P - 2.7T + 11.7$$

que tiene un coeficiente de correlación de $r = 0.9$ y donde P es la precipitación media mensual (mm) y T la temperatura media mensual (°C). Esta regresión, ha sido obtenida mediante la aplicación de un modelo matemático en un acuífero kárstico situado 30 km al norte de la zona de estudio y que tiene semejantes características y funcionamiento hidrogeológico (Sanz, 1996). Según esta correlación resulta un rango de recarga respecto de la precipitación del 36 %. Por otro lado, se observa como el 80 % de la recarga se concentra en los seis meses de menos temperatura del año (de Noviembre a Abril). La precipitación aumenta con la altitud y por tanto de NE a NO, con un gradiente de 90 mm. por cada 100 m. de altitud. Este gradiente pluviométrico en el sector NO: del Acuífero de Alhama es el doble que el calculado en otras áreas más montañosas de la Cordillera Ibérica. Así, por ejemplo, Fernández García (1989) obtiene un gradiente de 45 mm. por cada 100 m. de altitud en las Sierras de la Demanda, Urbión y Albarracín. Sanz (1987) obtiene un gradiente en la Sierra del Moncayo de 43 mm/100 m en la ladera norte y 37 mm/100 m en la ladera sur. La evaporación disminuye lógicamente también hacia el noroeste y la frecuencia de precipitaciones en forma de nieve es mayor hacia esa dirección. Casi todas las circunstancias mencionadas favorecen la regularidad de las entradas de agua en el sistema hidrológico y el alejamiento del centro del gravedad respecto a los Manantiales de Alhama.

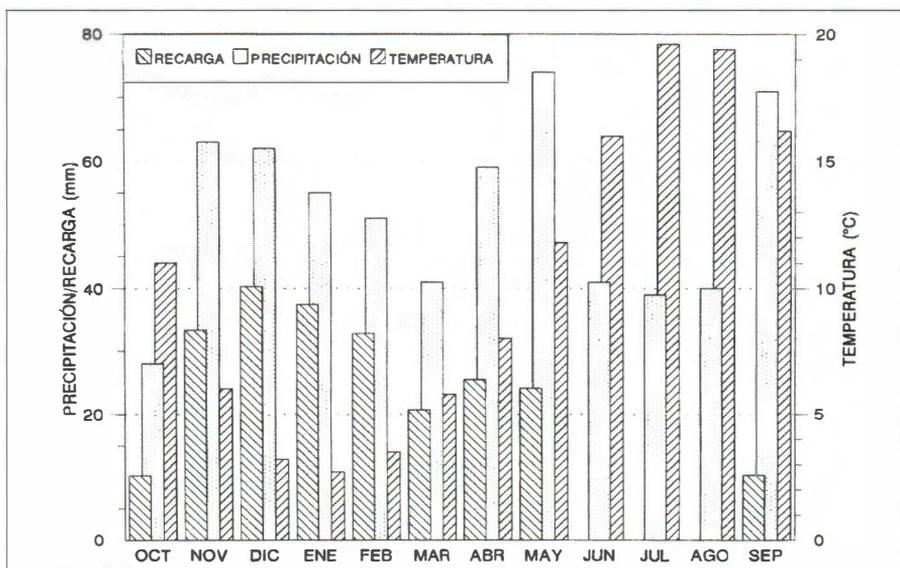


Fig. 11.3.-Valores medios estimados de recarga, precipitación y temperatura en el Acuífero de Alhama.

En el sector sureste del Acuífero de Alhama la altitud media del área de recarga se encuentra alrededor de los 800 m y prácticamente toda la superficie (18 km²) está comprendida entre 750 y 850 m de altitud. Las características geológicas, edafológicas y la vegetación son muy similares a las del sector noroeste. La precipitación media anual es de 350 mm y la temperatura media anual también de 12.1 °C. Utilizando la misma correlación múltiple que anteriormente, se obtiene una recarga media anual de 75 mm (21.5 % de la precipitación) o bien . El 96 % de esta recarga se concentra en los seis meses de temperatura menor temperatura (Noviembre a Abril).

4.2. LA CIRCULACIÓN Y LA DESCARGA DEL ACUÍFERO DE ALHAMA

4.2.a. Descarga en manantiales

El Acuífero de Alhama está prácticamente sin explotar por lo que las salidas del sistema se realizan a través de cuatro grupos de manantiales (Deza, San Roquillo, Embid y Alhama) distribuidos a lo largo de la Falla de Alhama que pone en contacto las calizas del Cretácico con el Terciario arcilloso (Fig. 11.1, tabla 11.2).

Tabla 11.2

Valores de caudal y temperatura de los manantiales del Acuífero de Alhama

(1) Este trabajo (2) IGME (1985) (3) Tena et al. (1991)

<i>Grupo de manantiales</i>	<i>Nombre del manantial</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Caudal (l/s)</i>	<i>Referencia</i>
Deza	Hocino	19.2		
	Hocino	10	2	(1)
	Fuente del Suso	19.5		
	Fuente del Suso	19.2	-	(3)
	Fuente del Suso	18.5	10-20	(1)
	Fuente Vieja			
	Fuente Azañón	15	5	(1)
San Roquillo	San Roquillo	19	10	
	San Roquillo	18	5-10	(1)
	Ojos de la Vega	19	10	
Embid de Ariza	Fuente del Lavadero	29	40	
	Fuente del Lavadero	29	10	(2)
	Fuente del Lavadero	27.5	-	(3)
	Fuente del Lavadero	23		(1)
Alhama de Aragón	Galería Termas Pallarés	33.2	9.2	
	Galería Hostal San Fermín	33.2	20.3	
	Baños del Rey	33.2	47.2	
	La Meona	33.2	2.2	
	La Alberca	33.2		
	La Cascada y el Lago	34.0	143.6	
	San Roque-1	32-35	5.8	
	San Roque-2	32-35	3.2	
	Baños Guajardo	33.4	3.7	
	La Leñera	33.4	0.16	
	Molino del Garaje	33.4		
	Molino de las Dehesillas	32-35	7.4	
	Baño del Moro	32-35	2.9	
	Molino de los Baños (S.R.)	32-35	0.74	
	El Chorrillo	32-35	1.5	
	Fuente Pública	32-35	0.01	
	Surgencias termales en cauce del río Jalón	32-35	284	

1) Manantiales de Deza. Comprende los manantiales denominados Suso, Hocino, Azañón y Fuente Vieja. Las dos primeras nacen en el contacto entre las calizas cretácicas y el Terciario impermeable. Las aguas de la Fuente de Azañón, aunque provienen del acuífero de Alhama, descargan en el aluvial del río Henar (Fte. de Azañón). En éste último caso, es muy probable que se mezclen con las subálveas y pierdan temperatura.

El macizo calcáreo está modelado aquí por la superficie de erosión fundamental finimiocena (Navarro et. al., 1991-b) coetánea con la superficie de colmatación terciaria del Páramo. Esta circunstancia ha supuesto, probablemente, el establecimiento de una primitiva red de drenaje hacia Deza desde finales del Mioceno, época en la que no afloraban hacia el SE los terrenos cretácicos pues estaban cubiertos por el Terciario. El grupo de manantiales de Deza puede tener un caudal conjunto aproximado de 115 l/s y una temperatura variable de 19°C.

2) Manantiales de San Roquillo. Descargan a través de un nivel de calizas karstificadas dentro de los sedimentos del Neógeno que hacen el papel de un by-pass para el Acuífero de Alhama. Los manantiales brotan en el pie de la ladera del Valle del Henar dando lugar a un edificio tobáceo, o bien en el aluvial holoceno en forma de ojos. Se hallan influenciados por la pequeña área de recarga de esas calizas karstificadas neógenas, que dan lugar a mayores variaciones de caudal que en los restantes manantiales del acuífero de Alhama. Tienen un caudal medio aproximado de 20 l/s y una temperatura de 19°C.

3) Embid de Ariza. Se trata de una galería horizontal de 50 m.. de longitud que capta el agua que antiguamente surgía en el cauce del río Henar. Tiene un caudal medio de 20 l/s y una temperatura de 26°C.

4) Manantiales de Alhama de Aragón. Comprenden 16 surgencias utilizadas para balnearios que tienen un caudal total de 193 l/s, oscilando entre 0.16 y 144 l/s y entre 32 y 35°C de temperatura (Tabla 11.2). Algunos de los manantiales surgen a presión y brotan 8 m por encima del cauce del río Jalón y quedan vestigios de depósitos tobáceos colgados situados a 10 m del talweg del río Jalón. Aparte de estos manantiales hay una descarga difusa en el propio cauce del río Jalón a lo largo de los 350 m de afloramiento de las cali-

zas cretácicas, y que totalizan un caudal de unos 250 l/s. Los manantiales más caudalosos se localizan hacia el contacto entre el Cretácico y el Terciario y los de menor caudal tienden a situarse cerca del borde oriental del acuífero (contacto entre las calizas y las margas de base).

En épocas de sequía, el Río Jalon se encuentra seco aguas arriba de Alhama de manera que, en este sector del curso del río, solo se alimenta de la descarga de los manantiales termales.

4.2.b. Análisis de hidrogramas

La estación de aforos E-9057 de la red del Ministerio de Obras Públicas en el río Henar controla el conjunto de los manantiales de Deza y San Roquillo, más las escorrentías superficiales de una cuenca en la que el 95% de la superficie son materiales terciarios de la Cuenca Sedimentaria de Almazán. Los Manantiales de Deza y San Roquillo se recargan en otras cuencas hidrográficas superficiales fuera de la del río Henar.

Según el inventario completo de manantiales situados en el Terciario, la aportación de estos es de unos 20 l/s durante los estiajes del período 1990-1995. Se han estudiado 24 años de aforo de dicha estación (1945/46-1974/75) donde se ha obtenido una aportación media anual de 8.1 hm³/año. Utilizando el método de Barnes, se ha separado la escorrentía superficial y la subterránea, método que se ha aplicado con bastante fiabilidad pues los estiajes prolongados han ofrecido curvas de agotamiento muy claras. La escorrentía superficial que se origina en la cuenca terciaria impermeable de Almazán tiene una manifestación clara en el hidrograma del río, con respuesta rápida a los episodios lluviosos. En dicho período de tiempo se ha obtenido una aportación media anual de escorrentía subterránea de 4.6 hm³/año (146 l/s), que es el 57% de la escorrentía total, y que resulta 30 l/s, superior a la suma de los manantiales de Deza y San Roquillo, medidos entre 1990-1995, lo cual parece lógico ya que hay que tener en cuenta que el período de sequía de estos últimos años ha afectado especialmente al manantial de San Roquillo. Los manantiales de Embid tienen 40 l/s y los de Alhama 440 l/s.

Con los datos de aforo puntuales se ha comprobado que los manantiales de Deza y Embid son bastante regulares y únicamente

el de San Roquillo acusa variaciones relativamente importantes en su caudal. En Alhama los manantiales son también muy constantes y el caudal y temperatura de los manantiales de los balnearios no ha variado a lo largo de más de un siglo, según se observa en la información recopilada por ITGE (1992). Así pues se puede ver que en general, la regularidad del caudal de las salidas del acuífero aumenta hacia el drenaje principal de Alhama, de forma directamente proporcional al aumento del recorrido del flujo subterráneo.

El volumen hidrodinámico en la fecha inicial media es de 2 hm³. En la figura 11.4 se representan a modo de ejemplo algunas curvas de agotamiento correspondientes a diferentes años. Analizados los aforos de la estación E-9057 durante 30 años (1945/46 -1974/75) con 24 períodos de régimen no influenciado se ha manifestado una curva de agotamiento principal de $\alpha = 0.0057$.

5. HIDROGEOQUÍMICA

Dentro de este trabajo se ha realizado la toma de muestras y posterior análisis, tanto para química convencional como isotópica (tritio y ¹⁸O) (tabla 11.3). También se han recogido los datos analíticos de trabajos previos. Los datos hidroquímicos, especialmente los de isótopos, apoyan la hipótesis de un flujo preferente desde el extremo noroeste del acuífero hacia el sureste, descargando en los manantiales termales de Alhama.

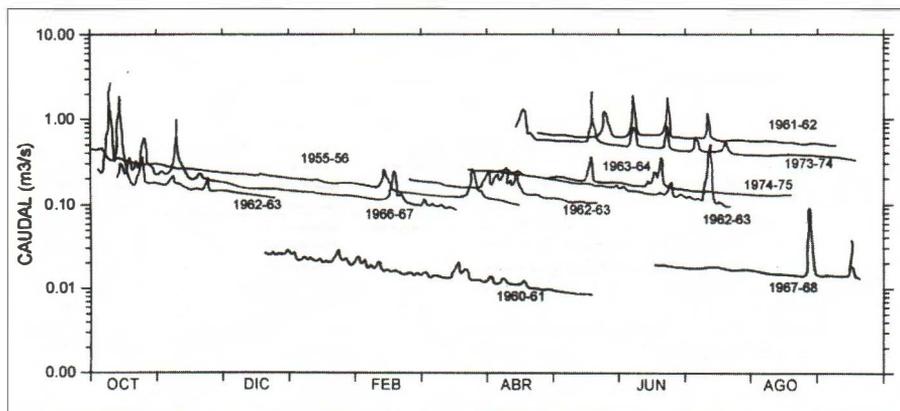


Fig. 11.4.—Curvas de agotamiento del hidrograma del río Henar.

Tabla 11.3
Valores de isótopos ambientales

<i>Manantiales</i>	<i>1992</i>		<i>1993</i>
	^3H U.T.	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰
Fuente Suso (Deza)	8.1±1.0	-9.0	-8.5
El Molino (Deza)	7.4±1.0	-8.9	—
San Roquillo	12.5_4.3	-8.9	-8.5
Embid	3.3±0.9	-8.7	-8.5
Galería Termas Pallarés (Alhama)	1.9*0.7	-8.7	—
Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ ‰ SMOW		1992-93	
Estación	Verano	Otoño	Invierno
Almenar	-4.5	-	-4.5
Almazul	-5.1	-9.0	-
Deza	—	-4.6	-4.7
Embid	-4.3	-4.0	—

5.1 TRITIO

El resultado de los valores de tritio indican un progresivo envejecimiento de las aguas en sentido NW a SE, desde los manantiales de Deza (8 T.U.) hacia Embid (3.6 U.T.) y finalizando en Alhama (1.8 U.T.).

A fin de estimar la edad de las aguas de Alhama partimos de dos supuestos:

a) Los datos de tritio en precipitaciones de la estación de Madrid (red de la I.A.E.A.) son representativos de las precipitaciones sobre el acuífero de Alhama. Se trata de la única estación española alejada de la influencia marina. Dicha estación, situada a 200 km al suroeste del acuífero de Alhama y en el centro de la península ibérica, dispone de un registro continuo de valores de tritio desde 1970 hasta 1989. Los valores están recogidos en Plata (1994). Los datos de tritio anteriores a la década de los 70 se obtienen de los estimados para la Meseta Central Española por Plata (1972, pp.55).

b) El acuífero de Alhama obedece a un modelo de flujo tipo pistón. En el sector noreste del acuífero hay un área de recarga localizada en su extremo septentrional, a cotas por encima de los 1100 m, desde donde el agua subterránea se va desplazando sin que apenas tengan lugar procesos mezcla. De esta forma, el contenido de tritio en el agua subterránea esta controlado únicamente por las leyes de la desintegración radiactiva.

En la figura 11.5 se representa por una línea continua los valores medios anuales de tritio en la precipitación (medidos y calculados) de la estación de Madrid, y mediante símbolos las rectas de la ecuaciones

$$\text{Log}C_t = \text{Log}C_o - \frac{1}{12.48} (t - 1992)$$

Donde t es una fecha anterior al muestreo; C_t es la concentración de tritio en dicha fecha; C_o corresponde a la concentración de tritio en el muestreo de 1992, y 12.48 el valor (años) del período de semidesintegración del tritio. Tomando como inicio el valor de tritio obtenido en los manantiales de Alhama en el muestreo de 1992 y admitiendo los dos supuestos anteriores, la intersección de los símbolos con las precipitaciones nos indicaría la fecha de recarga de las aguas.

Los manantiales de Alhama y Embid tienen aguas infiltradas en la primera mitad de la década de los 50. En cambio para Deza y San Roquillo cabe la posibilidad, tanto de que sean aguas recientes (década de los 80) como que también se infiltraran en los años 50. En cualquier caso, serían más recientes que las de Alhama o Embid, coherentemente con el sistema general de flujo.

Tomando en consideración que las mayor parte de las aguas del acuífero descargan en el grupo de manantiales de Alhama, y que es muy probable que se infiltraran entre 1952 y 1956, resulta una edad (el muestreo fue en 1992) de unos 36-40 años. Si además se tiene en consideración que la distancia media del centro de gravedad de la recarga a los manantiales de Alhama es de unos 40 km, se obtiene una velocidad real del agua del orden de 1 km/año.

5.2 OXÍGENO-18.

Al igual que en caso del tritio, la única estación de medida del ^{18}O en las precipitaciones situada en el centro de la Península Ibérica es la ciudad de Madrid (red I.A.E.A.), la cual estuvo en servicio en el período 1978-83. Del análisis de los datos se desprenden las siguientes características (Herraéz et al., 1983):

- a) El clima continental con estaciones muy marcadas (dife-

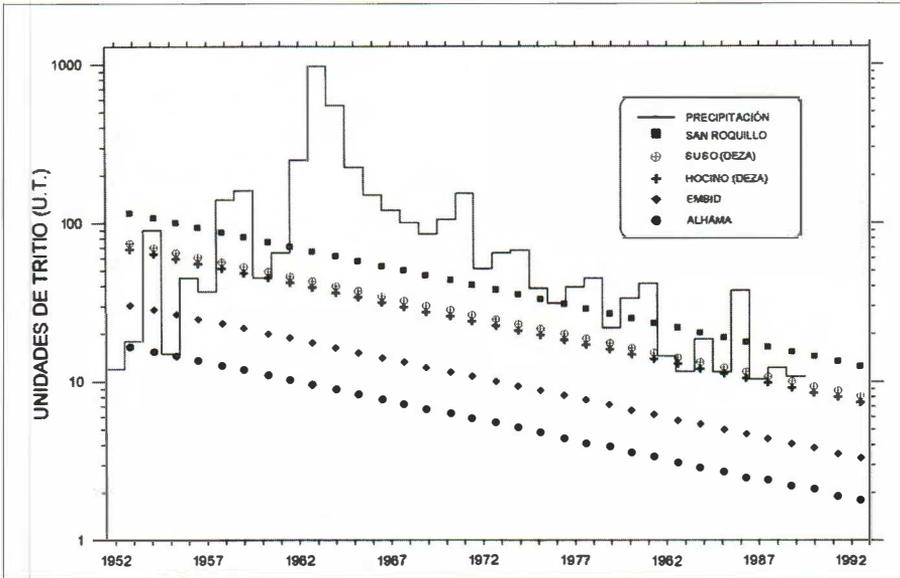


Fig. 11.5.—Concentración de tritio en la lluvia de Madrid (línea continua) y evolución del tritio en los manantiales del Acuífero de Alhama (líneas de trazos) suponiendo un flujo de tipo pistón.

rencias acusadas de precipitación y temperatura entre el verano y el invierno) incide notablemente sobre la composición isotópica de las precipitaciones.

b) Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ oscilan entre -10 y $+2$ ‰, claramente correlacionados con la temperatura del aire (gradiente de 0.5 - 0.8 ‰/°C).

c) En el período de infiltración eficaz (precipitación supera la evapotranspiración), entre los meses de octubre y marzo (el mismo que en el acuífero de Alhama) la composición media de $\delta^{18}\text{O}$ es de -7.3 ‰

En el estudio del acuífero de Alhama tomamos ocho muestras de agua de lluvia (tabla 11.4). Los valores oscilan entre -4.3 y -9.0 ‰ dentro del margen de variación de Madrid, apoyando la hipótesis de que la composición isotópica de que la precipitación en esta estación es análoga a la del acuífero de Alhama, ya que ambas son áreas continentales con un clima similar.

Tabla 11.4

Composición química de las aguas de manantiales del Acuífero de Alhama

(1) Análisis de este trabajo (2) IGME (1985) (3) Álvarez et al. (1983).

Manantial	Ec μ S 25° C	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SiO ₂	Error	Refer.
DEZA												
Suso	910	7.5	27	120	311	1	15	102	30	17	-0.2	(2)
Suso	842	7.4	32	173	390	1.3	49	137	35	3.5	4.7	(1)
Hocino	-	7.4	23	250	141	1.5	18	70	39	-	-3.9	(1)
Hocino	-	-	23	276	213	2.2	18	115	37	-	-1.2	(3)
Hocino	940	7.7	35	231	347	3.4	25	119	60	4.5	2.1	(3)
Azañón	997	7.4	37	217	409	9.5	28	152	51	7.1	2.7	(1)
Suso	833	7.9	31	182	331	2	24	117	40	7.7	-1.4	(1)
Media Deza	7.5	30	207	306	3	25	116	42	8	1.3		
SAN ROQUILLO												
S.R.	747	7.9	30	136	332	1.5	20	106	32	7.8	-2.6	(1)
S.R.	790	7.6	22	100	311	1	12	96	28	17	-2.0	(2)
S.R.1	-	-	21	140	173	1.8	17	60	36	-	3.2	(3)
S.R.2	-	-	20	136	303	2.5	16	103	36	-	3.0	(3)
S.R.3	-	-	27	101	192	2.6	16	72	25	-	3.3	(3)
S.R.	741	7.5	29	179	290	1.4	15	97	43	8	-2.7	(1)
S.R.	746	6.9	27	148	370	1.1	31	119	35	5.4	0.5	(1)
Media San R.	7.5	25	134	281	1.7	18	93	34	9.6	1.1		
Manantial	Ec μ S 25° C	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SiO ₂	Error	Refer.
EMBED												
Alberca	1110	7.6	87	180	287	3	48	110	37	13	-1.6	(2)
Alberca	1232	7.5	106 H	282	244	3.4	64	134	44	12	-1.0	(1)
Alberca	1146	7.7	91	235	347	4.1	64	129	54	6.5	1.8	(1)
Media Embid	7.6	95	232	293	3.5	59	124	45	10	1.1		
ALHAMA Guajardo												
	1110	7.6	98	150	287	4	53	108	37	15	0.6	(2)
Pública	1150	7.2	104	180	281	3	58	106	37	13	-2.2	(2)
Lake	1120	7.3	98	160	281	3	54	100	36	13	-2.2	(2)
King Bath	1110	7.3	99	160	287	2	53	101	36	15	-2.8	(2)
Pallarés	1110	7.3	99	180	281	2	54	104	37	13	-2.9	(2)
Pallarés	1247	7.7	93	292	325	3.8	58	140	54	12	-2.0	(1)
Media Alhama		7.4	98	187	290	3	55	110	40	13	-0.6	

Valores en mg/l excepto la conductividad hidráulica (μ S) y pH

Por otro lado, en base al muestreo de manantiales en las hard rocks del área de Madrid, Herráez (1983) deduce un gradiente de altitud para el ^{18}O de $-0.23 \text{ ‰}/100 \text{ m}$, valor que está entre los más frecuentes, que oscilan entre -0.15 y $-0.5 \text{ ‰}/100 \text{ m}$ (Yurtsever & Gat, 1981).

Los valores de ^{18}O registrados en Alhama son análogos para todos los manantiales, oscilando entre -8.5 y -9.0 ‰ . Esta similitud indicaría un mismo área de recarga a pesar de la diferencia de cotas entre los manantiales: Deza 920 m, San Roquillo 900 m, Embid 760 m y Alhama 660 m. Partiendo de la composición media de las precipitaciones en Madrid (-7.3 ‰) considerando el gradiente deducido por Herráez (1983) a una altitud de 1100 a 1200 m el contenido de ^{18}O en el agua de lluvia sería de -8.3 a -8.5 ‰ cercano al obtenido en los manantiales del acuífero de Alhama (-8.5 a -9.0 ‰). En otras palabras, la similitud de contenido en ^{18}O de los cuatro grupos de manantiales del acuífero de Alhama, es coherente con la hipótesis de que la recarga se concentra en el extremo noroccidental del acuífero, a cotas de 1100-1200 m de altitud.

5.3 HIDROGEOQUÍMICA CONVENCIONAL

Se tienen 11 análisis de elementos mayoritarios de muestras de manantiales tomadas entre 1989- 93 junto con otros 14 procedentes de otras fuentes (IGME, 1985; Álvarez et al., 1983). Calculando el error en el balance de aniones-cationes mediante la fórmula (Lloyd & Headthcote, 1985, pp. 101): hemos descartado aquellos análisis con un error relativo superior al 5 % (dos de los análisis recogidos de la bibliografía). Los restantes aparecen en la tabla 11.4 junto con los valores medios para cada uno de los cuatro grupos de manantiales. La figura 11.6 muestra un perfil hidrogeoquímico donde, junto a los diagramas de Stiff para valores medios de los cuatro grupos de manantiales, también se indican los valores de temperatura, concentración de SiO_2 y composición isotópica.

La temperatura de los manantiales es coherente con el modelo general de flujo de NW a SE, aumentando hacia los manantiales más alejados del área de recarga: 19°C en Deza y San Roquillo, 28°C en Embid y 33°C en Alhama.

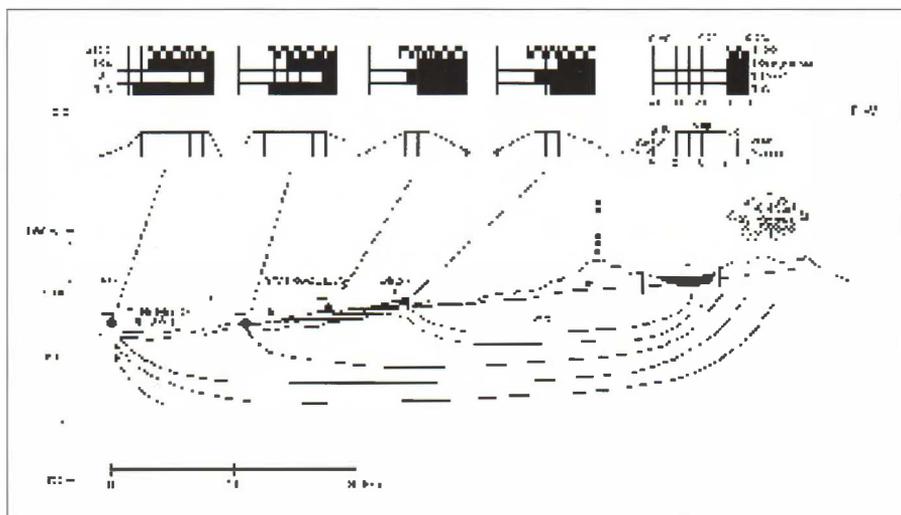


Fig. 11.6.—Evaluación geoquímica y de temperatura en el acuífero de Alhama.

La composición química no muestra grandes variaciones entre los distintos grupos de manantiales. Se trata de aguas de facies bicarbonatada cálcica o bicarbonatada sulfatada cálcica con salinidades entre 590 y 890 mg/l de total de sólidos disueltos. Los valores de pH también son similares, entre 7.4 y 7.6 de valor medio para cada grupo de manantiales.

Para el origen de las distintas especies disueltas cabe invocar dos procesos: disolución de las rocas que forman el acuífero de Alhama, y en menor medida concentración por evaporación de las precipitaciones. Como valores posibles de la composición química de las precipitaciones en la tabla 11.5 se recogen los rangos de las distintas especies para áreas que tiene en común dos características con la de Alhama:

(1) Zonas continentales sin influencia de los aerosoles marinos.

(2) Alejadas de áreas industriales, de forma que la composición química de la precipitación no se modifica por procesos de contaminación atmosférica.

Teniendo en consideración que el porcentaje de recarga proveniente de las precipitaciones y deducido en el apartado 4.1 es del 36 %, el agua de infiltración multiplicaría su concentración por tres.

Únicamente el contenidos en K^+ de los manantiales del acuífero de Alhama (1.7 a 3 mg/l) se podría explicar por esta vía y tomando como representativo de las precipitaciones el valor máximo de K^+ de la tabla 11.5. Los restantes iones en disolución tienen concentraciones demasiado elevadas para poder justificarse a través de concentración por evaporación, por lo que hay que suponer que proceden de la disolución de minerales presentes en los carbonatos del acuífero de Alhama, o en los materiales impermeables de sus bordes.

Tabla 11.5

Composición química de la precipitación en áreas continentales sin contaminación atmosférica. Basado en análisis recopilados por Freeze & Cherry (1979) and Verry (1983).

Componente	Max.	Min.	Media
Ca^{+2}	3.3	0.2	0.8
Mg^{+2}	2.0	<0.1	0.3
K^+	1.0	<0.1	0.3
Na^+	2.2	0.1	0.6
HCO_3^-	3.0	1.9	*
SO_4^{-2}	3.7	1.5	2.4
Cl^-	3.8	<0.1	0.9
pH	6.1	4.1	4.9

Valores en mg/l.

El predominio de la facies bicarbonatada cálcica se asocia a la propia litología calcárea del acuífero de Alhama. Dentro de estas rocas aparecen dolomías las cuales pueden suponer la fuente del magnesio (34-45 mg/l de media). Los equivalentes de Cl^- y Na^+ son bastantes similares en los cuatro grupos de manantiales (véanse los diagramas de Stiff de la figura 11.6) lo que invita a suponer que su origen está asociado a la disolución de halita, mineral presente en los sedimentos impermeables terciarios del borde occidental del acuífero.

A medida que aumenta el tiempo de permanencia del agua en el acuífero hay un incremento en los contenidos de Cl^- y Na^+ : estos

iones tienen una concentración tres veces menor en los manantiales de Deza y San Roquillo que en los de Embid y Alhama, tal como se recoge en los diagramas de Stiff de la figura 11.6.

Otro elemento mayoritario que también guarda una relación con el sentido del flujo es la sílice, con un aumento no muy acusado de acuerdo con el sentido general del flujo: valores medios de 8 mg/l en Deza, 9.6 en San Roquillo, 10 en Embid y 13 en Alhama.

6. MODELO GENERAL DE COMPORTAMIENTO HIDROGEO-LÓGICO PARA EL ACUÍFERO DE ALHAMA DE ARAGÓN

A partir de toda la información recopilada en los apartados anteriores, se plantea un modelo general de comportamiento hidrogeológico para el acuífero de Alhama. A efectos de simplificación, el modelo se refiere al sector noroeste del acuífero, donde aparecen los cuatro grupos de manantiales considerados y se concentran la mayor parte del flujo. El modelo conceptual considera que la banda noroeste de calizas cretácias se comporta de forma análoga a un tubo de forma prismática que se recarga por su extremo norte y se descarga en el sur, únicamente a través de los manantiales de Alhama de Aragón (figura 11.7).

6.1. Caudal de drenaje del sector Norte.

La recarga estimada en el sector noroeste del acuífero de Alhama es de 20.5 hm³/año (650 l/s) que en régimen permanente, lógicamente, coincide con la suma de las descargas de los cuatro grupos de manantiales. Los tres primeros grupos (Deza, San Roquillo y Embid) aportan solo una quinta parte del caudal total, lo que nos permitirá tener poco error si se supone que el drenaje se verifica únicamente por Alhama.

De los 500 l/s de caudal de los manantiales termales de Alhama, a efectos del cálculo se descuenta la pequeña aportación del sector sureste, que estimado por la recarga viene a ser de 1.4 hm³/año (44.4 l/s). Para no introducir decimales no significativos en los cálculos tomamos un caudal de descarga de 450 l/s.

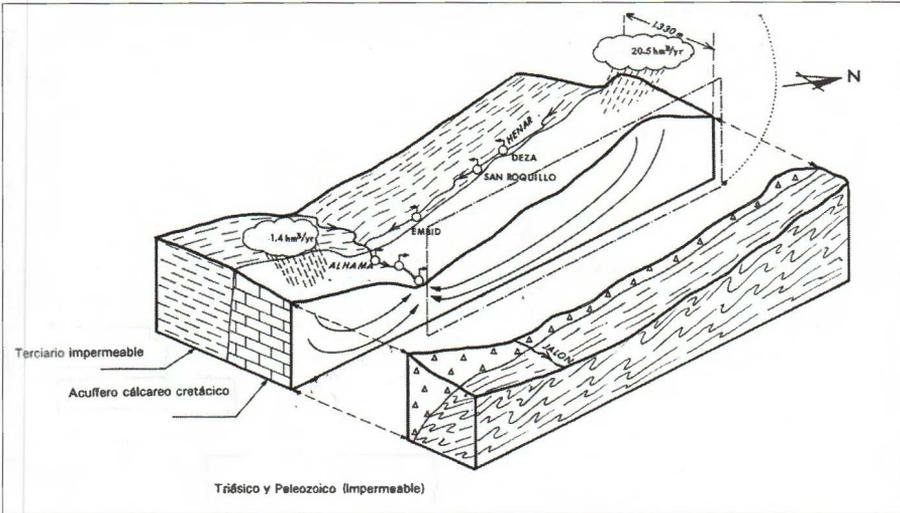


Fig. 11.7.—Modelo conceptual de flujo en el Acuífero de Alhama.

6.2. Gradiente hidráulico.

Teniendo en cuenta la topografía, situación de los manantiales y del nivel freático en cuatro sondeos concentrados en el extremo noroccidental acuífero de Alhama, se ha estimado un gradiente hidráulico de 0.0055 para el sector principal del acuífero. Este valor se encuentra entre 0.003 y 0.006, valores medidos por Sánchez Navarro et al. (1992) para calizas similares a las de Alhama, pero situadas en la Rama Argonesa de la Cordillera Ibérica, en lugar de la Castellana. Los autores obtienen estos valores a partir de medidas de nivel piezométrico en un centenar de sondeos.

6.3. Estimación del espesor medio del acuífero

La cartografía geológica de superficie indica una anchura media de las calizas del sector norte de 1330 m. Para conocer el espesor medio del acuífero se supone que éste es tal que tiene que justificar el termalismo de los manantiales partiendo de las siguientes premisas:

- (1) La geometría de las calizas en forma de banda alargada prismática implica que el flujo es principalmente de componente horizontal.

- (2) El prisma recibe una recarga concentrada en el extremo norte y descarga en su margen sur, en los manantiales de Alhama.
- (3) El gradiente geotérmico es el promedio de la superficie terrestre: 1°C/33 m. Como la temperatura media del aire en la zona es de 10°C y el espesor medio de la zona no saturada es del orden de un centenar de metros, en el nivel freático ya se tiene agua a una temperatura de 13°C.
- (4) La isotermas son paralelas a las líneas de flujo en la mayor parte del prisma, salvo en los dos extremos (áreas de recarga y descarga) donde predominará una componente vertical del flujo.

Asumiendo estas cuatro hipótesis de partida, en el nivel freático o primera línea de flujo, el agua se encontraría a 13°C. A 100 m por debajo de éste se podría suponer otra línea de flujo con agua a 16°C, y así sucesivamente, hasta alcanzar una temperatura tal, que al mezclarse todos los tubos de flujo, la temperatura promedio fuese de 33°C. Con un gradiente hidráulico y permeabilidad constantes, la temperatura de la línea de flujo más profunda (base impermeable del acuífero) sería:

$$T(\text{Alhama}) = \frac{T(\text{nivel freático}) + T(\text{base del acuífero})}{2}$$

$$33^\circ = \frac{T(\text{nivel freático}) + T(\text{base del acuífero})}{2}$$

de 53°C. Esto supone, en principio, que con un escaso espesor saturado de acuífero de 1333 m se justificaría el termalismo de los Manantiales de Alhama.

Para acotar más esta cifra de espesor saturado, manteniendo los cuatro supuestos anteriores, se considera la variación de la viscosidad con la temperatura. Si tenemos una red de flujo cuadrada y manteniendo constantes la permeabilidad intrínseca y el gradiente hidráulico, a medida que aumenta la profundidad se incrementa el caudal de cada tubo de flujo al disminuir la viscosidad dinámica. Ésta, en el intervalo entre 13 y 40°C varía de una forma casi lineal de acuerdo con la ecuación:

$$\mu_t = \mu_0 + [(t_0 - t) 0.0819]$$

Donde μ_0 es la viscosidad a 20°C (t_0), o sea 1 centipoise, y μ_t la viscosidad a la temperatura t . Teniendo en cuenta esta variación de viscosidad, estimar el espesor saturado del acuífero se consigue resolviendo la ecuación:

$$Q_{\text{Alhama}} \times T_{\text{Alhama}} = \sum_1^n q_i \mu_i T_i$$

Donde Q_{Alhama} es la descarga del sector norte del acuífero en Alhama y T_{Alhama} su temperatura. La letra n indica el número de tubos de flujo considerados; q_i y T_i el caudal y temperatura en cada uno de los tubos y μ_i es un factor que incrementa el caudal a medida que disminuye la viscosidad. Como en Alhama la temperatura es de 33°C y su caudal es igual a la suma de los q_i , la ecuación anterior se reduce a:

$$1/n = 33 / \sum_1^n q_i \mu_i T_i$$

Esta ecuación no tiene una solución directa sino mediante sucesivos tanteos. Si se considera una red de ocho tubos de flujo con incrementos de temperatura de 3°C entre cada línea de flujo, variando la viscosidad de forma lineal con la profundidad y estando la línea de flujo superior (nivel freático) a 13°C, la mezcla de agua de esos ocho tubos de flujo alcanza una temperatura de 33,7°C, tanteo que se considera válido. Como se parte de un valor de gradiente geotérmico de 1°C/33 m, los ocho tubos suponen un espesor saturado de acuífero de 800 m más el centenar de zona no saturada suman un espesor de las calizas del Acuífero de Alhama de 900 m.

En base a la información proporcionada por la cartografía geológica existente que está apoyada en parte por diversas prospecciones de sísmica de reflexión realizadas en la zona para investigaciones petrolíferas y por otros trabajos hidrogeológicos donde se ha utilizado la Gravimetría, Sondeos Eléctricos Verticales y Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de los Tiempos (Aracil et. al., 1993), en la vertical del límite Terciario-Cretácico, la base del Acuífero de Alhama se sitúa entre 400 y 1.300 m, y a unos 2 ó 3 km. más hacia el Suoeste de este contacto, la base se encuentra entre 500 y más de 2.000 m, dependiendo de las zonas (Fig. 11.2.). Esta profundidad es mayor en los extremos del acuífero y menor en las proximidades de Alhama, y rápidamente alcanza profundidades mayores hacia el cen-

tro de la Cuenca de Almazán situada al suroeste (Bond, 1995). Por tanto, es perfectamente posible la existencia de un espesor medio en las calizas del Acuífero de Alhama de 900 m, justificándose el termalismo de los manantiales sin necesidad de una anomalía positiva de calor en la base del acuífero.

6.4. Estimación de los parámetros hidráulicos medios del Acuífero de Alhama

El alto tiempo de permanencia del agua en el acuífero más la ausencia de formas kársticas indican que el acuífero de Alhama tiene un comportamiento hidráulico más parecido al de un acuífero con porosidad intergranular que a un acuífero con permeabilidad por karstificación y baja capacidad de regulación, a pesar de estar formado por rocas calcáreas. Por tanto cabe aplicarle la ley de Darcy.

$$Q_{\text{Alhama}} = S \frac{\Delta h}{\Delta L} k$$

donde Q_{Alhama} es el caudal en el sector norte (450 l/s), S la superficie obtenido por el ancho medio (1330 m) del acuífero y el espesor saturado calculado en el apartado anterior (800 m), y $\Delta h/\Delta L$ el gradiente hidráulico indicado en el apartado 6.2, 5.5 ‰. Con estos valores se calcula una permeabilidad media de 6,64 m/día y una velocidad de Darcy (V_D) de 0,037 m/día, y una transmisividad (T) de 5312 m²/día. Además, tomando en consideración la velocidad real 1Km/año = 2,74 m/día estimada por los valores de tritio resulta una porosidad eficaz de 1,4 ‰, valor comprendido entre los que cabe esperar para calizas fracturadas, que según Castany (1984) oscila entre el 1 y el 5%.

Con los datos anteriores se puede calcular el coeficiente de agotamiento del manantial de Alhama (∞) por la fórmula

$$\infty = \frac{\pi^2 \cdot T}{4 \cdot m_e \cdot L^2}$$

Como longitud del prisma se considera la distancia desde el centro de gravedad de la recarga hasta los Manantiales de Alhama, que viene a ser de unos 40 Km. También se puede calcular su volumen hidrodinámico ($V_n = Q/\infty$) y lo que pudiéramos denominar “vida

media" (t_m) del manantial definido por el tiempo que tardaría el mismo en reducir su caudal a la mitad, en el supuesto de que el acuífero no recibiese ninguna recarga. Se trata de una media que refleja con más claridad la regularidad del manantial ante eventos de sequía. Su expresión que sale de la relación $0'5 = e^{-\alpha t}$ es

$$t_m = \frac{0'693}{\alpha}$$

Así, el coeficiente de agotamiento de Alhama es $\alpha = 0'000585$ día⁻¹, su volumen hidrodinámico $V = 66,5$ hm³ y la vida media de 3,25 años. Si consideramos que desde el centro de gravedad de la recarga hasta los manantiales de Deza se estima una longitud media de las líneas de flujo de 16 km, en este caso el coeficiente de almacenamiento resulta $\alpha = 0'0037$ día⁻¹, que es del mismo orden de magnitud que el obtenido por el hidrograma de la estación de aforos del río Henar ($\alpha = 0'0057$ día⁻¹) y que avalan de alguna manera la bondad de los resultados obtenidos.

DISCUSIÓN

El estudio de un acuífero no explotado por pozos perforados como el de Alhama de Aragón (tan solo 5 sondeos y además concentrados en el extremo NW) tiene muchas limitaciones. No pueden elaborarse mapas de isolíneas de nivel freático, no se dispone de puntos donde realizar pruebas de bombeo, etc. Sin embargo en este estudio se ha llegado a un conocimiento razonable del comportamiento del acuífero de Alhama y sus manantiales termales. Integrando datos hidrogeológicos de diferente naturaleza (estructura geológica del acuífero en base a cartografía superficial y apoyo en estudios previos de geofísica, análisis de hidrogramas de estaciones de aforos, hidroquímica convencional e isotópica) se obtiene un modelo simple en el cual toda la información es coherente. El coeficiente de agotamiento obtenido por el análisis de hidrogramas es análogo al deducido a partir de aplicar la ley de Darcy; la temperatura de los manantiales se justifica con un flujo a través de 1000 m de acuífero que coincide a grosso modo con los datos de la estructura geológica; los datos de hidroquímica convencional e isotópica apoyan el sentido general del

flujo de dirección NW a SE en que se basa este modelo sencillo. Y en conjunto, se deduce un valor de porosidad eficaz que entra dentro de los valores previsibles. Todo ello en base sencillas elaboraciones matemáticas, sin sofisticados planteamientos que posiblemente no tendrían sentido dado el discreto conocimiento que todavía se tiene del acuífero.

En los trabajos previos como IGME (1985) o en el ANPAM, la presencia de la importante falla de Alhama junto a las surgencia termal había llevado a la conclusión de que esta fractura era la responsable directa del termalismo de los manantiales: la falla sería la vía de circulación de las aguas subterráneas, infiltrándose en un extremo, calentándose en profundidad y emergiendo los manantiales termal en el extremo contrario. Sin descartar el que la falla sea una posible vía de ascenso del calor interno, de entrada parece poco viable que por un plano de falla pueda circular un caudal de 440 l/s. En el modelo conceptual del acuífero propuesto (circulación hasta 1000 m de profundidad por toda la sección del acuífero cretácico con un gradiente geotérmico normal) no hace falta recurrir a una anomalía térmica positiva y el papel de la falla de Alhama en el origen del termalismo es secundario. La falla no es la vía de circulación de aguas termal, sino la responsable de la geometría del acuífero, al verticalizar las capas de sedimentos cretácicos y permitir la existencia de 1000 m de espesor saturado de calizas.

El acuífero estudiado también refleja el importante papel que pueden jugar las aguas subterráneas en la distribución del calor de origen interno en la superficie de la corteza. Si suponemos que por los materiales calcáreos del acuífero de Alhama no hubiera circulación de aguas subterráneas y que estos tuvieran un flujo de calor similar al de la media de la superficie terrestre ($1.5 \mu\text{cal/cm}\cdot\text{seg}$), en los 100 km² de superficie que ocupan emitirían 4.7×10^{13} cal/año. En cambio, los manantiales termal de Alhama, concentrados en una estrecha banda de 300 m de longitud, descargan una masa de agua de 14 hm³/año que ha calentado su temperatura de unos 10 a 33°C, lo que supone una emisión de calor de 4.7×10^{15} cal/año, dos órdenes de magnitud superior.

CONCLUSIONES

Según las observaciones hechas en los apartados precedentes, podemos construir una hipótesis de modelo de flujo tal como se ve en la figura 11.7 donde se presenta un perfil vertical esquemático y conceptual, longitudinal al acuífero y de dirección NO-SE.

La recarga es autógena y se verifica sobre todo en los afloramientos calcáreos cretácicos alejados del drenaje principal de Alhama; no se descarta una pequeña aportación proveniente del Terciario que rodea al sistema termal. Ello favorece la circulación del agua en régimen laminar como un modelo de flujo-pistón, donde la velocidad media es de 1 km/año, y donde la mayor parte del flujo subterráneo se mantiene hasta el punto más alejado y bajo en Alhama.

A lo largo de la Falla de Soria se registran también varias salidas del sistema termal situadas a diferentes altitudes. Los datos de isótopos de estos manantiales y la composición físico-química de las aguas de estos manantiales presentan una estrecha relación con el tiempo de residencia. Se observa en el sentido del flujo del agua un aumento de la temperatura, edad del agua, mayor mineralización, regularidad en el caudal de los manantiales, etc. En este sentido, el manantial de Alhama tiene un coeficiente de agotamiento muy bajo, y aunque no tuviese recarga, tardaría más de 6 años en reducir su caudal a la mitad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a P. Peri, M. Montero y M. de la Fe Díaz, del Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Obras Públicas (CEDEX) la realización de los análisis de tritio. Igualmente, agradecemos a J. Baeza las facilidades para la consulta de los informes internos (internal reports) del Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C.; de Pedro, F.; Gallego, R. y Villanueva, E. (1983). "Aplicación del análisis químico e interpretación geoquímica de las aguas de la zona de Soria correspondientes a la Hoja 408. Torrijo de la Cañada (Soria)". *Bol. Geol. Min. España*, 94 (I), 20-31. Madrid.
- ANPAM. Archivo Nacional de Puntos de Aguas Minero-Medicinales, Minero-Industriales y de Bebida Envasada del Instituto Tecnológico Geomínero de España.
- Aracil, E.; López, F.J.; Rubio, V.; Sanz, E. y Savirón, L. (1993). "La Falla de San Saturio". *Geogaceta*, 13, 12-15.
- Armijo, M. (1968). "Compendio de Hidrología médica". Editorial Científico-Médica. 484 pp. Barcelona.
- Bond, J. (1996). "Tectono-sedimentary evolution of the Almazán Basin, NE Spain". In: Friend, P.F. & Dabrio, C.J. (Editors), "Tertiary basins of Spain". Cambridge University Press, pp. 203-213.
- Castany, G. (1984). "Hydrogeological features of carbonate rocks ". In: La Moreaux, P.E.; Morere, B. & Memon, B.A. (Editors), "Guide to the hydrology of carbonate rocks". Studies and reports in hydrology, UNESCO, pp. 47-68.
- Coloma, P.; Sánchez Navarro, A. y Martínez Gil, F.J. (1995). "El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro (Sector Riojano)". *Geogaceta*, 17, 68-17.
- Cruz J.; García Rossell, L. y Granda, J.M. (1979). "Nuevos datos sobre las aguas termales de la provincia de Granada". II Simposio Nacional de Hidrogeología. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, V, 533-546. Pamplona.
- Del Pozo, M.; Herranz, J.M. y Monterde, J. (1983). "Investigación hidrogeológica básica del sistema nº 88 (10 bis). Terciario del sureste de Soria". III Simposio Nacional de Hidrogeología. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, IX, 397-406. Madrid.
- Domenico, P.A. & Schwartz F.W. (1990). "Physical and Chemical Hydrogeology". Wiley, 823 pp.
- Fernández García, F. (1989). "Gradientes térmicos y pluviométricos de dos sectores de la Ibérica: Demanda, Urbión y Albarracín". I Encuentro Nacional de Estudios sobre el Moncayo. Ciencias de la Naturaleza. Turiaso IX. Tomo I. pp. 245-260. Tarazona.

- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979). "Groundwater". Prentice-Hall International, 604 pp.
- Guisado, R.; Armenteros, I. y Dabrio, C.J. (1988). "Sedimentación continental paleógena entre Almazul y Deza. (Cuenca de Almazán Oriental, Soria)". *Studia Geológica Salamanticensia*, XXV, 67-86.
- Hernández-Pacheco, F. (1949). "La tectónica peninsular y su relación con las aguas mineromedicinales". Discurso de entrada en la Real Academia de Farmacia. 126 pp. Madrid.
- Hernández-Pacheco, F. (1954). "Estudio hidrogeológico de las Termas de Alhama de Aragón (Zaragoza)". *Ann. R. Ac. Farmacia*, XX (4), 309-336. Madrid.
- Herráez, M.I. (1983). "*Análisis de las variaciones de los isótopos ambientales estables en el sistema acuífero detrítico terciario de Madrid*". Tesis Doctoral. 439 pp. Fac. de Ciencias. Univ. Autónoma. MADRID.
- Herráez, M.I.; Plata, A. y Baonza, E. (1983). "Composición y variación isotópica de las precipitaciones de Madrid". III Simposio Nacional de Hidrogeología. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VIII, 205-214. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1953). "Mapa geológico nacional a escala 1:50.000. Hoja n_ 892 (Fortuna)". Memoria 93 pp. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (19XX). "Mapa geológico nacional a escala 1:50.000. Hoja n_ 56 (Cabrería-Cabrales)". Memoria XX pp. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1972). "Mapa geológico nacional a escala 1:50.000. Hoja n_ 301 (Lovios)". Memoria XX pp. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1985-a). "*Estudio de las manifestaciones termales de Extremadura-Salamanca-Aragón y Rioja orientadas a su posible explotación como recurso geotérmico*". Informe interno número 747. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1985-b). "Calidad química de las aguas subterráneas en España. Informe de síntesis". 3 tomos. MADRID.
- Instituto Tecnológico Geominero de España (1989). "El agua subterránea en Soria. Mapa hidrogeológico a escala 1:200.000". Memoria 20 pp. Madrid.
- Instituto Tecnológico Geominero de España (1992). "*Las aguas mineromedi-*

- cinales, minero- industriales, termales y de bebida envasadas en la Comunidad Autónoma de Aragón. Avance del Proyecto a 31/12/1992. Referencias y Sinopsis bibliográficas*". Informe interno. Madrid.
- Junta de Castilla y León. Consejería de Agricultura (1989). "*Estudio Geofísico mediante los métodos Gravimétrico y Electromagnético en el Dominio de Tiempo en la Comarca del Campo de Gómara*". Informe interno.
- Junta de Castilla y León. Consejería de Agricultura (1991). "*Estudio Hidrogeológico y estructural en la Comarca del Campo de Gómara*". Informe interno.
- Lendínez, A. y Ruiz, V. (1991). "Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 408 (Torrijo de la Cañada)". Memoria 90 pp. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Lendínez, A. y Martín, D. (1991). "Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 436 (Alhama de Aragón)". Memoria 90XX pp. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Lopes Paradela, P.; Martins Nunes, A. y Calado, C.M.A. (1982). "Estancias Termals". *III Semana de Hidrogeología*, Guía de excursiones, pp. T1-T77. Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias. Lisboa.
- López Azcona, J.M. (1983). "Balneario de Alhama de Aragón. Consideraciones sobre el grupo de manantiales de aguas mineromedicinales de Alhama de Aragón". *Ann. R. Ac. Farmacia*, 47 (2), 335-358. Madrid.
- Lloyd, J.W. & Heathcote, J.A. (1985). "Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater". Oxford University Press, 296 pp.
- Navarro, D. (1991-a). "Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 380 (Borobia)". Memoria 96 pp. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Navarro, D. (1991-b). "Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 350 (Soria)". Memoria 70 pp. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Plata, A. (1972). "Isótopos en Hidrología". Editorial Alhambra, 328 pp. Madrid.
- Plata, A. (1994-a). "*Concentraciones de tritio en las precipitaciones del globo a partir del año 1953: características generales y modelos de distribución*". Apuntes del Curso de Hidrología Isotópica, pp. 57-71. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas-Universidad Autónoma. Madrid.

- Plata, A. (1994-b). "Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. 139 pp. Madrid.
- Rey, D. y Ramos, A. (1991). "Estratigrafía y Sedimentología del Pérmico y Triásico del Sector Deza-Castejón (Soria)". *Rev. Soc. Geol. España*, 4, 1-2.
- Sánchez, J. (1992). "Guía de establecimientos balnearios de España". Ediciones del M.O.P.T., 357 pp. Madrid.
- Sánchez Navarro, J.A.; San Román, J.; de Miguel, J.L.; Pérez A. y 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.
- Sanz, E. (1987). "El karst del sur y oeste del Moncayo". *Bol.Inf.Est.*, 47, 159 pp. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.
- Sanz, E. (1996) in press: Application et Simplification du modèle SIMERO a la source de Vozmediano (Espagne). *Hidrological Sciences Journal*.
- Schuster, E.T. & White, W.B. (1971). "Seasonal fluctuaciones in chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers". *Journal of Hydrology*, 14, 93-128.
- Servicio Geológico de Obras Públicas (1990). "*Estudio hidrogeológico de la provincia de Soria*". Informe interno, Madrid.
- Servicio Geológico de Obras Públicas-Diputación Foral de Navarra. "Las aguas subterráneas en Navarra. Proyecto Hidrogeológico". 229 pp. Burlada (Navarra).
- Tena, J.M.; Auqué, F.; Gimeno, J. y Mandado, J. (1991). "Aplicabilidad de geotermómetros químicos clásicos a sistemas de baja entalpia. El ejemplo del sistema Alhama-Jaraba (Zaragoza)." *IV Congreso de Geoquímica*, 247-252 pp. Soria.
- Verry, E.S. (1983). "Precipitation chemistry at the Marcell Experimental Forest in North Central Minnesota". *Water Resour. Res.*, 19 (2), 454-462.
- Yepes, J. (1990). "*Síntesis hidrogeológica general de las aguas minerales de España*". Tesis de Licenciatura. Memoria 161 pp. Facultad de Geología. Universidad Complutense. Madrid.
- Yurtsever, Y. & Gat, J.R. (1981). "Atmospheric waters". In: Gat, J.R. & Gofiantini R. (Editors), "Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle". I.A.E.A., pp. 203-213XX. Vienna.

12. INTRODUCCION A LOS MANANTIALES TERMALES Y MINEROMEDICINALES DE LA PROVINCIA DE SORIA

PRIMERA PARTE: ORIGEN Y PROPIEDADES TERAPÉUTICAS DE LOS MANANTIALES MINEROMEDICINALES Y TERMALES DE LA PROVINCIA DE SORIA.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el presente trabajo se exponen las principales características de los manantiales termales y mineromedicinales existentes en la provincia de Soria. En particular se estudia el origen y propiedades terapéuticas de las aguas sulfuradas y ferruginosas.

La provincia de Soria apenas tiene tradición balneoterapia pues realmente no ha contado con establecimientos médicos propiamente dichos. En las épocas de mayor auge de los balnearios (finales del siglo pasado y principios del actual), a lo más que se llegó fue al acondicionamiento de algunos manantiales sulfhídricos. Este tipo concreto de aguas medicinales eran casi las únicas que se aprovecharon para fines terapéuticos, principalmente para infecciones cutáneas y trastornos intestinales.

Sin embargo, dentro de los afloramientos de los materiales de la facies Purbeck-Weald de Soria, son relativamente abundantes los manantiales y captaciones de aguas subterráneas mineromedicinales. Principalmente se trata de aguas de naturaleza sulfhídrica o ferruginosa, de bajos caudales, y cuya génesis parece guardar una notable relación con el tipo de sustrato litológico sobre el que brotan, tal como se muestra en el presente trabajo.

12.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la localización e inventario de puntos de agua de estas características se recurrió a tres fuentes de información:

(1) Una recopilación bibliográfica exhaustiva de los trabajos geológicos previos, desde los primeros estudios realizados en el siglo

(*) Eugenio Sanz Pérez, Javier González Yélamos y Jesús Sanz Pérez

pasado por la Comisión del Mapa Geológico de España como los trabajos de Aranzazu (1877) o Palacios (1890). Junto con la labor de inventario, esta recopilación aportó el conocimiento del medio geológico, básico para poder establecer el origen de estos peculiares puntos de agua.

(2) Una encuesta a todos los ayuntamientos y farmacéuticos de la provincia de Soria, solicitando de forma sencilla y escueta información sobre la existencia de aguas termales o mineromedicinales. Es de señalar la alta participación de las autoridades municipales y sanitarias, ya que contestaron más del 90%, aunque muchas de las respuestas fueron negativas.

(3) Con la información recopilada en las dos fases, se realizó una campaña de campo, en la que a la vez que se fueron cogiendo muestras de agua para ulterior análisis, se localizaron nuevos manantiales no recogidos en las dos vías anteriores, y se desecharon otros que carecían de interés.

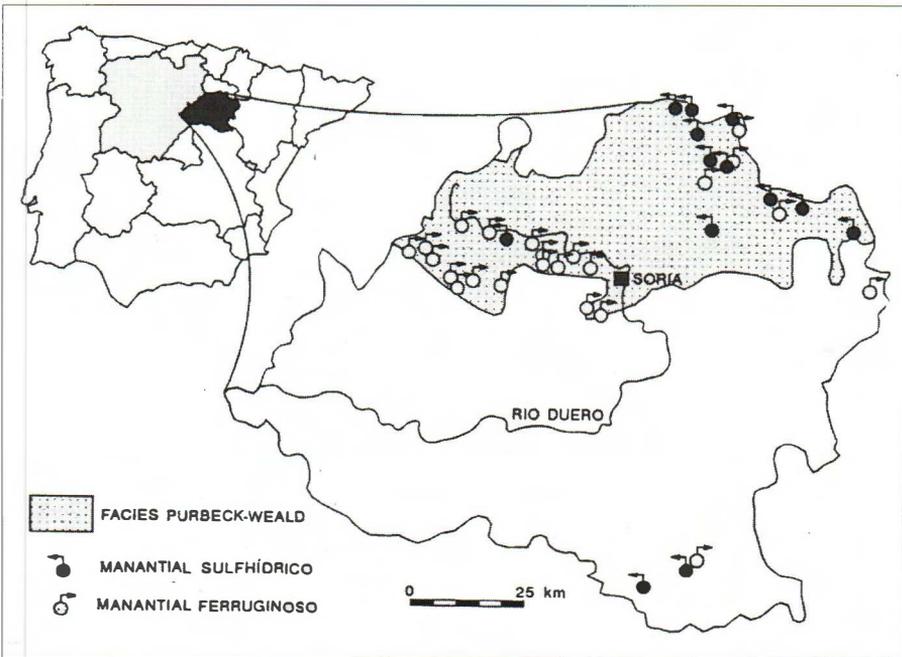


Fig. 12.1.—Situación geográfica de los manantiales sulfhídricos y ferruginosos en Soria.

Dentro del conjunto de las aguas minerales, termales y mine-romedicinales de Soria, las que tienen mayor entidad son las de naturaleza sulfhídrica, seguidas de las ferruginosas. Aunque estas últimas son más numerosas (véase la figura 12.1), sin embargo, frecuentemente se trata de pequeños rezumes que no pueden ser muestreados o bien de pozos fuera de servicio, precisamente por su alto contenido en hierro. Las aguas termales en Soria se restringen a las surgencias relacionadas con la importante fractura que origina las Termas de Alhama de Aragón, y a la zona de Fuencaiente del Burgo.

Por estos motivos, en este trabajo nos hemos centrado en las aguas sulfhídricas, y en menor medida en las ferruginosas.

12.1.2. LOS MANANTIALES MINEROMEDICINALES

12.1.2.1. ORIGEN DE LOS MANANTIALES SULFHÍDRICOS Y FERRUGINOSOS

GEOLOGÍA

Características generales de la facies Purbeck-Weald

La facies Purbeck-Weald se extiende desde el norte de las provincias de Soria y Burgos hasta el sur de la de Logroño. Su estudio fue iniciado por Palacios y Sánchez Lozano (1885) y seguido por Sáenz (1933,1948) quien definió cinco grupos sedimentarios. Más tarde Beuther et al. (1965) distinguieron también cinco conjuntos que, aunque no coinciden exactamente con los de Sáenz, conservan un paralelismo litológico.

Estos grupos se denominan, de techo a muro: Oliván, Enciso, Urbión, Oncala y Tera. El grupo Oliván está constituido exclusivamente por materiales detríticos. El grupo Enciso está formado por materiales detríticos con calizas y margas interestratificadas. El grupo Urbión está formado por alternancias pelítico-samíticas, con un conjunto detrítico grosero en la base. El grupo Oncala está constituido por carbonatos que pasan lateralmente a facies detríticas y, finalmente, el grupo Tera que es de naturaleza eminentemente detrítica.

La facies Purbeck-Weald de la región de estudio

En la figura 12.2 se hace un intento de síntesis estratigráfica de aquellos niveles del Purbeck-Weald relacionados con los manan-

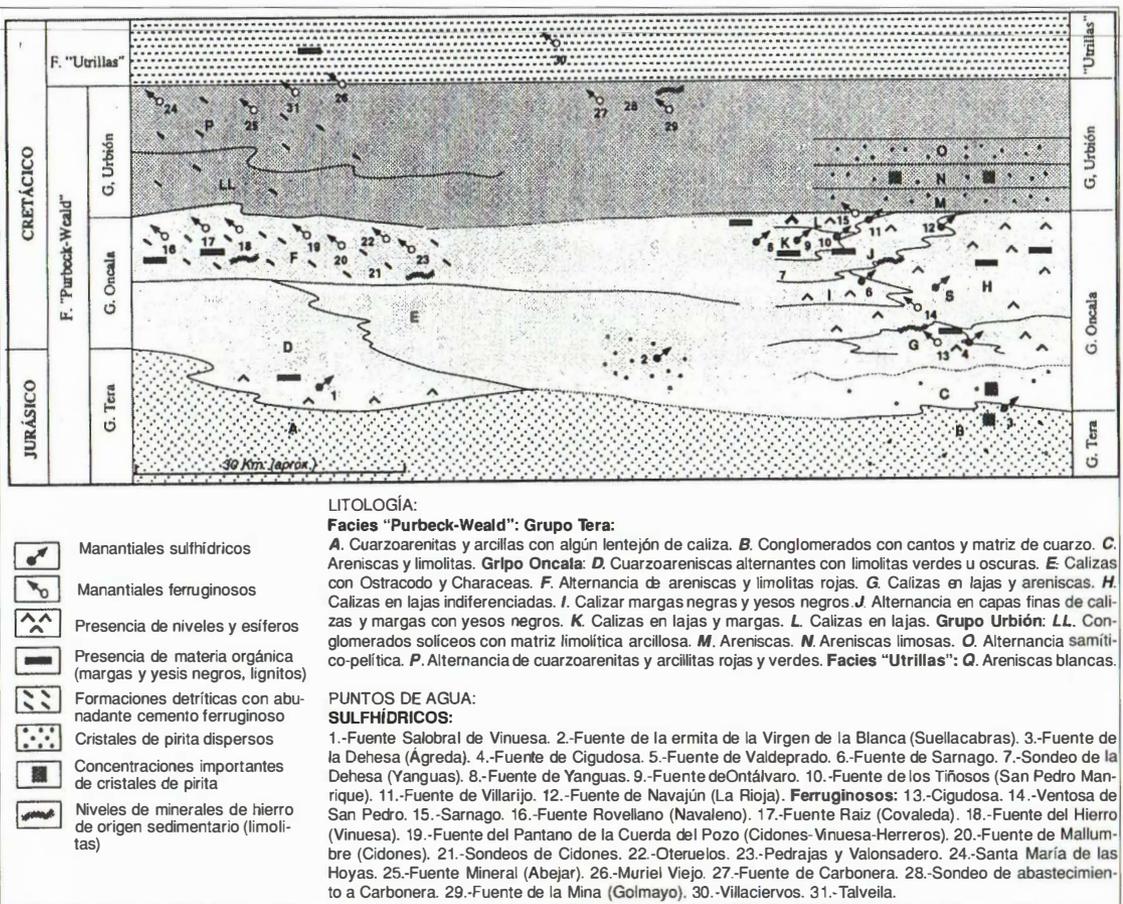


Fig. 12.2.—Síntesis estratigráfica de las facies Purbeck-Weald de la provincia de Soria y su relación con los manantiales sulfidricos y ferruginosos.

tiales sulfhídricos y ferruginosos, en base a la cartografía geológica MAGNA que cubre la región de estudio. Este esquema estratigráfico se extiende de oeste a este y es representativo del tercio norte de la provincia, en una longitud de unos 100 Km. En él se muestran, además de los niveles litológicos importantes, una serie de caracteres geológicos que parecen estar íntimamente relacionados con el origen de las aguas ferruginosas y sulfhídricas. Así, se han indicado aquellas formaciones de areniscas con especial abundancia de cemento ferruginoso, aquellas otras que presentan niveles delgados de yesos y margas negras intercalados, que nos delatan la presencia de materia orgánica. Se han señalado asimismo, las capas que contienen abundancia de cristales de pirita de forma dispersa, y aquéllas donde estos se concentran de forma especial. Por último, hemos de hacer notar la existencia de pequeños yacimientos de hidróxidos de hierro y de lignitos, que de forma esporádica también aparecen en esta facies.

La facies Purbeck-Weald aparece representada en nuestra zona de estudio por lo grupos Tera, Oncala y Urbión, aunque el grupo Oncala es el que se hace más ostensible, llegando a adquirir un espesor variable entre 200 y 2000 m. Por lo general, las estructuras de esta facies suelen resolverse en geometrías sencillas, de suaves y amplios pliegues o en series monoclinales con valores bajos de buzamiento.

Es una característica general en los grupos Tera y Oncala la de presentar un cambio lateral de facies de este a oeste, de tal manera que las secuencias situadas hacia oriente son más detríticas, y hacia occidente mucho más calcáreas. Los niveles de areniscas del grupo Oncala y Urbión van perdiendo porosidad hacia el este, a medida que va disminuyendo el contenido en cemento ferruginoso, lo que se hace ostensible al este del meridiano de Soria, donde las areniscas suelen ser más compactas y con cemento más silíceo. En la comarca de Pinares, sin embargo, es muy general la alternancia de areniscas arcósicas y limonitas rojizas, que dan lugar a un relieve en cuestas característico de la zona. En esta misma comarca es frecuente la presencia de troncos fósiles ferruginosos que se extienden hacia la provincia de Burgos (zona de Castrillo de la Reina), así como una relativa abundancia de lignitos en el sector de San Leonardo de Yagüe-Navaleno. A veces aparecen yacimientos de "hierro pobre" generalmente limolítico, de origen sedimentario o debido a segrega-

ción y migración hacia ciertos niveles más porosos de la roca del cemento ferruginoso. Estos yacimientos aparecen de forma dispersa en la comarca de Pinares y campiña de Cidones y fuero motivo de antiguas denuncias de explotación.

Son bastantes los manantiales con más o menos contenido en hierro asociados a los materiales detríticos de la facies Purbeck-Weald, sobre todo a los grupos Oncala y Urbión. Posiblemente el hierro de estos manantiales tiene diversos orígenes. En el Purbeck-Weald tiene una especial importancia el alto contenido en cemento ferruginoso de las series areniscosas. La migración de este elemento hacia el exterior forma costras ferruginosas en las paredes de los afloramientos de areniscas, en tafonis, diaclasas e incluso en los sillares utilizados en los monumentos románicos de Soria. También es muy frecuente su presencia en los planos de estratificación así como en los planos de las laminaciones cruzadas.

En algún caso concreto es posible que los manantiales ferruginosos estén relacionados con yacimientos de óxidos e hidróxidos de hierro o de piritas (figura 12.2).

El yeso en la facies weáldica se presenta en pequeños niveles, intercalado generalmente entre margas negras o de color oscuro de unos 40 a 60 m. de espesor, siendo el mismo yeso frecuentemente de esos colores, lo que indica una relación con medio reductores.

Los yesos se hacen más abundantes hacia el este, quedando relegados en la parte más occidental a la base del grupo Oncala (región de Vinuesa). Se concentran en niveles determinados y en áreas concretas pues hay numerosos cambios laterales de facies. En la superficie los afloramientos de yesos supuran rezumes blancos de sulfatos y disulfuros. A veces, relacionado con los niveles yesíferos se ha podido detectar la presencia de azufre nativo que rellena las grietas (Palacios y Sánchez Lozano, 1885) como ocurre, por ejemplo, en la localidad de La Cuesta. En los niveles más areniscosos de la zona oriental (que dentro del grupo Oncala son minoría con respecto a los calcáreos) hay a veces pequeños yacimientos de hidróxidos de hierro, como ocurre en la población de Las Fuestas. También hay presencia de galena y otros minerales de plomo y cobre asociados a filones de cuarzo o rellenando los paleokarst de la base del Kimmeridgiense (Mina de los Templarios en Valdejeña y de Loma-Charra en Ólvega).

La presencia de cristales de pirita es una regla general en la zona este. Ésta se presenta en forma de cubos y dodecaedros, en muchas ocasiones limonitizada. La pirita se distribuye de manera dispersa aunque no hay duda de que se asocia a ciertos niveles más que a otros, y dentro de éstos se presenta en áreas más localizadas. Así, es frecuente que se presente en calizas y margas, aunque suelen ser más abundante en éstas últimas. La presencia de pirita no sólo afecta a la facies Purbeck-Weald, si no también a las margas y calizas del Jurásico marino, sobre todo al norte del paralelo de Fuentes de Ágreda. La pirita está completamente ausente dentro del grupo de niveles de margas y calizas en las zonas donde se ubican la mayoría de los manantiales sulfhídricos.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

Para el estudio de las especies químicas presentes en los manantiales de la zona de estudio, contamos con 24 análisis químicos, que corresponden a 21 puntos de agua distintos. La mayoría de los análisis corresponden a manantiales sulfhídricos y ferruginosos, pero también se han cogido muestras en manantiales que no tienen ni H_2S ni Fe , a fin de poder contrastar la composición química de iones mayoritarios entre éstos y los que tienen carácter sulfhídrico o ferruginoso. Del total de 24 análisis, 17 corresponden a puntos de agua visitados y muestreados personalmente por los autores, mientras que los 7 análisis restantes han sido tomados de trabajos previos.

Durante los trabajos de campo, aparte de la toma de muestras, se midió “in situ” la temperatura, el pH, la conductividad y el caudal. Estos parámetros se recogen en la tabla 12.1, junto con el error en el balance de equivalentes de cationes-aniones.

La mayoría de los análisis presentan errores muy por debajo del 10% salvo los análisis números 2 y 3, con 24.8 y 18.9 % respectivamente. Sin embargo, hay que tener presente que se trata de aguas de muy baja mineralización (tan solo 24 y 49 $\mu S/cm$) para las cuales se pueden permitir errores de tal magnitud.

La tabla 12.2 recoge las concentraciones de los distintos iones

mayoritarios. En ella, el contenido de F_e es el total, medido en laboratorio y sin que a las muestras se le aplicara ningún tratamiento de conservación, de forma que el valor registrado debe considerarse como una medida más bien cualitativa. En cambio, el valor de ion sulfhídrico es una medida realizada en campo por un método colorimétrico. El valor de la columna de HS^- en la tabla 12.2 recoge el total de especies de azufre reducido (expresadas como HS^-); dado que en casi todos los manantiales sulfhídricos el pH está cerca de 7, agrosso modo se puede indicar que del valor recogido en la tabla 12.2, el 50 % corresponde realmente a la fase disuelta HS^- , y la otra mitad consiste en la forma gaseosa hidrosoluble H_2S , responsable del característico olor de las aguas sulfhídricas. El contenido en S^{2-} de los manantiales estudiados debe ser prácticamente nulo, ya que esta especie tan solo aparece de forma significativa con valores de pH básicos (por encima de 11), mientras que el más alcalino de los manantiales sulfhídricos estudiados presenta un pH de 8.1.

LOS MANANTIALES SULFHÍDRICOS Y FERRUGINOSOS DEL GRUPO ONCALA

Características generales

De los cinco grupos en que tradicionalmente se divide la facies Purbeck-Weald, el grupo Oncala es en el que brotan la casi totalidad de los manantiales sulfhídricos de Soria, y en menor proporción, los ferruginosos, tal como se mostraba en la figura 12.2.

El cambio lateral de facies de esa figura (sedimentos terrígenos hacia el oeste y de naturaleza química hacia el este) tiene un claro reflejo en la calidad química de las escasas aguas subterráneas que discurren por el grupo Oncala. El gráfico conductividad/pH de la figura 12.3 muestra como los manantiales situados sobre materiales terrígenos presentan unas salinidades muy bajas (menos de 50 $\mu S/cm$ de conductividad) junto con un pH ácido (menor de 5), dando la impresión de que se trata casi de aguas de lluvia que únicamente han sufrido procesos de concentración de sales por evaporación, y quizás una incipiente hidrólisis de silicatos. En cambio, los manantiales sulfhídricos y ferruginosos ubicados sobre los sedimentos de naturaleza

química (carbonatos y yesos) tienen una más elevada salinidad (conductividades entre cientos y miles de $\mu\text{S}/\text{cm}$) junto con un pH cercano al neutro.

La distribución porcentual entre los iones mayoritarios de estos manantiales queda reflejada en el diagrama de Piper-Hill-Langèlier de la figura 12.4. En ésta, los análisis desde el número 2 al 5 corresponden a manantiales sobre sedimentos terrígenos, estando los restantes sobre sedimentos de naturaleza química. Con relación a los cationes, en todos los manantiales el contenido porcentual es bastante similar, siendo el calcio el ion mayoritario. La única excepción la constituye el análisis número 7, la Fuente del Salobral que, coherentemente con su topónimo, tiene al sodio como catión mayoritario. (Fotos 39 y 40).

Mayores diferencias aparecen en el contenido en aniones. Las aguas sulfhídricas tienen una clara tendencia a ser sulfatadas, mientras que las ferruginosas (especialmente las que se ubican sobre los sedimentos terrígenos del grupo Oncala), son de naturaleza bicarbonatada. Nuevamente la fuente del Salobral se desmarca del resto de los manantiales, con un porcentaje de cloruros cercano al 30%, mientras que en ninguno de los restantes manantiales sulfhídricos se supera el 10 % de ion Cl^- .

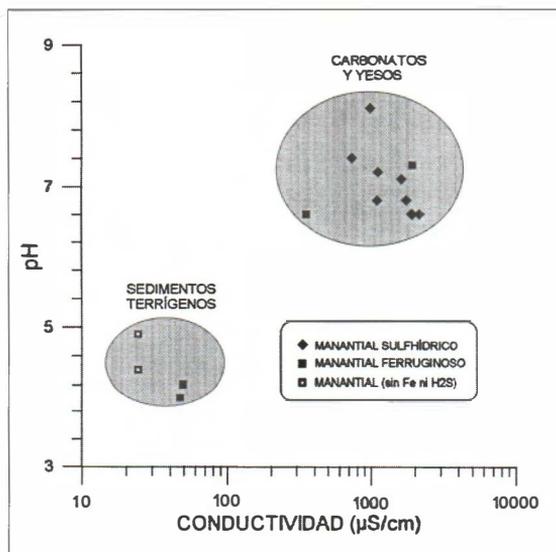


Fig. 12.3.—Diagrama de pH frente a conductividad para los manantiales del grupo Oncala.

Dentro de los manantiales sulfhídricos y exceptuando el de El Salobral, el nº 15 (Fuente de Suellacabras) (Fotos 49 y 50) es el que más se aleja de la tónica general de aguas sulfatadas, siendo sus aguas de facies bicarbonatada clara. Posiblemente las aguas actuales de este manantial no sean representativas de la composición química de fuentes sulfhídricas por los siguientes motivos:

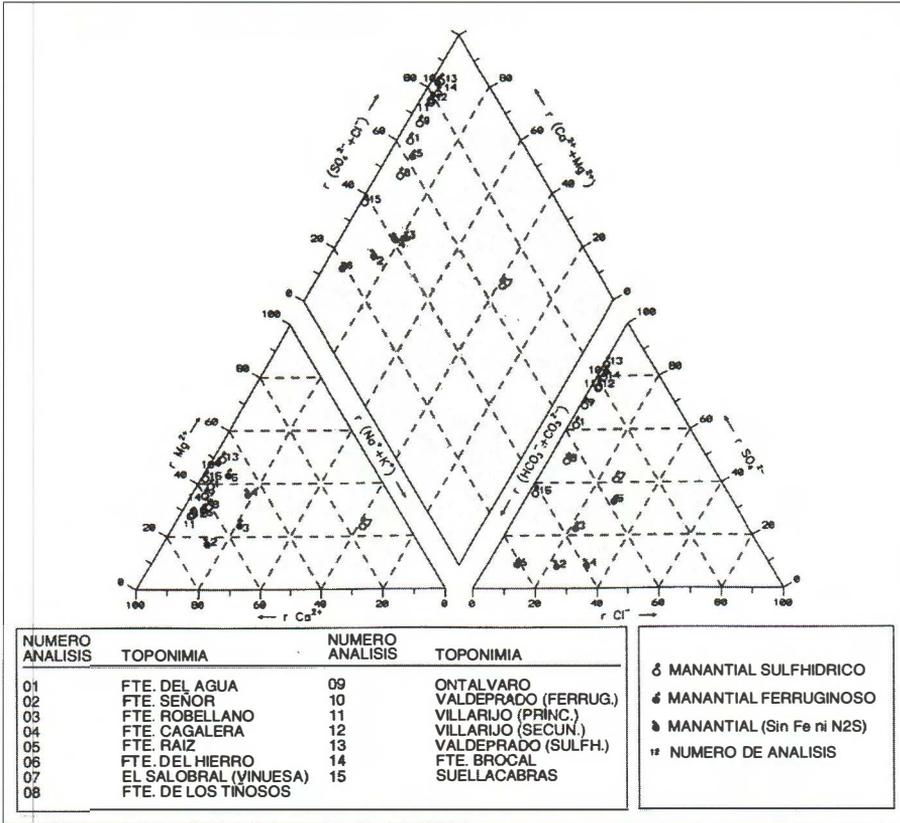


Fig. 12.4.—Diagrama de Piper-Hill-Langèlier para los manantiales del grupo Oncala.

(1) Actualmente no presenta carácter sulfhídrico, aunque en épocas anteriores si que desprendía gas H_2S , tal como se indica en los trabajos de Madoz (1845-50) y Palacios (1890).

(2) Presenta indicios de contaminación, con un contenido en nitratos de 86 ppm mientras que ninguno de los demás manantiales sulfhídricos se supera los 5 ppm de NO_3^- . La causa más probable del elevado contenido en nitrógeno puede ser el empleo de abonos en los campos de labor sitios justo donde brota el manantial.

(3) Es probable que sus escasas aguas se mezclen con las provenientes del acuífero calcáreo (por tanto aguas bicarbonatadas) que dan lugar al nacimiento del río Alhama, el cual brota a unos 300 m de la surgencia de Suellacabras.

Los manantiales del sector de Yanguas-San Pedro Manrique

La mayor concentración de manantiales sulfhídricos aparece al noreste de la provincia de Soria, siguiendo una directriz NW-SE entre las localidades de Yanguas y San Pedro Manrique. En este sector, y siempre en las laderas meridionales, se encuentran las fuentes sulfhídricas del Agua (Yanguas) (Foto 45), la Fuente de Ontalvaro (Fotos 43 y 44), la Fuente de los Tiñosos (San Pedro Manrique) (Foto 46), la Fuente Podrida de Ampudia (actualmente desaparecida) más un sondeo geotécnico (inicialmente surgente) dentro de la Dehesa de Yanguas.

En general, el conjunto de materiales wealdenses de este sector, pueden considerarse como impermeables en la práctica, pues se trata de margas, calizas compactas con poco desarrollo de la karstificación, y areniscas muy cementadas; además, los tramos calcáreos más karstificados presentan numerosas intercalaciones margosas. Los manantiales son de pequeño caudal y los cursos fluviales tienen un régimen hidrológico muy variable, debido a la impermeabilidad de sus cuencas de drenaje y a lo acusado de las pendientes; por ejemplo, el río Linares, en la estación de aforos de San Pedro Manrique, presenta una aportación media de 28 hm³/año, con 63 hm³ en el año más húmedo, y bajando a 3 hm³ en el más seco (cfr ITGE, 1989).

La naturaleza litológica condiciona el que la circulación de las aguas subterráneas se realice sobre todo a través de fracturas y discontinuidades. Una prueba de ello se observa en la importante fractura de unos 30 km de longitud que se prolonga entre las localidades de Sta. Cruz de Yanguas y Los Campos, la cual, parece motivar la existencia de varios manantiales que se utilizan para abastecimiento en las nueve localidades que se alienan a lo largo de la falla (Cfr.IGME, 1981-A). Por otra parte, en un sondeo de reconocimiento que realizó el SGOP (1990) se pudo comprobar la existencia de agua confinada que provenía exclusivamente de un par de fracturas.

El hecho de que esos cinco puntos de agua sulfhídricos broten siempre en las laderas meridionales tiene un motivo geológico, el cual se muestra en el esquema de la figura 12.5, que también sirve para mostrar el probable origen del sulfhídrico presente en estas surgencias.

En el sector Yanguas-San Pedro Manrique los sedimentos del grupo Oncala se encuentran plegados y buzando a contrapendiente

(Fig. 12.5). Dentro de los materiales del grupo Oncala podemos considerar dos conjuntos litológicos:

(1) Una unidad superior, de naturaleza carbonatada, constituida principalmente por calizas en lajas y margas.

(2) Una unidad inferior, que aunque fundamentalmente son carbonatos, presenta niveles de terrígenos, sobre todo areniscas.

Por encima de la unidad superior afloran los materiales detríticos del grupo Urbión. Pero especialmente hay que hacer notar la existencia de un nivel de calizas con margas negras (presencia de materia orgánica) y yesos (también en ocasiones negros) justo en el contacto entre las dos unidades que hemos diferenciado. Este nivel de margas y yesos es continuo desde Yanguas hasta San Pedro Manrique, aunque con variaciones de potencia (cfr. IGME, 1981-A).

Dada la disposición litológica descrita, es coherente suponer el siguiente modelo hidrogeológico conceptual para el origen de los

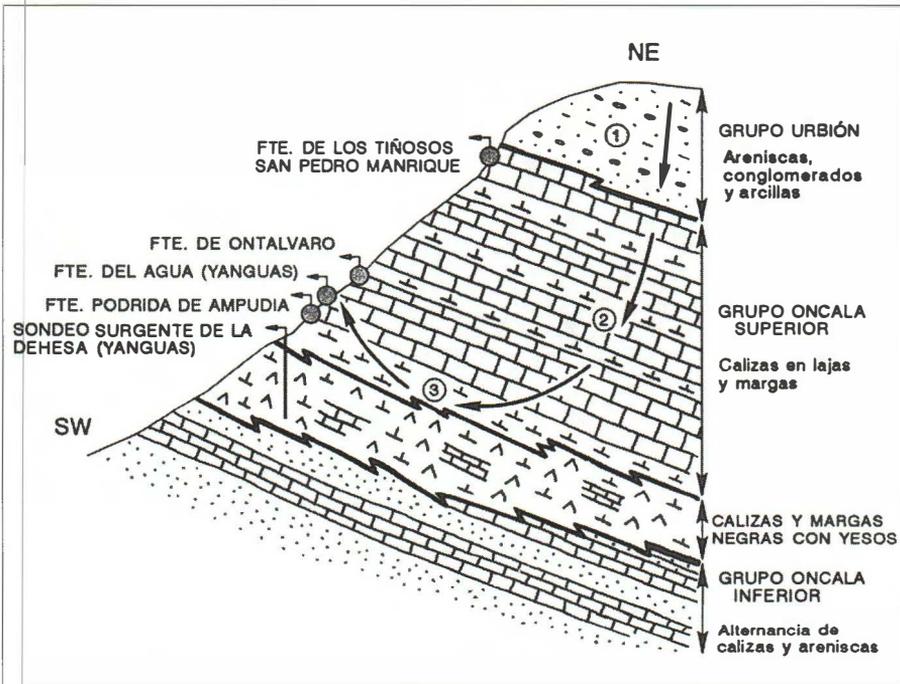


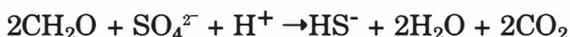
Fig. 12.5.—Esquema conceptual hidrogeológico para los manantiales sulfhídricos del grupo Oncala en el sector de Yanguas-San Pedro Manrique.

cinco puntos de aguas de naturaleza sulfhídrica que aparecen en el sector Yanguas-San Pedro Manrique:

(1) Infiltración de las precipitaciones a través de los afloramientos de la unidad superior del grupo Oncala, o bien sobre los materiales del grupo Urbión.

(2) Circulación de las aguas subterráneas a través de las fracturas y discontinuidades del grupo Urbión y de la unidad superior del grupo Oncala. Dada la baja solubilidad de los materiales silicatados que componen el Grupo Urbión, cabe esperar que la composición de sus aguas subterráneas sea análoga a la de los manantiales que brotan en el sector occidental del grupo Oncala: aguas de bajo contenido en sales disueltas, facies bicarbonatada cálcica y pH ácido. En cambio, al atravesar los materiales más solubles de la unidad superior del grupo Oncala, incrementarán su salinidad (muy posiblemente por disolución de carbonatos) e incrementarán su pH, aunque mantendrán el carácter bicarbonatado-cálcico.

(3) Las aguas subterráneas se ponen en contacto con el nivel de margas y yesos con materia orgánica. Por un lado incrementarán su salinidad por disolución de los yesos, adquiriendo el carácter sulfatado cálcico característico de estas surgencias sulfhídricas. Por otro lado, parte de los aniones de sulfato, podrán sufrir una reducción a ion sulfhídrico en presencia de la materia orgánica, proceso que se refleja en la reacción:



A su vez, el ion bisulfuro pasa al característico gas sulfhídrico mediante la reacción:



Aunque la reducción del sulfato puede incrementar el contenido en bicarbonatos así como el pH de los manantiales, es muy posible que este sea un proceso menor, dadas las bajas concentraciones (menos de 5 ppm) de especies reducidas de azufre presentes en los manantiales. Por otro lado, al ponerse en contacto las aguas bicarbonatadas cálcicas de la unidad superior del grupo Oncala con el nivel de margas y yesos de su base, es muy probable el que se de una sobresaturación en calcita u otros minerales carbonatados.

De la observación de la figura 12.5 parece poco probable que la Fuente de los Tiñosos sea un punto de descarga de aguas sulfhí-

dricas. Ésto es debido a que en tal figura aparecen representadas las surgencias no por su cota absoluta, sino por su mayor o menor proximidad al techo del nivel de margas y yesos, y al muro del grupo Urbión. En realidad, la Fuente de los Tiñosos no se encuentra en una zona elevada, a media ladera, sino en un área de descarga, a pocos metros de un afluente del río Linares.

Restantes manantiales sulfhídricos del grupo Oncala

El mismo tipo de modelo hidrogeoquímico conceptual puede proponerse para las restantes surgencias sulfhídricas del sector oriental del grupo Oncala: la Fuente del Brocal, la Fuente de Valdeprado (Foto 47) y las dos surgencias de Villarijo (Foto 48).

Las dos primeras también brotan en el tramo del grupo Oncala compuesto por carbonatos con ausencia de terrígenos. Aunque en este caso no aparece un nivel de margas y yesos tan claro y continuo como el del sector de Yanguas-San Pedro Manrique, sí que aparecen niveles de yesos interestratificados entre las calizas, a la vez que hay una intercalación de calizas margosas algo bituminosas (cfr.IGME, 1981-B). Nuevamente, la combinación de yesos y materia orgánica parece ser el origen del contenido en especies reducidas de azufre de estos dos manantiales; su contenido en iones mayoritarios (véanse los análisis números 13 y 14 de la figura 12.4) es análoga a la de los manantiales sulfhídricos del sector Yanguas-San Pedro Manrique (análisis números 1, 8 y 9 de la misma figura).

Las dos surgencias de Villarijo se encuentran en el extremo más nororiental de Soria, en un sector ocupado principalmente por los materiales del grupo Urbión. Sin embargo la acción erosiva del Arroyo de Orcajuelo ha dado lugar a la aparición de un afloramiento de las calizas en lajas del techo del grupo Oncala, que es precisamente el área donde brotan estos manantiales sulfhídricos. Dada la escasez de afloramientos del grupo Oncala en el alfoz de Villarijo, posiblemente no se puedan apreciar en superficie si existen o no niveles con yesos y materia orgánica, pero nos inclinamos a suponer que estos deben encontrarse en profundidad y son el origen de estas aguas sulfhídricas. Al menos su composición química en iones mayoritarios es también análoga a la de las anteriores surgencias (análisis 11 y 12 de la figura 12.4).

El último manantial sulfhídrico que nace dentro del grupo Oncala es la Fuente del Salobral (Fotos 39 y 40), que se diferencia de los anteriores en los siguientes aspectos:

(1) Se encuentra en el sector occidental de la facies Purbeck-Weald, donde ésta tiende a ser más terrígena y menos carbonatada.

(2) Su composición química es sulfatada sódica con un alto contenido en cloruros, mientras que los anteriores son de facies sulfatada cálcica sin apenas Cl^- .

(3) En vez de ubicarse hacia el techo del grupo Oncala, se encuentra en la base.

No obstante, en el muro del grupo Oncala, y dentro del sector occidental, también aparecen niveles de yesos y margas de color oscuro, con presencia de materia orgánica (cfr. IGME, 1988), a los cuales posiblemente se asocie el origen de las aguas sulfhídricas de la Fuente del Salobral.

LA FUENTE SULFHÍDRICA DE ÁGREDA

La Fuente de Ágredda es, posiblemente, el manantial sulfhídrico más famoso de toda la provincia de Soria, al encontrarse situado en una de las más importantes localidades de la comarca.

Aunque recientemente la Diputación Provincial ha arregalado la Fuente de Ágredda (Fotos 41 y 42), cuando se realizó el muestreo esta surgencia había perdido su carácter sulfhídrico pues su arqueta se encontraba medio derruida, de manera que era fácil que estuviera contaminada. Ambas circunstancias ponen una cierta incertidumbre sobre si el análisis químico actual es realmente representativo de la calidad natural de este manantial. Por ello hemos recopilado un análisis químico realizado en el siglo pasado (Núñez y Sonier, 1885), con las técnicas gravimétricas de la época, y en el que el contenido en sales disueltas se expresaba en forma de óxidos. Transformados éstos a epm, el error en el balance de cationes-aniones resulta ser de un 4.4 % inferior al de alguno de los análisis tomados de la bibliografía, y en cambio realizados por técnicas analíticas más modernas.

La distribución de especies iónicas del análisis actual y el de 1885 se representa en el histograma de la figura 12.6. En ella puede observarse como las diferencias de composición no son notables:

ambas aguas son de facies bicarbonatada cálcica, con sulfato y magnesio como segundo cation y anion mayoritario. En el mismo histograma de la figura 12.6 se han incluido tres análisis químicos pertenecientes a otras tantas fechas, y que corresponden a la surgencia de los Ojos del Keiles.

Dicho manantial, con un caudal de varias decenas de l/s, constituye la descarga del denominado Acuífero de los Ojillos del Quiles, constituido por materiales carbonatados del Jurásico y siendo su base impermeable los sedimentos de la Facies Purbeck-Weald (cfr.SGOP, 1990). La surgencia de los Ojos del Keiles brota a corta distancia (unos cientos de metros) y sobre los mismos materiales que la antaño fuente sulfhídrica de Ágreda. La calidad química de éste manantial es análoga al de los Ojillos del Keiles, especialmente si se compara con el análisis de 1885: aguas bicarbonatadas o bicarbonatadas-sulfatadas, con el magnesio como segundo cation mayoritario. Considerando los cuatro iones mayoritarios, son incluso menores las diferencias entre el análisis de la Fuente de Ágreda de 1885 y el de los Ojos del Keiles del 2-10-81, que entre este y los otros dos análisis. Esto hace suponer que el origen de la antaño Fuente sulfhídrica de Ágreda guarda relación con el acuífero que forman los carbonatos

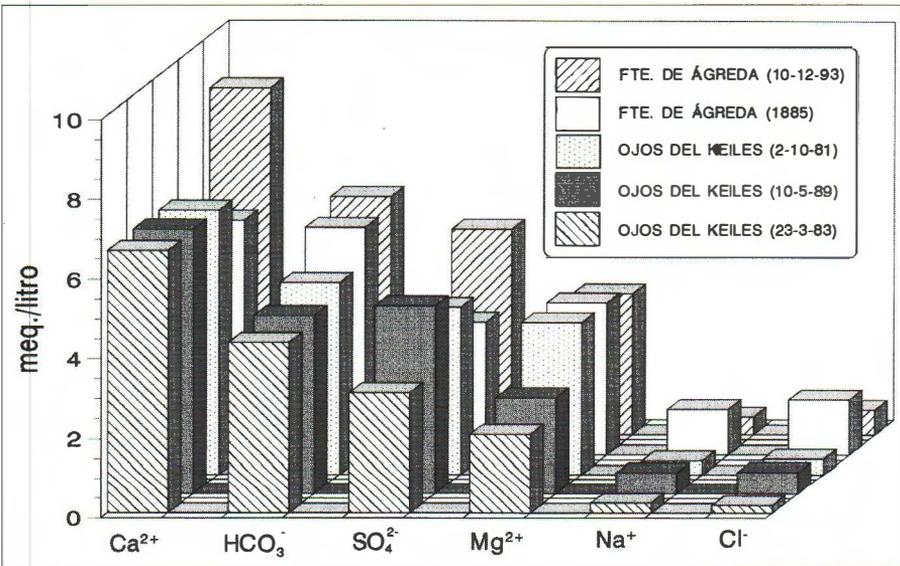


Fig. 12.6.—Distribución de especies disueltas en la Fuente de Ágreda y Ojos del Keiles.

marinos del Jurásico, dentro de los cuales son frecuente los cristales de pirita, que quizás, estuvieran asociados al origen del contenido en sulfhídrico que tuvo la Fuente de Ágreda.

LA FUENTE DE LOS BAÑOS (ESTERAS DE MEDINACELI)

Situada en el extremo suroriental de la provincia de Soria, la Fuente de los Baños (Foto 51) brota dentro de un entorno geológico totalmente distinto al de los manantiales comentados en las páginas anteriores: el Triásico de la Cordillera Ibérica. Sin embargo parece que los procesos que le dan su carácter sulfhídrico son análogos a los que originan los manantiales con HS^- del grupo Oncala.

El diagrama Schoeller-Berkalof de la figura 12.7 recoge el análisis químico de la Fuente de los Baños, junto con otras tres surgencias de la zona: la Fuente Salada, la Fuente de Ambrona y el nacimiento del río Jalón. La Fuente de los Baños presenta aguas de naturaleza sulfatada cálcica y salinidad media ($1533 \mu\text{S}/\text{cm}$) cercana a la de la Fuente Salada ($1133 \mu\text{S}/\text{cm}$), la cual, tal como su nombre indica, es de facies clorurada sódica. Ambos dos manantiales se asocian al acuífero que constituyen los niveles de carbonatos del Muchelkalk. En cambio, la Fuente de Ambrona y el Nacimiento del río Jalón son aguas muy similares, de menor salinidad ($343\text{-}370 \mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad) y marcando carácter bicarbonatado cálcico. En este caso son surgencias que nacen en el contacto entre los materiales impermeables de la facies Keuper y las calizas de la base del Jurásico. Éstas constituyen un acuífero más permeable y de mayor entidad que las dolomías de la facies Muchelkalk, tal como ponen de relieve los diferentes caudales: la Fuente de Ambrona y el nacimiento del río Jalón aportan decenas de l/s, mientras que la Fuente Salada y la de los Baños, no llegan a superar un l/s.

El probable origen de las aguas sulfhídricas de la Fuente de los Baños guarda una estrecha relación con la estructura geológica de la zona, la cual se muestra en el perfil de la figura 12.8, basado en la cartografía geológica MAGNA de la zona (IGME, 1981-C).

La facies Muchelkalk está plegada formando un anticlinal afectado por dos fallas, que elevan a las dolomías haciéndolas aflorar en superficie, de manera que el acuífero puede recargarse por infiltración directa de las precipitaciones. De las dos fallas representadas

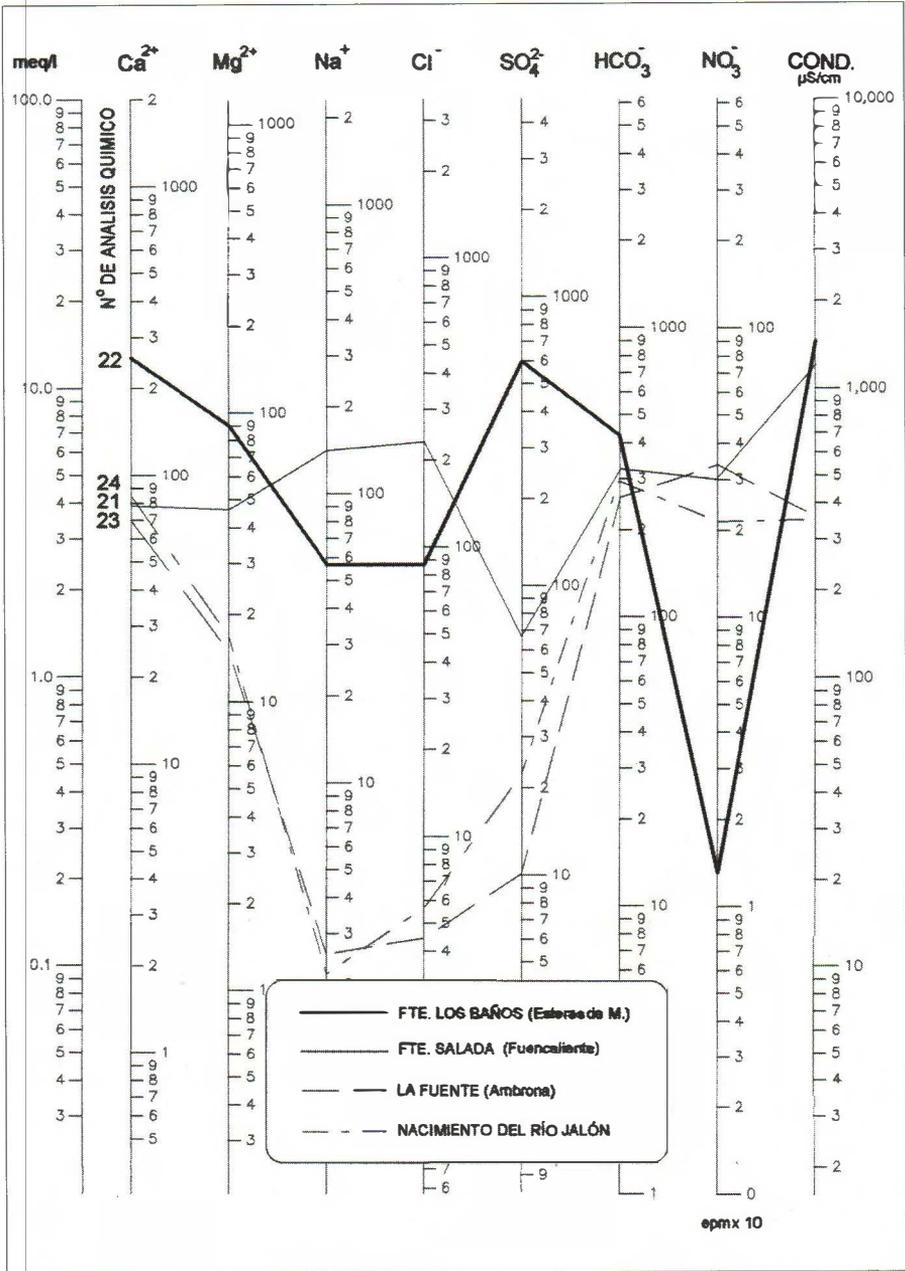


Fig. 12.7.—Diagrama de Schoeller-Berkalof para los manantiales de los alrededores de Esteras de Medinaceli.

en el perfil, la meridional es segura, mientras que la septentrional es tan solo probable, pero su existencia no se puede confirmar al estar el terreno recubierto por las terrazas del río Jalón. Los materiales de la facies Buntsandstein son impermeables en la práctica, constituyendo la base del acuífero carbonatado, mientras que a techo de éste aparecen las arcillas y sales de la facies Keuper, también impermeables.

Las aguas de precipitación que se infiltran sobre el afloramiento del Muschelkalk, tienden a desplazarse, principalmente hacia el NE, dado que este es el flanco mayor del piegue (véase la figura 12.8), hasta llegar a la probable falla septentrional, que al poner en contacto el Keuper con el Musch, haría el efecto de una barrera que impide el desplazamiento hacia el NE, a la vez que constituiría una vía de escape hacia la superficie atravesando los materiales del Keuper. De esta manera, la descarga de los materiales carbonatados del Muschelkalk se haría hacia la Fuente de los Baños, o bien directamente al cauce del río Jalón. En ambos casos, atravesando los materiales más o menos permeables que forman la terraza más baja de éste río.

Sobre el mismo perfil de la figura 12.8 aparece representada una surgencia en posición hidrogeológica análoga a la de la Fuente

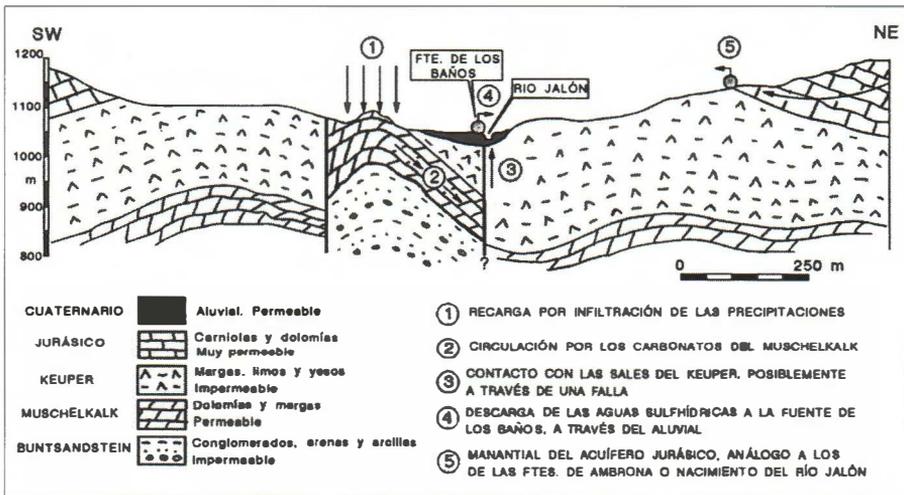


Fig. 12.8.—Perfil hidrogeológico mostrando el probable origen de la fuente sulfhídrica de los Baños (Esteras de Medinaceli).

de Ambrona o al Nacimiento del río Jalón. El acuífero (en este caso libre) lo constituyen las dolomías y carnioles muy permeables de la base del Jurásico, produciéndose la descarga en el contacto con los materiales impermeables de la facies Keuper.

Dentro de las facies Keuper de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica tradicionalmente se distinguen tres niveles litológicos (MARFIL, 1970):

(1) Inferior, de margas grises, verdes, rojas y violáceas con abundantes yesos en niveles bastantes gruesos y frecuentes; a veces con intercalaciones de materia orgánica.

(2) Medio, con margas grises, verdosas, algo calcáreas y a veces arenosas, con capas de caliza dolomítica y caliza arenosa muy escasas y discontinuas.

(3) Superior, de margas rojas y rojo-violáceas con yesos, aunque más escasos y dispersos que en el nivel inferior.

Volviendo al perfil de la figura 12.8, las aguas del acuífero de la Fuente de los Baños atravesarían precisamente el nivel litológico inferior del Keuper, donde son abundantes los yesos y suelen aparecer niveles de materia orgánica. Incluso dentro del Keuper del área de Medinaceli aparecen pequeños niveles de lignitos. Por tanto pueden darse los mismos procesos que en el caso de los manantiales sulfhídricos de la Facies Purbeck-Weald: disolución de yesos para aportar sulfatos, y reducción de éstos a sulfhídrico en presencia de materia orgánica.

DISCUSIÓN: INCOMPATIBILIDAD ENTRE LOS MANANTIALES SULFHÍDRICOS Y FERRUGINOSOS

Dentro del conjunto de manantiales de aguas ferruginosas y sulfhídricas estudiadas se aprecia una clara separación o dicotomía entre ambas clases de aguas, manifestada en estos dos hechos:

(1) Las aguas ferruginosas tienden a situarse en el sector occidental de las facies Purbeck-Weald, mientras que las sulfhídricas son predominantes en la mitad oriental (véase las figuras 12.1 y 12.2).

(2) En ninguno de los análisis de aguas sulfhídricas se detecta la presencia de hierro, y a la inversa, en ninguno de los manantiales ferruginosos muestreados aparece hidrógeno sulfurado.

El origen del contraste en posición geográfica aparece obvio: se debe a diferencias litológicas y mineralógicas entre los dos sectores. Los niveles de sedimentos terrígenos con cemento ferruginoso son más abundantes en el poniente. Los yesos y niveles de materia orgánica, responsable de la presencia de aguas sulfhídricas, son más frecuentes en el sector oriental.

Sin embargo, el factor litológico o mineralógico no explica por sí solo el que no se detecte F_e en los manantiales sulfhídricos, ni gas sulfhídrico en los ferruginosos. En varias ocasiones, ambos tipos de aguas aparecen sobre el mismo tipo de substrato incluso separadas tan solo unos pocos metros. Este hecho se ha podido observar en los siguientes casos:

(1) El manantial ferruginoso de Valdeprado (Foto 54) brota a unos 2 km del sulfhídrico del mismo nombre, y sobre los mismos materiales: las calizas en lajas de la (que hemos denominado) unidad superior del grupo Oncala. Además, la composición química en iones mayoritarios es idéntica en ambos manantiales (análisis número 10 y 13 de la figura 12.4).

(2) La Fuente del Hierro (Foto 53) y la sulfhídrica de El Salobral en Vinuesa, están separadas 1 km e igualmente nacen sobre el mismo tipo de litología. Además, a escasos metros de la arqueta de El Salobral aparecen pequeños rezumes (de tan bajo caudal que fueron imposibles de muestrear) pero con el característico color rojo de las aguas ferruginosas.

(3) Igualmente, a pocos metros de las fuentes sulfhídricas de Villarijo y la Fuente Brocal se observaron rezumes ferruginosos, y sin embargo no se detecta Fe en los análisis de las fuentes sulfhídricas, como en principio cabría esperar.

El origen de esta incompatibilidad entre aguas sulfhídricas y ferruginosas parece obedecer a un fundamento termodinámico. En el diagrama de estabilidad de la figura 12.9 puede apreciarse como para unos valores concretos de temperatura, presión y composición química, el campo de formación de piritita se superpone sobre el de predominio de las especies reducidas de azufre.

Aunque no disponemos de medidas de potencial redox, en base a los valores de pH de nuestros manantiales ferruginosos (entre 4.2 y 7.1) podemos estimar que estos se encuentran en el sector de la

figura 12.9 marcado con la letra F. Para el caso de las aguas sulfhídricas, dado que disponemos de valores de las concentraciones de las distintas especies de azufre presentes, es posible calcular el valor del potencial redox a través de la siguiente expresión (Drever, pp.286, 1988):

$$Eh = E^{\circ} + \frac{0.059}{n} \log \left(\frac{\text{actividad de las especies oxidadas}}{\text{actividad de las especies reducidas}} \right)$$

Siendo E° el potencial estandar y n el número de electrones envueltos en la siguiente reacción:



De esta forma la ecuación anterior queda como:

$$Eh = E^{\circ} + \frac{0.059}{8} \log \left(\frac{aSO_4^{2-} \cdot a^{10}H^{+}}{aH_2S \cdot a^4H_2O} \right)$$

A 25°C, E° toma el valor de +0.3 V (ibídem, 1988). En esta ecuación resulta evidente que las actividades de las especies de azufre tienen mucho menor peso que el pH, ya que la actividad de hidrogeniones se encuentra elevada a la décima potencia. Para simplificar, en vez de actividades consideraremos concentraciones, y en el caso del ácido sulfhídrico, supondremos que su valor es la mitad del total de especies reducidas analizadas en campo. El error introducido por estas simplificaciones no es relevante. Por ejemplo, en el caso del manantial de Valdeprado (el más salino de todos los sulfhídricos), si en vez de considerar las actividades se utiliza directamente la concentración de sulfatos, el valor final de potencial redox se modifica en 0.003 V; o bien, de considerar 2.5 ppm de SH₂ a utilizar 5 ppm, la variación del Eh calculado es de 0.002 V. En ambos casos, se trata de valores totalmente despreciables a la hora de representarse sobre el eje de abscisas de la figura 12.9.

Con los valores de Eh calculados, junto con los de pH, los nueve manantiales sulfhídricos aparecen representados en el sector de la figura 12.9 marcado con la letra S: muy próximos al límite del paso de predominio de especies oxidadas a reducidas, y dentro del campo de formación de la pirita.

Dada esta situación, si un agua ferruginosa (sector F) se desplaza hacia condiciones más reductoras, tiende a perder su conteni-

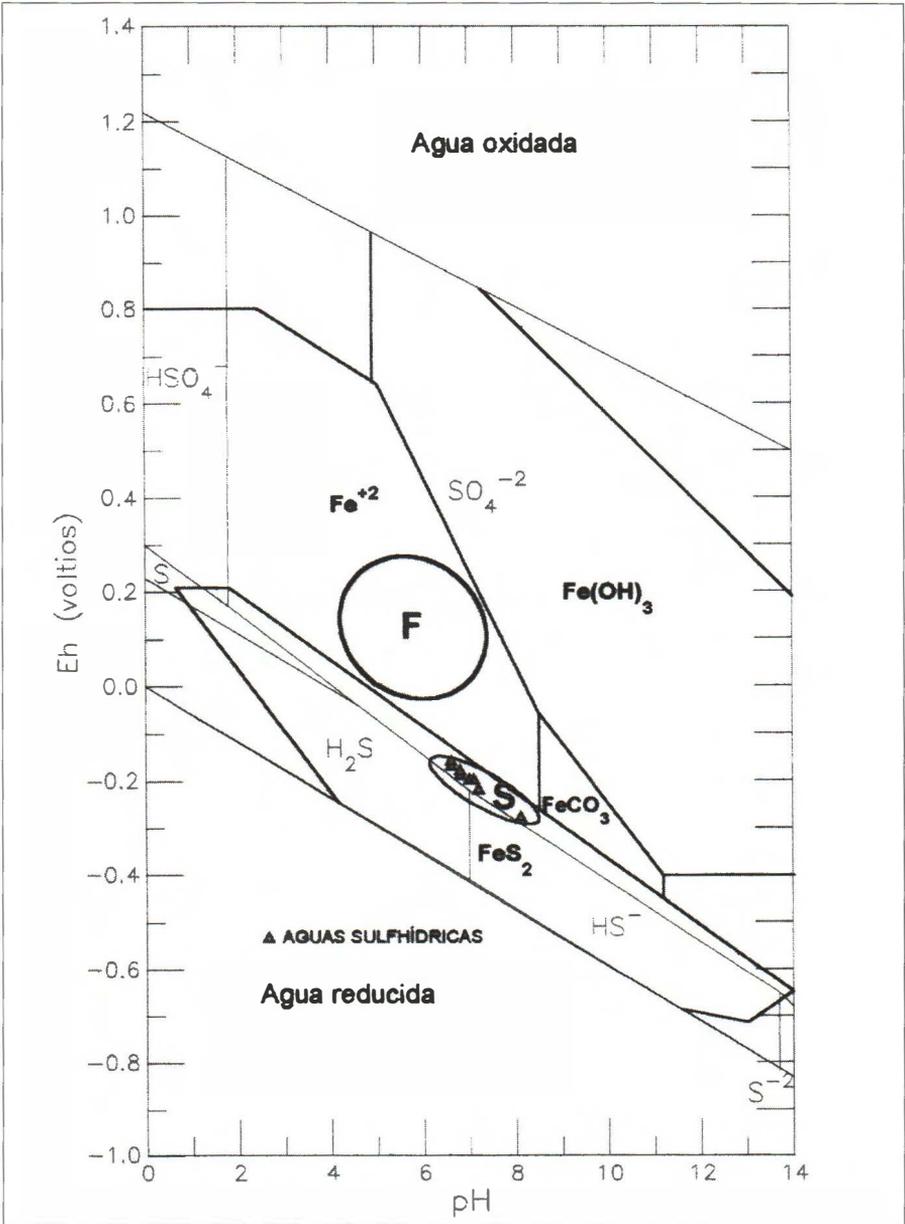


Fig. 12.9.—Diagrama pH-Eh mostrando los campos de predominio para las especies de azufre (líneas finas) junto a los campos de estabilidad para diversas formas disueltas y sólidas de hierro (líneas gruesas), a 25°C y 1 atmósfera de presión. Tomado de Hem (1970).

do en Fe al formar piritita, combinándose con parte del sulfato que a la vez se iría reduciendo. Puesto que, generalmente, el contenido en especies de azufre es mucho mayor que el de hierro, una vez agotado éste, aún quedaría SO_4^{2-} que al reducirse diera lugar a aguas sulfhídricas. A la inversa, si un agua sulfhídrica del sector S de la figura 12.9 pasara a condiciones más oxidantes, donde el Fe^{2+} sea estable, tendería a perder su carácter sulfhídrico al oxidarse el HS^- y el H_2S para dar lugar a sulfatos.

En síntesis, es termodinámicamente coherente el que en la región de estudio los manantiales sulfhídricos no sean a la vez ferruginosos, aunque en ocasiones aparezcan muy próximos y sobre el mismo sustrato litológico, ya que parecen reflejar distintas condiciones de potencial redox.

12.1.2.2 PROPIEDADES TERAPÉUTICAS DE LAS AGUAS SULFURADAS Y FERRUGINOSAS

Resulta difícil estudiar las propiedades terapéuticas de los manantiales sulfhídricos, también llamados sulfurados, de Soria pues no se cuenta con una práctica médica reciente, ya que la mayoría de estas fuentes han dejado de utilizarse desde hace más de 40 años. Se ha tratado de averiguar lo máximo posible mediante consultas personales de antiguos pacientes, médicos y gentes del lugar, que junto con los análisis realizados nos darán una idea de las acciones específicas que producen en el organismo. No hay duda que hubo muchas personas que recurrieron a las aguas sulfuradas sin ningún control médico, pero que su constante cita al tratamiento periódico demostraba inequívocamente que el agua mejoraba sus lesiones.

No vamos aquí a describir las cualidades terapéuticas de las aguas sulfuradas que ya se tratan en diferentes estudios y publicaciones (Armijo, 1968, 1990; Schnizer, 1985; Artmann y Pratzel, 1987, etc.), sino más bien a recoger el uso popular que se hacía tradicionalmente de estas aguas mineromedicinales.

Las principales indicaciones terapéuticas se referían a infecciones cutáneas y trastornos intestinales. Para ello se administraba el agua en la bebida durante novenas, y se aplicaba de forma directa y local en la piel durante una o más semanas.

Así, por ejemplo, hemos podido conocer que la fuente de

Ontalvaro (Foto 43) se empleaba para tratar dermatitis atópicas, eccemas, procesos alérgicos, acnes, etc. Aquí se aplicaba tanto el agua como los sedimentos sulfobacterianos blancos que se encontraban en la emergencia. La presencia de sulfatos alcalinos parece que producían efectos diuréticos y purgantes.

El manantial de los Tiñosos (Foto 46) era recomendado por los médicos en caso de eccemas, alergias difusas en la piel, en ocasiones con prurito. La forma de aplicación era lavándose la cara o las zonas afectadas durante una o más semanas, varias veces al día. Por sus cualidades favorecedoras de la función hepática y digestiva, se aplicaba también el agua por vía oral, en forma de novenas: el primer día un vaso, el segundo dos... el noveno, nueve.

Tanto los manantiales de Yangüas, Villarijo, Valdeprado, Suellocabras, Esteras y Cigudosa, debido a la parecida composición química de sus aguas, sus aplicaciones terapéuticas eran igualmente similares, aunque su mayor o menor eficacia estaba en relación directa con el contenido en azufre. Sin embargo, queremos señalar algunas peculiaridades propias de cada manantial: En Yangüas se empleaba sobre todo para la curación de erupciones cutáneas y, en forma de bebida era favorecedora de la función renal debido a su acción diurética. En Villarijo, sus aguas eran recomendadas para curar las "pupas" de la cara, así como las de Valdeprado lo eran para los "ojos legañosos" y conjuntivitis. Resultaba común en todos estos manantiales la aplicación de lodos blancos en la piel, las novenas como forma de ingestión in situ a pie de manantial, o la recogida de agua en garrafas.

La fuente sulfurada de Ágreda era conveniente contra las erupciones herpéticas y ejercían una acción saludable en los pacientes del estómago por exceso de alcalí en el jugo gástrico o en la bilis. Causaba así mismo efectos diuréticos y purgantes.

La de Vinuesa era muy recomendada para afecciones cutáneas en general, siendo el único manantial que disponía de bañeras. La alta concentración en cloruros que obraban como tónicos, contribuían a la buena digestión del agua, que se llevaban en garrafas.

Las aguas ferruginosas son por lo general aguas de mineralización débil, aunque el porcentaje de hierro disuelto supera el 1 % del contenido catiónico total. La presencia apreciable de hierro se hace notar en los característicos depósitos rojos que tiznan el lecho de

fuentes y arroyos, con ferrobacterias filamentosas que provocan la oxidación del hierro ferroso que precipita como hidrato férrico. Algunos de los manantiales situados en las orillas del pantano de la Cueda del Pozo llegan a generar pequeños depósitos de limonita de aspecto tobáceo. Muchos rezumes presentan la característica película superficial de tono irisado, denominándolos por este motivo los naturales como “aguas luminosas”. El metano detectado en el manantial ferruginoso de Robellano (Navaleno) (Foto 52), parece provenir de las fermentaciones de tipo anaeróbico de depósitos orgánicos, como turberas e incluso quizá lignitos, que de forma abundante pero diseminada, se esparcen por el área de San Leonardo y Casarejos.

Hay otros manantiales ferruginosos en Abéjar (Fuente Mineral), Cidones, Toledillo, Galmayo, Carbonera (Foto 55), etc.

Las propiedades terapéuticas de estos manantiales ferruginosos se centran como reconstituyentes en las debilidades, ya estomacales, ya por clorosis o anemia, en la leucorrea, etc. En general han sido utilizadas de forma esporádica y desigual.

12.1.2.3. OTRAS POSIBLES FUENTES MINEROMEDICINALES

De la encuesta realizada se han recibido noticia de algunos otros manantiales con fama de medicinales: Así, parece que las fuentes denominadas de Las Balsas, en Sotillo del Rincón, son apropiadas para las afecciones del estómago. La fuente de Pasadilla en Arguijo se aprecia propiedades diuréticas. La fuente de los Avehars en Valdeavellano de Tera, y la de La Cagalera en Covaleda, se indican como beneficiosas en los trastornos digestivos e intestinales. En Ausejo de la Sierra, la Fuente del Cuervo es utilizada por sus habitantes en los dolores de estómago. Las de Cantalucía, Fuentecantales y Rejas de Ucero, eran citadas por Madoz (1845-1850) como fuentes minerales o mineromedicinales. Aunque algunos de estos manantiales creemos que no tienen propiedades terapéuticas significativas, su investigación detallada desborda los propósitos de este trabajo.

12.1.3. LOS MANANTIALES TERMALES

En Soria no puede hablarse de manantiales termales propia-

mente dichos, aunque sí hay dos zonas con aguas templadas que se acercan a los 20°C. Nos referimos al área de Fuencaliente del Burgo y Vildé, en la parte occidental de la provincia, y a la región de Deza, en el extremo oriental, lindando con Aragón. En estos dos sectores aparecen manantiales con temperaturas entre 4'5 y 7'5 grados por encima de la temperatura media de las fuentes del país, que se sitúa en los 12'5°.

La primera región comprende seis manantiales con temperatura de unos 17°. Los situados cerca de Fuencaliente del Burgo (Tabla 12.3), tienen un caudal parecido y un régimen hidrológico bastante regular. Son químicamente parecidas, presentando facies bicarbonatada-cálcica y tienen un burbujeo de aire apreciable. Son los manantiales de la Ermita de Fuencaliente (Foto 57), Rejas de Ucero (Foto 58), Nafría y Valdernalque.

Estos manaderos se hallan alineados según la dirección O.NO-E.SE, que coincide con las directrices geológicas del Cretácico calcáreo que aquí se encuentra cubierto por el Terciario arcilloso. Aunque los brotes se suelen ubicar en terrenos poco permeables (rañizos, arcillas del Mioceno, Garumnense), el agua proviene seguramente de la recarga que se efectúa en las calizas del Turoniense-Coniaciense situadas más hacia el NE, circulando luego a cierta profundidad bajo el Terciario, donde adquieren la temperatura, y obligadas a salir por algún accidente tectónico concreto que no siempre se observa en superficie (cúpula anticlinal, falla, etc). La semejanza isotópica observada en las concentraciones de oxígeno-18 en los manantiales estudiados (Tabla 12.3), refleja la existencia de una misma zona de recarga para todos ellos. Relacionados con los anticlinales cretácicos que emergen del Terciario de la Cuenca de Almazán, se encuentran los manantiales de Vildé y Andaluz, este último de facies sulfato-cálcica. (Foto 22)

La segunda zona, más importante, comprende la prolongación del acuífero de las Termas de Alhama de Aragón en territorio soriano (Hernández Pacheco, 1954). Los manantiales situados en las proximidades de Deza (Tabla 12.1), son salidas parciales de este embalse subterráneo (Foto 56). Todas las manifestaciones termales tienen unos 20° de temperatura y están situadas sobre la importante falla que baja desde Deza hasta Alhama de Aragón en dirección NO-SE, siguiendo el curso del río Henar. En esta misma fractura brotan los manantiales de Embid de Ariza y Alhama de Aragón (Zaragoza).

Se pueden observar como a medida que se progresa hacia la salida principal del acuífero de Alhama, situado en el punto de menor cota en el Valle del Jalón, los manantiales van progresivamente ganando temperatura.

La explicación del origen de las termas de Alhama hay que buscarla principalmente en el desnivel existente entre la meseta castellana y el Valle del Jalón y la presencia de una falla importante. En una corta distancia hay una diferencia de unos 400 m, por lo que las aguas infiltradas en la tierra de Deza van recorriendo distintos trayectos según diferentes líneas de flujo cada vez más largas y profundas, dando lugar a la mencionada graduación de temperaturas en los manantiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aránzazu, J.M. (1877). "Apuntes para una descripción física y geológica de las provincias de Burgos, Logroño, Soria y Guadalajara". Boletín nº IV de la Comisión dle Mapa Geológico de España.
- Armijo, M. (1968). "Compendio de Hidrología Médica". Ed. Científico-Médica. Barcelona, 484 págs.
- Armijo, F. (1990). "El azufre en las aguas mineromedicinales". Bol. Soc. Esp. Hid. Med. 3, 109-112.
- Artmann, K.; Pratzel, H. (1987). "Immunsuppression der Hautdurch Schwefel-Bäder". Phys. Med. Baln. Med. Kelim. 16, 65-68.
- Beuther, A.; Dahm, H.; Kneuper-Haak, F; Mensink, H.; Tischen, G. (1965). "Der Jura und Wealden in Nordost-Spanien. *Beih. Geol. Ib.*, 44, 225 pp. Hannover.
- Drever, J.I. (1988). "The Geochemistry of natural waters". Prentice Hall, 437 pp (2nd edition). New Jersey.
- Hem, J.D. (1970). "Estudy an interpretation of the chemical characteristics of natural Waters". *Geological Survey Water-Supply Paper*, 1473, 363 pp. (2nd edition). Washington.
- Hernández-Pacheco, F. (1954). "Estudio hidrogeológico de las Termas de Alhama de Aragón (Zaragoza)". Anales de la Real Academia de Farmacia. Año XX. Núm. 4, pp. 309-336.
- Instituto Geológico y Minero de España (1981-A). "Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 280 (Enciso)". Memoria 27 pp. Madrid.

- Instituto Geológico y Minero de España (1981-B). "Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 319 (Ágreda)". Memoria 24 pp. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1981-C). "Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 462 (Maranchón)". Memoria 38 pp. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1982). "Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 281 (Cervera del Río Alhama)". Memoria 41 pp. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1988). "Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 317 (Vinuesa)". Memoria 41 pp. Madrid.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España (1989). "El agua subterránea en Soria. Mapa hidrogeológico a escala 1:200.000". Memoria 20 pp. Madrid.
- Madoz, P. (1845-50). "Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de Castilla y León (Soria). Reeditado en 1984 por Ediciones Ámbito. 281 pp. Madrid.
- Marfil, R. (1970). "Estudio petrogenético del Keuper en el sector meridional de la Cordillera Ibérica". *Est. Geol.* 26, (2), 113-161. Madrid.
- Núñez, C. & Sonier, A. (1985). "Aguas minero-medicinales y aguas potables de Ágreda". Imprenta de F. Martínez Zaporta. 28 pp. Logroño.
- Palacios, P. (1890). "Descripción física, geológica y agrológica de la provincia de Soria". Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España, 112-117. Madrid.
- Palacios, P. y Sánchez Lozano, R. (1885). La Formación Wealdense en las provincias de Soria y Logroño". *Not. y Com. Map. Geol. de España*, 12, 109-140. Madrid.
- Sáenz García, C. (1932). "Notas para el estudio de la facies wealdica española. Congreso de la Asociación Española para el progreso de las Ciencias. Sección IV, pp59-76. Madrid.
- Sáenz García, C. (1948). "Datos para el estudio de la paleografía del Jurásico Superior y del Cretácico Inferior en el noreste de España". *Asesoría Geológica de Obras Públicas*, nº 1. Madrid.
- Sanz, E. (1987). "El karst del sur y oeste del Moncayo". *Bol. Inf. Est.*, 47, 159 pp. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.
- Servicio Geológico de Obras Públicas (1990). "*Estudio hidrogeológico de la provincia de Soria*". Informe interno, inédito. Madrid.
- Soler, M. (1990). Soria Semanal (números de 1990: 10, 20, 24, 27, y 29 de marzo; 5, y 19 de abril; 5, 8, 17, 22, 26, y 29 de mayo; 2, 7, 12, 14 de junio; 2, 9 y 11 de agosto).
- Largo, L.M. (1987). Soria Semanal (25 de julio).

**GUIA DE LOS MANANTIALES
MINEROMEDICINALES Y TERMALES
DE LA
PROVINCIA DE SORIA**

**Mapas de situación de los manantiales minero-medicinales y
termales en Soria.**

1. Manantial del Salobral (Vinuesa)
2. Manantial sulfuroso de Ágreda
3. Fuente de Ontálvaro (Aldealcardo)
4. Fuente del agua (Yanguas)
5. Fuente de los Tiñosos (San Pedro Manrique)
6. Fuente de Valdeprado
7. Manantiales de Villarijo
8. Fuente del Brocal (Cigudosa)
9. Fuente de la Ermita (Suellacabras)
10. Fuente los Baños (Esteras de Medinaceli)
11. Fuente de Robellano (Navaleno)
12. Fuente del Hierro (Vinuesa)
13. Fuente de Agadir o del Suso (Deza)
14. Fuente de San Roquillo (Deza)
15. Manantial de Fuencaiente del Burgo
16. Manantial de Nafría de Ucero
17. Manantial de Andaluz

1. FUENTE DE EL SALOBRAL

Municipio: Vinuesa

Situación

Se encuentra en la margen derecha del río Duero, hoy cola del Embalse de la Cuerda del Pozo, cerca de la vía romana y en el paraje de Valliluenga.

Acceso

Desde Vinuesa, en dirección hacia el Sur, se cruza el pantano por el puente medieval y, en la ermita situada inmediatamente a la derecha, parte una pequeña senda que ha de seguirse unos 700m aguas arriba, sin perder altura. En medio del pinar hay un edificio en ruinas de dos plantas, en cuyo interior se encuentra la fuente. Es conveniente preguntar a los lugareños, pues no es fácil encontrarla.

Descripción

El agua sale de dos caños dentro de una edificación en ruinas de dos plantas, y de la que se conservan las paredes y un balcón. Era un hotelito de descanso que regentaba la familia Torroba.

Anteriormente el manantial fue dado a conocer en el primer tercio del siglo XIX por el párroco D. Esteban García. En 1879 lo denunció D. Antonio Rodríguez Tierno, y en 1880 se realizó un proyecto para la construcción de un balneario cerca de Vinuesa y alejado del brote sulfuroso, que aunque fue aprobado no llegó a materializarse. En el Archivo del Ayuntamiento de Vinuesa se conserva diversa documentación al respecto, como las características que iba a tener el futuro balneario (con tres plantas y seis baños). En su lugar se construyó in situ la actual edificación, la cual contaba con una bañera y demás instalaciones hidroterápicas en la planta baja y las habitaciones en la planta superior.

Parece que permaneció activo hasta la década de los cuarenta. En la actualidad se ve concurrido por gente de Vinuesa y veraneantes.

Propiedad: Ayuntamiento de Vinuesa

Aguas: Sulfuradas, sulfatada sódica, frías (12°C).



1. Manantial del Salobral (Vinuesa)

2. FUENTE SULFUROSA DE ÁGREDA

Municipio: Ágreda

Situación

Se halla en el margen del paseo central del Parque de la Dehesa, dentro del casco urbano de la Villa, junto al paseo principal de la alameda. Nace en una fuente hundida, en la que hay que bajar escaleras. En el caño contiguo sale agua proveniente del Moncayo, pero la fuente sulfurosa se distingue fácilmente de las otras fuentes por su característico olor a huevos podridos, y a los depósitos blancos que deja en el lecho.

Descripción

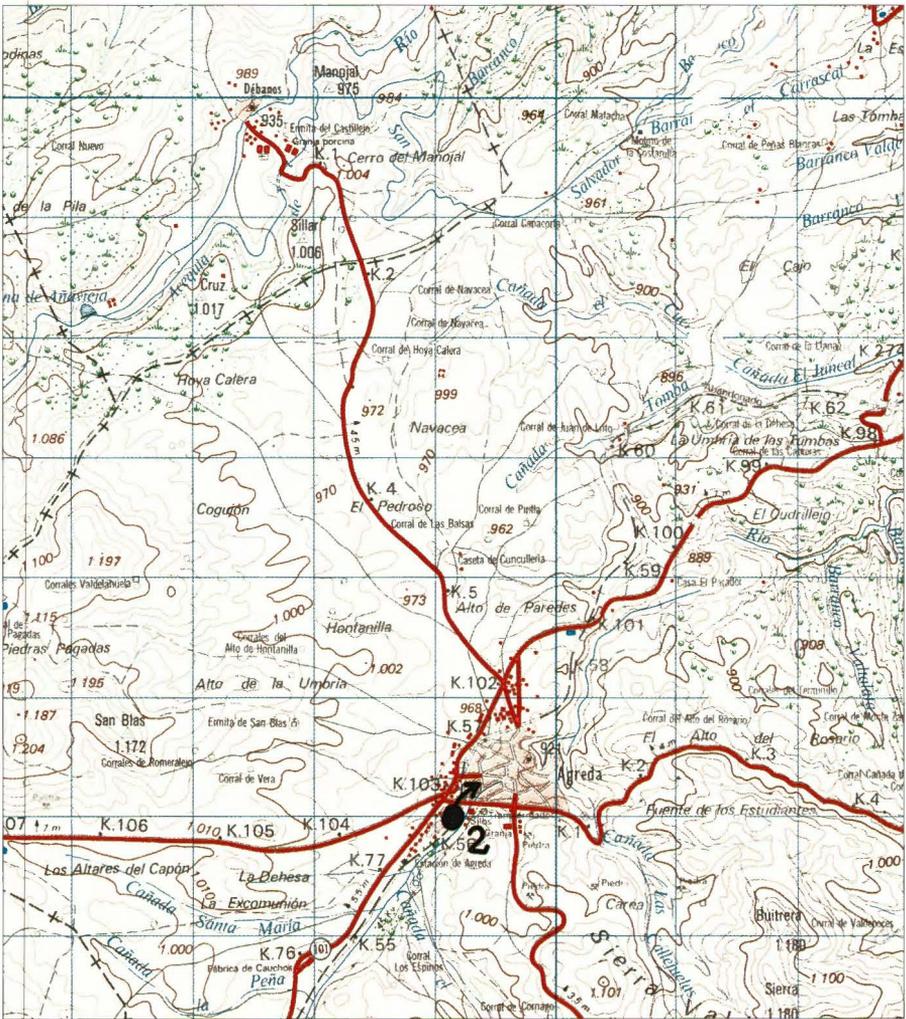
Era un manantial muy conocido, y actualmente es visitado por personas que recogen el agua para uso medicinal. En 1885 fue objeto de una monografía por parte de los farmacéuticos Núñez y Sonier, quienes analizaron sus propiedades medicinales. En las cimentaciones de edificios cercanos han aparecido otras manifestaciones sulfhídricas. La antigua fuente sulfurada está fechada en 1948 y dedicada a Pedro Cilla Valenciano por su labor municipal.

Bibliografía

Núñez, C. y Sonier, A. (1885): "Aguas minero-medicinales y aguas potables de Ágreda". Imprenta de F. Martínez Zaporta. 28 pp. Logroño.

Propiedad: Municipal

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías (9,9°C).



2. Manantial sulfuroso de Agreda

3. FUENTE DE ONTALVARO

Municipio: Yanguas (despoblado de Aldealcardo)

Situación

En las inmediaciones del antiguo despoblado de Ontálvaro, cercano al también hoy despoblado de Aldealcardo, cerca de La Cuesta. Se halla en una casita dentro de la cual brota el manantial sulfurado.

Acceso

Se deja el coche en Aldealcardo y luego hay que subir andando en dirección al NE por un camino de tierra que parte de la iglesia del pueblo. A unos 300 m de fuerte repecho, sale una senda de una curva del camino, que faldea en dirección al Norte otros 300 m, que es donde se encuentra dicha caseta, hoy derruida. Es casi imprescindible preguntar en La Cuesta o en Yanguas la situación de este manantial, ya que es difícil encontrarlo.

Descripción

El terreno de las inmediaciones está cubierto de coluviones arcillosos y antiguos bancales de cultivo, entre los que asoman calizas y margas en lajas, con areniscas y margas fétidas. En el cercano pueblo de La Cuesta es frecuente ver azufre relleno las grietas de la roca.

Durante los meses de verano acudían de Arnedo, Calahorra y otros pueblos cercanos los veraneantes, que se hospedaban en casas particulares de La Cuesta y Aldealcardo. Pagaban una pequeña cuota a los ayuntamientos, pues el manantial era de propiedad municipal. Entre los visitantes de principio de siglo se encontraba D. Arsenio Gallego, Catedrático de Matemáticas en el Instituto de Cáceres, natural de Castilruiz (Soria), más conocido por sus obras literarias en relación con Soria. El manantial se ve concurrido por los veraneantes que recogen el agua o siguen practicando in situ las novenas.

Parece ser que la fuente de abastecimiento de La Cuesta tenía cierto olor a sulfhídrico, aunque dicho gas no ha sido detectado en nuestros análisis.

4. FUENTE DEL AGUA

Municipio: Yanguas

Situación

Está situada en las afueras del pueblo, dentro de una casa bien conservada, propiedad antiguamente de la familia Barros de Lis.

Acceso

Por la carretera de Yanguas a Diustes, pasando el Castillo de Yanguas, y cerca de una pequeña ermita situada a la vera del camino.

Descripción

La fuente brota en las inmediaciones, aunque es conducida a una modesta pero bien conservada edificación, de construcción tradicional, en cuyo sótano sale el agua sulfurosa de un pequeño caño. En la época estival, de mayor afluencia de veraneantes, los agüistas podían alquilar habitaciones en el pueblo. Esta actividad se ha mantenido hasta los años 40 o 50, pero en la actualidad prácticamente no se utiliza.

Esta fuente, que puede menguar bastante de caudal, está asociada a capas de yeso negro y margas ricas en materia orgánica. En la Dehesa de Yanguas hay también un sondeo geotécnico cuya boca mana esporádicamente un débil caudal de agua sulfurada. En los taludes de los desmontes de la carretera cercana de Calahorra a Soria se puede ver el yeso negro y las exudaciones blancas de sulfatos.

Propiedad: Privada

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías (9°C).



4. Fuente del Agua (Yanguas)

5. FUENTE DE LOS TIÑOSOS

Municipio: San Pedro Manrique

Situación

A las afueras del pueblo de San Pedro Manrique, al pie de una finca de labor.

Acceso

Desde el Ayuntamiento de San Pedro Manrique se sale en dirección del pueblo en dirección hacia el E, cerca de las últimas casas, junto al arroyo de desagüe de las aguas sucias. Conviene preguntar en el pueblo.

Descripción

Este manantial era recomendado por los médicos para eccemas, alergias difusas en la piel y prúrito. Se lavaba la cara o zonas afectadas durante una o más semanas varias veces al día. También se aplicaba en agua por vía oral en forma de novenas debido a sus cualidades favorecedoras de la función hepática y digestiva. Hoy en día es visitado por algunas personas.

En el cercano despoblado de Sarnago, hay un pequeño rezume sulfurado casi desaparecido por las labores de roturación; se llamaba Fuente de Ampudia.

Propiedad: Municipal

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías (10°C).

6. MANANTIAL DE VALDEPRADO

Municipio: Valdeprado

Situación

En la orilla derecha del Barranco de Valdeprado, cerca de un antiguo molino harinero. (Molino del Fortunato).

Acceso

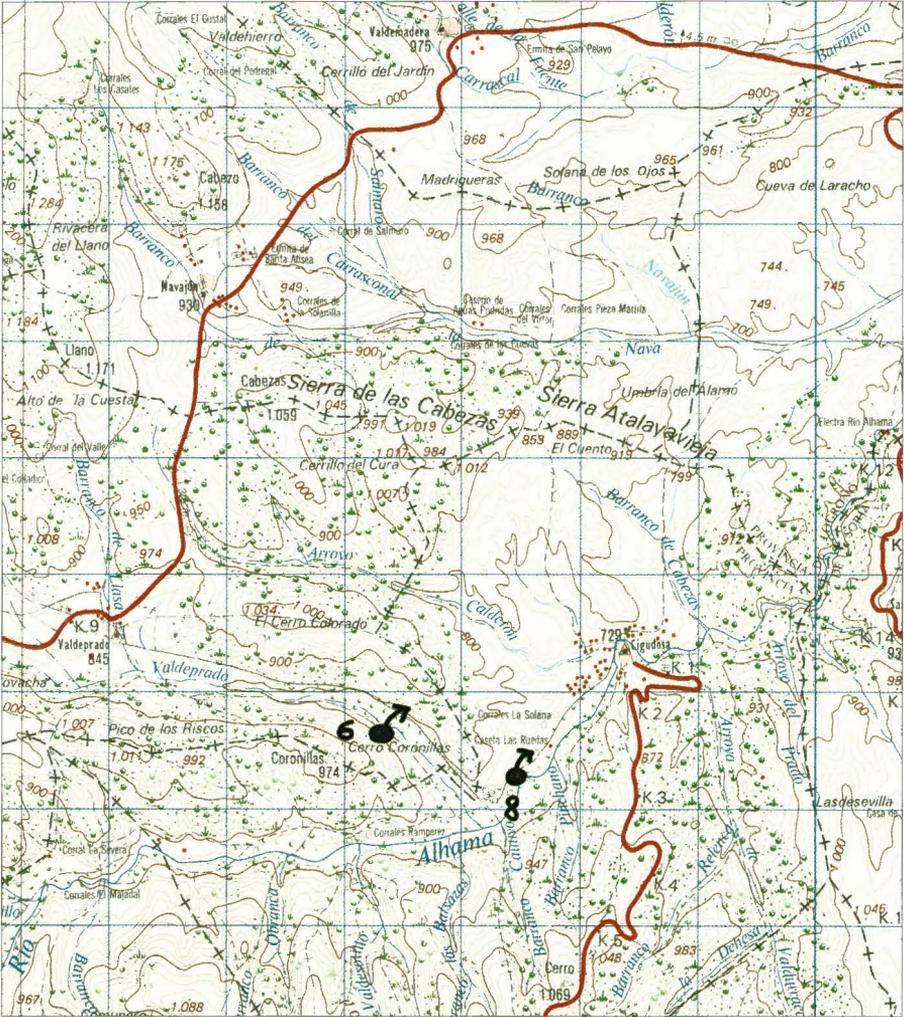
Se puede llegar en coche o todoterreno desde Valdeprado, siguiendo el camino que va de este pueblo a Cigudosa. A unos 1,5 Km, a 50 m a la derecha del camino, se halla un molino abandonado (del Fortunato). Hay que cruzar en río de Valdeprado, y unos 50 m aguas arriba, en la orilla derecha, hay un esquinazo de piedra con un pequeño caño de donde brota el agua sulfurada.

Descripción

Este manantial tiene un alto contenido en azufre y deja un sarro gris y blanco característico. Brota de una formación geológica donde predominan las lajas de calizas y margas, con niveles delgados intercalados de yeso. Antiguamente era visitado por gentes de la comarca, aunque la mayor parte de los agüistas acudían al balneario de Navajun (La Rioja), situado a muy poca distancia de Valdeprado.

Propiedad: Municipal

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías.



6. Fuente de Valdeprado

7. MANANTIALES DE VILLARIJO

Municipio: San Pedro Manrique

Situación

En el Barranco de la Yasa, a unos 800 m al Este del despoblado de Villarijo. Al lado se encuentran las ruinas del único molino de aceite de oliva que había en Soria.

Acceso

A Villarijo se puede llegar en coche o en todoterreno por medio de una pista forestal que sale de San Pedro Manrique. El recorrido es de unos 15 o 20 Km y la pista muere en Villarijo, donde hay que dejar el vehículo. A pie se cruza el despoblado en dirección hacia el Este y se sigue la senda que baja al río de la Yasa unos 300m. Este barranco es afluente por la izquierda del río Linares, que se halla muy próximo al lugar. Después se sigue unos 200 m aguas arriba del barranco, por entre las gravas y acarreos, hasta llegar a las ruinas del molino de aceite, que se sitúa en la orilla derecha.

Descripción

Se trata de dos brotes sulfhídricos muy próximos, que juntos dan un caudal aproximado de 1 l/s, siendo por lo tanto los más caudalosos de la provincia. Brotan de entre los acarreos de gravas y bolos del Barranco de la Yasa. Junto a ellos hay un brote ferruginoso. Su alto caudal hizo pensar en el siglo pasado en la construcción de un balneario que no llegó a realizarse (Palacios, 1890). Actualmente se encuentran bastante abandonados, con el único arreglo de estar encañados con dos tejas, y con el peligro de que una riada pueda hacerlos desaparecer. Debido a lo recóndito y lejanía del lugar, estos manantiales no se ven frecuentados por agüistas.

Propiedad: Municipal

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías (15°C).

8. MANANTIAL DE EL BROCAL

Municipio: Cigudosa

Situación

En la orilla izquierda del río Linares, junto a su cauce, unos 2 Km aguas arriba de Cigudosa.

Acceso

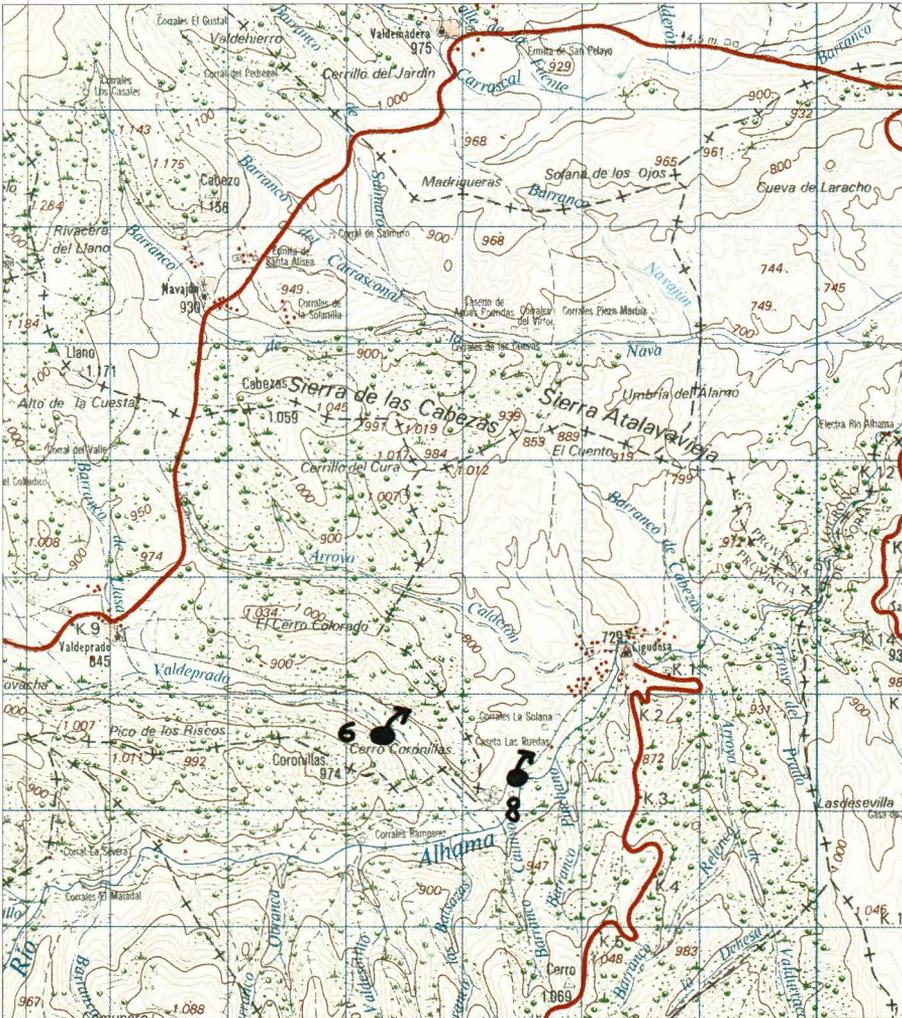
Desde Cigudosa, y cruzando el río Alhama, se puede ir en coche por un camino de tierra que va a Valdeprado, Camino de la ermita de San Roque. A unos 2 Km del pueblo, y junto a unas huertas hay que dejar el vehículo y acercarse andando unos 200 m al río Alhama, donde se encuentra una pequeña fuente encañada. Es conveniente preguntar en Cigudosa sobre su situación, pues es difícil encontrarla.

Descripción

Junto a esta fuente y en el lecho del río hay un rezume ferruginoso. En la época estival es visitada por algunos veraneantes y agüistas de Cigudosa que hacen novenas o se lavan con sus aguas.

Propiedad: Municipal

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías (12°C).



8. Fuente del Brocal (Cigudosa)

9. FUENTE DE LA ERMITA

Municipio: Suellacabras

Situación

En medio de una finca de labor, junto a la ermita de la Virgen de la Blanca.

Acceso

Se encuentra en las proximidades de Suellacabras, unos 400 m al Sur del pueblo. Se puede llegar en coche hasta la propia ermita por un camino de tierra que sale del mismo pueblo.

Descripción

Mana el agua en una pequeña arqueta de piedra que se encuentra medio destruida. Este manantial se halla casi perdido, cubierto de zarzas, abandonado y contaminado. Antiguamente tuvo dos caños. El agua no tiene ya olor característico a sulfhídrico, aunque el drenaje de la finca en la que nace si parece tener un débil olor a huevos podridos. Según cita Madoz (1845-1850), hubo también aquí un intento de construir un establecimiento de balneoterapia. En los alrededores se pueden ver calizas jurásicas con piritas.

Propiedad: Se desconoce

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías (9°C).



9. Fuente de la Ermita (Suellacabras)

10. FUENTE DE LOS BAÑOS

Municipio: Esteras de Medinaceli - Fuencaiente de Medinaceli

Situación



En la orilla izquierda del río Jalón, a pocos metros del cauce. Cerca de la autovía de Aragón y el cruce de desvío a Medinaceli viniendo de Madrid.

Acceso

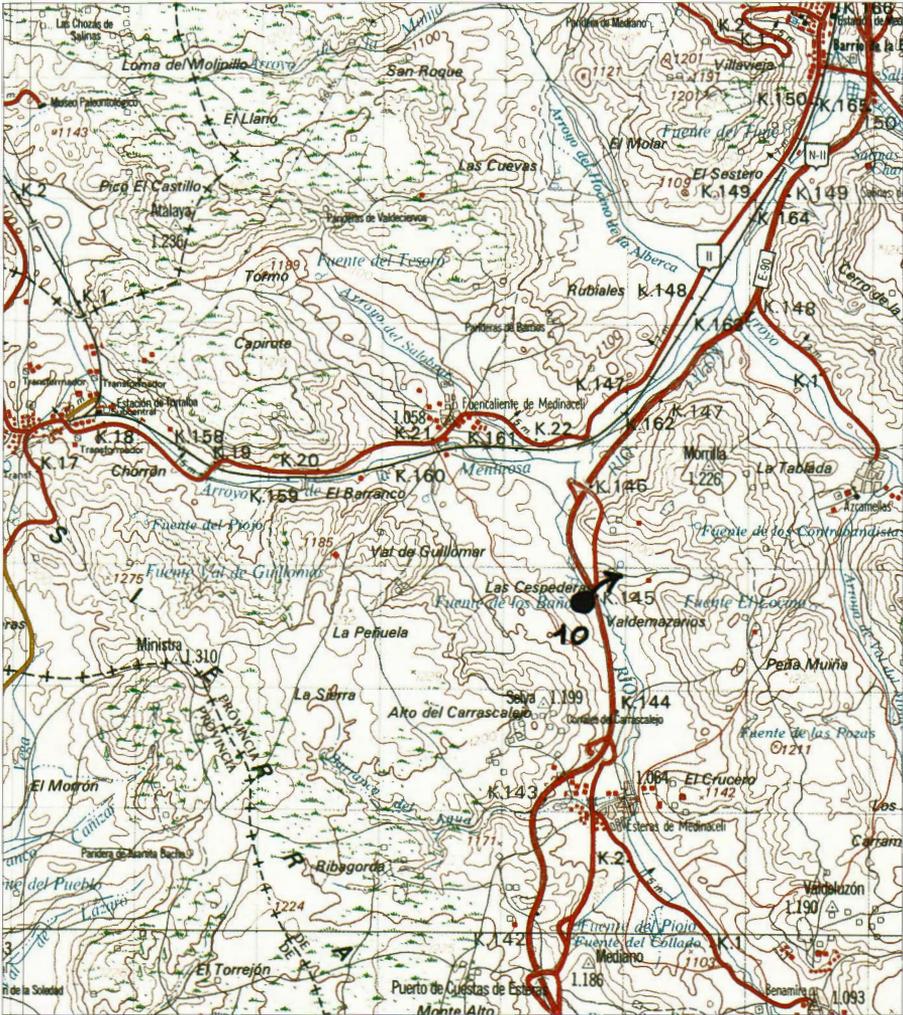
Se puede llegar viniendo de Medinaceli por la antigua carretera nacional y entrando por un camino de tierra una vez pasado el ferrocarril de Madrid-Barcelona. Hay un pequeño puentecillo que cruza el río, a partir del cual hay que subir por la orilla izquierda del río andando aguas arriba unos 250 m.

Descripción

Aparte de otros pequeños rezumes sulfhídricos que hay en las inmediaciones y en Urex, este es el único manantial sulfurado del Sur de la provincia. Está asociado a los yesos y margas del Keuper y era bastante conocido en la comarca, de donde acudían los agüistas, que se alojaban en las casas particulares de Esteras. La fuente se encuentra encañada y es visitada por algunas personas de los pueblos de alrededor.

Propiedad: Particular

Aguas: Sulfuradas cálcicas, frías (10°C).



10. Fuente los Baños (Esteras de Medinaceli)

11. MANANTIAL DE ROBELLANO

Municipio: Navaleno

Situación

A medio kilómetro al Norte de Navaleno, en un merendero situado junto a la carretera que va a El Almogable.

Acceso

En coche desde Navaleno, por la citada carretera de El Almogable.

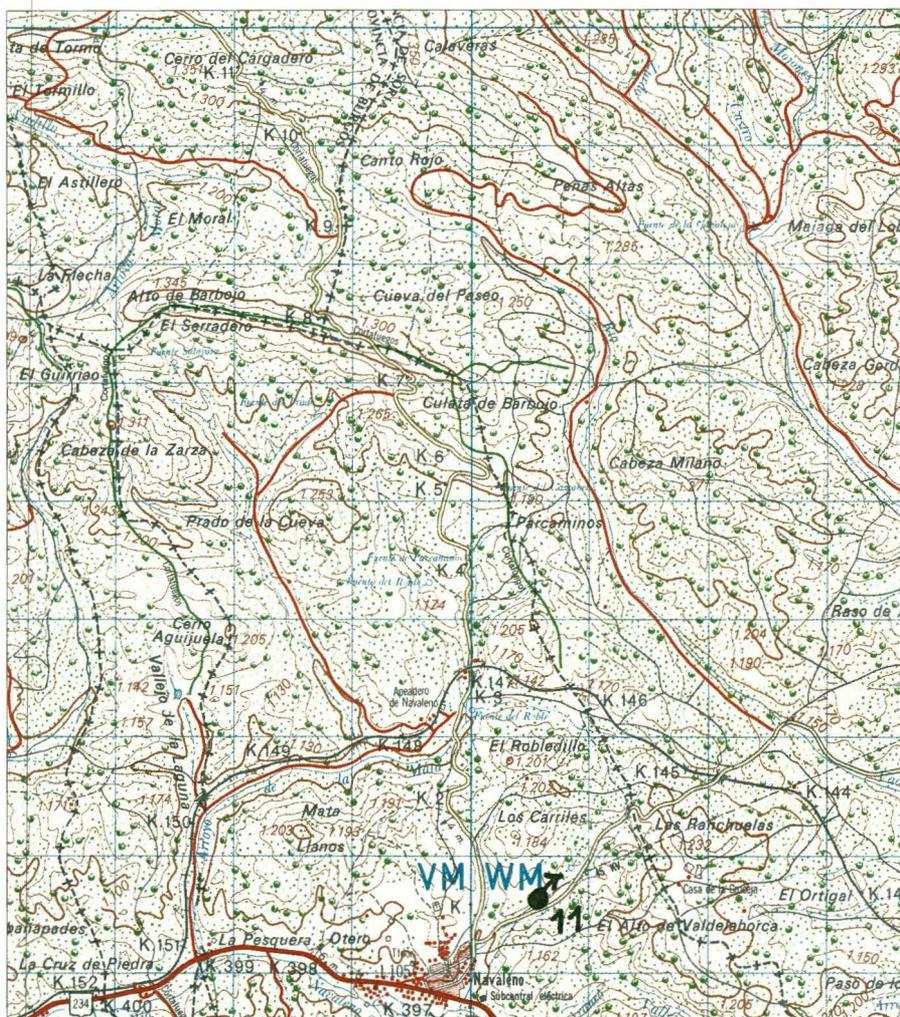
Descripción

Brota junto a un pino y en seguida se delata su carácter ferruginoso en los depósitos rojos que deja en el lecho del pequeño regacho que forma. Si se acerca al caño se puede sentir un olor característico a metano. Hay en los alrededores de Navaleno otros manantiales ferruginosos, como los rezumes de los prados que hay junto a la carretera de Burgos. También hay algún sondeo con agua ferruginosa.

Esta agua puede considerarse como un reconstituyente en las debilidades, como anemias o leucorreas, etc.

Propiedad: Municipal

Aguas: Ferruginosas (9,1°C).



11. Fuente de Robellano (Navaleno)

12. FUENTE DEL HIERRO

Municipio: Vinuesa

Situación

En la margen derecha del río Duero, hoy cola del Embalse de la Cuerda del Pozo, entre Vinuesa y Molinos de Duero.

Acceso

A mitad de camino entre la carretera que va de Vinuesa a Molinos de Duero, hay un puente de cemento que cruza el pantano de la Cuerda del Pozo. Inmediatamente a la derecha después de pasado este puente hay un pequeño brote muy cerca de la orilla.

Descripción

Es un manantial de muy poco caudal, pero que deja un ostensible y llamativo precipitado rojo de hierro. Algunas de estas aguas, aparte de elevarlas in situ para las anemia, han sido instintivamente utilizadas como cicatrizantes por los animales salvajes.

Otros manantiales ferruginosos

Existen otros muchos manantiales y rezumes ferruginosos repartidos por todo el Norte de la provincia de Soria, especialmente en la zona de Pinares. Podríamos citar los rezumes de Cigudosa, de Ventosa de San Pedro, Sarnago, Fuente Raíz (Covaleda), numerosas fuentes alrededor del pantano de la Cuerda del Pozo (Cidones, Vinuesa, Herreros), Fuente de Malluembre (Cidones), Oteruelos, en Pedrajas y Valonsadero, sondeos de Cidones y Carbonera, en Santa María de las Hoyas, La Fuente Mineral de Abejar, en Muriel Viejo, en Carbonera, Fuente de la Mina (Golmayo), Villaciervos y Talveila.

Propiedad: Municipal

Aguas: Ferruginosas (8,6°C).



12. Fuente del Hierro (Vinuesa)

13. MANANTIAL TERMAL DE AGADIR Y DEL SUSO (DEZA)

Municipio: Deza

Situación

En la parte superior del pueblo de Deza, junto a las piscinas municipales

Acceso

Se puede llegar en coche hasta las inmediaciones, dejándolo aparcado junto a las piscinas municipales.

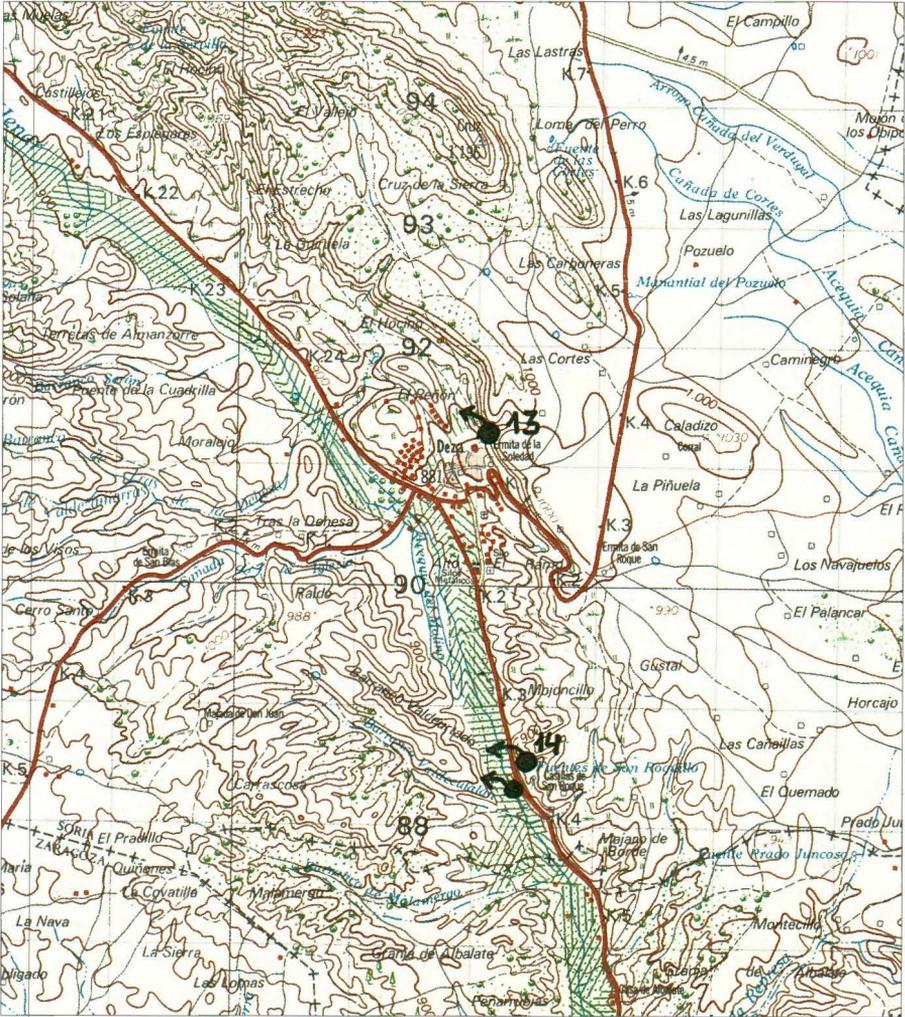
Descripción

Se trata de varios brotes que nacen del paredón de caliza cretácica que se pone aquí en contacto mediante falla con el Terciario arcilloso. Da lugar a un arroyo que constituye el principal caudal de base del río Henar (con más de 60 l/s). Las aguas del manantial son muy incrustantes y forman potentes lechos de toba que afloran desde 4 m por encima de los manantiales hasta la vega del Henar. La mayor parte de Deza está asentado sobre este tipo de calizas. El manantial es de caudal muy constante y regular y no acusa apenas las sequías. En las inmediaciones se produjo una sima de hundimiento por lo que sale vapor en invierno. Un kilómetro hacia el Oeste hay otro manantial más pequeño (llamado del Ocino), de 7-8 l/s de caudal, que proviene del mismo acuífero y tiene la misma temperatura.

En la vega hay un ojo de aguas algo menos calientes (16°C). Todos estos manantiales, junto con los de San Roquillo y los de Embid de Ariza (Zaragoza), pertenecen al acuífero que drena en los famosos manantiales de Alhama de Aragón (Zaragoza), de 34 a 37°C de temperatura.

Propiedad: Municipal

Aguas: Bicarbonatadas cálcicas. (19-20°C).



13. Fuente de Agadir o del Suso (Deza)

14. MANANTIALES TERMALES DE SAN ROQUILLO

Municipio: Deza

Situación

Unos 3 Km al Sur de Deza, junto a la carretera de Deza a Cihuela. Se ven unas chorreras de agua que caen de un tobazo sobre el que se asienta la pequeña ermita de San Roque el Viejo.

Acceso

Como se ha dicho, se puede llegar en coche por la carretera de Deza a Cihuela.

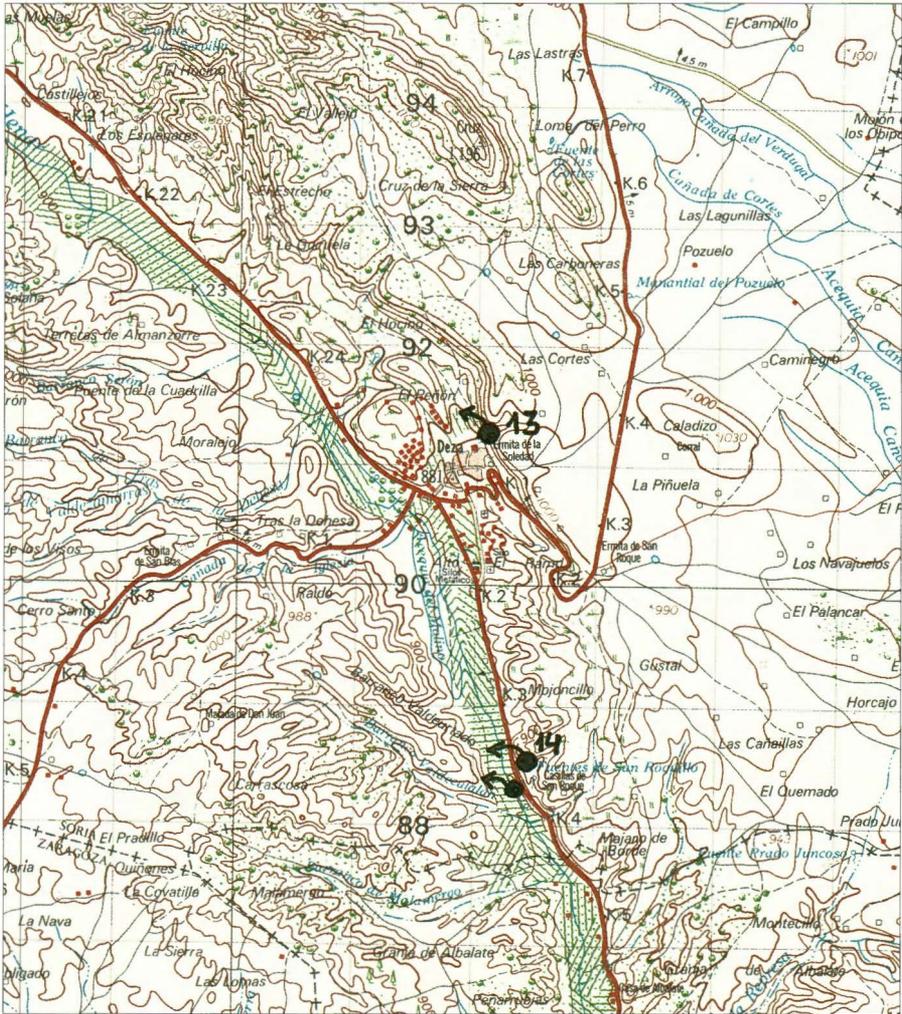
Descripción

Hay dos tipos de manantiales: unos brotes nacen unos 10-15 m por encima de la carretera, en el contacto entre unas calizas muy kársticas, probablemente terciarias, y unas arcillas rojas que se sitúan debajo. Estos manantiales, que tienen entre 10-20 l/s, son de caudal constante, aunque menos que los de Agadir de Deza. Son aguas muy incrustantes, por lo que han desarrollado un tobazo constituido de tufa blanca en facies de cascada de unos 100 m de ancho por 15 m de altura. Cuando llueve mucho pueden ponerse en funcionamiento otros conductos de salida y un manantial denominado el Estanque del Cura, situado 0,5 Km más hacia el Sur, que brota de la misma formación calcárea.

Aparte de estos manantiales de ladera, hay otros ojos que se sitúan en el aluvial de la Vega del río Henar (Manantiales de Azañón), frente a los de San Roquillo, bastante caudalosos y que presentan igualmente temperatura elevada.

Propiedad: Municipal

Aguas: Bicarbonatadas cálcicas (18-19°C).



14. Fuente de San Roque (Deza)

15. MANANTIAL TERMAL DE FUENCALIENTE DEL BURGO

Municipio: Fuencaliente del Burgo

Situación

Se encuentra unos 350 m al Norte del pueblo, junto a la carretera que va a Santa María de las Hoyas, y al lado de una ermita. El manantial se llama precisamente “de la Ermita”.

Acceso

Se puede llegar en coche hasta el mismo manantial.

Descripción

Es una estanque de medianas dimensiones, en cuyo fondo arenoso mana el agua con cierta abundancia de burbujas de aire.

El manantial brota de una facies de conglomerado calizo acarriolado que se apoya sobre el Cretácico calcáreo que aflora más hacia el Norte; aquí se encuentra el contacto con el Terciario arcilloso.

Aguas: Bicarbonatadas cálcicas (18-19°C).

16. MANANTIAL TERMAL DE REJAS DE UCERO

Municipio: Nafría de Ucero

Situación

Se encuentra unos 400 m al Norte del pueblo, junto a un antiguo lavadero de ropa.

Acceso

Desde Nafría se puede llegar en coche por un camino de tierra hasta el mismo lavadero. La distancia es de 1 Km.

Descripción

El manantial se llama “ de la Inquinilla” y nace de una roca de conglomerado calizo de color rojizo acarniolado, de la misma facies que la de Fuencaliente del Burgo. En el mismo brote hay un lavadero que se construyó aquí precisamente para aprovechar el calor de las aguas, antes de que se enfriaran fuera de la emergencia. Presenta la misma temperatura que la de Fuencaliente. De la emergencia parte un canal que riega la huerta del pueblo, donde son famosas sus judías semipintas.

A las afueras de Santervas del Burgo, pueblo próximo a Nafría, hay también un ojo de agua templada, lo mismo que en Rejas de Ucero y en Valdelinares. En este último pueblo, el manantial se sitúa unos 0,5 Km al Oeste del pueblo por el que se puede llegar en coche por una pista de tierra. Allí el agua brota con muchas burbujas de aire dentro de una formación miocena arenosa del tipo raña.

Aguas: Bicarbonatadas cálcicas (18-19°C).

17. MANANTIAL DE ANDALUZ

Municipio: Andaluz

Situación

Se encuentra en la orilla de la margen derecha del Duero, unos 700 m al Oeste de Andaluz y cerca del camino de tierra que va de Andaluz a Tajueco por la orilla del Duero.

Acceso

Se puede acceder en coche por el mencionado camino y luego hay que andar unos 50-100 m hacia el Duero. El lugar se reconoce fácilmente, ya que hay una captación del manantial y un estanque de cemento.

Descripción

El manantial sale del fondo arenoso en borbotones burbujeantes. Aunque el brote se sitúa en las terrazas del Duero, el origen del agua hay que buscarlo en el drenaje de la cúpula anticlinal calcárea cretácica de Andaluz, que se halla en las proximidades y en contacto con el Mioceno arcilloso de la Cuenca de Almazán. Su caudal es muy constante y supera los 30 l/s.

Los manantiales de las Cañameras en Vildé brotan a unos 19°C y se sitúan junto al Duero en el portillo de Gormaz. Se trata de unas fuentes de escaso caudal y que nacen también en el contacto entre las calizas cretácicas y el Mioceno arcilloso. También en Vildé se aprovecha el agua templada que surge de un pozo de investigación petrolera.

Aguas: Sulfatadas cálcicas (17°C).

Agradecimientos.

Queremos manifestar nuestro agradecimiento a los alcaldes y farmacéuticos titulares de la provincia de Soria que colaboraron en la encuesta sobre los manantiales minero-medicinales de sus demarcaciones, así como a D. Angel Sáenz Ojuel, quien participó en la preparación de la misma. Igualmente agradecemos al Dr. Jaime Cuevas, Profesor Asociado de la Universidad Autónoma de Madrid, su infatigable asesoramiento en cuestiones de hidroquímica.

DOCUMENTACION FOTOGRAFICA



Foto 1. Sondeo de reconocimiento surgente en Taniñe. (Proyecto Hidrogeológico de Soria. SGOP, 1990).
(Foto E.S.).



Foto 1 bis. Fuente pública de Ocenilla.

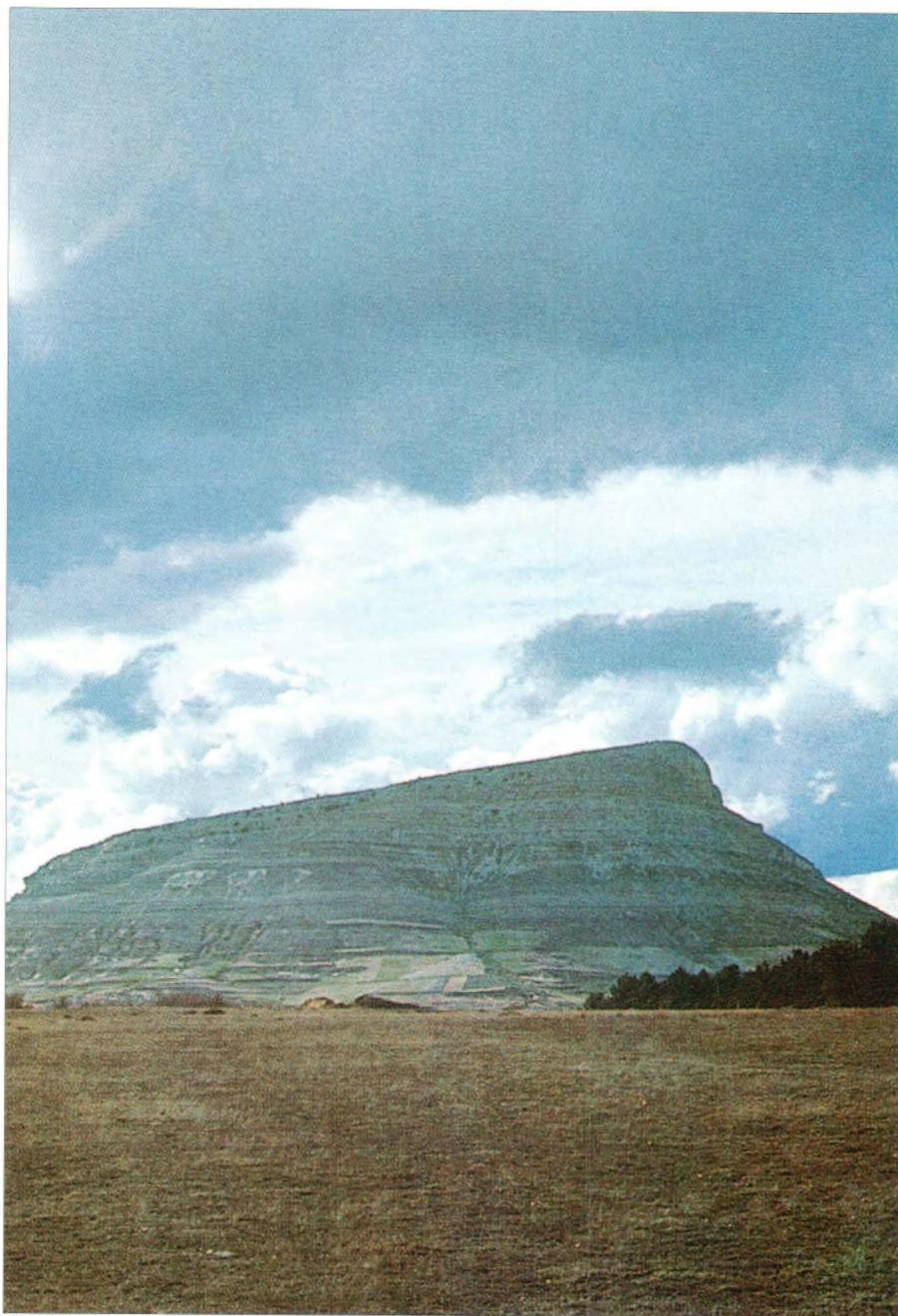


Foto 2 Vista de Pico-Frentes (Foto V.R.).



Foto 3. Sondeo de reconocimiento en Añavieja (Proyecto Hidrogeológico de Soria (SGOP, 1990). (Foto E.S.)



Foto 4. La mayor parte de los acuíferos de Soria están constituidos por rocas carbonatadas karstificables. Uno de los más importantes es el del río Lobos. En la foto, el Cañón del río Lobos y la Ermita de San Bartolomé. (Foto J.M.M.).



Foto 5. Vertido de fluoresceína en el sumidero del Apretadero, donde se pierde el río Lobos en estiaje. Este colorante verde surgió seis días después en el manadero de la Galiana, situado a 14 Km. del perdedero. (Foto E.S.).



Foto 6. Prueba de comunicación entre el río Navaleno y el Manantial de La Galiana. Obsérvese el remolino que delata la presencia de un sumidero en el lecho del río. El colorante tardó 10 días en recorrer subterráneamente el acuífero y salir en el manantial de La Galiana. (Foto R.S.).



Foto 7. El río Lobos durante una crecida en el invierno de 1995-1996 (Foto E.S.).



Foto 8. Sumidero del Chorrón, donde se pierde en una cueva un arroyo del término de Santa María de las Hoyas. El agua se tiñó de fluoresceína y surgió en el manantial de La Galiana 10 días después, recorriendo un trayecto de 10 km. (Foto E.S.).



Foto 9. Manantial de la Galiana, nacimiento del río Ucero. (Foto E.S.).



Foto 10. Vista del manantial de la Galiana desde el borde superior del Cañón, tras un período de lluvias intensas. Obsérvese el color marrón de las aguas turbias del manadero (proveniente del arrastre de las arcillas de la red de cuevas y galerías subterráneas) que contrastan con las más claras del río Lobos. (Foto E.S.).



Foto 11. Sima de la Hue Seca, en el término de Santa María de las Hoyas, de 10 m. de profundidad. (Foto E.S.).



Foto 12. La misma sima de la Hue Seca repleta de agua. Tras períodos de intensas lluvias el nivel freático asciende y brota por la boca de la sima un copioso caudal de agua que origina un arroyo. (Foto R.S.).



Foto 13. Tras fuertes lluvias nace un arroyo (también denominado Hue Seca) en la entrada de una cueva de 400 m. de longitud que habitualmente se encuentra seca. (Valdeavellano de Uceró) (Foto E.S.).



Foto 14. La Fuentona de Muriel u Ojo de Mar es un gran manadero de más de 1.000 l/s de caudal medio. (Foto E.S.).



Foto 15. Otra vista de la Fuentona de Muriel, uno de los parajes más bellos y pintorescos de Soria. (Foto E.S.).



Foto 16. Río de Muriel, proveniente de la Fuentona de Muriel. (Foto E.S.).

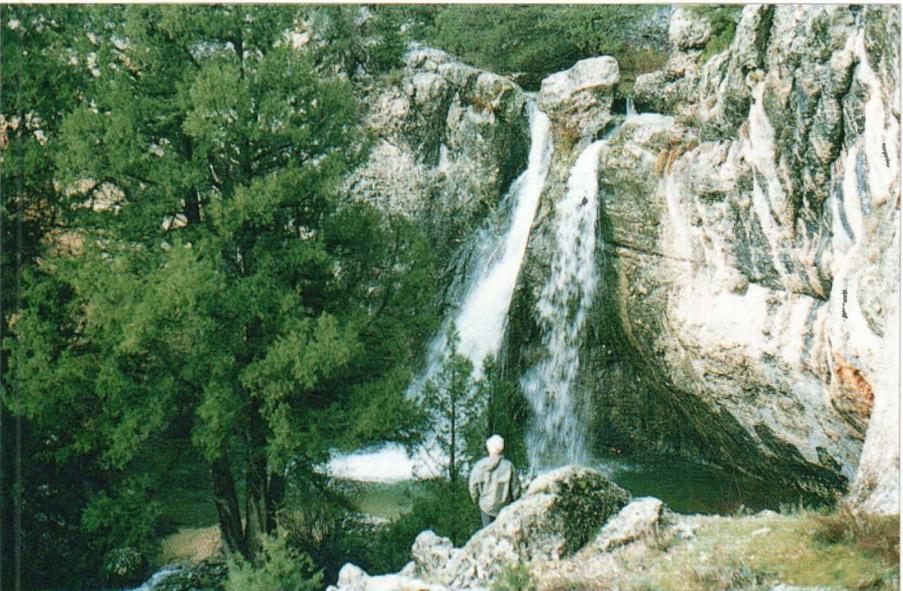


Foto 17. En períodos lluviosos el arroyo de Cabrejas no se filtra totalmente en el acuífero de la Fuentona y se precipita en rápidos y cascadas hasta confluir con el Arroyo de Muriel. (Foto E.S.).



Foto 18. Explorando el sifón de la Fuentona de Muriel. (Foto F.M.).



Foto 19. Cascada en el manantial de La 'Tbba. (Foto E.S.).



Foto 20. Manantial inferior de Cueva Pachón, nacimiento del río Mazos. (Foto E.S.).



Foto 21. Manantial superior de Cueva Pachón, normalmente seco (T^{ra} M^{da} de Villaciervos). (Foto E.S.).



Foto 22. Manantial del Batán, en Andaluz. (Foto E.S.).



Foto 23. Acidificación con ácido clorhídrico en el pozo de apoyo al abastecimiento de El Burgo de Osma. (Estudio Hidrogeológico de Soria SGOP, 1990). (Foto E.S.).

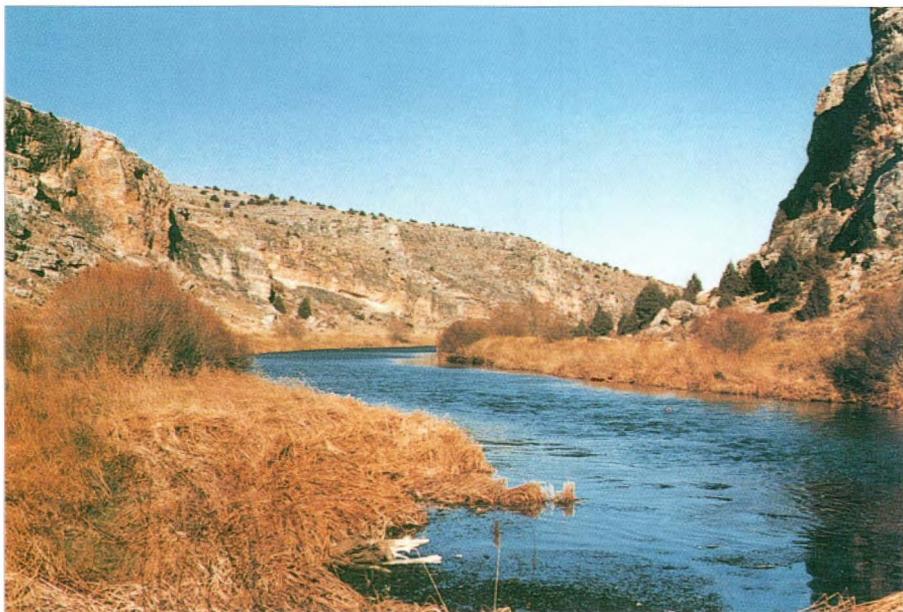


Foto 24. En el Estrecho de Gormaz, el río Duero recibe un gran aporte de origen subterráneo. (Foto J.P.).



Foto 25. Las Fuentes Grandes de Quintanas de Gormaz. (Foto E.S.).



Foto 26. Manantial de La Laguna (Gormaz). (Foto E.S.).



Foto 27. Los manantiales de San Luis, en Vildé. (Foto E.S.).



Foto 28. Ensayos de bombeo en los manantiales de Gormaz. (Foto E.S.).



Foto 29. Ensayos de bombeo en Gormaz, en los que se verificó las buenas perspectivas de regulación de los manantiales (Proyecto Hidrogeológico de Soria - (SGOP, 1990). (Foto E.S.).



Foto 30. Manantial de Vozmediano, con 1.500 l/s. Visita de los alumnos de la E. T. S. Ing. Cam., Madrid.



Foto 31. Salinas de Medinaceli donde se aprovechan los manantiales que surgen y lavan el Keuper.
(Foto E.S.).



Foto 32. Manantiales de Añavieja. (Foto E.S.).



Foto 33. Manantial del nacimiento del río Queiles en Vozmediano.



Foto 34. A pesar de el Embalse de la Cuerda del Pozo, los caudales del Duero están en gran parte sin regular. Crecido del Duero en Almazán en invierno de 1979. (Foto V.R.).

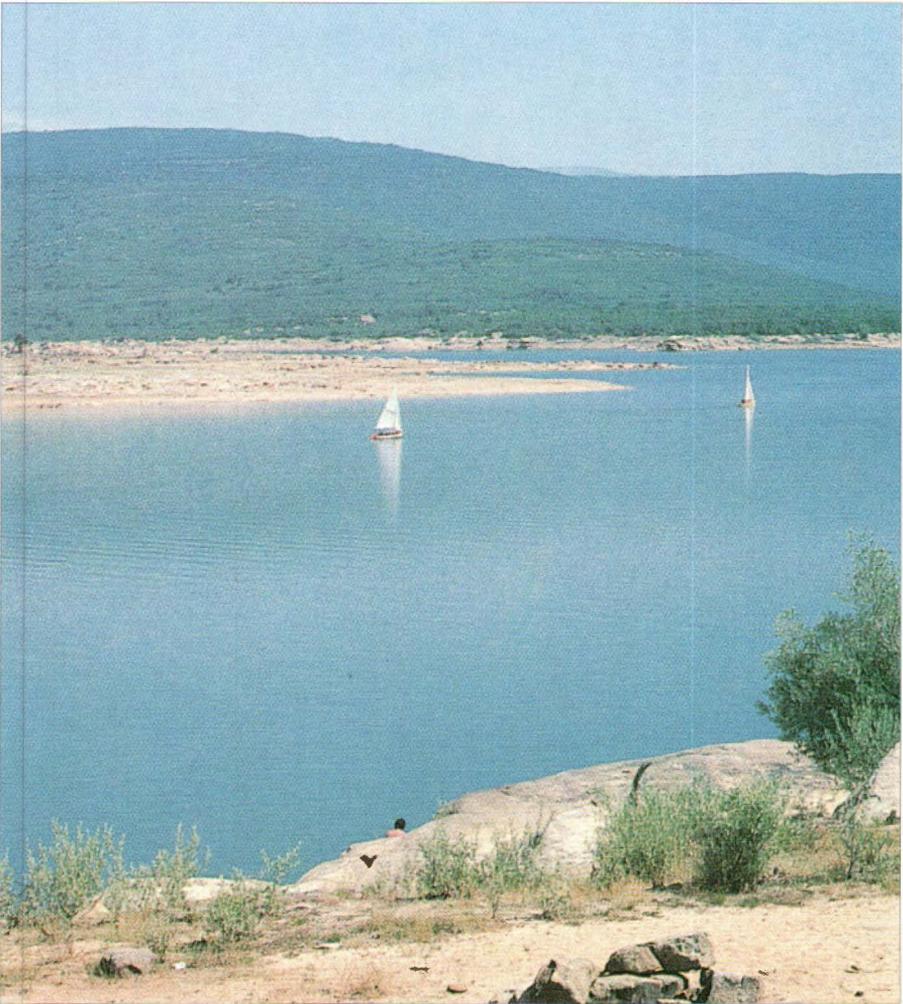


Foto 35. El Embalse de regulación de la Cuerda del Pozo de 200 hm³ de capacidad (Foto V.R.).



Foto 36. El Embalse de los Rábanos (Foto V.R.).



Foto 37. Crecida del río Razón en el Valle. (Foto J.P.).



Foto 38. Estación de aforos del río Linares en San Pedro Manrique. Se localiza en la Dehesa de este pueblo, donde hay surgencias de aguas subterráneas. (Foto E.S.)



Foto 39 Antiguo balneario de la Fuente sulfhídrica de El Salobral (Vinuesa)



Foto 40 Fuente sulfúrica de El Salobral (Vinuesa).

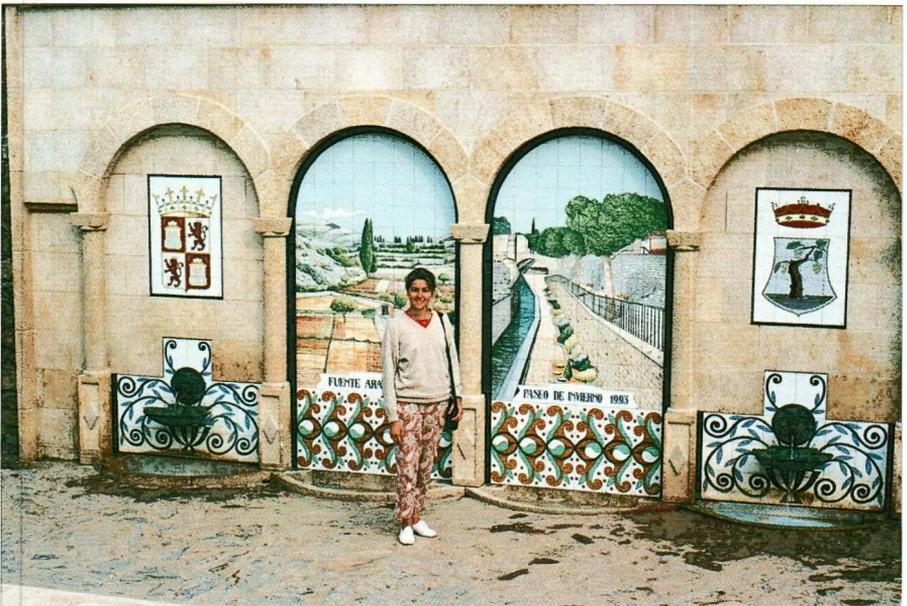


Foto 41 Fuente sulfurosa de Agreda, en el parque de la Dehesa (Agreda).



Foto 42 Detalle de la fuente sulfurosa de Agreda.

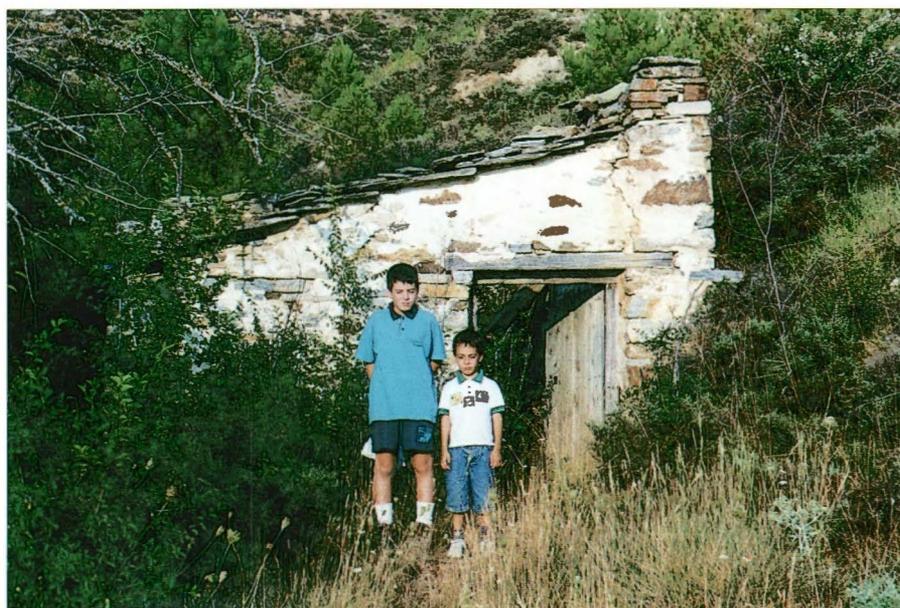


Foto 43 Caseta dentro de la cual se encuentra la fuente sulfhídrica de Ontálvaro (Aldealcardo-Yanguas).



Foto 44 Detalle de la fuente sulfhídrica de Ontálvaro (Aldealcardo-Yanguas).

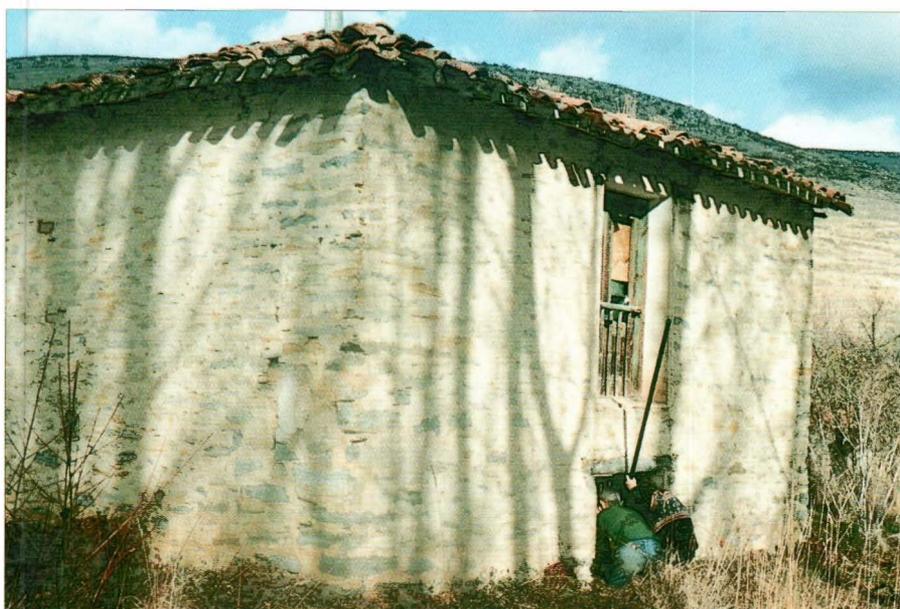


Foto 45 Casa donde se encuentra la Fuente del Agua (Yanguas).



Foto 46 Fuente sulfhídrica de Los Tiñosos (San Pedro Manrique).



Foto 47 Manantial sulfhídrico de Valdeprado.



Foto 48 Uno de los dos manantiales sulfhídricos de Villarijo.



Foto 48 bis. Uno de los dos manantiales ferruginosos de Villarajo.



Foto 49 Ermita de la Virgen de la Blanca, a la que se le tiene gran devoción en la comarca. En medio del campo de labor se encuentran unas zarzas y la fuente sulfhídrica de la Ermita (Suellacabras).



Foto 50 Detalle de la arqueta de piedra de la fuente sulfhídrica de la Ermita (Suellacabras).



Foto 51 Desagüe de la Fuente sulfhídrica de los Baños en el río Jalón (Esteras de Medinaceli).

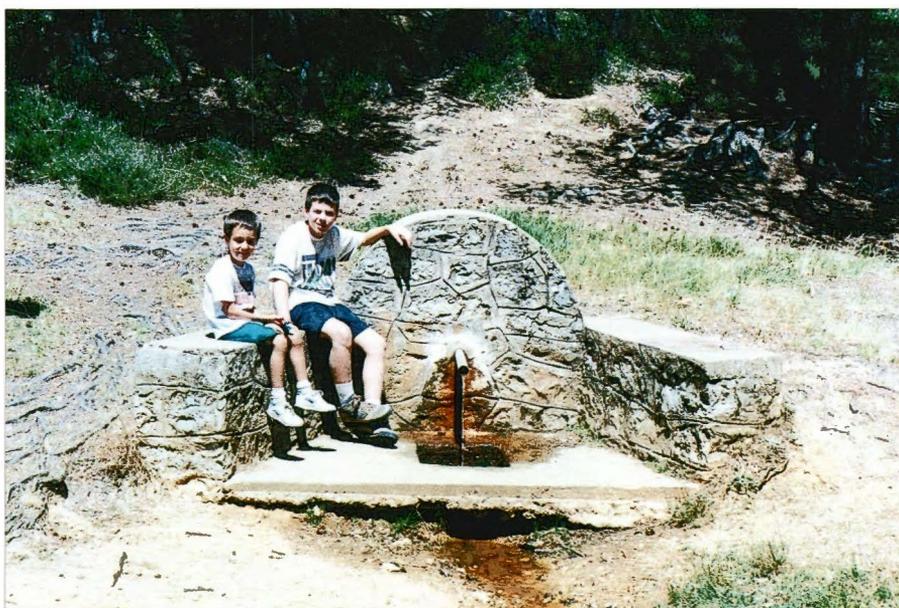


Foto 52 Manantial ferruginoso de Robellano (Navaleno).



Foto 53 Lugar donde frota el rezume ferruginoso llamado Fuente del Hierro (Vinuesa).



Foto 54 Rezumes ferruginosos en Valdeprado.



Foto 55 Fuente ferruginosa de Golmayo.



Foto 56 Manantial termal de Agadir (Deza).



Foto 57 Manantial termal de Fuencaliente del Burgo. (Fuente de la Ermita).



Foto 58 Manantial termal de Rejas de Ucero.

ÍNDICE DE TABLAS

PARTE PRIMERA

- Tabla 1. Precipitaciones medias estacionales en la provincia de Soria (en mm).
- Tabla 2. Precipitación media anual en los acuíferos de Soria.
- Tabla 3. Procedencia y naturaleza del inventario de puntos de agua.
- Tabla 4. Pozos experimentales del SGOP (1990) en el área de Gormaz. Características técnicas.
- Tabla 5. Pozos experimentales del SGOP (1990) en el área de Gormaz. Resumen de los ensayos de bombeo.
- Tabla 6. Recursos de las unidades hidrogeológicas de la provincia de Soria.
- Tabla 7. Aportaciones de los ríos sorianos.
- Tabla 8. Relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas.
- Tabla 9. Características hidrológicas más importantes de los ríos sorianos.
- Tabla 10. Curvas de agotamiento del río Añamaza en Dévanos.
- Tabla 11. Aforos puntuales en el manantial de Aranda de Moncayo (Zaragoza).
- Tabla 12. Curvas de agotamiento del río Henar en Embid de Ariza (Zaragoza).
- Tabla 13. Curvas de agotamiento del río Jalón en Cetina de Aragón (Zaragoza).
- Tabla 14. Depuración de aguas residuales.
- Tabla 15. Resultados uso del agua.

PARTE SEGUNDA

Tabla 11.1. Principales manantiales termales de la Península Ibérica con caudal mayor de 10 l/s y temperatura mayor de 30°C.

Tabla 11.2. Valores de caudal y temperatura de los manantiales del Acuífero de Alhama.

Tabla 11.3. Valores de isótopo ambientales.

Tabla 11.4. Composición química de las aguas de manantiales del Acuífero de Alhama.

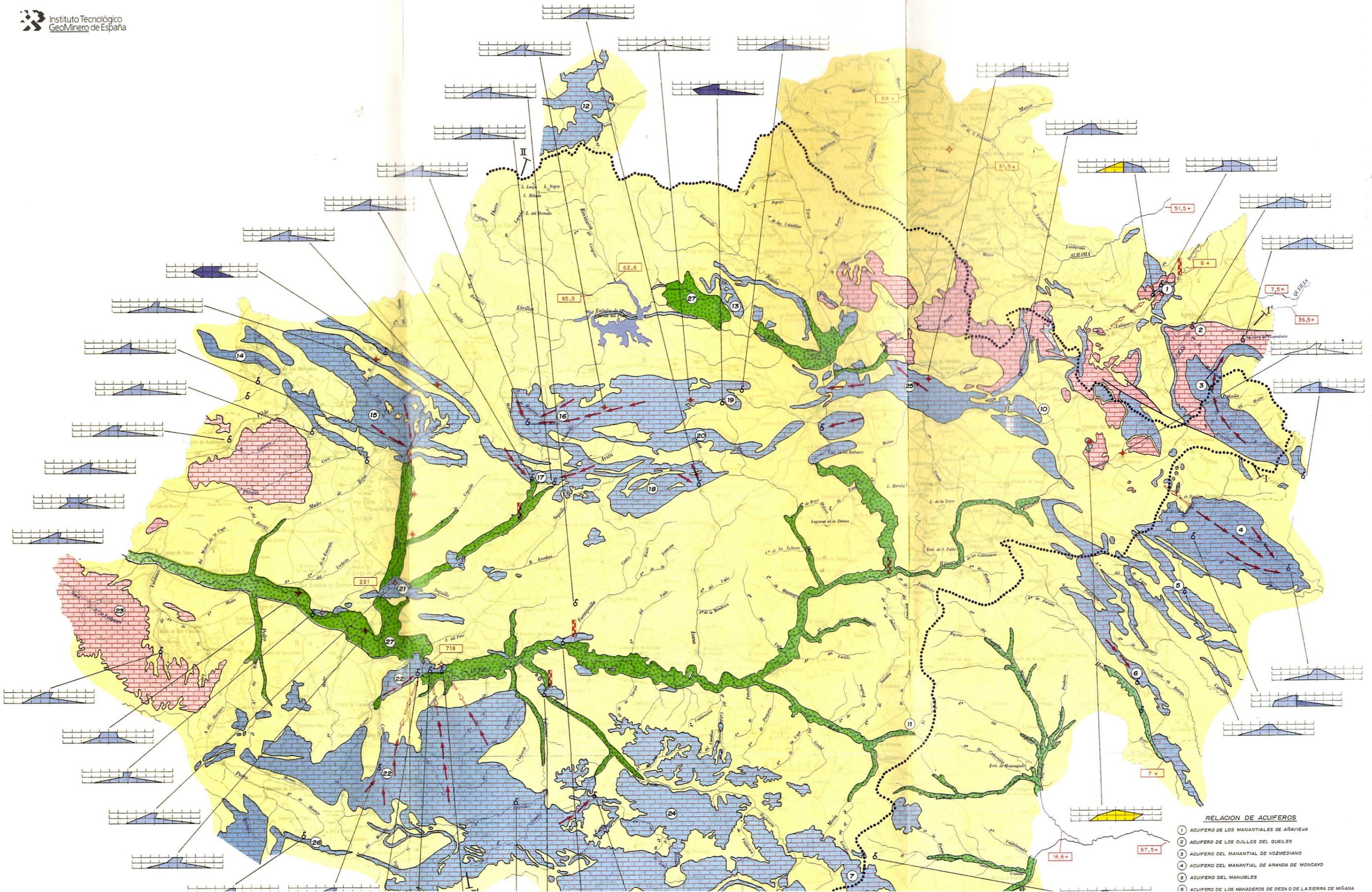
Tabla 11.5. Composición química de la precipitación en áreas continentales sin contaminación atmosférica. Basado en análisis recopilados por Freeze y Cherry (1979) y Verry (1983).

Tabla 12.1. Parámetros físico-químicos, caudal y error en el balance de los análisis estudiados.

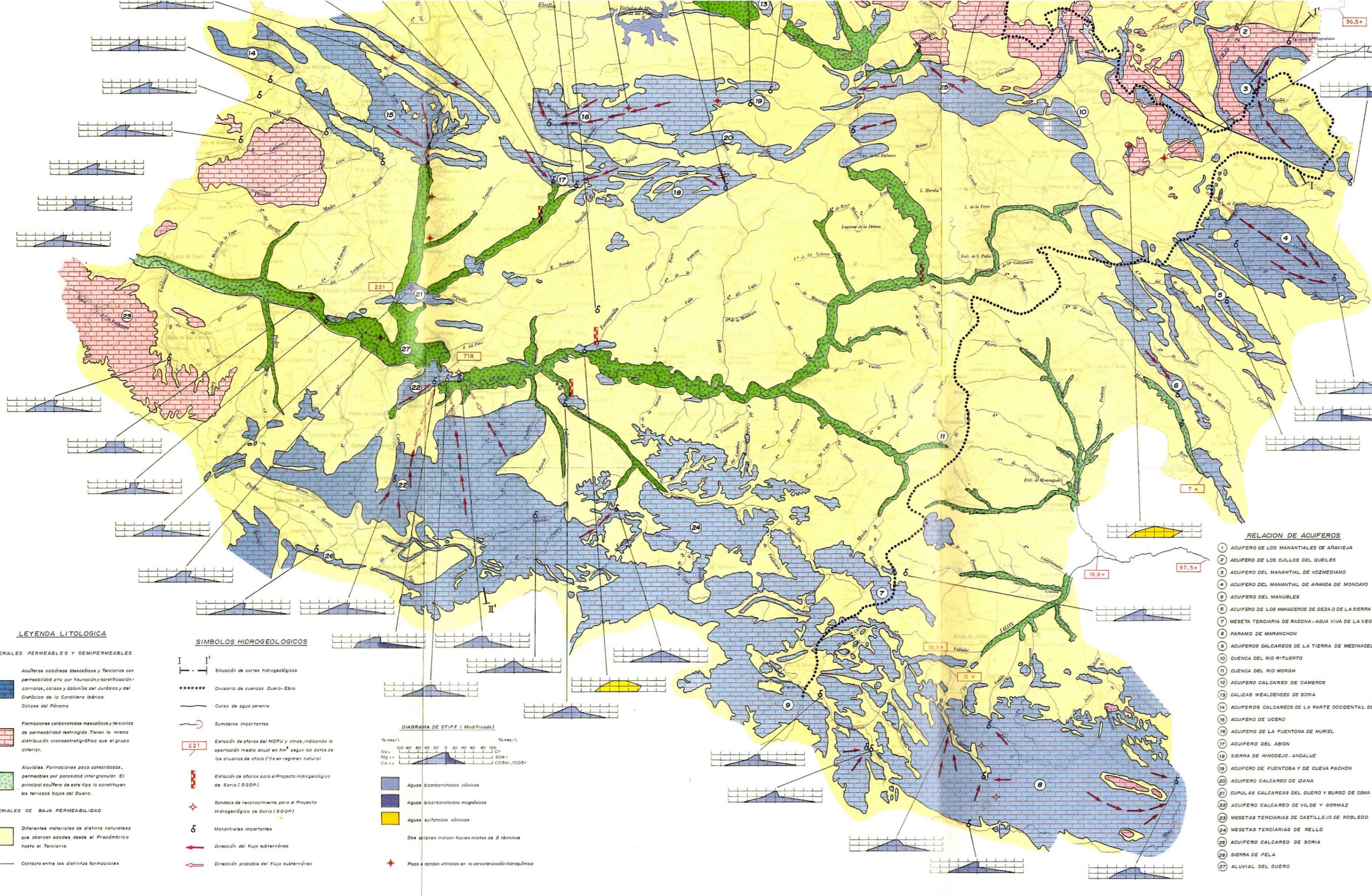
Tabla 12.2. Resultados de los análisis químicos (valores en ppm).
nd: no determinado.

Tabla 12.3. Relación de manantiales con mayor temperatura de la provincia de Soria.

MAPA HIDROGEOLOGICO DE SORIA



- RELACION DE ACUIFEROS**
- 1 ACUIFERO DE LOS MANANTIALES DE ARAVIEJA
 - 2 ACUIFERO DE LOS OJILLOS DEL QUEILES
 - 3 ACUIFERO DEL MANANTIAL DE VOZMEDIANO
 - 4 ACUIFERO DEL MANANTIAL DE ARANDA DE MONCAYO
 - 5 ACUIFERO DEL MANUBLES
 - 6 ACUIFERO DE LOS MANADEROS DE DEZA O DE LA SIERRA DE MIÑANA



RELACION DE ACUIFeros

- 1 ACUIFERO DE LOS MANANTIALES DE ARABIEJA
- 2 ACUIFERO DE LOS CUILLOS DEL QUEILES
- 3 ACUIFERO DEL MANANTIAL DE VOZMEDIANO
- 4 ACUIFERO DEL MANANTIAL DE ARANDA DE MONCAYO
- 5 ACUIFERO DEL MANUBLES
- 6 ACUIFERO DE LOS MANADEROS DE ZEZA O DE LA SIERRA DE...
- 7 MESETA TERCIARIA DE RADONA - AGUA VIVA DE LA VEGA
- 8 PARAMO DE MARANCHON
- 9 ACUIFEROS CALCAREOS DE LA TIERRA DE MEDINACELI
- 10 CUENCA DEL RIO RITUERTO
- 11 CUENCA DEL RIO MORON
- 12 ACUIFERO CALCAREO DE CAMEROS
- 13 CALIZAS WEALDENSES DE SORIA
- 14 ACUIFEROS CALCAREOS DE LA PARTE OCCIDENTAL DE SC
- 15 ACUIFERO DE UGERO
- 16 ACUIFERO DE LA FUENTONA DE MURIEL
- 17 ACUIFERO DEL ABION
- 18 SIERRA DE HINDEJO - ANDALUZ
- 19 ACUIFERO DE FUENTOSA Y DE CUEVA PACHON
- 20 ACUIFERO CALCAREO DE IZANA
- 21 CUPULAS CALCAREAS DEL DUERO Y BURGO DE OSM
- 22 ACUIFERO CALCAREO DE VILDE Y GORMAZ
- 23 MESETAS TERCARIAS DE CASTILLEJO DE ROBLEDO
- 24 MESETAS TERCARIAS DE RELLO
- 25 ACUIFERO CALCAREO DE SORIA
- 26 SIERRA DE PELA
- 27 ALUVIAL DEL DUERO

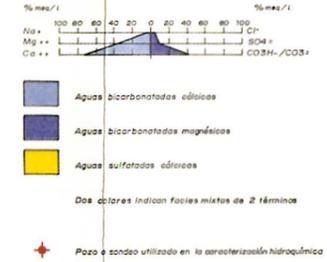
LEYENDA LITOLÓGICA

- MATERIALES PERMEABLES Y SEMIPERMEABLES**
- Acuíferos calcáreos Mesozoicos y Terciarios con permeabilidad alta por fisuración y karstificación: conchales, calizas y dolomitas del Jurásico y del Cretácico de la Cordillera Ibérica. Calizas del Páramo.
 - Formaciones carbonatadas mesozoicas y terciarias de permeabilidad restringida. Tienen la misma distribución cronogeográfica que el grupo anterior.
 - Aluviales. Formaciones poco consolidadas, permeables por porosidad intergranular. El principal acuífero de este tipo lo constituyen las terrazas bajas del Duero.
- MATERIALES DE BAJA PERMEABILIDAD**
- Diferentes materiales de distinta naturaleza que abarcan edades desde el Precámbrico hasta el Terciario.
 - Contacto entre las distintas formaciones

SÍMBOLOS HIDROGEOLÓGICOS

- I - I' Situación de cortes hidrogeológicos
- Divisorio de cuencas Duero-Ebro
- Curso de agua perenne
- Sumideros importantes
- 221 Estación de aforos del MOPU y otras, indicando la aportación media anual en hm³ según los datos de los anuarios de aforos (*) o en régimen natural
- Estación de aforos para el Proyecto Hidrogeológico de Soria (SGOP)
- Sondeos de reconocimiento para el Proyecto Hidrogeológico de Soria (SGOP)
- 6 Manantiales importantes
- Dirección del flujo subterráneo
- ↔ Dirección probable del flujo subterráneo

DIAGRAMA DE STIFF (Modificado)



CORTE I - I'



CORTE II - II'



