

**ACTUACIONES DE USO CONJUNTO Y RECARGA
ARTIFICIAL ENCAMINADAS A MEJORAR LA
GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL Y EL USO SOSTENIBLE
DE LOS ACUÍFEROS LIGADOS A LA ARTERIA
TRANSVERSAL DE LA ISLA DE MALLORCA**



**EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO Y
DETERMINACIÓN DE LA RECARGA NATURAL DEL
ACUÍFERO DE CRESTATX (MALLORCA)**

Diciembre de 2007





INFORME	Identificación: H8/003/09
	Fecha: Marzo 2008
TÍTULO EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO Y DETERMINACIÓN DE LA RECARGA NATURAL DEL ACUÍFERO DE CRESTATX (MALLORCA)	
PROYECTO ACTUACIONES DE USO CONJUNTO Y RECARGA ARTIFICIAL ENCAMINADAS A MEJORAR LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL Y EL USO SOSTENIBLE DE LOS ACUÍFEROS LIGADOS A LA ARTERIA TRANSVERSAL DE LA ISLA DE MALLORCA	
RESUMEN Se ha realizado una evaluación de la recarga natural al acuífero de Crestatx, en Mallorca, a nivel diario para el período 1964-2005 utilizando modelación matemática, en concreto el código Visual Balan. Para la calibración se han utilizado datos piezométricos de varios sondeos de explotación existentes en el acuífero, aunque su serie de datos disponibles no es tan larga. El resultado obtenido indica que el porcentaje de infiltración sobre la lluvia que se convierte en recarga es de aproximadamente el 45%.	
Revisión Nombre: José Antonio de la Orden Gómez Unidad: Dpto. Investigación y Prospectiva Geocientífica Fecha: Diciembre 2007	Autores: Gema Ortiz Villalobos Responsable: José Antonio de la Orden Gómez

Este informe ha sido elaborado dentro del Convenio de colaboración suscrito entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Gobierno Balear, para el estudio de las aguas subterráneas en el archipiélago balear cuyo seguimiento administrativo realizan D^a Rosa María Mateos (IGME) y D. Alfredo Barón (Gobierno Balear). El informe se integra dentro del proyecto titulado "ACTUACIONES DE USO CONJUNTO Y RECARGA ARTIFICIAL ENCAMINADAS A MEJORAR LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL Y EL USO SOSTENIBLE DE LOS ACUÍFEROS LIGADOS A LA ARTERIA TRANSVERSAL DE LA ISLA DE MALLORCA". Los trabajos realizados han sido dirigidos por D. José Antonio de la Orden (IGME) y D. José Manuel Murillo Díaz (IGME).

Directores del estudio:

José Antonio de la Orden Gómez (IGME)
Alfredo Barón Pérez (Gobierno Balear)

Autora del estudio:

Gema Ortiz Villalobos (IGME)

Asesores hidrogeológicos:

José Manuel Murillo Díaz (IGME)
Rosa María Mateos Ruiz (IGME)
José María López García (IGME)
Concepción González Casanovas (Gobierno Balear)

Los autores y directores agradecen la colaboración que el Instituto Nacional de Meteorología, la oficina del IGME en Mallorca y la Dirección General de Recursos Hídricos del Gobierno Balear han prestado en el estudio

I N D I C E

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. ANTECEDENTES**
- 3. OBJETIVOS**
- 4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE CRESTATX.**
- 5. CÓDIGO VISUAL BALAN**
- 6. METODOLOGÍA APLICADA**
- 7. INFORMACIÓN DE PARTIDA.**
 - 7.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA**
 - 7.2. INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA**
- 8. MODELO DE BALANCE HÍDRICO**
 - 8.1. CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO**
 - 8.2. AJUSTE DE NIVELES**
 - 8.3. BALANCE HÍDRICO**
- 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS**
- 10. CONCLUSIONES**
- 11. BIBLIOGRAFÍA**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Situación del acuífero de Crestatx

Figura 2: Corte hidrogeológico transversal del acuífero de Crestatx

Figura 3: Situación de sondeos y cota piezométrica

Figura 4: Cuenca del modelo de balance hídrico

Figura 5: Evolución piezométrica en los piezómetros del acuífero de Crestatx

Figura 6: Evolución temporal de los niveles piezométricos medidos y calculados

Figura 7: Correlación de niveles medidos y calculados

Figura 8: Balance hídrico del acuífero de Crestatx

Figura 9: Gráfica comparativa de precipitación, recarga y evapotranspiración real

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen estadístico de las estaciones meteorológicas

Tabla 2: Parámetros de la calibración del modelo del acuífero de Crestatx

Tabla 3: Resultados del modelo calibrado

1. INTRODUCCIÓN

En la isla de Mallorca, las aguas subterráneas constituyen la fuente principal de suministro de recursos hídricos. Aproximadamente el 75 % de la demanda hídrica de la isla se satisface con este tipo de recurso (Mateos *et al.* 2007). Esto es debido a la conjunción de ciertos factores como el régimen pluviométrico de la isla, la escasez de cauces superficiales y la dificultad orográfica para regularlos mediante embalses, como lo prueba el hecho de que solo existen en la isla dosembalsescuyos recursos se utilizan para abastecimiento, los de Gorg Blau y Cúber.

Con objeto de mejorar el conocimiento de las aguas subterráneas de la isla y establecer acciones encaminadas a preservar su calidad frente a la contaminación, la Dirección General de Recursos Hídricos del Gobierno Balear y el Instituto Geológico y Minero de España, han firmado un Convenio de colaboración. Una de las actuaciones previstas dentro del Convenio aborda la posibilidad de incrementar los recursos hídricos del acuífero de Crestatx mediante la recarga artificial del mismo, aprovechando los excedentes de la descarga de las Fonts Ufanes de Gabellí.

Para poner en marcha este proyecto de recarga artificial, es necesario planificar diversos trabajos que permitan profundizar en el conocimiento de este acuífero, cuyo funcionamiento hidrogeológico presenta algunas dudas importantes. Una de las actividades programadas en el marco de este Convenio es la evaluación de la recarga natural del acuífero de Crestatx a nivel diario, a partir de datos de precipitación y temperatura diarios. Los nuevos valores obtenidos en el estudio se utilizarán para actualizar y mejorar el modelo matemático de flujo ya existente en el acuífero elaborado conjuntamente por el IGME y el Gobierno Balear en años anteriores y, sobre éste, simular y analizar las distintas hipótesis de recarga artificial a plantear, para estimar la efectividad de la misma y planificar su gestión futura.

Este informe presenta los resultados de un estudio hidrometeorológico del acuífero orientado a la estimación de su recarga natural.

2. ANTECEDENTES

El funcionamiento hidrodinámico de algunos de los manantiales que se encuentran localizados en la sierra de Tramuntana ha sido previamente estudiado en ciertos trabajos, entre los cuales, cabe destacar los siguientes:

La primera estimación del balance hídrico en la zona de Ses Ufanes y S'Almadrava, fue realizada por MOPU/DGOH (1973), dentro del marco del "Informe Fuster" sobre los recursos hidráulicos de la isla de Mallorca.

Posteriormente y mediante la interpretación de datos químicos, isotópicos e hidrodinámicos del manantial de Ses Ufanes, Barón y González (1978) consiguieron caracterizar el funcionamiento hidráulico del mismo. Aún así, siguieron realizándose estudios en esta zona, de modo que Barón *et al.* (1984) consiguieron mejorar el modelo de comportamiento hidráulico anteriormente definido, utilizando para ello, los datos adicionales ofrecidos por los ensayos de bombeo llevados a cabo en la zona.

El Servicio Hidráulico de Baleares (1987), recopiló y actualizó la información hidrogeológica de Mallorca aportada por el "Informe Fuster" (1973), ofreciendo alguna información adicional en relación con el área de Ses Ufanes.

Finalmente, cabe destacar la tesis doctoral realizada por Cardoso da Silva (1997), en la que se ofrecen importantes avances en el estudio del funcionamiento hidráulico de las unidades hidrogeológicas a las que pertenecen los manantiales de Sa Costera, Ufanes de Gabellí y S'Almadrava.

3. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es estimar la recarga natural del acuífero de Crestatx. El conocimiento de la recarga es esencial, tanto para conocer el modelo de funcionamiento hidrogeológico del acuífero, como para la realización de un modelo matemático fiable del mismo. La recarga se ha evaluado a través de la calibración de modelos numéricos de balance hídrico aplicados a la zona de estudio; en concreto utilizando el código Visual Balan V. 2.0 (Samper *et al.*, 2005).

El modelo de balance hídrico calibrado representa una primera aproximación en cuanto a la evaluación numérica de la recarga del acuífero, y constituye el punto de partida para el diseño y posterior desarrollo de un modelo de flujo cuyo dominio comprenda el ámbito espacial del acuífero en estudio, dentro del cual la recarga estará sometida a un proceso de calibración.

4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE CRESTATX.

El acuífero de Crestatx se encuentra situado en el cuadrante nororiental de la isla de Mallorca, en las estribaciones de la sierra de Tramontana (Fig. 1). Geográficamente, se ubica al norte de la autovía que discurre entre Palma de Mallorca y Alcudia, a la altura de la

población de Sa Pobla. Las poblaciones más importantes situadas en su proximidad son Campanet al suroeste, Sa Pobla al sur y Pollensa, unos 10 kilómetros al norte.

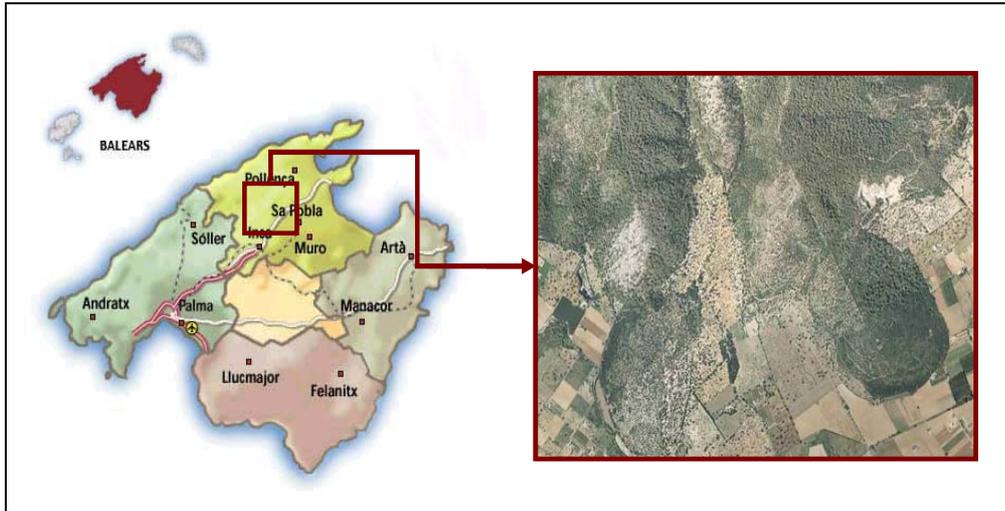


Figura 1: Situación del acuífero de Crestatx

La totalidad de la superficie de la unidad está incluida en los términos municipales de Campanet, Sa Pobla y Pollensa.

La unidad de Crestatx está limitada geográficamente al norte y el oeste por el camino viejo de Pollensa, al este por la carretera de Sa Pobla a Pollensa, y al sur por los accidentes geográficos de Puig de Sant Miquel, Puig de Son Corro y Ses Parets de Moros (figura 2).

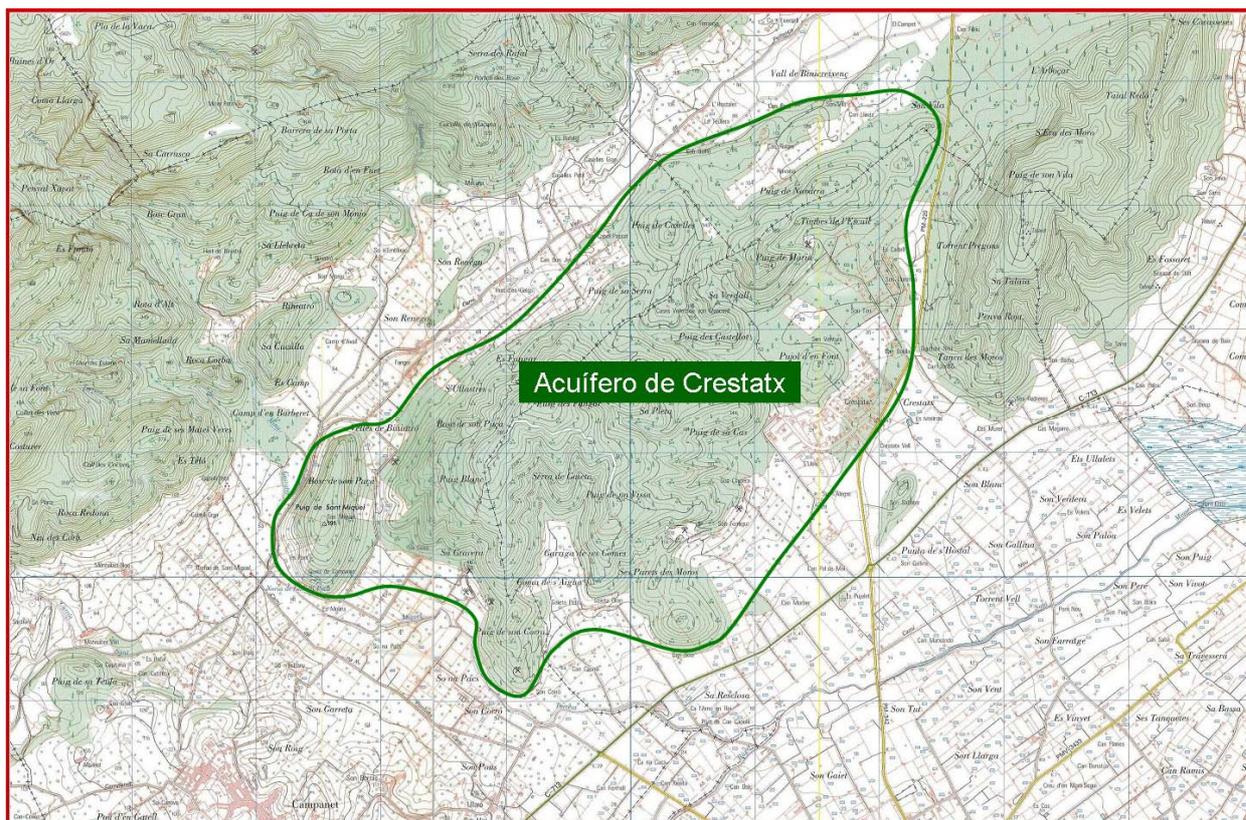


Figura 2. Límites geográficos de la unidad de Crestatx.

Geológicamente, la zona de estudio pertenece a la unidad tectónica de Alfabia-Es Barraca. Los materiales que la componen son de naturaleza carbonatada y edad Jurásico, con presencia de materiales triásicos del Retiense y el Keuper que actúan como límites impermeables o independizando distintas escamas de los materiales carbonatados. Dentro de la unidad, se han cartografiado varios cabalgamientos que inducen desplazamientos de unos materiales sobre otros, independizándolos a veces, lo cual tiene su importancia hidrogeológica puesto que generan desconexión hidráulica entre las distintas escamas. La unidad está claramente independizada por todos sus límites, excepto por el sur, en donde está recubierta por los materiales arcillosos del Holoceno que conforman el Llano de Inca-Sa Pobra, extendiéndose por debajo de ellos y desconociéndose con precisión la superficie total que ocupan.

Con objeto de profundizar en el conocimiento geológico del acuífero de Crestatx, establecer sus límites, y determinar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del mismo, el IGME emprendió varios estudios, ejecutados por la Universidad de Baleares. En los mismos, se ha realizado un análisis exhaustivo de los datos existentes, y se han completado con nuevos análisis sobre el terreno, en especial de la influencia de los cabalgamientos presentes en la independización hidrogeológica del conjunto, haciendo una reinterpretación de toda la información para establecer el modelo de funcionamiento

perseguido (IGME-UIB, 2006). A modo de resumen, se exponen a continuación las características geológicas de las unidades geológicas que se han distinguido, de base a techo, en la zona de estudio:

Triásico Retiense: Formado por dolomías y calizas dolomíticas con intercalaciones de margas y arcillas. Las capas presentan una estratificación clara y de orden decimétrico. El espesor aflorante de esta unidad es de 120 m (se trata por tanto de su espesor mínimo). Se trata de un conjunto permeable.

Lías: Compuesto por dolomías y calizas masivas en la base, y dolomías y calizas con fósiles de crinoideos y belemnites, dispuestas en estratos de orden métrico, en el techo de la unidad. La unidad superior tiene una potencia mínima de 160 metros. Desde un punto de vista hidrogeológico, constituye la unidad de mayor permeabilidad: se trata de un nivel acuífero.

Dogger-Malm-Cretácico: Se trata de una alternancia de margas y margocalizas con estratificación decimétrica y con fauna de ammonites. La potencia mínima de esta unidad es de 210 metros. Hidrogeológicamente se la puede considerar una unidad de baja permeabilidad.

Paleógeno: Consiste en una alternancia de margas grises y calizas con estratificación de orden métrico. Se han observado algunos niveles de pisolitos ferruginosos. Se trata de una unidad poco permeable.

Cuaternario: Formado por materiales de origen torrencial o coluvial. Desde un punto de vista litológico corresponde a niveles alternantes de arcillas, arenas y conglomerados. El espesor es variable entre 0.5 m y 20 m. Se trata de un conjunto permeable.

La cartografía geológica muestra un buzamiento general de los materiales hacia el SO: los materiales más antiguos, los del Retiense, afloran en el sector NE de la zona estudiada y los más modernos, los del Dogger-Malm-Cretácico, afloran en el sector SO (IGME-UIB, 2006).

Los cortes geológicos señalan que la estructura general de la zona de estudio es la de un sistema imbricado de cabalgamientos compuesto por materiales carbonatados del Lías, de carácter kárstico y con un nivel de despegue local en la base de las dolomías del Retiense (Ancochea *et al.*, 2004). Estos cabalgamientos presentan una traza con una orientación general NE-SO y un buzamiento hacia el SE (ITGE-UIB, 1998) (Fig. 3).

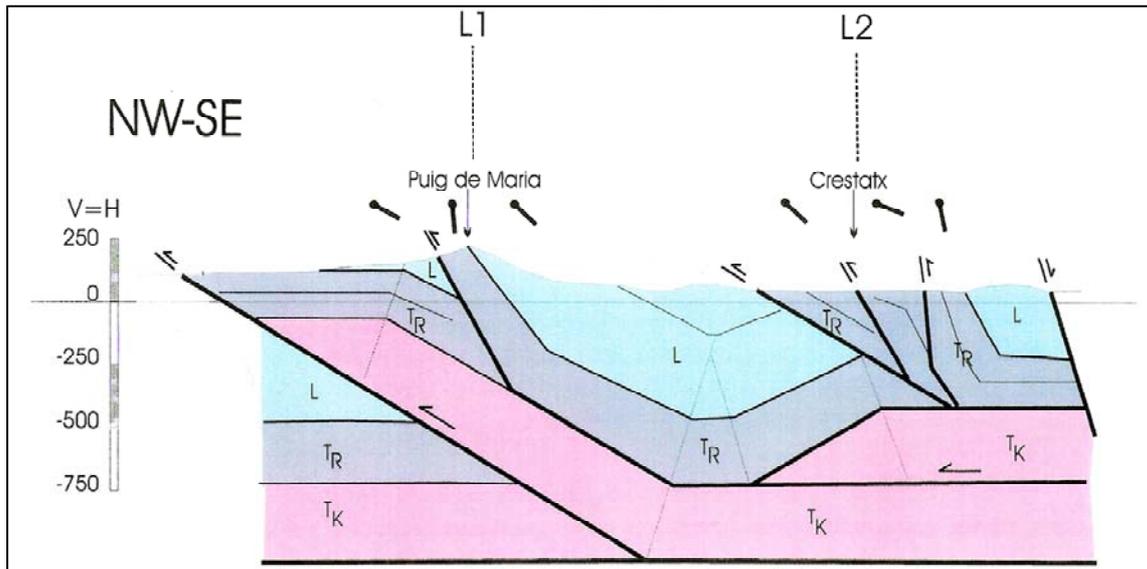


Figura 3. Corte hidrogeológico transversal del acuífero de Crestatx. Fuente: IGME-UIB (2006)

Desde el punto de vista hidrogeológico, los materiales del Retiense, Lías, Dogger-Malm-Cretácico y Cuaternario, calizas y dolomías principalmente, presentan alta permeabilidad por fisuración y karstificación, con un espesor medio de 350 m. La base impermeable del acuífero la constituyen las arcillas y margas de la facies Keuper del Triásico y la parte inferior del Retiense en el tránsito Triásico-Jurásico (IGME-UIB, 2005) (Figura 3).

Como resultado de la interpretación de todos los datos disponibles hasta la fecha, se puede identificar la existencia de dos acuíferos de carácter libre: el superior, con un área de recarga de 3,5 km², y el inferior, con una superficie aproximada de 8 km², siendo el SO la dirección general de flujo de agua subterránea en régimen natural (Figura 4).

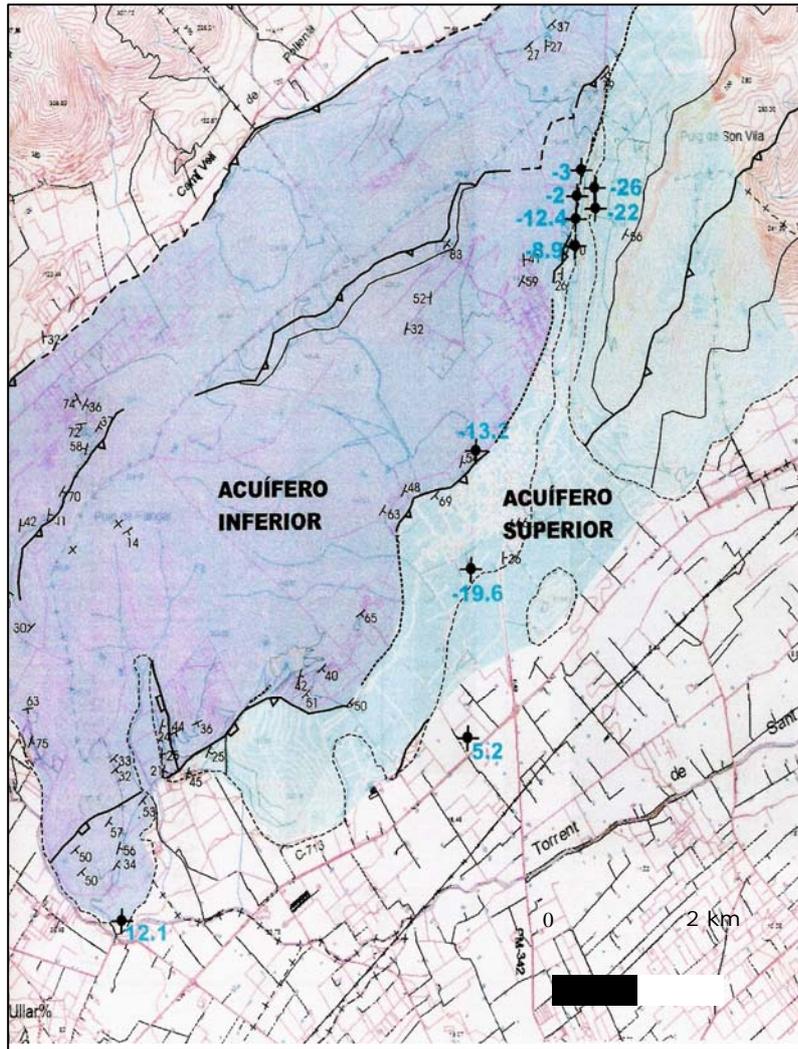


Figura 4: Situación de sondeos y cota piezométrica. Fuente: IGME-UIB (2006)

5. CÓDIGO VISUAL BALAN

La estimación de la recarga al acuífero se ha realizado mediante la aplicación de un balance hidrológico de intervalo diario a escala de acuífero utilizando, para ello, el código Visual Balan 2.0 (Samper et al., 2005).

Este programa realiza de forma secuencial balances diarios de agua en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero, partiendo para ello de datos de precipitación diaria y proporcionando los resultados para cada una de las componentes del balance. De esta forma, comienza evaluando la precipitación y las dotaciones de riegos, datos conocidos, para continuar después con la intercepción (mediante los métodos de Horton o de Singh), la escorrentía superficial (a través de la ley de Horton o el método del Número de Curva de la U), la evapotranspiración real (función de las variables anteriores) y, finalmente, la recarga por infiltración o en tránsito, que constituye la entrada de agua a la

zona no saturada. La evapotranspiración real también puede ser calculada a partir de la evapotranspiración potencial (calculada según datos experimentales o a través de los métodos de Thornthwaite, Blaney-Criddle, Makkink, Penman o Turc) mediante el empleo de métodos entre los que se encuentran el de Penman-Grindley y Penman-Grindley Modificado, o los que consideran que la fracción ETR/ETP es una función lineal o exponencial del déficit hídrico del suelo.

El balance hidrológico realizado a la zona edáfica permite calcular la recarga en tránsito total, que contempla tanto la recarga en tránsito directa, resultado del flujo preferente a través de las fisuras, macroporos o raíces y directamente proporcional al agua suministrada al suelo, como la recarga en tránsito diferida, consecuencia del flujo que tiene lugar entre los poros y relacionado con la conductividad hidráulica vertical del suelo en condiciones de saturación. Visual Balan 2.0 obtiene este valor en función de la cantidad de agua existente en el suelo.

El balance hidrológico realizado a la zona vadosa y al acuífero subyacente permite, por su parte, obtener los niveles piezométricos y los caudales descargados en el punto de salida de la cuenca, permitiendo comparar estos valores con niveles o datos de aforo reales, a fin de obtener una calibración automática de los parámetros del modelo y un análisis de sensibilidad que evalúe la precisión de los resultados del balance respecto a dichos parámetros.

Al igual que la mayor parte de los programas existentes para la realización de balances de agua en el suelo, Visual Balan utiliza algunas relaciones semiempíricas en las que aparecen parámetros empíricos carentes de fundamento físico, que deben estimarse en cada caso particular. Además, considera de forma conjunta todas las aportaciones de agua al suelo (precipitación más riegos) sin distinguir su distinto origen.

El programa incorpora dos opciones de carácter avanzado: el ajuste automático de parámetros del modelo a partir de datos de nivel piezométrico y/o caudales, y el análisis de sensibilidad, que permite evaluar la sensibilidad de los resultados del balance respecto a variaciones en ciertos parámetros del modelo.

La versión 2.0 de Visual Balan incorpora las siguientes novedades con respecto a versiones anteriores:

- La definición de varias subcuencas dentro de la cuenca de estudio, cada una de ellas con propiedades y parámetros diferentes. El programa realiza los cálculos del balance en cada subcuenca por separado.
- Posibilidad de utilizar datos de varias estaciones hidrometeorológicas.

- Posibilidad de utilizar datos de varias estaciones de aforos, siendo posible realizar la restitución de los caudales al régimen natural.
- Posibilidad de introducir datos hidrometeorológicos y de aforos directamente en el formato utilizado por las Confederaciones Hidrográficas españolas.
- Posibilidad de utilizar el método de Turc para el cálculo de la evapotranspiración potencial.
- Consideración de la interceptación utilizando las ecuaciones de Horton y Singh.
- Consideración de la precipitación, retención y escorrentía nival.
- Posibilidad de utilizar series temporales largas de hasta 100 años.

6. METODOLOGÍA APLICADA

La evaluación de la recarga mediante un balance hidrometeorológico en el suelo se encuentra con dos dificultades importantes: la carencia de datos sobre el medio físico (espesores y parámetros hidráulicos del suelo y el acuífero) y la escasez e inadecuación de los datos disponibles para la calibración, en este caso, de los niveles piezométricos.

Otro aspecto difícil de cuantificar es la presencia de otro tipo de precipitaciones que no se encuentren registradas en la estación meteorológica analizada. Estas precipitaciones son, por ejemplo, el rocío y la alta humedad relativa de las zonas costeras, que hace que el agua disponible para la evapotranspiración sea mayor que la estrictamente evaluada numéricamente en el balance meteorológico.

La elaboración del modelo de balance hídrico para el acuífero de Crestatx ha requerido de las siguientes etapas de trabajo:

- Revisión y análisis de la información meteorológica disponible, identificando las zonas de influencia de las distintas estaciones existentes sobre cada dominio del modelo según la orografía, orientación de los vientos y distancia del acuífero a las mismas. Teniendo en cuenta la extensión y calidad de los registros de precipitaciones y temperatura, los balances diarios se plantearon para un periodo de 41 años hidrológicos (1964-2005) a partir de los datos suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología relativos a la estación meteorológica de Campanet (B696).
- Revisión de la base de datos piezométrica del Instituto Geológico y Minero de España y selección de los puntos de observación, atendiendo tanto al número total de datos como a la frecuencia de los registros. Dado el régimen de explotación del acuífero, no existen disponibles piezómetros con series de datos en régimen no influenciado, que son los que requiere el modelo. La piezometría disponible puede considerarse por tanto de carácter dinámico. Esta circunstancia, agravada por el hecho de que el

código no posea la capacidad de representar regímenes influenciados, ha dificultado la calibración del modelo.

- Delimitación, según criterios topográficos y de explotación agrícola circundante, de las zonas de recarga o influencia inmediata correspondientes a los puntos seleccionados, y que configuran el dominio de los respectivos modelos de balance hídrico.
- Estudio e introducción de los diferentes parámetros edafológicos y foronómicos del modelo, a fin de calcular el balance hidrológico diario.
- Calibración de los modelos de balance hídrico caracterizada por la ejecución inicial de una serie de simulaciones que determinen ciertas variables de estado como la recarga en tránsito diferida, la evapotranspiración real o la escorrentía superficial, y que permitan identificar los mejores métodos de cálculo para las distintas componentes del balance. Asimismo y en una etapa posterior, se pasa a realizar la estimación automática de los parámetros del modelo basada en la minimización de una función objetivo que mide las diferencias cuadráticas ponderadas entre los valores medidos y calculados de los niveles piezométricos, así como un análisis de sensibilidad de los resultados según algunas variaciones de los parámetros del mismo.
- Análisis y valoración de los resultados basado en la coherencia y consistencia de los modelos, así como en el contraste con estimaciones existentes y con los restantes modelos calibrados.

7. INFORMACIÓN DE PARTIDA

Los datos de entrada de los que se dispone para este estudio son los meteorológicos (precipitación diaria y temperatura media mensual, así como indicadores mensuales de la insolación, la humedad relativa y la velocidad del viento), cedidos por el Instituto Nacional de Meteorología, y los de nivel piezométrico diarios, aportados, en este caso, por la oficina del IGME en Mallorca. Las dotaciones de riego no se han evaluado en este estudio al considerarse prácticamente inexistente la presencia de prácticas agrícolas en la zona de recarga de Crestatx.

7.1. Información meteorológica

Para la realización de este estudio se ha recopilado la información meteorológica (precipitación diaria y temperatura media mensual) en tres estaciones meteorológicas

próximas al acuífero de Crestatx (Fig. 4). La tabla 1 resume las características estadísticas de las series disponibles en ellas:

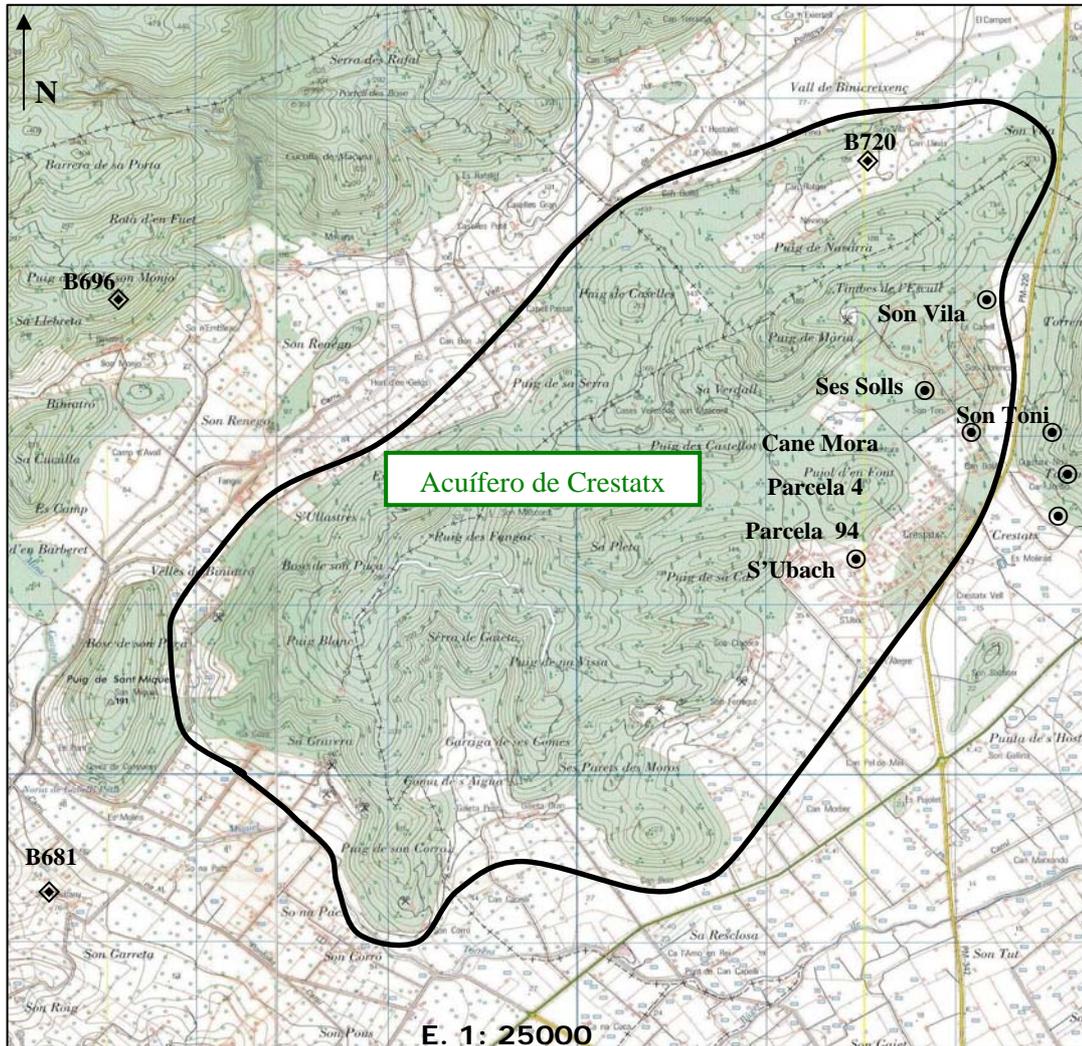


Figura 4: Cuenca del modelo de balance hídrico

Tabla 1: Resumen estadístico de las estaciones meteorológicas

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Año inicial	Año final	Años completos	Serie completa más larga
B681	Campanet Son Estrany	60	1989	2006	3	1992-1995
B696	Campanet Biniatró	120	1964	2006	41	1964-2005
B720	Campanet Pollença/ Son Vila	87	1976	1980	1	1979-1979

Como se muestra en la tabla 1, las series de datos de estas estaciones presentan una gran heterogeneidad tanto en periodos de registros como en periodos completos. Una vez analizados ambos factores, se ha seleccionado la estación B696 (Campanet Biniatró), cuya serie es la más completa y larga tanto para precipitación como para temperatura, y engloba todo el periodo de simulación (1964-2005).

Según esta estación y para el periodo de tiempo considerado en el estudio, la precipitación anual media es de 912 mm. La precipitación máxima se da en el mes de noviembre con 405 mm, y la mínima en julio con 0,2 mm. Se trata de un registro típicamente mediterráneo, con dos máximos, primavera y otoño, éste último mayor, y un acusado estiaje en los meses de verano.

La temperatura media anual es de 17,5 °C, con una temperatura media mensual máxima en agosto de 29,8 °C, y una mínima en febrero de 6,9 °C.

7.2. Información piezométrica

El acuífero de Crestatx es objeto de una intensa explotación para regadío y abastecimiento, concentrada fundamentalmente en la Unidad de Crestatx (Acuífero Superior).

La información piezométrica disponible, obtenida a partir de ocho piezómetros distribuidos por la superficie del acuífero objeto de este estudio, ha sido suministrada por la oficina del IGME en Mallorca, y se representa gráficamente en la figura 5. La localización geográfica de estos puntos se muestra en la figura 4.

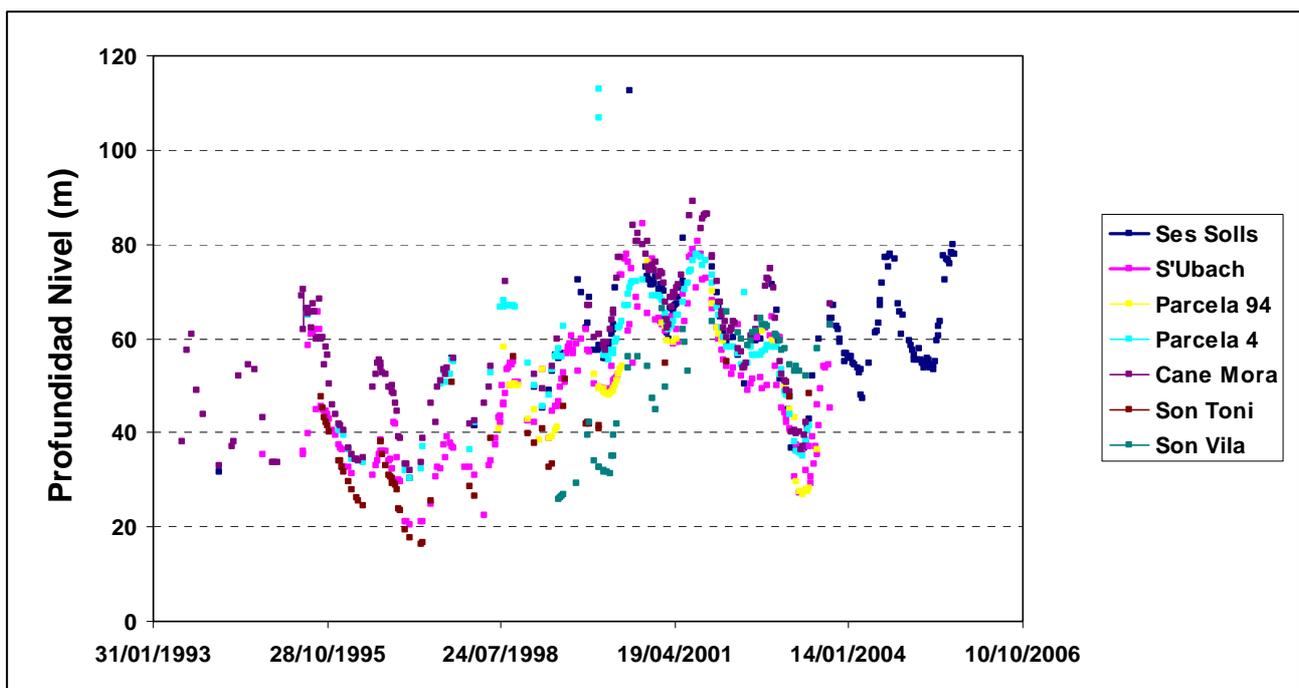


Figura 5: Evolución piezométrica en los piezómetros del acuífero de Crestatx

Según esta información, durante el periodo 1993-2005 se advierte una similar evolución temporal de todos los piezómetros (Fig. 5) debido, fundamentalmente, a que todos ellos se encuentran sometidos a un régimen de explotación similar. Las oscilaciones que se observan son coherentes tanto con el régimen pluviométrico antes comentado, como con el régimen de explotaciones a que está sometido el acuífero, coincidiendo las épocas de máximo bombeo con las de menor precipitación.

8. MODELO DE BALANCE HÍDRICO

En el presente capítulo se describe el proceso de modelado, cuyo resultado final es un modelo calibrado, tanto en sus características como en los resultados alcanzados, detallando los ajustes entre los niveles calculados y medidos.

En la realización del estudio hidroclimático del acuífero de Crestatx se ha considerado una cuenca de 11,5 km² de superficie, cuya morfología (Fig. 4) ha permitido utilizar el modelo unicelular como el más representativo del área de estudio.

Las series históricas de datos de precipitación y piezometría diarias, así como las de temperatura media mensual, han hecho posible identificar un único periodo de modelización, el comprendido entre octubre de 1964 y septiembre de 2005. Estos datos, pertenecientes a la estación meteorológica B696 de Campanet y a los piezómetros de control localizados en los pozos de Son Toni, Son Vila, Ses Solls, S'Ubach, Cane Mora, Parcela 4 y Parcela 94, todos ellos distribuidos por la superficie del acuífero en estudio, han sido suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología y la oficina del IGME en Mallorca respectivamente.

8.1. Calibración de los parámetros del modelo

Para la determinación del balance entre los años hidrológicos 64/65 y 04/05, se partió de una estimación inicial de los parámetros del modelo basada en las características de la cuenca simulada. Posteriormente, empleando la opción de la estimación automática de parámetros, se procedió a la calibración de los mismos utilizando, para ello, los datos de piezometría medidos en los pozos de bombeo.

Los parámetros iniciales y los resultantes del proceso de calibración del modelo unicelular se presentan en la tabla 2. Asimismo, se indican las técnicas de cálculo seleccionadas inicialmente para describir algunos de los procesos del ciclo hidrológico y las técnicas identificadas finalmente como mejores descriptores de dichos procesos.

Los parámetros resultantes parecen ser coherentes con el conocimiento hidrogeológico que se tiene del medio. De entre todos ellos destacan los siguientes:

Periodo 1964/65-2004/05			
Componentes del Balance Hídrico	Parámetros del Modelo	Valores Iniciales	Modelo Unicelular
<i>Suelo Edáfico</i>	Porosidad Total	0,40	0,45
	Punto de Marchitez	0,15 (52,5 mm)	0,15 (75 mm)
	Capacidad de Campo	0,35 (122,5 mm)	0,35 (175 mm)
	Reserva Útil	0,20 (70 mm)	0,20 (100 mm)
	Humedad Inicial	0,15 (52,5 mm)	0,15 (75 mm)
	Espesor del Suelo	350 mm	500 mm
	Conductividad Hidráulica	0,0864 m/d	0,0864 m/d
<i>Recarga en Tránsito</i>	Diferida	Método de la Curva	Método de la Curva
	Preferente	Por Fisuración CKRD=0,4; FRD=0,5	Por Fisuración CKRD=0,6; FRD=0,4
<i>Evapotranspiración Real (ETP por Thornthwaite)</i>		M. Penman Grindley Modificado CRPG=55 mm; CEPG=0,5	M. Penman Grindley Modificado CRPG=70 mm; CEPG=0,9
<i>Escorrentía Superficial (M. Número de Curva)</i>		Valor Curva=80 Lluv. Mín.= 5 mm	Valor Curva=75 Lluv. Mín.= 17 mm
<i>Zona No Saturada</i>	T. Semiagotamiento Hipodérmico	0 d	0 d
	Permeabilidad Vertical	0,1 m/d	0,1 m/d
	T. Semiagotamiento Percolación	1,4 d	1,4 d
	Humedad Inicial	0 mm	0 mm
<i>Acuífero</i>	Coef. Almacenamiento	0,017	0,004
	Nivel Inicial	75 m	75 m
	Nivel de Descarga	30 m	30 m
	Tiempo de Semiagotamiento Subterráneo	57,8 d	46,2 d
	Transmisividad	350 m ² /d	350 m ² /d

Tabla 2: Parámetros de la calibración del modelo del acuífero de Crestatx

- El suelo edáfico posee un espesor medio de 50 cm, presenta una porosidad total de 0,45%, su reserva útil se encuentra alrededor de los 100 mm y la conductividad hidráulica del suelo resulta ser de 0,0864 m/d.
- Se ha identificado como mecanismo preferente de recarga la fisuración o macroporos, lo que se adapta de forma conveniente a la karstificación que presenta la litología de la zona.
- La capacidad máxima de infiltración en las condiciones de capacidad de campo y punto de marchitez del modelo es característica de medios de baja escorrentía, lo que parece evidente teniendo en cuenta que se trata de un acuífero kárstico. Por ello, las características torrenciales de las precipitaciones y la gran reserva útil del

suelo hacen que, ante un suceso de lluvias, la capacidad de campo se alcance con mayor dificultad y, por tanto, se favorezca la infiltración.

- En la zona no saturada la permeabilidad vertical es un parámetro irrelevante en la calibración del modelo, mientras que los coeficientes de agotamiento del flujo hipodérmico y de percolación ejercen una importante influencia en el mismo al sufrir notables variaciones durante el proceso. El tiempo de semiagotamiento del flujo hipodérmico obtenido tras la calibración es nulo y el del flujo de percolación de 1,4 días, lo que indica tiempos de tránsito pequeños acordes, de nuevo, con el carácter kárstico de la formación.
- En la zona saturada el coeficiente de almacenamiento obtenido es de 0,004, valor típico para acuíferos libres de naturaleza kárstica. El tiempo de semiagotamiento alcanza casi los dos meses, lo que revela tiempos de tránsito pequeños para la escorrentía subterránea en sus niveles más superficiales que, presumiblemente, se incrementan de forma proporcional con la profundidad de circulación del flujo.

8.2. Ajuste de niveles

En la Fig. 6 se muestra la evolución temporal de los niveles medidos y calculados con Visual Balan 2.0. Asimismo pueden observarse los contrastes entre ambos tipos de nivel, a fin de determinar la precisión de la calibración resultante.

La serie de datos piezométricos seleccionada para la calibración del modelo corresponde al piezómetro de control de nombre Parcela 94, por ser ésta la que presenta mayor número de registros, concretamente 56 en el periodo de tiempo estudiado, cuyos valores varían entre los 27 m y los 76 m. A pesar de estas oscilaciones estacionales, la comparación de los niveles para distintos periodos de tiempo refleja un comportamiento muy similar de los mismos en todos ellos.

Tal y como se aprecia al contrastar el hidrograma calculado y los registros del piezómetro (Fig. 6), la calibración del modelo alcanza un buen ajuste entre los niveles medidos y calculados. Así, el error cuadrático medio obtenido es bajo, tan sólo 19,3 m lo que demuestra que el modelo presenta un comportamiento adecuado. De todas formas resulta evidente que un mayor número de datos piezométricos correspondientes al periodo simulado, hubiera permitido determinar con mayor fiabilidad si la caracterización del medio obtenida se corresponde o no con la bondad del ajuste alcanzado. Estos datos no existen y, por tanto, no están disponibles.

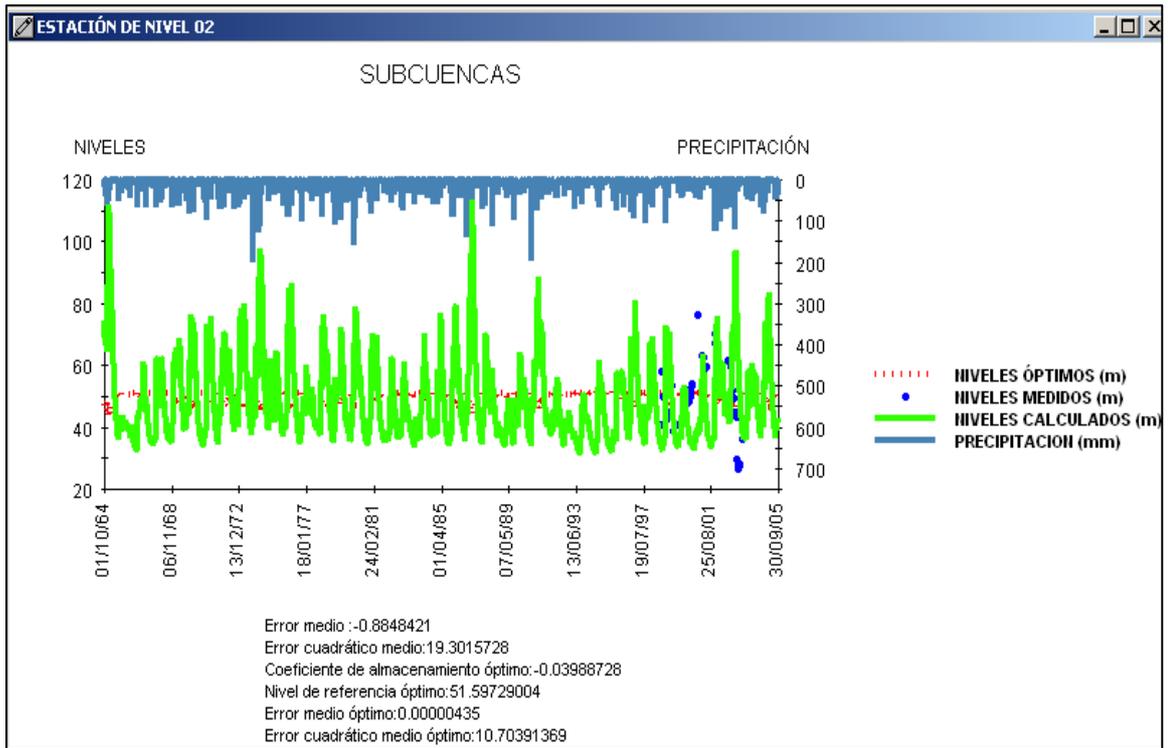


Figura 6: Evolución temporal de los niveles piezométricos medidos y calculados

La bondad del ajuste también se manifiesta en la correlación entre los niveles medidos y calculados que se presenta en la Fig. 7.

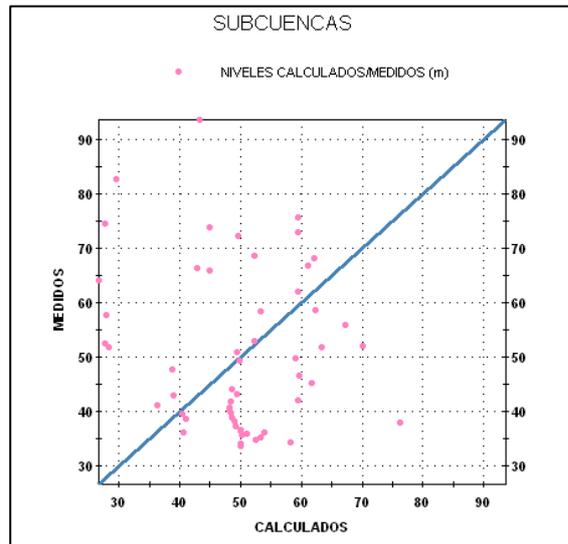


Figura 7: Correlación de niveles medidos y calculados

8.3. Balance hídrico

Una vez realizada la calibración del modelo, los balances hídricos realizados al suelo edáfico, la zona no saturada y el propio acuífero (Fig. 8) indican que de los 915 mm/año de precipitación media anual, 380 mm/año corresponden a la evapotranspiración real. Además,

la recarga natural por infiltración resulta ser la componente mayoritaria del balance con 415 mm/año, y la escorrentía superficial directa se cuantifica en 119 mm/año, resultando nula la escorrentía subsuperficial o hipodérmica y la intercepción por vegetación, en este último caso por considerarse prácticamente nulo el volumen de ésta.

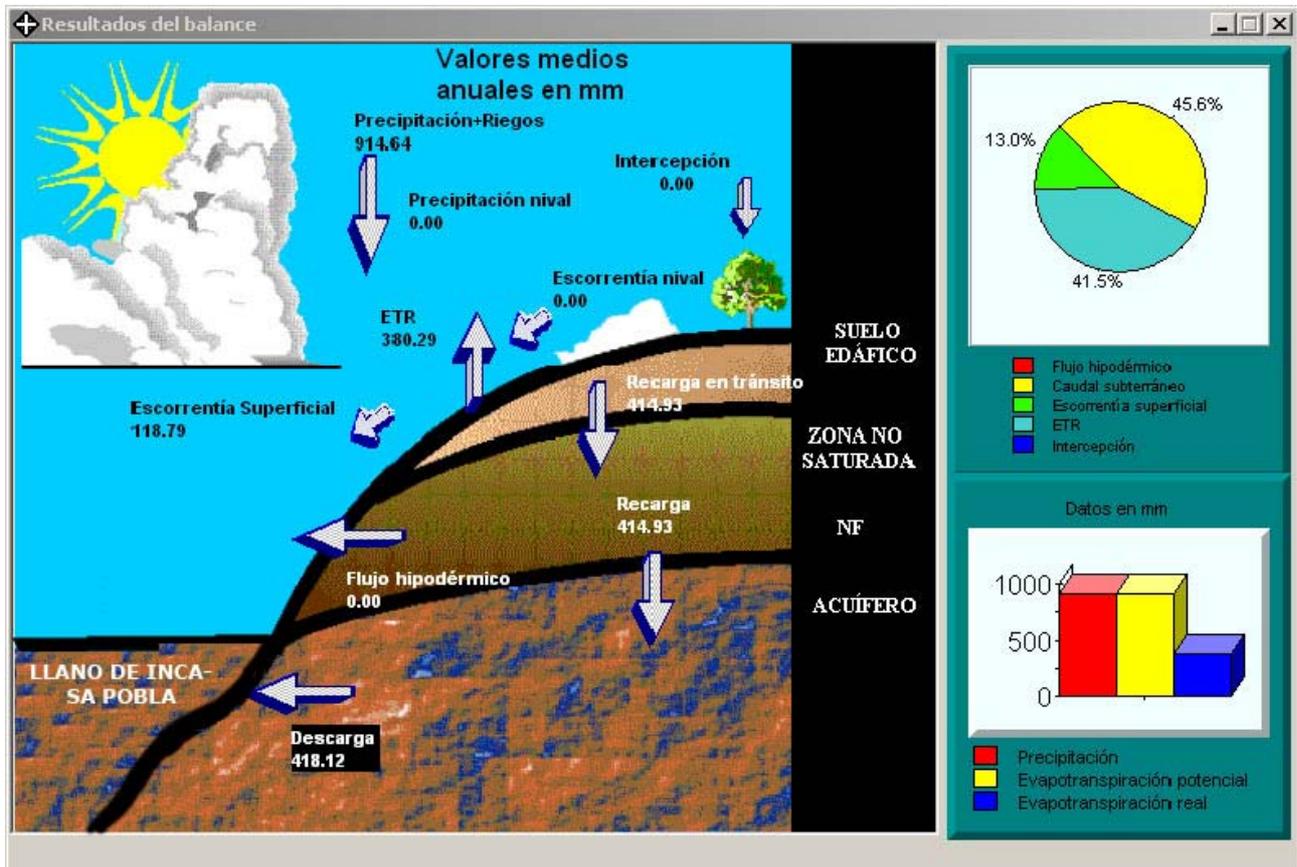


Figura 8: Balance hídrico del acuífero de Crestatx

Según IGME-DRHGB (2004), la descarga de flujo se realiza a través de los bombes de abastecimiento ($1,5 \text{ hm}^3/\text{a}$) y, de forma natural y en régimen no influenciado (Fig. 8), por el suroeste al Llano de Inca-Sa Pobra (418 mm , equivalente a $4,8 \text{ hm}^3/\text{a}$).

Según los resultados comentados anteriormente, la tasa de recarga del acuífero expresada en forma de porcentaje con respecto a la precipitación resulta ser del 45 % (Fig. 9), valor característico de acuíferos carbonáticos con características similares al estudiado en cuanto a karstificación y fisuración (López-Geta *et al.*, 2004).

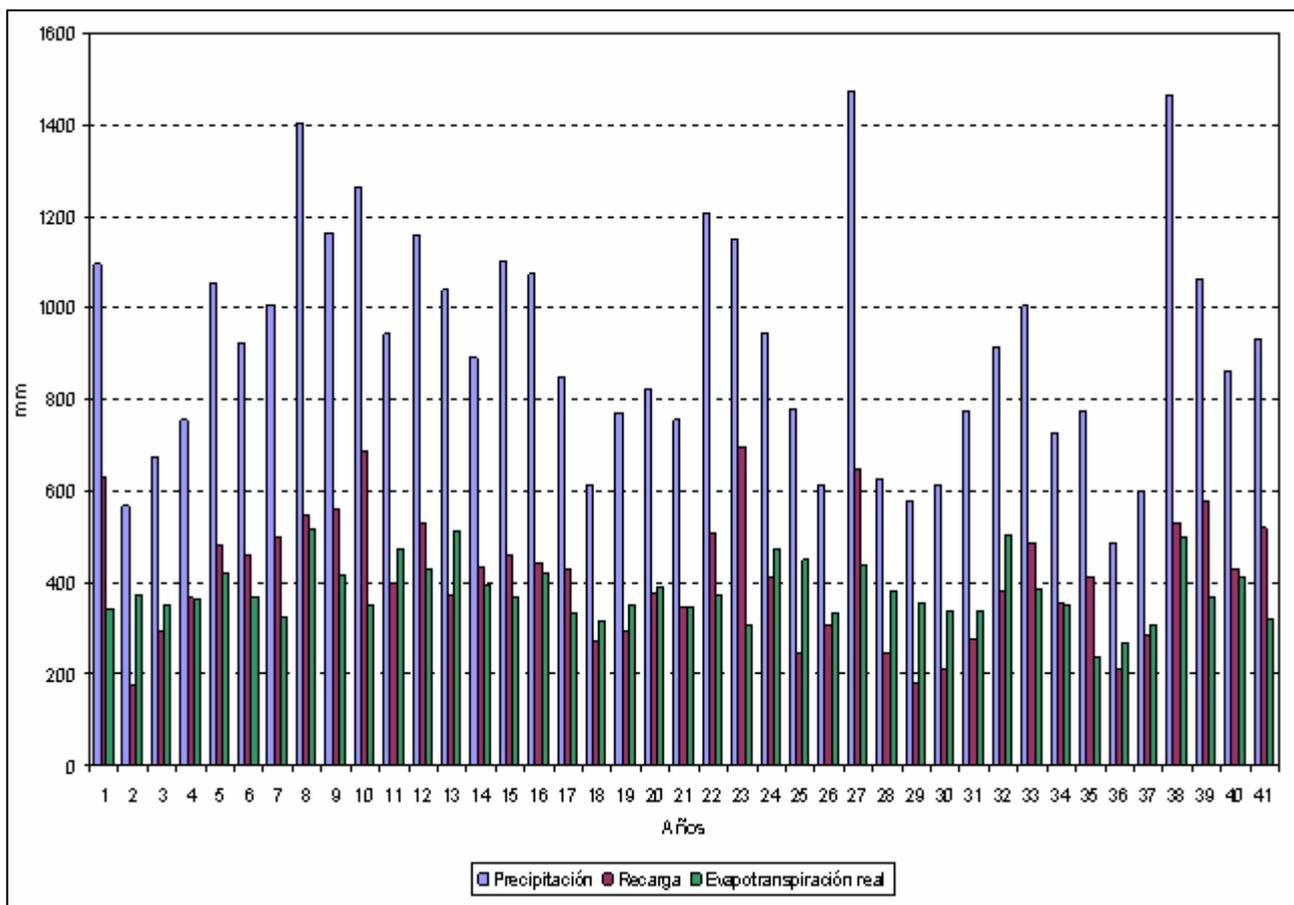


Figura 9: Comparación entre precipitación, recarga y evapotranspiración real

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 3 se presenta el balance hídrico medio anual y los parámetros del modelo calibrado mediante Visual Balan 2.0. Según estos valores dados, la evapotranspiración real y la escorrentía superficial son las salidas cuantitativamente más importantes, puesto que representan el 55 % del total de las mismas. Entre estas dos componentes, el valor de la ETR es destacable (380 mm frente a 119 mm) sobre todo debido a que, por las características del acuífero, no se han considerado riegos ni, por tanto, retornos de riego.

Modelo	Periodo	Precipit. (mm)	Dotación (mm)	ETR (mm)	ES (mm)	F. Hip. (mm)	Recarga (mm)
<i>Crestatx</i>	1964-2005	914,64	-	380,29	118,79	0	414,93
				41,6 %	13,0 %	0 %	45,4 %

Tabla 3: Resultados del modelo calibrado

A pesar del régimen pluviométrico imperante en la isla (precipitaciones de alta intensidad durante cortos espacios de tiempo) y de las fuertes pendientes en la orografía de parte de su extensión, los valores de escorrentía superficial no son tan elevados como

cabría esperar en un terreno de estas características. La causa más probable es que, a pesar de las carencias de suelo y cubierta vegetal del mismo, el carácter kárstico del acuífero permite que se favorezca la infiltración. Este hecho viene reforzado por valores altos en la capacidad de campo y el punto de marchitez, lo que obliga a que la reserva útil del terreno aumente y, con ella, su capacidad máxima de infiltración.

Tal y como se observa en la tabla 2 anteriormente comentada, el modelo creado ha valorado la potencia del suelo edáfico en 50 cm, valor que representa el material de alteración de la roca madre que actúa, en este caso, a modo de suelo. La porosidad, o lo que es lo mismo el coeficiente de almacenamiento al tratarse de un acuífero libre, y la transmisividad del mismo se han estimado en 0,004 y 350 m²/d respectivamente, resultados que se han considerado coherentes con el conocimiento geológico e hidrogeológico que se posee del medio.

Todos los parámetros que se han utilizado para la calibración del modelo no han tenido la misma influencia. Así, los coeficientes de agotamiento o de descarga del acuífero, inversamente proporcionales a los tiempos de semiagotamiento del mismo, han resultado ser parámetros clave en la calibración del modelo mientras que, por el contrario, otros, como la permeabilidad de percolación no han incidido de forma definitiva en la misma.

10. CONCLUSIONES

El código Visual Balan 2.0 ha permitido, mediante el empleo de técnicas numéricas y la calibración automática de los resultados obtenidos, establecer los balances hídricos en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero, consiguiendo de ese modo caracterizar la recarga natural del acuífero de Crestatx en la isla de Mallorca.

El conjunto de datos meteorológicos y piezométricos utilizados, seleccionados en base a la extensión de las series de datos disponibles y a su localización geográfica próxima al área de estudio, ha permitido definir y calibrar un modelo de balance hídrico asociado a ocho piezómetros distintos; de todos ellos, el que ha aportado mejores resultados en la calibración ha sido el piezómetro del pozo de nombre Parcela 94. los principales resultados obtenidos se resumen a continuación:

- La recarga media del acuífero es de 415 mm/a.
- La evapotranspiración real, ETR, se estima en torno a los 380 mm/a para un régimen de riego nulo. Esta consideración se ha realizado teniendo en cuenta la práctica ausencia de suelo y vegetación en la zona de estudio.
- La estimación media anual de las escorrentías superficial es de 119 mm.

- La reserva útil evaluada según este modelo ha sido de 100 mm.
- El coeficiente de almacenamiento y la transmisividad, determinados respectivamente como 0,004 y 350 m²/d para el acuífero de Crestatx, resultan coherentes con el tipo de acuífero considerado y la información litológica previa de la que se dispone.

Los ajustes alcanzados para este modelo de balance hídrico son buenos, aunque resultaría conveniente disponer de una mayor densidad de registros que permitiera considerar estos resultados como una caracterización rigurosa del balance en sus respectivos ámbitos. Sin embargo, dada la coherencia de la mayor parte de los parámetros obtenidos con el conocimiento geológico e hidrogeológico del acuífero, el análisis de dichos resultados puede considerarse como una primera aproximación válida del comportamiento real del medio.

Los resultados obtenidos se validarán en la actualización del modelo matemático de flujo del acuífero mediante un código de diferencias finitas.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Ancochea, E., Barnolas, A., Bea, F., Calvo, J. P., Civis, J., de Vicente, G., Fernández-Gianotti, J., García-Cortés, A., Pérez-Estaún, A., Pujalte, V., Rodríguez-Fernández, L.R., Sopeña, A., Tejero, R. y Vera, J. A. 2004. *Geología de España*. Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 884 pp.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1983. *Hidrología Subterránea*. Tomo I. Omega, Barcelona, 468-468.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1991. *Mapa Geológico de España 1:50 000. Hoja 671, Inca*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España y Dirección de Recursos Hídricos del Gobierno Balear. 2004. *Elaboración de una metodología para el sistema técnico-económico y el diseño de normas de operación en la gestión y construcción de instalaciones de recarga artificial. Aplicación de la recarga con aguas procedentes de las Fonts Ufanes de Gabellí (Mallorca)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 84 pp.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España y Universidad de las Islas Baleares. 1998. *La estructura geológica de la mitad occidental de la isla de Mallorca*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España y Universidad de las Islas Baleares. 2005. *Campaña de AMT en Crestatx (Mallorca)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

- Instituto Geológico y Minero de España y Universidad de las Islas Baleares. 2006. *Cartografía geológica de la zona de Crestatx (Mallorca)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 23 pp.
- López-Geta, J. A., Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Carrasco, F. y Jiménez, P. 2004. *Aproximación metodológica para evaluar la recarga en acuíferos carbonáticos*. Instituto Geológico y Minero de España y Universidad de Málaga, Madrid.
- Mateos, R. M., López-García, J. M., Gelabert, B., Marcuello, A., Ledó, J. J., Queralt, P., Murillo, J. M., de la Orden, J. A. y Ortiz, G. 2007. *Control geológico de la intrusión marina en los acuíferos que abastecen a la bahía de Alcudia, norte de la isla de Mallorca*. Congreso TIAC'07. Almería.
- Ministerio de Obras Públicas, Industria y Agricultura. 1973. *Estudio de los recursos hidráulicos totales de las islas de Mallorca e Ibiza*. Ministerio de Obras Públicas, Industria y Agricultura, Madrid.
- Murillo, J.M., de la Orden, J.A., Armador, J. L. y Castaño, S. 1999. *Recarga artificial de acuíferos*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España y Diputación Provincial de Alicante, Madrid, 156 pp.
- Navarro, A., Fernández, A. y Doblas, J. G. 1989. *Las aguas subterráneas en España*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid, 591 pp.
- Sahún, B. y Murillo, J.M. 2000. *Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*. Instituto Tecnológico y GeoMinero de España y Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 57 pp.
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García-Vera, M. A. 2005. *Manual del usuario del programa Visual Balan 2.0*. ENRESA, Madrid, 139 pp.