

Descripción hidrogeológica y balance hídrico de la cuenca alta del río Foix, Cataluña, España

Enrique Portugal Marín

Instituto de Investigaciones Eléctricas, México

Juan Antonio Hernández

Centro Internacional de Hidrología Subterránea, España

Georgina Izquierdo

Instituto de Investigaciones Eléctricas, México

La cuenca alta del río Foix, en Cataluña, España, es una zona poco conocida desde el punto de vista hidrológico, dada la inexistencia de redes de control piezométrico y de calidad. Se caracteriza por una precipitación y temperatura medias anuales de 516 mm y 15°C, respectivamente. Existen dos conjuntos de formaciones explotadas en su mayoría: unas formadas por materiales acuitados y acuicludos (margas y arcillas), que engloban tramos arenosos productores, y otras formadas por acuíferos mesozoicos carbonatados que afloran en el interior de la depresión, formando pequeños horst, según la evolución tectónica de la zona. En estas últimas estructuras es donde se ubican las principales captaciones y se localiza la explotación, que induce a un incremento de los aportes subterráneos de los relieves próximos. La mayor parte de la extracción está destinada a cubrir las necesidades de abastecimiento urbano de la comarca. La infiltración profunda media calculada para 23 años hidrológicos completos en la formación margas-arenas es de 21 mm, obteniéndose unos recursos medios para esta serie de años del orden de 1.6 hm³/año. Mientras que para la estructura de Pac's presenta escasez de recursos del orden de -0.6 hectómetro cúbico por año.

Palabras clave: hidrogeología, explotación de acuíferos, demanda de agua, balance hídrico, río Foix, agua subterránea.

Introducción

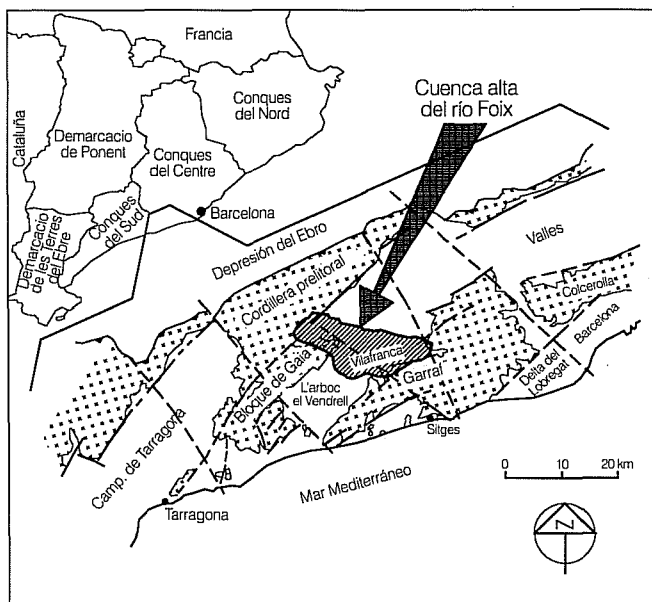
La cuenca alta del río Foix se encuentra dentro de la comunidad autónoma del río del mismo nombre, en Cataluña, al oeste de la ciudad de Barcelona, España, a 41° 20' 40" de latitud y 91° 41' 40" de longitud. La zona de estudio limita al sur por el macizo de Garraf y la autopista del Mediterráneo; al este con la cuenca d'Anoia, donde se ubica la población San Sadurní d'Anoia, y al norte y al oeste con la cordillera prelitoral (ilustración 1).

Los límites de la cuenca se establecieron con base en la divisoria de aguas superficiales, con lo cual quedaron insertos los municipios de Vilafranca, Olérdola, Las Cabañas, Pac's, Santa Margarida, Els Monjos, La Granada, San Cugat Sesgarriques, Font-Rubí, San Mar-

tín Sarroca, Torrelles de Foix, Avinyonet y Pontons. Además, se incluyó la cabecera de la riera de Vilafranca con el área correspondiente a la depresión del Penedés, alcanzando una superficie total aproximada de 250 kilómetros cuadrados.

Básicamente, el agua de la zona se suministra a una población urbana aproximada de 49 mil habitantes. El aporte proviene de captaciones, excepto en las poblaciones Pontons y Torrelles, las cuales se abastecen con la descarga de manantiales. En la actualidad no existe propiamente déficit de agua. Sin embargo, se prevé un crecimiento anual de población de 2% y un crecimiento industrial que puede ser cubierto sin problemas (AAV, 1996). El cuadro 1 muestra las principales fuentes de abastecimiento con el volumen anual de extracción.

Ilustración 1. Localización geográfica de la zona de estudio y situación geológica.



Diversos estudios hidrogeológicos realizados en la depresión del Penedés incluyen la cuenca alta de río Foix. Estos trabajos han permitido establecer los fundamentos del funcionamiento hidrogeológico de la zona (REPO, 1970; MOPU, 1985, y Alfonso *et al.*, 1995). Otras contribuciones son las de Cattaneo y Alom (1980), y Leao y Pereira (1982) en trabajos realizados en el Alt Penedés y los alrededores de Vilafranca, así como por la Junta de Agua en zonas puntuales del área. Además, hay estudios sobre abastecimiento municipal efectuados, por lo general, por la Junta de Agua, según las necesidades de los municipios. La zona de estudio se caracteriza por la importante producción de vid, la cual representa el principal cultivo de la población para la producción de vino y cava. La apertura del mercado ha ocasionado un incremento de las actividades industriales, generando una economía importante en la región.

El objetivo de este trabajo es realizar un balance hídrico en la formación de margas y arcillas con arenas (arenas-margas del Penedés) y en la estructura prelitoral de Pac's relacionada con la anterior, con la finalidad de mejorar el conocimiento de la relación existente entre estas unidades.

Síntesis geológica

La información geológica de la zona es escasa debido a la falta de pozos de sondeo, no obstante, fue obtenida de MOPU (1985) y de los mapas geológicos 1/50000 del IGME (IGME, 1972a; 1972b).

La depresión del Penedés forma parte de una gran fosa tectónica conocida como Vallés-Penedés con dirección noreste-suroeste y limitada por las cordilleras litoral y prelitoral. Esta estructura está rellena con materiales fundamentalmente miocénicos, depositados sobre elementos mesozoicos aflorantes en las cordilleras y en dos pequeñas estructuras (Pac's y Vilobí), que emergen del interior de la depresión, formando pequeños *horts*, los cuales debieron actuar como altos fondos en la evolución de la cuenca miocena. La estructura Vilobí, muy próxima a los afloramientos prelitorales, representa una estribación de éstos hacia el interior de la depresión, individualizando la subcuenca de Torrelles. De acuerdo con Alfonso *et al.* (1985), la zona de estudio la constituyen las siguientes formaciones:

Formaciones mesozoicas

El Triásico aflora al norte del área, en la cordillera prelitoral. Está representado por el Muschelkalk inferior y superior, conformados por dolomías y calizas dolomíticas, con un espesor para cada uno de ellos en un rango que va de 70 a 100 m. Además, existe afloramiento de Keuper, formado por arcillas dolomíticas, dolomías y margas con yesos, con un espesor entre 50 y 60 m. El Jurásico, aflorante en la cordillera prelitoral, está formado casi en su totalidad por dolomías masivas negras. El Cretácico aflora en el bloque de Gaia y del Garraf; está representado por calizas, margas biocalcarenítas y dolomías, con edades comprendidas desde el Valanginiense hasta el Albiense.

Formaciones miopliocenas

Conglomerados, arcillas y yesos: los primeros materiales depositados en la cuenca incipiente representan la formación de base miocena. Llegan a espesores máximos de 30 metros.

Formación calcarenítica arrecifal: representadas en el borde de Garraf y en los bloques de Pac's y Vilobí. Alcanzan espesores de 40 y 60 m y cambian lateralmente a facies margosas miocénicas.

Formación arcillo-margosa con arenas y limos: es la más representativa de la zona. En realidad puede hablarse de dos formaciones: la primera, margosa, con algunos niveles arenosos, y la segunda, sobreyacente a la anterior, de carácter más terrígeno con mayor contenido de arcillas y tramos arenosos, en particular, fuera de la zona de estudio (lo que da lugar a las arenas de Santa Oliva). Para simplificar se considera todo como una sola formación, con espesor variable, alcan-

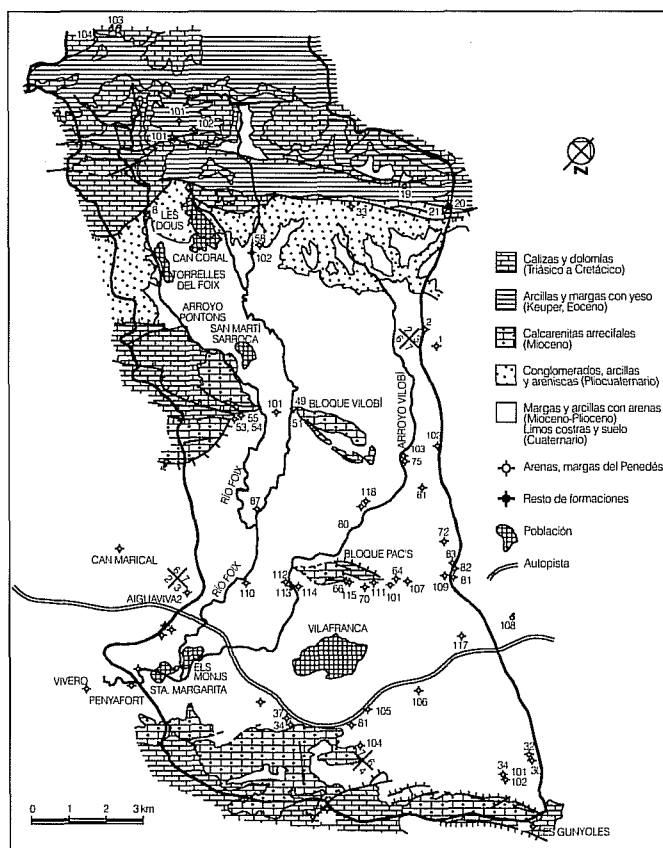
Cuadro 1. Relación de captaciones ubicadas en la zona de estudio.

Fecha	Sitio	Toponimia	Naturaleza	Formación geológica	Profundidad (m)	Caudal (L/s)	Vol. extr. (m³/año)	Uso
180596	2-019	Font d-L'avella	3	Prelitoral (Musk)		1		FR,R
200596	2-020	Ftes de Font-Rubí	10	Prelitoral (Jur.-Cret.)	25	5	10,000	AB
200596	2-021	Ftes de Font-Rubí	1	Prelitoral (Jur.-Cret.)	148	10	85,000	AB
200596	2-033	Can Suyes	1	Prelitoral (Jur.-Cret.)	245	4	40,000	AB
180596	3-001		1	Arenas margas del Penedés	70	5.5		DO,G
180596	3-002	Cal Rovieta	1	Arenas margas del Penedés	115	1		DO
10396	5-006	Los Dous	3	Prelitoral jurásico			130,000	AB
220496	6-049	Trens	1	Arenas margas del Penedés	100		200,000	AB
140596	6-051	Can Sogas	1	Arenas margas del Penedés	100		250,000	AB
220496	6-053	Propenfort2	1	Prelitoral	217		325,000	AB
140596	6-054	Propenfort1	1	Prelitoral	217		275,000	AB
140596	6-055		1	Prelitoral	220		200,000	AB
200596	6-057	Can Lleo	9	Arenas margas del Penedés	100		10,000	AB
210596	6-101	Roda de Milans	1	Prelitoral	495		300,000	AB
60696	6-059	Cal Via	1	Arenas margas del Penedés	160	3.8	3,000	G
150596	7-062	Pinar-pozo 1	1	Arenas margas del Penedés	100	3.8	12,000	AB
150596	7-063	Pinar-pozo 3	1	Arenas margas del Penedés	115	3.8	12,000	AB
220496	7-064	Cal Andraix	9	Prelitoral (Bloque Pac's)	260		25,000	AB
220496	7-066		1	Prelitoral (Bloque Pac's)	240	14	700,000	AB
220496	7-070	Pou Cristalera	1	Prelitoral (Bloque Pac's)	250	16.6	550,000	AB
220496	7-072	Els Pujols	1	Arenas margas del Penedés	75		25,000	AB
220496	7-101	La Torreta	1	Prelitoral (Bloque Pac's)	105		<7,000.00	DO
300496	7-103		3	Cuaternalio		0.1		FP
200596	7-104	Mas Rabassa	1	Macizo Garraf?	200	1.4	500	DO
100596	7-105	Sta. M. Huertos	1	Arenas margas del Penedés	120	0.15		DO
150596	7-106		3	Cuaternalio	4	1		AG
150596	7-107	Torreta	1	Prelitoral (Bloque Pac's)	270	5.5	86,200	AB
140596	7-110	La Bleda	8	Aluvial Foix	18		70,000	AB
220496	7-111	Casal-2000	1	Prelitoral (Bloque Pac's)	235	23.6	200,000	AB
220496	7-112	Pou 1-Pac's	1	Prelitoral (Bloque Pac's)	265	7	250,000	AB
220496	7-113		8	Aluvial cuaternalio	11	6.4	50,000	AB
220496	7-114	Pou 2-Pac's	1	Prelitoral (Bloque Pac's)	370	8.7	150,000	AB
160596	8-030	Pou Nou	1	Arenas margas del Penedés	150		50,000	AB
160596	8-034	Els Puig	1	Arenas margas del Penedés	170		22,500	AB
200596	3-034		9	Arenas margas del Penedés				
220496	3-035	Pou Moja	1	Garraf	230	11	250,000	AB
60696	3-102	P.I. Casanova P-4	1	Arenas margas del Penedés	90	1.2	130,000	AB
220496	4-101	Sant Miguel	1	Garraf	280	8.3	60,000	AB

Naturaleza: 1. Sondeo; 3 Manantial; 4 Pozo abierto; 8 Pozo abierto con galería; 9 Pozo abierto con sondeo; 10 Pozo con galería y sondeo.

Uso: AB abastecimiento urbano; DO doméstico; G galería; AG agricultura; FP fuente pública.

Ilustración 2. Mapa hidrogeológico de la zona de estudio que indica la localización de las captaciones de agua, así como las principales estructuras.



zando el máximo en el borde norte de la depresión, con espesores próximos a 300 m y decreciendo a la estructura de Vilobí, Pac's y el macizo de Garraf.

Conglomerados del Plioceno: afloran en especial en la zona norte y se asocian, en particular, con los escarpes de falla. Están formados por conglomerados, arcillas y areniscas depositadas en ambientes fluviotorrenciales y lagunares. Pueden llegar a espesores de 100 metros.

Formación cuaternaria: representada por costras, limos y suelos, así como por depósitos coluviales y aluviales de las rieras (ilustración 2).

Hidrología superficial

La cuenca del río Foix incluida en la zona de estudio comprende alrededor de 200 km² divididos en las subcuencas de los arroyos de Pontons, Vilobí y el Foix, propiamente dicho (ilustración 2). La más abundante

de todas es la riera de Pontons, al recibir los aportes del manantial Les Dous, con caudales invernales de 15 a 25 l/s (muy variables tras las lluvias y sin contar la derivación para el abastecimiento del municipio de Torrelles). Además, a este arroyo llegan también las copiosas aportaciones de los manantiales de Pontons, que si bien en verano se derivan por entero para el abastecimiento del citado municipio, en invierno tienen un caudal sobrante en conjunto de 6 a 10 litros por segundo.

Los otros dos arroyos tienen un caudal reducido (5 a 10 l/s), llegando a quedar completamente secos en periodo estival y con fuertes incrementos después de lluvias intensas. Todos ellos, al disponer de un elevado grado de humedad, presentan abundante vegetación de bosque de ribera. El río Foix incrementa su caudal aguas abajo con la confluencia del arroyo Pontons, en especial a su salida de la zona estudiada, donde recibe los aportes de la estación depuradora comarcal de Vilafranca (11 m³/día, según datos de AAV, 1996).

Cuantificar el conjunto de aportes de estos arroyos no es fácil, ya que se cuenta sólo con los datos foronómicos de la estación del embalse del Foix. Este embalse recoge los aportes del resto de subcuencas aguas abajo de la zona de estudio, así como los vertidos de diversas poblaciones y de la estación depuradora citada anteriormente. Además de los arroyos ya mencionados, la zona incluye también la cabecera del arroyo intermitente de Vilafranca (incluida en la depresión del Penedés) hasta su penetración en el macizo de Garraf. Ocupa una extensión aproximada de 50 km² y presenta caudales muy reducidos (< 5 l/s), permaneciendo casi seco buena parte del año.

Escenario hidrogeológico

Unidades acuíferas

Dentro del conjunto de formaciones geológicas se pueden distinguir acuíferos y acuitados con comportamiento hidrogeológico diferenciado (MOPU, 1985; Alfonso *et al.*, 1995):

Dolomitas de la formación Muschelkalk: se observa permeabilidad originada por fisura, fracturación, disolución y procesos de desdolomitización. El superior queda como horizonte colgado.

Dolomías y calizas-margas: tienen un grosor máximo cercano a 500 m y funcionan como un acuífero único o dando lugar a acuíferos colgados de menor entidad, lo cual resulta del grosor del tramo margoso. En este

estudio se le considera en particular en los bloques de Pac's y Vilobí, en relación con su formación margoso arenosa miopliocena.

Calcarenitas arrecifales: se localizan en los bordes del Garraf y Gaia, y en la parte superior de los bloques de Pac's y Vilobí. Hay muy pocos datos sobre esta formación en el área estudiada, dando niveles colgados, especialmente en los situados en el macizo de Garraf (MOPU, 1985).

Margas y arcillas con arenas (formación arenas-margas del Penedés): junto a los bloques prelitorales de Pac's y Vilobí es la formación particularmente estudiada en este trabajo. Los tramos acuíferos están formados por los lentejones de arenas intercalados en los tramos margosos y arcillosos a modo de acuífero multicapa. A gran escala, la formación actúa como un acuitardo con notables variaciones de sus parámetros hidráulicos en función de la cantidad de materiales detríticos más gruesos. En la subcuenca situada al norte de la estructura de Vilobí parecen menos representados los niveles arenosos, según los escasos datos geológicos disponibles y ante la menor presencia

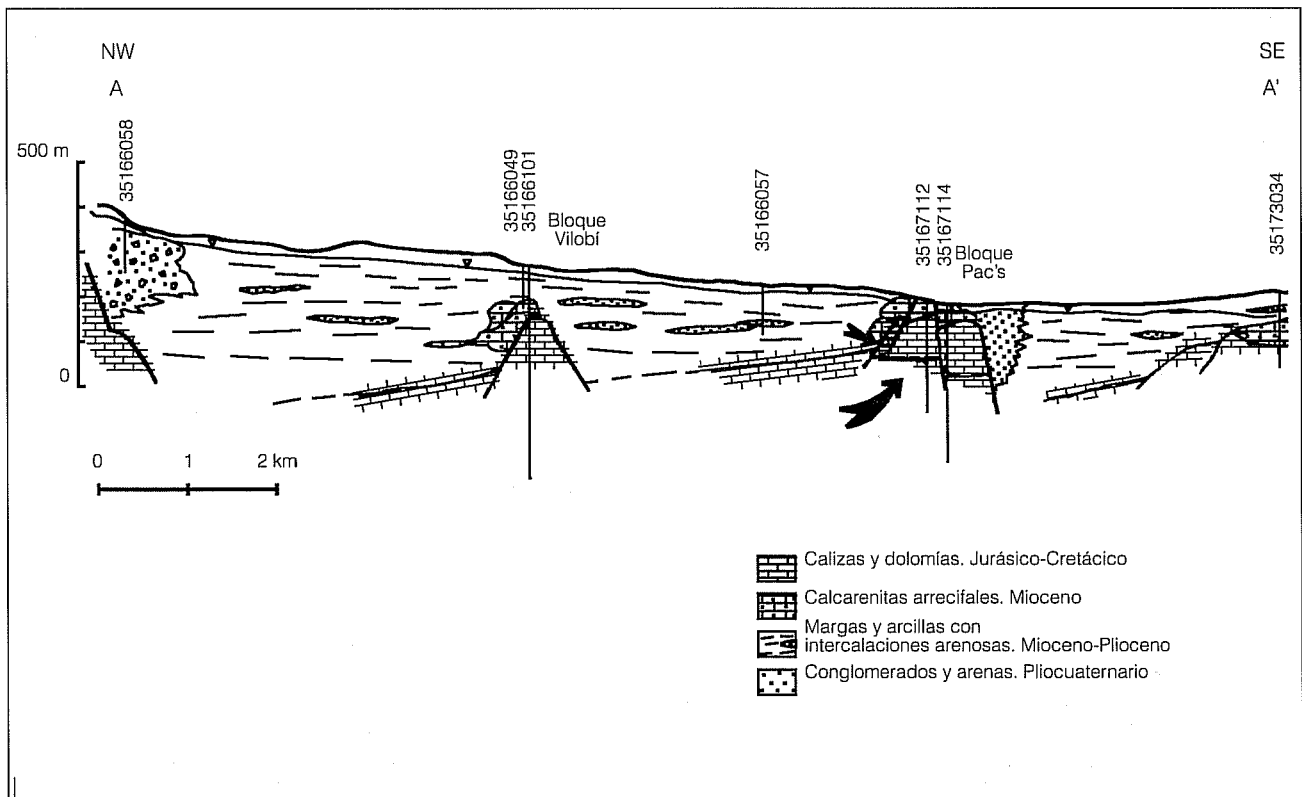
de captaciones de agua. No obstante, ante la falta de datos litológicos no se puede verificar este hecho.

Conglomerados y areniscas pliocenas: intercalados con la formación arcillosa de colmatación de la cuenca, pueden presentar interés local como formación acuífera. Se dispone de muy pocos datos referentes a su comportamiento hidráulico y no se localizó ningún punto en el inventario incluido en dicha formación.

Depósitos cuaternarios (gravas, conglomerados, arcillas, costras y suelos): los suelos y conglomerados de matriz arcillosa (pie de monte) pueden considerarse con un comportamiento hidrogeológico similar a la formación margoso-arenosa. Las gravas que forman parte de los aluviones de los arroyos, si bien presentan un escaso desarrollo, pueden tener un mayor interés local como acuífero.

La ilustración 2 presenta un mapa simplificado de la geología de la zona de estudio y la ubicación de las principales captaciones de agua, mientras que la ilustración 3 muestra un corte geológico simplificado en dirección noroeste-sureste, con el objeto de esclarecer esquemáticamente las principales estructuras del área.

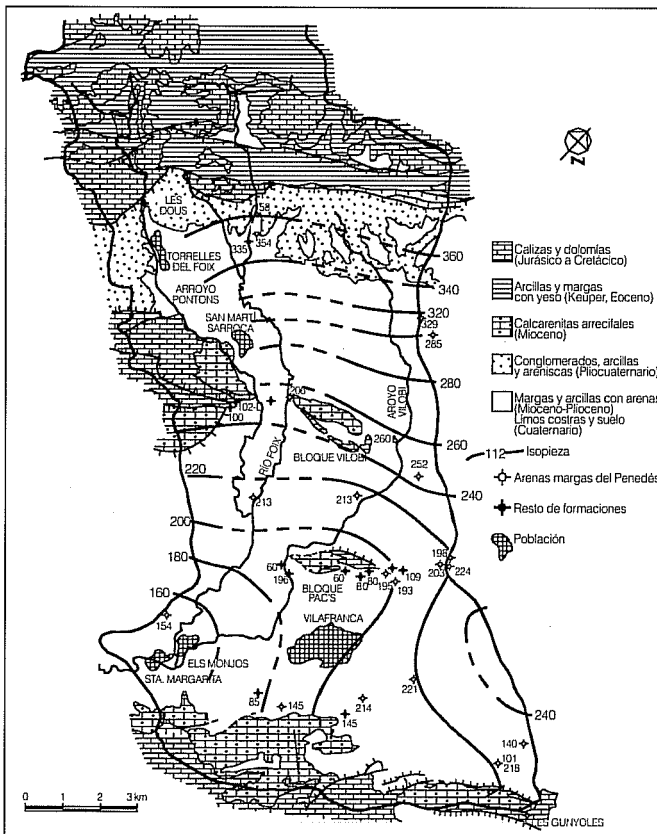
Ilustración 3. Corte geológico simplificado.



Piezometría

En la zona de estudio no existe una red piezométrica conformada para llevar a cabo mediciones del nivel estático, por tal motivo, la elaboración de la piezometría que se presenta aquí se desarrolló a partir de mediciones realizadas en 47 captaciones tanto de abastecimiento público como de pozos domésticos. En algunos puntos se considera que los niveles tuvieron la influencia de efectos dinámicos ocasionados por el bombeo de pozos próximos, sobre lo cual no fue posible tener control. En estos casos, esos datos no se consideraron en la elaboración de la piezometría. Los puntos de medición están distribuidos de manera irregular en el conjunto de formaciones. En la ilustración 4 se presenta la piezometría obtenida para la zona de estudio. Para la formación margoso-arenosa del Penedés se puede apreciar que las cotas de agua más elevadas se dan en el borde norte de la depresión (llegando a más de 360 metros sobre el nivel del mar), hasta descender a menos de 160 m de cota piezométrica en el borde suroeste, donde se observa la zona

Ilustración 4. Configuración de las isolíneas de nivel estático (piezometría) para la zona de estudio.



de drenaje del área de estudio. Los gradientes obtenidos son del orden de 0.02, siendo algo más elevados en la mitad norte y más reducidos en la mitad sur. Por otra parte, se contó con datos piezométricos referidos a las estructuras prelitorales de Pac's y Vilobí, con niveles claramente diferenciados de los anteriores, con cotas sensiblemente inferiores (más de 100 m de diferencia, ver ilustración 3) y relacionados con toda probabilidad con los niveles regionales de la estribación oriental del macizo de Gaia. La ausencia de piezómetros en la formaciones carbonatadas infrayacentes en el interior de la depresión impide demostrar dicho comportamiento.

Funcionamiento hidráulico

La principal recarga producida en la formación de margas y arcillas con arenas se debe a la infiltración del agua de lluvia, mientras que la descarga se da principalmente por bombeos. No se descarta la posibilidad de un drenaje hacia las estructuras de Pac's y Vilobí, donde los niveles se encuentran muy por debajo de los de formación margosa y están favorecidos por la diferencia de permeabilidad entre ambos tipos de formaciones. Dado que los niveles en las arenas-margas del Penedés se encuentran por debajo de la cota de los arroyos en la mayor parte de los casos, no parece existir influencia de los mismos en la piezometría de esta formación. Esto se debe en buena medida al hecho de no tener en cuenta los datos procedentes de los pozos domésticos de escasos metros de profundidad relacionados con tramos superficiales de mayor permeabilidad, con menor tiempo de tránsito y descargas locales influenciadas por los arroyos. Los aportes subterráneos procedentes de las formaciones prelitorales al norte del área estudiada deben ser escasos, como lo atestigua la presencia de manantiales importantes como la fuente de Les Dous (ilustración 3), la cual aporta agua a los cauces superficiales de la zona de estudio. Por otro lado, la descarga hacia el macizo de Garraf (con niveles claramente descolgados de los existentes en la depresión, pozo Les Gunyoles), tampoco debe de ser muy elevada, en función de la baja permeabilidad de la formación margosa arenosa y de los bajos gradientes de la zona.

De acuerdo con MOPU (1985), parece existir una recarga hacia la estructura de Vilobí provocada por las infiltraciones del arroyo de Pontons y el río Foix a su paso por la misma, no obstante, durante las observaciones *in situ* no pudo confirmarse este hecho, al llegar a ambos cursos fluviales caudales importantes de difícil estimación. Además, existen captaciones ubicadas junto a los cursos de agua superficiales que reciben

Cuadro 2. Valores de temperatura media (T°C) y de evapotranspiración potencial (ETP) mensual y diaria de acuerdo con Thornthwaite, 1948.

Variable	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.
ETP-D*	2	0.9	0.6	0.5	0.7	1.1	1.7	2.5	3.5	4.7	4.4	3.3
ETP**	63	28	19	15	21	35	50	78	106	144	137	100
T-MM°	16	11	8	7	9	11	13	16	20	24	23	21

* ETP-D Evapotranspiración diaria.

** ETP-M Evapotranspiración mensual.

° T-MM Temperatura media.

aguas procedentes de la recarga inducida de los mismos (captaciones 6-049 y 7-110, cuadro 1), ayudados en algunos casos por sistemas de captación horizontal (galerías).

El escaso aporte subterráneo de las formaciones prelitorales hacia las estructuras de Vilobí y Pac's, especialmente hacia esta última, parece tener una importancia cada vez mayor en relación con los volúmenes de agua extraídos, en comparación con los descensos provocados. El flujo de agua de la formación margas-arenas hacia el sustrato mesozoico resulta de difícil estimación, puesto que, salvo en las estructuras mencionadas, se desconoce la piezometría de dichos materiales mesozoicos en el interior de la depresión, al igual que la permeabilidad vertical de la formación margoso-arenosa. No obstante, debe de ser bastante reducido, dada la menor escasez de niveles arenosos en la formación margosa en cuanto a la arcilla suprayacente, además de interponerse la formación miocena basal, compuesta de abundantes arcillas y evaporitas, que favorecerían el confinamiento de los carbonatos secundarios.

Balance hidrológico

El balance másico de agua está basado en la extracción y aporte del líquido en la zona de estudio. El análisis se realizó a partir de la ecuación general, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$Q_r = P + Q_{as} - E - Q_{ss} - Q_b - ETP + \Delta S$$

donde:

Q_r = recarga

P = precipitación

ETP = evapotranspiración

Q_{as} = aporte subterráneo

ΔS = capacidad de almacenamiento

E = escorrentía

Q_{ss} = salida subterránea

Q_b = extracción por bombeo

Cálculo de los componentes superficiales

Características climáticas: para el estudio se dispuso de los datos de precipitación diaria correspondientes a las estaciones meteorológicas 66 Vilafranca del Penedés, 62A Torrelles de Foix y 180 San Quinti de Mediona, así como de la temperatura media mensual de las dos primeras. Los datos generados en la estación de Vilafranca fueron fundamentalmente los que se analizaron, dada la ubicación y el volumen de información disponible.

Precipitación: la zona presenta una precipitación media estimada de 516 mm con base en el análisis de la media de 23 años hidrogeológicos con datos completos, para una serie que comprende de 1914 a 1991, con un intervalo sin datos entre 1950 y 1972.

Termometría: en el cuadro 2 se presentan los valores medios mensuales para una serie de 10 años con datos (entre 1978 y 1992) de la estación de Vilafranca. Estos valores se han empleado para calcular la evapotranspiración (ETP), según los distintos métodos usados. Se considera poco significativa su variación interanual a efecto de los resultados de un balance hidrometeorológico medio, donde la variable fundamental es la precipitación.

Cuadro 3. Valores de ETP calculados por el método de Thornthwaite 1948, Blaney-Cridle y Turc (Custodio y Llamas, 1983).

Método	ETP anual (mm)
Thornthwaite	796
Blaney-Cridle	871
Turc	933

Evapotranspiración potencial (*ETP*): la evapotranspiración se estimó a partir de ecuaciones empíricas debido a la ausencia de mediciones directas de evaporación en la zona. Los métodos usados son los de Thornthwaite (1948), la versión moderna de la ecuación de Turc (Custodio y Llamas, 1983) y el de Blaney-Criddle (Custodio y Llamas, 1983). El cuadro 3 muestra un resumen de los resultados que se obtuvieron a partir de los diferentes métodos empleados. Para el método de Turc se utilizaron los datos de horas de insolación efectiva medidos en las estaciones sin aplicar el factor de corrección por concepto de humedad relativa media menor de 50%. En ningún caso se encontraron valores de humedad por debajo de ese límite. En cuanto a la aplicación del método de Blaney-Criddle, se utilizó como factor *k* el proporcionado por el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos para la uva de mesa debido a que, como ya se dijo, en la zona de estudio el cultivo básico es la viña para la producción de vino. Los resultados calculados por los diferentes métodos presentan una dispersión de 137 mm, siendo la media, 864 mm. Con el método de Thornthwaite se calculan 796 mm, mientras que con los métodos de Blaney-Criddle y Turc se estimaron 871 mm y 933 mm, respectivamente. El valor medio de estos datos viene a ser 864 mm para una evapotranspiración anual. Los resultados del primer método se encuentran en el rango de entre 9 y 17%, mientras que el segundo método (Blaney-Criddle) (Custodio y Llamas, 1983), en el rango de entre 7 y 9%. Con base en los resultados obtenidos y dadas las incertidumbres existentes en los coeficientes empleados en los métodos anteriores, se optó por el método de Thornthwaite como el más representativo.

Balance hidrometeorológico: la recarga media de agua en la formación de margas-arenas del Penedés se calculó para un periodo de 23 años hidrológicos con datos completos, ya que los datos disponibles no permiten evaluar años hidrológicos consecutivos. La principal incertidumbre que surge es acerca del valor de la reserva útil del suelo al inicio de cada año hidrológico (proveniente del resultado del balance del último día del año anterior). Un análisis de sensibilidad de esta variable, cambiando su valor y estudiando los resultados de infiltración profunda y escorrentía obtenidos para cada año, demostró que para cualquier valor por debajo de 100 mm para el primer día del año los resultados obtenidos se mantuvieron prácticamente constantes. En cuanto a los años hidrológicos, a su inicio, en la zona de estudio, el suelo suele estar seco, con lo que se minimiza este efecto. En los cálculos se tomó como valor inicial de reserva útil 150 mm, que si bien

es alto, se consideró adecuado, al tratarse de campos muy labrados y desarrollados con poca profundización de las raíces de la viña (cercanas al metro). El cálculo se realizó mediante la ley de Horton (Horton, 1945, en Custodio y Llamas, 1983), utilizando un ritmo de infiltración inicial de 110 mm/día, como ritmo de infiltración final de 18 mm/día, y un valor de *K'* de 1.13. Los datos necesarios para emplear el método se obtuvieron en un estudio realizado en la zona (REPO, 1970). Los resultados se muestran en la ilustración 5 y en el cuadro 4. Se puede apreciar que la infiltración profunda media para los 23 años considerados asciende a 21 mm/año, un poco inferior a 5% de la precipitación media y por debajo de la escorrentía generada, en consonancia con el incremento de caudal observado en los días de lluvia relativamente intensa en los arroyos más importantes. Los bajos valores de infiltración profunda que se obtuvieron están en buena medida producidos por la elevada reserva útil empleada, apreciándose, además, que más de la mitad de los años no tienen ninguna infiltración profunda, con lo que a efectos de balance para años secos, la recarga al acuífero por este concepto es nula.

Cálculo de los aportes subterráneos

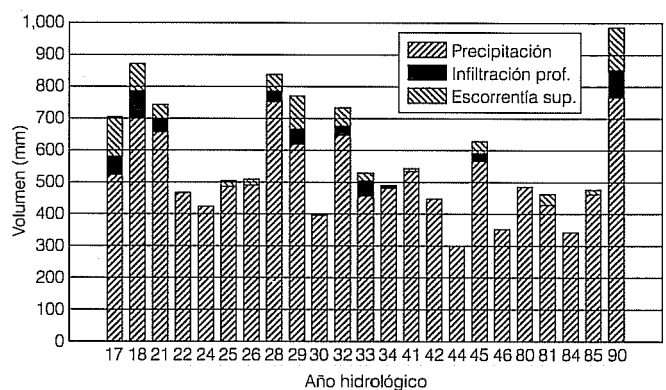
Los flujos subterráneos se calcularon a partir de la ecuación de flujo:

$$Q = T \cdot i \cdot L$$

donde *T* se refiere a la transmisividad; *i*, al gradiente hidráulico, y *L*, a la longitud.

Formación arenas-margas: de acuerdo con MOPU (1985), para el sistema acuífero arenas-margas en el ámbito regional se consideran valores de transmisivi-

Ilustración 5. Balance hidrometeorológico.



Cuadro 4. Resumen del balance hidrometeorológico (mm).

Año hidrológico	Precipitación	Reserva del suelo (30 sept.)	Infiltración profunda	Escorrentía
17-18	523	0	60	124
18-19	702	1	85	87
21-22	656	12	47	41
22-23	475	29	0	0
24-25	425	0	0	0
25-26	488	0	0	21
26-27	496	0	33	20
28-29	755	0	54	54
29-30	619	17	0	99
30-31	400	19	29	0
32-33	650	64	51	56
33-34	455	0	7	22
34-35	485	0	0	3
41-42	542	68	0	6
42-43	455	37	0	0
44-45	302	0	0	1
45-46	568	1	23	40
46-47	357	0	0	0
80-81	490	15	0	0
81-82	433	0	0	32
84-85	348	0	0	0
85-86	468	0	0	10
90-91	768	62	88	133
Media	516	14	21	33

dad de alrededor de $10 \text{ m}^2/\text{día}$. En el cálculo del aporte subterráneo al acuífero del bajo Penedés se ha usado este valor. El gradiente hidráulico y la longitud se obtuvieron de los datos de piezometría mostrados en secciones anteriores y de la sección de drenaje, respectivamente (ver ilustración de piezometría). El gradiente hidráulico calculado para esa zona fue de 0.01 y la longitud considerada, tres kilómetros.

El cálculo de la aportación másica de la formaciones arenas-margas sobre los acuíferos de los bloques Pac's, Vilobí y Garraf es sólo para orientar debido a la escasez de información precisa sobre datos de transmisividad de las margas-arenas en las proximidades de dichas estructuras, de la superficie de contacto entre estas estructuras y de los gradientes hidráulicos. Según MOPU (1985), existe gran variabilidad de los valores de transmisividad en estas estructuras, desde valores medios de 10 hasta $700 \text{ m}^2/\text{día}$. Con base en las observaciones realizadas en la zona, consideramos adecuado asumir aportes procedentes de la formación arenas-margas entre 0.2-0.4, 0.3-0.4 y $0.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ sobre las estructuras Pac's, Vilobí y Garraf,

respectivamente. Para el caso de la estructura Pac's, sobre la cual existe más información, se consideró una longitud de contacto de 4 km y un gradiente hidráulico de 0.02 de acuerdo con los datos piezométricos.

Bloques Vilobí y Pac's: los aportes de los componentes subterráneos y el balance hídrico de la estructura de Vilobí no se realizó debido a que es una estríbabión de la cordillera prelitoral, con clara continuidad hidráulica con la misma. Además, las captaciones más importantes se ubican en el borde de los afloramientos prelitorales, con lo que un balance individualizado en este sector no tendría sentido. En cambio, se consideró el efecto drenante que dicha estructura puede producir en la formación margoso-arenosa miopliocena. Para la estructura de Pac's, como ya se expuso, el cálculo del aporte másico proveniente de la formación arenas-margas también es supuesto, dadas las elevadas incertidumbres en los parámetros. Al considerar una superficie de $4,000 \text{ m}^2$ (I), un valor de gradiente hidráulico de 0.02 y una transmisividad de $10 \text{ m}^2/\text{año}$ para la zona se obtiene un aporte de 0.3 hectómetros cúbicos.

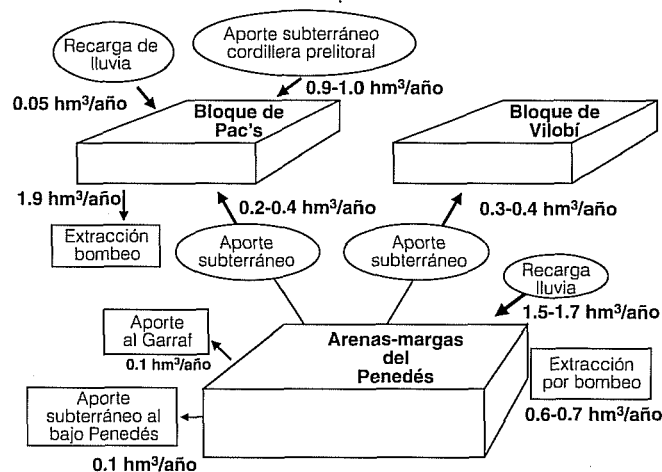
Balance másico

Se realizó el balance meteorológico medio para una serie larga de años, con énfasis en el cálculo de la recarga, a fin de poder caracterizar ante descargas el grado de utilización de las reservas de los acuíferos a largo plazo y diagnosticar en mejores condiciones la situación de la unidad hidrogeológica.

Los datos de caudal de extracción anual obtenidos en los municipios de los sistemas acuíferos de los bloques Pac's y Vilobí presentan una extracción de 1,986,200 m³/año y 1,100,000 m³/año, respectivamente, mientras que los sistemas arenas-margas y macizo de Garraf alcanzan 584,000 y 300,000 m³/año. Estos valores demuestran la gran importancia de estas formaciones en el abastecimiento de la zona.

Los resultados de los componentes estimados para la formación arenas-margas se presenta en el cuadro 5. El balance másico de estos datos indica un almacenamiento de 0.1 hm³ para la formación arenas-margas. Los valores de los componentes estimados para el bloque Pac's se presentan también en el cuadro 5. En esta estructura, el descenso medio es de 3 m/año, el *m* eficaz 0.05. Para una superficie de 4 km², el coeficiente de almacenamiento es de -0.6 hm³. Al considerar este valor en la ecuación de balance másico, se estima que el aporte (EP) de la cordillera prelitoral

Ilustración 6. Esquema del balance hídrico propuesto para los sistemas acuíferos arenas-margas del Penedés y bloque Pac's.



es de 0.95 hm³. La ilustración 6 presenta el balance hídrico propuesto para las estructuras arenas-margas y de Pac's. Cabe destacar que se aprecia una situación estabilizada, sin que, con unos recursos medios del orden de 1.6 hm³/año, se prevean problemas de sobreexplotación en la formación de arenas-margas (si bien pueden existir problemas de este tipo debido a condicionantes hidrogeológicas). No es éste el caso de los bloques de Pac's y Vilobí, con un descenso continuado de los niveles (20 m en los últimos años, AAV, 1996). A pesar de las grandes incertidumbres, parece demostrarse (dado el orden de magnitud de los distintos parámetros que entran en juego) que, especialmente para el caso del bloque de Pac's, es necesario un aporte importante de las calizas prelitorales para que, en función de la extracción y del posible aporte de la formación margosa arenosa, los niveles se mantengan en la situación observada. En esta estructura, el balance se ha estimado en forma aproximada para la media de los últimos siete años, en los que se dispone de valores de descenso de los niveles para poder calcular la variación en el almacenamiento y despejar de esta forma en el balance la incógnita de la escorrentía subterránea procedente de la cordillera prelitoral.

Conclusiones

La zona presenta una temperatura y precipitación media anual de 15° C y 516 mm, así como una infiltración profunda de 21 mm, de acuerdo con la estimación obtenida por la ley de Horton, y una *ETP* calculada de 864 milímetros.

Cuadro 5. Resultados del balance hídrico de la formación margas-arenas del Penedés y del bloque Pac's.

Balance hídrico de la formación margas-arenas

	Componente	(hm ³)
Entradas	Infiltración (<i>Q_r</i>)	1.5 - 1.7
Salidas	Extracción bombeo (<i>Q_b</i>)	0.6 - 0.7
	Aporte subterráneo (<i>Q_{as}</i>)**	
	Salida subterránea, drenaje (<i>Q_{ss}</i>)	0.1
	Salida subterránea, Pac's (<i>Q_{ss}</i>)	0.2 - 0.4
	Salida subterránea, Vilobí (<i>Q_{ss}</i>)	0.3 - 0.4
	Salida subterránea, Garraf (<i>Q_{ss}</i>)	0.1
	Total	1.3 - 1.7

Balance hídrico del bloque Pac's

	Componente	(hm ³)
Entradas	Infiltración (<i>Q_r</i>)	0.05
	Aporte subterráneo (<i>Q_{as}</i>)	0.3
	Aporte cordillera prelitoral	EP
Salidas	Extracción por bombeo (<i>Q_b</i>)	1.9

Existen dos formaciones con estructura y comportamiento hidráulico claramente diferenciados. Por un lado, las estructuras carbonatadas mesozoicas y miocenas de Pac's y Vilobí y, por otro, la formación margo-arcillosa con arenas de relleno de la cuenca. En el primer caso se observa una clara explotación con descensos de 20 m en los últimos siete años, donde se concentran las principales captaciones, con un volumen de extracción muy superior al resto del área estudiada. En el segundo caso parece darse una situación de equilibrio entre las entradas y salidas, presentando una explotación muy inferior, dadas las propias características hidráulicas de la formación.

Se tiene una fuerte incertidumbre ante la falta de datos sobre la conexión hidráulica entre estas formaciones y los bloques de Pac's y Vilobí con la cordillera prelitoral, por lo que se pone de manifiesto la necesidad de incrementar las medidas de control e investigación, sobre todo ante la importancia de las captaciones empleadas para abastecimiento de la mayor parte de los núcleos de población. No obstante, parece evidenciarse un aporte subterráneo cada vez mayor de los relieves prelitorales, especialmente en la estructura de Pac's.

Agradecimientos

Esta investigación formó parte de las actividades realizadas durante el XXX Curso Internacional de Hidrología Subterránea desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Los autores quieren agradecer a las autoridades del Centro Internacional de Hidrología, España, por las facilidades ofrecidas para su divulgación. También desean agradecer a los revisores los comentarios realizados, los cuales fueron adecuados para mejorar la presentación del trabajo.

Recibido: 12/10/2000

Aprobado: 12/01/2001

Referencias

- AAV, *Comunicación personal por la empresa Administradora de Aguas de Vilafranca*, 1996, pp. 315-323.
- Alfonso, P., J. Torrens y J.M. Murrillo, "Estudio hidrogeológico del Penedés", *IV Simposio de hidrogeología*, Sevilla, 1995.
- ATLL, *Estudi de la demanda latent i futura d'aigua en l'ambient de servei de l'empresa pública Aigües Ter Llobregat*, Barcelona, 1995, 200 pp.
- Cattaneo, O. y A. Alom, *Estudio hidrogeológico preliminar del Alt Penedés*, XIV CIHS, Barcelona, 1980, 30 pp.
- Custodio, E. y M.R. Llamas, *Hidrología subterránea*, Omega, vol. 2, Barcelona 1983, 2359 pp.
- IGME, *Vilafranca del Penedés*, mapa geológico de España, 1/50,000, Madrid, 1972b.
- IGME, *Vilanova i la Geltrú*, mapa geológico de España, 1/50,000. Madrid, 1972a.
- Leao, M. y B. Pereira, *Hidrogeología de los alrededores de Vilafranca del Penedés*, XVI CIHS, Barcelona, 1982, 50 pp.
- MOPU, "Estudio hidrogeológico de la depresión del Penedés", *Plan hidrogeológico del Pirineo Oriental*, Ministerio de Obras Públicas Urbanas (DGOH), Madrid, 1985, 300 pp.
- REPO, "Estudio de los recursos hidráulicos totales del Pirineo Oriental: zona sur", *S1 Informe Garraf-Penedés-Gaia*, 3 vols., Memoria, anexos de geología y de hidrogeología, Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental, Servicio Geológico de Obras Públicas, Barcelona, 1970, 340 pp.
- Thornthwaite, H., "An Approach Toward a Rational Classification of Climate", *Geologic Rev.*, vol. 38, 1948, pp. 55-94.

Abstract

E. Portugal Marín J. A. Hernández & G. Izquierdo, "Hydrologic Description and Water Balance of the River Foix High Basin, Cataluña, Spain", Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish), vol. XVI, num. 4, pages 79-90, October-December, 2001.

The river Foix high basin is a zone where there is no piezometric and quality networks. The area is characterized by an average annual rain fall and temperature of 516 mm and 15°C, respectively. Two geological formations are mainly exploited: one composed of aquitards and aquicludes (marls and clays) materials, which include the sandy production sections and others formed by carbonate Mesozoic aquifers outcropping inside the deep valley forming small horst according to the tectonic evolution of the zone. The later geological structures are found where the main wells are located and the exploitation is performed by inducing an increment of the ground contributions of the nearest reliefs. The main water extraction is addressed to fulfill the urban demand. Average calculated deep recharge for 23 hydrologic years using a complete set of data in the marl-sand formation is 21 mm. Average resources for this data set are around 1.6 hm³/year. While for the Pac's structure -0.6 hm³/year was estimated.

Key words: hydrogeology, aquifer exploitation, water supply, water balance, Foix river, ground water.

Dirección institucional de los autores:

Enrique Portugal Marín
Georgina Izquierdo

Instituto de Investigaciones Eléctricas,
AP 470^a, 62000 Cuernavaca, Morelos, México.
Correo electrónico: portugal@iie.org.mx

Juan Antonio Hernández
Cervantes 16, 2^a
03400, Villena (Alicante), España.