

# Aplicación del modelo "ERAS" a la elaboración de series históricas de recarga natural y su relación con el cambio climático en cuatro acuíferos kársticos de la comarca del Alto Vinalopó (Alicante)

H. Aguilera y J.M. Murillo<sup>(1)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid  
E-mails: h.aguilera@igme.es - jm.murillo@igme.es

## RESUMEN

Este estudio supone un primer paso para evaluar los efectos del cambio climático (CC) sobre la recarga natural de acuíferos. Para estimar la recarga se ha utilizado un modelo matemático unicelular de tipo depósito que reproduce el fenómeno recarga-explotación-evolución de los niveles piezométricos con un paso de tiempo mensual. Los datos de partida son precipitaciones, temperaturas, extracciones y niveles piezométricos. La principal ventaja del modelo es su independencia del mecanismo de desplazamiento del agua en el suelo y en la zona no saturada. Se han seleccionado cuatro acuíferos kársticos sobreexplotados del Alto Vinalopó (Alicante). Las series históricas de recarga para los 100 años del siglo XX agrupadas por décadas muestran una tendencia decreciente de tipo logarítmico en los cuatro acuíferos. Este hecho se debe a las tendencias decrecientes de la precipitación y creciente de la temperatura observadas mediante el test de correlación Spearman. El porcentaje de recarga sobre la precipitación total sigue también una tendencia significativamente decreciente en todos los casos. Por tanto, la recarga relativa se ve reducida progresivamente a medida que disminuye la precipitación total y aumenta la temperatura. La principal conclusión del estudio es que el modelo ERAS (Estimación de la Recarga en Acuíferos Sobreexplotados) se ha mostrado eficaz para estimar la recarga en acuíferos kársticos y, por tanto, es válido para simular condiciones futuras a partir de modelos predictivos de CC. Queda para el futuro reducir la escala temporal a nivel horario para integrar en el análisis el efecto debido a la intensidad de la precipitación.

Palabras clave: cambio climático, kárstico, modelo ERAS, recarga natural

## ***Application of the "ERAS" model to estimate aquifer recharge time series and their relation to climate change in four karstic aquifers from the High Vinalopo County (Alicante)***

### ABSTRACT

*This study supposes a first step to evaluate the effects of the climatic change (CC) on the natural recharge of aquifers. To estimate the recharge a unicellular deposit type mathematical model has been used. It reproduces the recharge-exploitation-evolution of piezometric heads phenomenon with a monthly time step. The initial data are rainfall, temperature, abstractions and heads. The main advantage of the model is its independence of the mechanism of water displacement on the ground and in the unsaturated zone. Four overexploited karstic aquifers in the High Vinalopo County (Alicante) have been selected. Annual recharge time series for the 20th century have been made and grouped into decades they show a logarithmic decreasing tendency in the four aquifers. This fact is due to a decreasing trend of the annual rainfall and an increasing trend of the temperature, observed by means of the Spearman correlation test. The percentage of recharge on total rainfall also follows a significantly decreasing tendency in all cases. Therefore, relative recharge is progressively reduced along the century following a rainfall decrease and a temperature increase. The main conclusion of the study is that the ERAS model (Estimation of Recharge in Overexploited Aquifers) has been shown to be efficient to estimate the natural recharge in karstic aquifers and so it is valid for simulating future conditions from CC prediction models. It remains for the future to reduce the temporary scale to hourly level to integrate in the analysis the effect due to rainfall intensity.*

*Key words: climate change, ERAS model, karstic, natural recharge*

## Introducción

El cambio climático (CC), en lo que se refiere a las variaciones de temperatura y sobretodo a la forma de producirse la precipitación en cantidad e intensidad,

puede influir notablemente sobre el volumen de agua que recarga los acuíferos, en el sentido de un posible incremento o decremento de la misma. Esto se debe a que las variaciones climáticas provocan modificaciones en las distintas componentes del ciclo hidrológico.

gico y, por tanto, en los recursos hídricos. Determinar de qué manera estas variaciones influyen sobre la recarga natural a los acuíferos se antoja como un reto de capital importancia, ya que la recarga constituye un término básico del balance hídrico y su conocimiento y evaluación una cuestión indispensable para lograr una gestión eficaz de los recursos hídricos. Sin embargo, la estimación de la recarga constituye un problema complejo, que está influenciado por múltiples factores, no sólo meteorológicos, sino también de otra índole, como son el tipo de suelo, la vegetación, las características fisiográficas o las propiedades de los materiales geológicos.

Entre los métodos más utilizados para calcular la recarga se encuentran los de medición directa a través de lisímetros o infiltrómetros, balances de agua en las distintas zonas del suelo, análisis de hidrogramas y descargas por manantial, los métodos hidrodinámicos (modelos numéricos de flujo y método de aproximación al flujo de Darcy) y, por último, los hidroquímicos (ej. balance de masa de cloruros), isotópicos y de aplicación de técnicas de trazadores (Lerner *et al.*, 1990). Cada uno tiene sus propias limitaciones en lo referente a aplicabilidad y fiabilidad (Beekman y Xu, 2003). La aplicación de una técnica u otra dependerá de las características hidroclimáticas de la zona de estudio, los datos existentes y los medidos, el tiempo que se dedicará al estudio y los recursos económicos y técnicos disponibles (Heredía y Murillo, 2002).

Los modelos matemáticos, como técnica de evaluación de la recarga, constituyen una herramienta sin la cual es prácticamente imposible estimar la influencia que sobre dicho factor tienen uno cualquiera de los términos que intervienen en su cálculo (López Rodríguez y Giráldez, 1997). De hecho, existen distintos tipos de modelos de simulación de cuencas, más o menos complejos, capaces de abordar la estimación de la recarga. Con carácter general, se pueden dividir en tres tipos (Murillo, 2004):

- Modelos agregados con elevado número de parámetros. Operan a escala horaria o diaria y pueden llegar a utilizar hasta 25 parámetros.

- Modelos agregados con reducido número de parámetros. Su escala temporal suele ser la semana o el mes y el número de parámetros suele oscilar entre 2 y 6.

- Modelos distribuidos. Precisan de una gran cantidad de datos que normalmente no están disponibles por su elevado coste de obtención. El más conocido es el SHE (European Hydrologic System) que incluye los siguientes procesos hidrológicos: fusión de nieve, interceptación, evapotranspiración, flujo en canal, flujo sobre el terreno, flujo no saturado y flujo satura-

do. La versión más completa de este modelo, el MIKE SHE, tiene la ventaja de integrar todos los procesos anteriormente citados en un procedimiento continuo de cálculo.

Entre los modelos desarrollados en España, recopilados por Murillo (2004), cabe destacar: BALAN (Samper y García Vera, 1988 en Samper *et al.*, 1999), que realiza un balance secuencial de agua en el suelo, zona no saturada y zona saturada; QKARST (Aragón *et al.*, 1985), utilizado en algunos estudios puntuales en la provincia de Alicante para calcular el balance de agua en el suelo, la infiltración y la escorrentía; SOILB (Martín Machuca y Virgos, 1985), modelo de parámetros distribuidos que se construyó específicamente para calcular el balance de agua en el suelo y en el acuífero del Parque Nacional de Doñana; SIMPA, modelo hidrológico de simulación de tipo determinístico y distribuido para evaluar los recursos hídricos en régimen natural a escala mensual en grandes cuencas hidrográficas y que permite obtener series mensuales de recarga a los acuíferos y caudales en la red fluvial (Ruiz García, 1999); CBAS (López Rodríguez y Giráldez, 1992 en López Rodríguez y Giráldez, 1997), orientado al riego agrícola y a determinar el efecto de la cubierta vegetal; o ERLURE (Murillo, 2004), el cual emplea únicamente cinco parámetros e información agregada para estimar la recarga que tiene lugar por precipitación y regadío.

En los últimos años se ha producido un desarrollo notable de los métodos de estimación acoplados a Sistemas de Información Geográfica (Peña y Arcos, 2004; Tapia y Mora, 2004; Samper *et al.*, 2005; Conrad *et al.*, 2004), ya que estos permiten simplificar el cálculo de la recarga mediante un análisis más rápido y detallado (Peña y Arcos, 2004), al mismo tiempo que dan cuenta de la variabilidad espacial de la distribución de la recarga (Conrad *et al.*, 2004). A este respecto el IGME ha implementado el método APLIS (Andreo *et al.*, 2004), que no es un modelo, pero permite estimar la tasa de recarga media en acuíferos carbonáticos expresada como porcentaje de la precipitación.

Según Mendes *et al.* (2005), los métodos de balance hídrico secuencial en el suelo y en la zona no saturada son los que poseen mayor capacidad predictiva, ya que cuantifican la recarga mediante el cálculo de los procesos previos al evento de recarga (precipitación, infiltración, volumen de agua almacenada en la superficie y en la zona vadosa). Sin embargo, este tipo de metodologías y los modelos en que se sustenta precisan conocer una serie de parámetros que normalmente se desconocen (reserva útil, capacidad de infiltración, parámetros de cálculo de la ETR, coeficientes de agotamiento, etc), o son muy difíciles y

costosos de obtener en cuanto el área de trabajo adquiere una cierta dimensión ligeramente superior a la parcela experimental. La posibilidad de utilizar un determinado modelo depende, por tanto, de la cantidad y calidad de la información disponible. Por eso los modelos complejos, que parecen en principio más adecuados para proporcionar mejores resultados, no lo son tanto en la práctica debido a la incertidumbre que se detecta en la información disponible (Murillo, 2004; Tapia y Mora, 2004). En líneas generales se establece que la aplicabilidad de los modelos sofisticados es adecuada en estudios de investigación, mientras que las aplicaciones sencillas son aptas para un mayor número de trabajos por proporcionar de forma rápida y, en general, simple, una primera aproximación al problema que se estudia (López Rodríguez y Giráldez, 1997). En cualquier caso, en la determinación de la recarga natural a los acuíferos deben utilizarse distintos métodos, que sean complementarios entre sí, con objeto de aumentar la fiabilidad de las estimaciones realizadas (Lerner *et al.*, 1990; Samper, 1997; Scanlon *et al.*, 2002; Sanford, 2002; Beekamn y Xu, 2003; Kumar, 2003; Carrica y Lexow, 2004).

Esta serie de consideraciones de orden práctico constituye la razón que ha impulsado a utilizar en el presente trabajo un modelo sencillo y de fácil aplicación, que posteriormente habrá de contrastarse mediante la aplicación de un modelo más complejo calibrado con datos reales medidos en campo. El modelo ERAS de Estimación de la Recarga en Acuíferos Sobreexplotados (Murillo y De la Orden, 1996), es unicelular de tipo depósito y reproduce el fenómeno recarga – explotación - evolución de los niveles piezométricos con independencia del mecanismo de desplazamiento del agua en el suelo y en la zona no saturada. Es decir, evalúa la recarga desde los efectos que se producen en el acuífero, no desde la superficie del terreno. De hecho el modelo es capaz no sólo de proporcionar valores medios de recarga, sino también de modular la misma a lo largo del tiempo, lo que constituye un aspecto fundamental para la planificación y gestión de los recursos hídricos que requieren disponer cada vez más de este tipo de estimaciones. El modelo ERAS ya ha sido aplicado con éxito en diversos acuíferos de la provincia de Alicante como son el acuífero jurásico de Cabezón de Oro (Murillo y De la Orden, 1996), el acuífero de Orba (Armayer *et al.*, 2001) y el acuífero del Ventós-Castellar (Andreu *et al.*, 2001).

El presente trabajo pretende ser una aproximación orientativa del efecto del CC sobre la recarga natural a los acuíferos, un primer paso necesario para generar un conocimiento más profundo y preciso.

Concretamente, los objetivos abordados son los siguientes:

Aplicar un modelo matemático sencillo de estimación de la recarga en cuatro acuíferos kársticos de Alicante y generar series históricas de recarga del siglo XX (1900-2000)

Realizar un análisis anual y por décadas de la evolución de la precipitación, temperatura y recarga, con el fin de observar si existe alguna variación relacionada con el CC.

### Metodología de trabajo

El modelo matemático ERAS tiene su fundamento en el modelo MEDA (Iglesias, 1984) que a su vez es fruto del estudio del manantial de Alomartes en Granada (Castillo, 1981 en Martín *et al.*, 1992). La aplicabilidad del modelo ERAS se encuentra restringida a acuíferos cuyos drenajes naturales han desaparecido a causa de los bombeos.

Se considera que la recarga natural al acuífero corresponde a una fracción de la lluvia útil, estimada como la diferencia entre precipitación y evapotranspiración real.

$$P_{u_i} = P_i - T_i^\beta \quad (1)$$

Donde  $P_i$  y  $T_i$  son la precipitación (mm) y la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el mes  $i$ , y  $\beta$  un parámetro cuyo valor medio aproximado es 1,4 pero que puede variar entre 1,3 y 1,6 siendo, normalmente, los valores altos más adecuados para zonas cálidas y los más bajos para las más frías. La expresión (1) se ha deducido a partir del trabajo de Elías y Jiménez de 1965. En ella se muestran diversos datos de evapotranspiración y balances de agua obtenidos mediante la aplicación de distintos métodos de cálculo (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle y Penman) para un cierto número de las principales estaciones termopluviométricas situadas a lo largo de la geografía española.

La recarga natural al acuífero por infiltración a través del afloramiento permeable, para el mes  $i$ , viene dada por la expresión:

$$R_i = M \cdot (P_i - T_i^\beta)^N \quad (2)$$

- $R_i$  es la recarga natural que se produce en el período  $i$  (mm).
- y  $M$  y  $N$  parámetros adimensionales de una correlación potencial sujetos a calibración.

Una condición necesaria que han de verificar los parámetros del modelo es que  $R_i \leq P_{u_i}$ , es decir:

$$M \cdot (P_i - T_i^\beta)^N \leq (P_i - T_i^\beta),$$

$$M \cdot (P_i - T_i^\beta)^{N-1} \leq 1 \quad (3)$$

La variación del almacenamiento, en m<sup>3</sup>, que tiene lugar en el período "i" (V<sub>Ai</sub>), se puede evaluar mediante la expresión:

$$V_{Ai} = \Delta h_i \cdot FAG_i \quad (4)$$

- $\Delta h_i$ , es la variación del nivel piezométrico durante el período "i" (m).
- FAG<sub>i</sub>, es un Factor llamado de Almacenamiento Global, cuyo valor es igual al producto del coeficiente de almacenamiento (S<sub>i</sub>), por el área del embalse subterráneo (A<sub>i</sub>, en m<sup>2</sup>). Cada uno de estos factores puede adoptar valores diferentes para cada paso de tiempo, aunque en la práctica se consideran constantes.

La variación del almacenamiento también se puede expresar como:

$$V_{Ai} = R_i - B_i \quad (5)$$

Donde B<sub>i</sub> es la cantidad de agua bombeada durante el período "i" (m<sup>3</sup>). Para que la expresión anterior sea válida es necesario expresar la recarga en la misma unidad que el bombeo. Esto se consigue mediante el siguiente factor de conversión:

$$R_i \text{ (m}^3\text{)} = R_i \text{ (mm)} \cdot A_i / 1000$$

Igualando las expresiones (4) y (5), se obtiene la expresión que relaciona la "variación del nivel piezométrico", con "recarga" y "extracción por bombeo", para un determinado período "i":

$$R_i - B_i = \Delta h_i \cdot FAG_i$$

$$\Delta h_i = [M \cdot (P_i - T_i^\beta)^N - B_i] / FAG_i \quad (6)$$

En la expresión (6) el FAG se considera constante.

Como ya se ha comentado, la principal ventaja de este modelo, dado que se trata de un método que evalúa la recarga por contraste con las variaciones del nivel freático, es su independencia del mecanismo de desplazamiento del agua en el suelo y en la zona no saturada. Gracias a ello, se evita la estimación y calibración, a veces difícil, de los parámetros y variables que intervienen en dichos procesos. Ahora bien, el modelo únicamente tiene aplicación en acuíferos que reaccionan ante la recarga de un modo rápido, independientemente de que su agotamiento sea lento. La validez de la expresión (6) se sustenta en el hecho de que la respuesta freática de un acuífero o de sus caudales de descarga, ante un evento de recar-

ga, están regidos por efectos hidráulicos y no suponen necesariamente un movimiento físico del agua (Murillo y Roncero, 2005).

El programa de cálculo que desarrolla la expresión (6) se ha realizado mediante programación sobre una hoja de cálculo Excel, por lo que su manejo es muy sencillo.

### **Aplicación a los acuíferos de Solana, Peñarrubia, Jumilla-Villena y Serral-Salinas**

Se han elegido cuatro acuíferos sobreexplotados (bombeo mayor que la recarga durante un largo período de tiempo que se podría evaluar en varias decenas de años) de la comarca del Alto Vinalopó en Alicante: Jumilla-Villena, Serral-Salinas, Peñarrubia y Solana. Previamente se recalibrarán los modelos ya desarrollados para estos acuíferos (DPA-IGME, 2003a,b; 2005; Murillo y Roncero, 2005) al haberse detectado en ellos, tras una exhaustiva revisión, pequeños errores metodológicos en la calibración. La metodología aplicada se ha estructurado según tres etapas:

1. modelo conceptual.
2. datos de partida a introducir en el modelo.
3. calibración y validación.

### **Modelo conceptual**

Los cuatro acuíferos pertenecientes a la comarca del Alto Vinalopó están situados a ambos lados de la línea que une los municipios de Villena, Sax y Elda (Jumilla-Villena y Serral-Salinas al oeste; Solana y Peñarrubia al este). Abarcan superficies entre 41,5 km<sup>2</sup> (Peñarrubia) y 317 km<sup>2</sup> (Jumilla-Villena). Cabe destacar el hecho de que los acuíferos de Jumilla-Villena y Serral-Salinas son intercomunitarios (Comunidad Valenciana y Murcia) e intercuenca (ríos Júcar y Segura).

### **Características individuales**

Las calizas y dolomías del Cretácico superior forman el acuífero de Jumilla-Villena y Solana. Son formaciones permeables por fisuración y karstificación. El impermeable de base lo constituyen arenas, margas y arcillas en facies "Utrillas".

El acuífero de Serral-Salinas presenta una litología constituida por dolomías, calizas del Cretácico (Aptense a Senonense). El de Peñarrubia está formado por calizas del Jurásico superior y en menor proporción calcarenitas del Portlandiense-Barremiense.

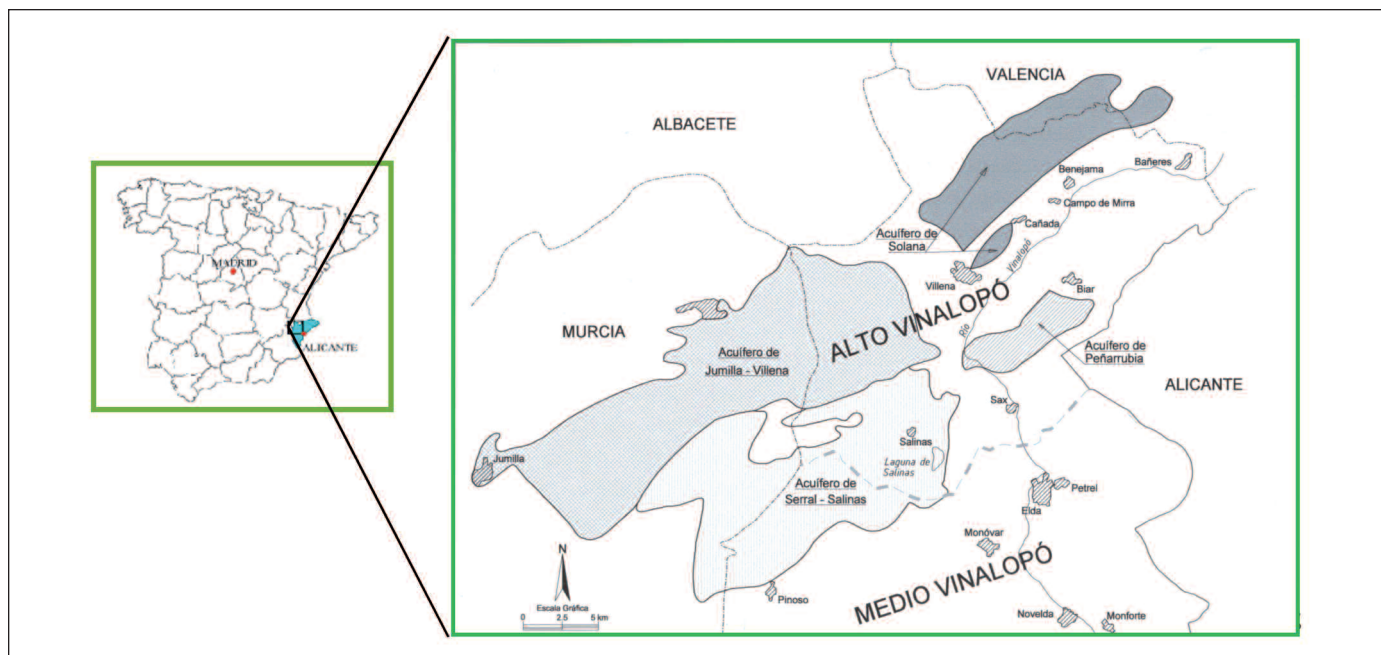


Figura 1. Situación de los acuíferos en la comarca del Alto Vinalopó  
 Figure 1. Aquifers location at the High Vinalopó county

En ambos acuíferos el impermeable está constituido por materiales cretácicos (margas del Cretácico inferior) y por materiales margosos del Eoceno y Mioceno.

La tabla 1 recoge los rangos de variación de algunos parámetros hidrogeológicos en cada uno de los acuíferos, tomados de distintas fuentes bibliográficas consultadas. Se puede observar, entre otros, el desequilibrio existente entre las aportaciones y las descargas de cada sistema, o los altos valores de transmisividad en estos acuíferos kársticos.

*Características comunes*

Las características comunes que presentan los cuatro acuíferos van a definir la aplicabilidad del modelo. Estas son, principalmente, la litología (acuíferos calizos y dolomíticos permeables por fisuración y karstificación), que favorece una rápida reacción ante la recarga por la elevada transmisividad, y la sobreexplotación, que implica la desaparición de los drenajes naturales. De hecho, los cuatro acuíferos están incluidos en el catálogo elaborado por la

	<b>Jumilla-Villena</b>	<b>Solana</b>	<b>Serral-Salinas</b>	<b>Peñarrubia</b>
<b>Área del acuífero (m<sup>2</sup>)</b>	317.000.000	117.875.000	197.500.000	41.500.000
<b>Coefficiente de almacenamiento</b>	0,02-0,04	0,002-0,10	0,005-0,01	0,01-0,02
<b>Transmisividad (m<sup>2</sup>/d)</b>	500-800	80-1600	330-2000	-
<b>Valor medio de la recarga (hm<sup>3</sup>/año)</b>	7	9	4-5	4
<b>Valor medio de la descarga (hm<sup>3</sup>/año)</b>	29	37	11,1	0,5

Tabla 1. Datos históricos de los acuíferos de Jumilla-Villena, Solana, Serral-Salinas y Peñarrubia. Fuente: DPA-IGME (1982), DGOHCA-ITGE (1998), DPA-IGME (2003a,b; 2005), Murillo y Roncero (2005)  
 Table 1. Historical data for the Jumilla Villena, Solana, Serral-Salinas and Peñarrubia aquifers. Data source: DPA-IGME (1982), DGOHCA-ITGE (1998), DPA-IGME (2003a,b; 2005), Murillo and Roncero (2005)

Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (DGOHCA) en colaboración con el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), concluido en 1998.

En los acuíferos estudiados se considera que las únicas entradas de agua provienen de la recarga por la infiltración de la lluvia útil. Las salidas se realizan exclusivamente por bombeos en los pozos y sondeos de captación, que son utilizados en abastecimiento urbano e industria, así como en agricultura.

### Datos de partida

Para la construcción y calibración del modelo se han utilizado datos mensuales de precipitación, temperaturas, bombeos, variaciones del nivel piezométrico y área del acuífero. Estos datos se operan según un paso de tiempo mensual.

### Climatología

Los datos de pluviometría y temperatura introducidos en el modelo han sido obtenidos de la estación termopluviométrica de Villena, elegida como la más representativa de las condiciones climáticas del área por su proximidad a los cuatro acuíferos. Dicha estación posee datos mensuales de precipitación desde 1950 y de temperatura desde 1942. Entre 1960 y 2000 faltan 13 datos de temperatura que corresponden a la totalidad del año 1994 y al mes de diciembre del año 1992. Para completarlos se han utilizado datos correspondientes a la estación meteorológica de Villena-La Vereda. Los huecos del resto de la serie desde 1900 hasta 1960 han sido estimados a partir de los datos de otras tres estaciones: Pinoso CH Segura, Alicante Ciudad Jardín y Alicante-Instituto. Para ello se ha utilizado el programa CORTREST, del paquete informáti-

co HIDROBAS v. 3.0, que realiza una correlación ortogonal entre estaciones y restituye los valores de una estación incompleta a partir de una estación base cuando la correlación entre ambas es mayor o igual a 0,8 (Ortiz López *et al.*, 2001).

### Niveles piezométricos

Los piezómetros para cada uno de los acuíferos estudiados (Tabla 2) han sido seleccionados con arreglo a criterios de tipo geográfico, geológico e hidrogeológico. Entre ellos, que se encuentren alejados tanto de los principales cursos de agua, por lo que en principio no están afectados por recargas externas debidas a la infiltración que tiene lugar a través del lecho de los ríos o el vaso de los embalses, como de puntos de bombeo.

En el punto acuífero 2733-3-0009 de Jumilla-Villena se han realizado 13 medidas de nivel que abarcan desde febrero de 1998 a septiembre de 2002. Para la validación y comprobación, se poseen 15 y 10 medidas de los puntos 2733-3-0038 y 2633-8-0017, respectivamente, del período 2000-2001.

En el punto 2832-6-0019 del acuífero de Solana, se tienen 17 medidas de nivel que se concentran en el período de tiempo que va de enero de 1994 a diciembre de 1997. Para la validación y comprobación, se poseen 11 medidas en el punto 2832-6-0010, en el período 1994-1997, y 3 medidas en el 2833-1-0061 en 1989.

En el acuífero de Serral-Salinas se han estudiado los puntos 2733-8-0003 y 2734-2-0002. Del primer punto se tienen 7 medidas entre febrero de 1989 y diciembre de 1989, y del segundo punto se han realizado 4 medidas comprendidas entre abril de 1989 y diciembre de 1989. En la validación se han usado los mismos piezómetros pero con 4 medidas tomadas en el año 2000.

		Jumilla-Villena	Solana	Serral-Salinas		Peñarrubia
Nº del inventario del IGME	Calibración	2733-3-0009	2832-6-0019	2733-8-0003	2734-2-0002	2833-1-0035
	Validación	2733-3-0038	2832-6-0010	2733-8-0003	2734-2-0002	2833-1-0019
		2633-8-0017				
		2733-5-0001	2833-1-0061			

Tabla 2. Puntos piezométricos utilizados en la calibración y validación de los modelos  
Table 2. Piezometers used in model calibration and validation

En el acuífero de Peñarrubia, en el punto 2833-1-0035 se tienen 31 medidas que se concentran en el período de tiempo que va de septiembre de 1988 a mayo de 1999. En el piezómetro 2833-1-0019 utilizado en la etapa de validación se cuenta con 11 medidas que abarcan desde febrero de 1984 a abril de 1991.

<b>JUMILLA-VILLENA</b>		<b>SOLANA</b>		<b>SERRAL-SALINAS</b>	
ene-98	318618,33	ene-94	1916844,69	ene-89	427353,60
feb-98	686834,54	feb-94	2405520,92	feb-89	457216,86
mar-98	2030246,98	mar-94	3348066,69	mar-89	479871,75
abr-98	2173266,17	abr-94	3102607,45	abr-89	1190411,46
may-98	3682272,25	may-94	3857786,19	may-89	539598,27
jun-98	4822473,81	jun-94	4502099,63	jun-89	1609526,92
jul-98	6583687,56	jul-94	4915192,01	jul-89	2474531,78
ago-98	6635272,43	ago-94	4466446,68	ago-89	1156429,13
sep-98	4174235,53	sep-94	3140441,02	sep-89	578729,45
oct-98	2847831,33	oct-94	1688515,59	oct-89	524151,76
nov-98	950577,55	nov-94	1705485,80	nov-89	459276,39
dic-98	1352242,52	dic-94	1631889,34	dic-89	400579,64
ene-99	632394,33	ene-95	1923097,65		
feb-99	1273391,54	feb-95	2423836,94		
mar-99	2732822,98	mar-95	2598967,83		
abr-99	2962995,17	abr-95	3391458,66		
may-99	4711397,25	may-95	4182036,43		
jun-99	6051445,81	jun-95	3906778,84		
jul-99	8215859,56	jul-95	4658517,20		
ago-99	8113246,43	ago-95	4321716,24		
sep-99	4901751,53	sep-95	3223844,55		
oct-99	3362192,33	oct-95	2654983,48		
nov-99	1270399,55	nov-95	2485869,31		
dic-99	1668628,52	dic-95	2192260,88		
ene-00	566962,33	ene-96	2027588,29		
feb-00	1400583,54	feb-96	1921202,12		
mar-00	2844378,98	mar-96	2831334,37		
abr-00	3099188,17	abr-96	3108080,27		
may-00	4694742,25	may-96	3440951,67		
jun-00	6179321,81	jun-96	4332765,07		
jul-00	8311482,56	jul-96	4810160,66		
ago-00	8323716,43	ago-96	4835385,08		
sep-00	5281871,53	sep-96	3527886,66		
oct-00	3663064,33	oct-96	2780136,19		
nov-00	1474219,55	nov-96	1404051,59		
dic-00	1856690,52	dic-96	1567564,04		
ene-01	807205,33	ene-97	2216504,08		
feb-01	1585737,54	feb-97	1199501,81		
mar-01	3033787,98	mar-97	3066138,60		
abr-01	3386557,17	abr-97	2966503,90		
may-01	4729538,25	may-97	3713660,96		
jun-01	6336033,81	jun-97	3424064,91		
jul-01	8273198,56	jul-97	4130474,65		
ago-01	8256749,43	ago-97	4183176,57		
sep-01	5095202,53	sep-97	2714283,44		
oct-01	3406236,33	oct-97	1835320,40		
nov-01	1345123,55	nov-97	1621424,27		
dic-01	1642299,52	dic-97	1766041,42		
ene-02	608763,33				
feb-02	1179686,54				
mar-02	2651762,98				
abr-02	2756976,17				
may-02	4590839,25				
jun-02	6184821,81				
jul-02	7972785,56				
ago-02	7698961,43				
sep-02	4898361,53				
oct-02	3343261,33				
nov-02	1371741,55				
dic-02	1623147,52				

Tabla 3. Datos mensuales de extracción (m³) en los acuíferos de Jumilla-Villena, Solana y Serral-Salinas  
 Table 3. Monthly exploitation data (m³) for the Jumilla-Villena, Solana and Serral-Salinas aquifers

### Extracciones

En lo referente a los datos de extracciones realizadas en los acuíferos de Jumilla-Villena, Serral-Salinas y Solana (Tabla 3), se han utilizado los existentes en la base de datos del Departamento de Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante, entre ellos los de un estudio específico realizado expresamente para el modelo de Jumilla-Villena (2002). Para el acuífero de Peñarrubia, la Diputación dispone de datos mensuales de extracción durante los años 1989, 1994, 1995 y 1996. Sin embargo, la serie a la que dan origen no presenta continuidad, no es suficientemente larga y representativa y no es totalmente coincidente con el período en que existen datos de control piezométrico. Es por ello que los datos utilizados proceden de una serie sintética (IGME-DPA, 2002) elaborada a partir de encuestas realizadas por el Instituto Geológico y Minero de España, la Diputación Provincial de Alicante y la Comunidad General de Usuarios del Alto Vinalopó (ITGE-DPA, 2000), a través de una distribución porcentual mensual de los valores anuales.

### Calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo

La ecuación (6) es la que sirve de base para la calibración de los parámetros M, N y S del modelo mediante la aplicación iterativa de dicha expresión hasta obtener un ajuste mínimo cuadrático de los valores de  $\Delta h_i$ . En el caso del coeficiente de almacenamiento S, se ha partido de un valor acorde con la litología de cada formación acuífera principal (Tabla 1). Para el área de embalse se ha tomado un valor constante para cada acuífero y  $\beta$  igual a 1,3 en todos los casos. A continuación se ha procedido a la validación del modelo con datos de un período de tiempo y/o de un piezómetro distinto al de la calibración. Por último, se ha efectuado un análisis de sensibilidad variando los parámetros M, N y S obtenidos y observando la respuesta del modelo.

El diagnóstico de los modelos para comprobar si se cumplen las hipótesis básicas de la regresión se ha realizado mediante el análisis de los residuos (diferencia entre valor observado y esperado) que han de verificar: distribución normal (de media 0 y desviación típica 1) homocedasticidad (la varianza de los residuos ha de mantenerse constante para todos los valores de la variable dependiente) e independencia. Para comprobar la normalidad se han utilizado la prueba no paramétrica de *Kolmogorov-Smirnov* y la prueba *t-student* para una muestra para observar si la media de los residuos no es significativamente distinta de 0. La homocedasticidad se ha contrastado mediante los gráficos de residuos frente a valor estimado y la independencia con la prueba de rachas.

### Resultados y discusión

#### Calibración, validación y análisis de sensibilidad

En la tabla 4 se muestran los valores de los parámetros M, N y S obtenidos en la calibración para cada uno de los acuíferos estudiados. En general, se ha observado una adecuada distribución normal, homocedasticidad e independencia de los residuos de cada modelo. Las validaciones han corroborado los resultados de las calibraciones en todos los casos. Cabe destacar que los valores de N están muy próximos a la unidad en todos los casos lo que indica una cierta tendencia hacia la linearización de la expresión (2) y, por tanto, hacia una simplificación del modelo. Por otro lado, se aprecia una ligera relación entre los valores de M y la situación geográfica y el tamaño de los acuíferos, ya que Solana y Peñarrubia presentan valores más elevados de este parámetro y ambos se encuentran en la zona oriental y son los más pequeños. Sin embargo se desconoce la naturaleza de esta relación.

En las figuras 2, 3, 4 y 5 se representan la evolución piezométrica de los niveles medidos y simulados, así como el error cuadrático medio (ECM) de la

	SOLANA	SERRAL-SALINAS	PEÑARRUBIA	JUMILA-VILLENA
<b>M</b>	0,93	0,12	0,86	0,2
<b>N</b>	1,01	0,9	0,96	1,2
<b>S</b>	0,022	0,005	0,02	0,03

Tabla 4. Valores de los parámetros del modelo tras la calibración y la validación del mismo para los cuatro acuíferos  
 Table 4. Model parameter values from calibration and validation for the four aquifers



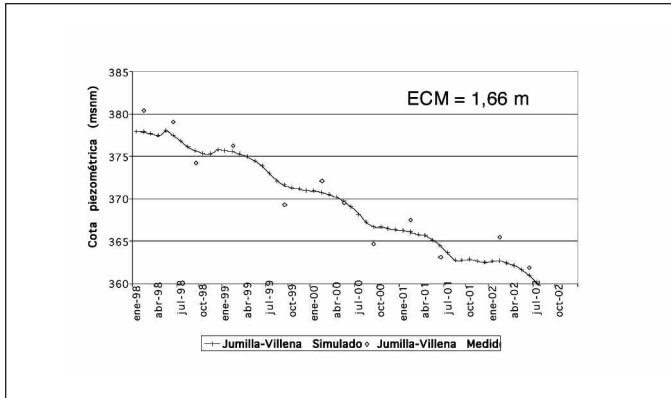


Figura 2. Acuífero de Jumilla-Villena. Niveles piezométricos medidos y simulados, y error cuadrático medio (ECM) asociado, para el período de calibración del modelo

Figure 2. Jumilla-Villena aquifer. Observed and simulated water table, and mean quadratic error (ECM), for the model calibration period

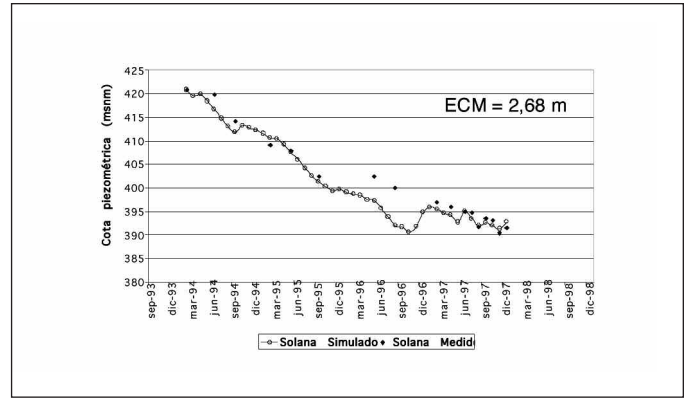


Figura 3. Acuífero de Solana. Niveles piezométricos medidos y simulados, y error cuadrático medio (ECM) asociado, para el período de calibración del modelo

Figure 3. Solana aquifer. Observed and simulated water table, and mean quadratic error (ECM), for the model calibration period

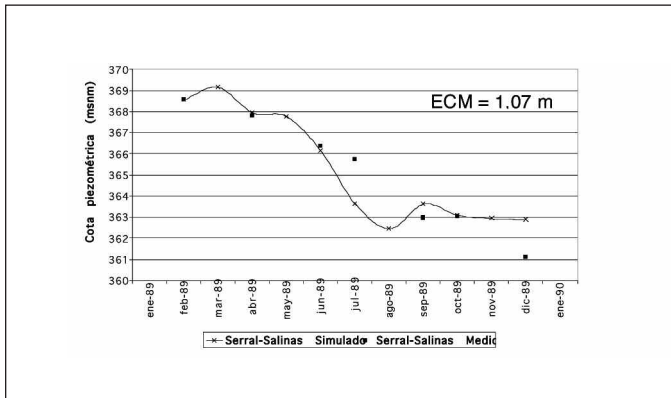


Figura 4. Acuífero de Serral-Salinas. Niveles piezométricos medidos y simulados, y error cuadrático medio (ECM) asociado, para el período de calibración del modelo

Figure 4. Serral-Salinas aquifer. Observed and simulated water table, and mean quadratic error (ECM), for the model calibration period

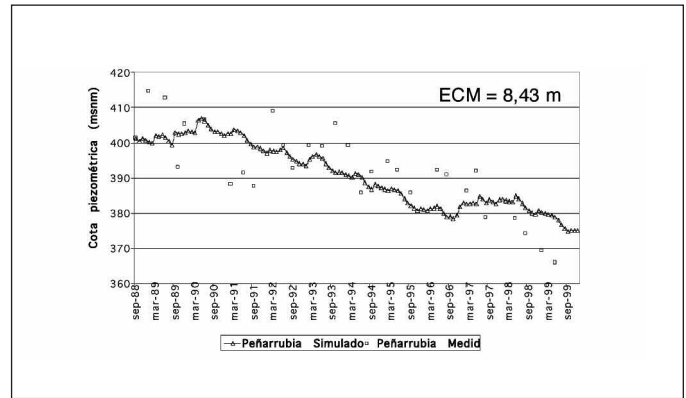


Figura 5. Acuífero de Peñarrubia. Niveles piezométricos medidos y simulados, y error cuadrático medio (ECM) asociado, para el período de calibración del modelo

Figure 5. Peñarrubia aquifer. Observed and simulated water table, and mean quadratic error (ECM), for the model calibration period

estimación, para cada uno de los acuíferos. El período de calibración se ve limitado, fundamentalmente, por la disponibilidad de datos de bombeo. Se observa buenos ajustes en los acuíferos de Serral-Salinas, Jumilla-Villena y Solana, este último con la excepción del año 1996, posiblemente debido a la escasez de datos medidos en ese año. En el caso de Peñarrubia, a la vista de los resultados obtenidos, y dada su compleja litología, se deduce la posibilidad de que el modelo conceptual del acuífero (ver DPA-IGME, 1982) no sea del todo adecuado y que, por tanto, su forma de funcionamiento no esté bien definida, pudiendo existir recarga lateral procedente de otros acuíferos, errores en la propia geometría, etc. Todo ello, unido a la baja fiabilidad de los datos de extracciones, son las

causas más probables del aumento del error cometido al realizar el ajuste del modelo.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad efectuado concluye que los valores de M, N y S sólo admiten, en general, pequeñas variaciones (especialmente N y S), pues lo contrario conduce a resultados que se apartan notablemente de los obtenidos en la calibración. Se considera, por tanto, que los modelos son bastante robustos y plausibles.

### Generación de series históricas y análisis por décadas

Con los valores de los parámetros obtenidos se ha generado, introduciendo los datos de precipitación y

temperatura en la expresión (2), la serie histórica de recarga mensual para el conjunto de años hidrológicos desde 1900-01 hasta 1999-00 en los cuatro acuíferos (Tablas 5a,b y 6a,b). La tabla 5 muestra, por razones de espacio ya que el volumen de datos generado es bastante grande, el valor absoluto estimado de la recarga natural anual así como los promedios para cada década y el promedio total, para

el citado período. La tipología del año climático que figura en dicha tabla se ha calculado ajustando la serie de pluviometrías anuales a la función de distribución de Goodrich mediante el programa FUNDIST del paquete HIDROBAS. Definiendo los años húmedos como los que se encuentran por encima del 0,65 de probabilidad acumulada en la función de distribución, y los años secos como los que se encuen-

Año hidrológico	Lluvia útil (P <sub>u</sub> )	SOLANA	JUMILLA-VILLENA	SERRAL-SALINAS	PENARRUBIA	Tipo de año
		R (m m)	R (m m)	R (m m)	R (m m)	
1900-1901	779,205	763,26	448,56	55,98	545,09	HUMEDO
1901-1902	311,459	301,63	140,93	24,98	227,89	HUMEDO
1902-1903	357,323	347,69	177,90	27,34	256,53	HUMEDO
1903-1904	572,400	557,35	287,14	43,41	409,69	HUMEDO
1904-1905	420,865	409,43	208,32	32,25	302,38	HUMEDO
1905-1906	908,371	891,02	530,59	64,11	631,47	HUMEDO
1906-1907	362,996	351,79	166,41	28,89	264,79	HUMEDO
1907-1908	363,774	352,58	167,50	28,95	216,82	HUMEDO
1908-1909	421,547	409,70	205,79	32,67	304,14	HUMEDO
1909-1910	232,699	226,17	114,15	18,05	167,88	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>473,06</b>	<b>461,06</b>	<b>244,73</b>	<b>35,66</b>	<b>332,67</b>	
1910-1911	254,855	246,28	110,11	20,86	188,02	MEDIO
1911-1912	240,129	233,16	114,34	18,76	173,86	SECO
1912-1913	236,598	231,28	129,90	17,33	166,85	MEDIO
1913-1914	230,358	223,56	108,80	18,09	167,12	MEDIO
1914-1915	693,209	678,71	392,25	49,91	485,61	HUMEDO
1915-1916	310,511	301,63	149,66	24,17	224,45	MEDIO
1916-1917	289,025	282,72	160,73	21,01	203,22	MEDIO
1917-1918	410,413	398,67	196,80	31,90	296,61	HUMEDO
1918-1919	358,663	351,05	201,86	25,93	251,61	SECO
1919-1920	264,738	256,29	119,25	21,32	193,99	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>328,85</b>	<b>320,34</b>	<b>168,37</b>	<b>24,93</b>	<b>235,13</b>	
1920-1921	230,531	222,96	101,70	18,74	169,57	HUMEDO
1921-1922	111,072	107,59	50,42	8,88	81,18	SECO
1922-1923	254,687	248,24	131,95	19,20	181,68	MEDIO
1923-1924	197,034	190,76	88,67	15,85	144,33	MEDIO
1924-1925	108,098	104,75	49,72	8,63	78,92	SECO
1925-1926	218,556	212,71	109,37	16,68	156,76	MEDIO
1926-1927	173,134	167,89	81,42	13,75	126,08	MEDIO
1927-1928	106,840	102,41	39,25	9,49	81,44	SECO
1928-1929	266,003	257,80	122,55	21,19	194,06	MEDIO
1929-1930	67,598	64,89	25,68	5,93	51,25	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>173,36</b>	<b>168,00</b>	<b>80,07</b>	<b>13,84</b>	<b>126,53</b>	
1930-1931	255,458	250,20	144,95	18,31	178,67	SECO
1931-1932	265,825	257,60	122,07	21,19	194,01	HUMEDO
1932-1933	309,525	299,54	137,93	25,00	227,11	HUMEDO
1933-1934	154,961	149,60	65,72	12,81	114,79	MEDIO
1934-1935	220,768	214,29	104,23	17,29	160,04	MEDIO
1935-1936	352,325	342,58	172,57	27,13	283,64	HUMEDO
1936-1937	235,556	229,62	121,98	17,71	167,92	HUMEDO
1937-1938	345,434	338,06	194,72	25,03	242,50	SECO
1938-1939	80,055	76,99	31,57	6,89	60,25	HUMEDO
1939-1940	238,102	232,80	131,19	17,40	167,75	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>245,80</b>	<b>239,13</b>	<b>122,69</b>	<b>18,88</b>	<b>176,67</b>	
1940-1941	191,123	185,35	89,39	15,13	139,08	SECO
1941-1942	206,481	200,16	95,41	16,41	150,51	HUMEDO
1942-1943	138,853	134,10	59,41	11,45	102,72	MEDIO
1943-1944	159,193	155,02	80,84	12,11	113,99	SECO
1944-1945	82,249	79,48	35,80	6,75	60,73	SECO
1945-1946	316,793	308,20	157,97	24,31	227,65	HUMEDO
1946-1947	305,775	295,82	135,96	24,80	224,68	MEDIO
1947-1948	161,280	155,74	68,87	13,31	119,36	HUMEDO
1948-1949	378,875	367,62	177,95	29,80	275,08	HUMEDO
1949-1950	159,420	154,31	71,04	12,83	116,83	SECO
<b>Promedio</b>	<b>210,00</b>	<b>203,58</b>	<b>97,26</b>	<b>16,69</b>	<b>153,06</b>	

Tabla 5.a. Series históricas de lluvia útil (P<sub>u</sub>) y recarga natural (R) de los acuíferos de Solana, Jumilla-Villena, Serral-Salinas y Peñarrubia, incluyendo promedios por década, para el período 1900-1950

Table 5.a. Time series for effective precipitation and natural recharge into Solana, Jumilla-Villena, Serral-Salinas and Peñarrubia aquifers, including average values for each decade, for the 1900-1950 period

tran por debajo del valor de 0,35. Los años medios de la serie corresponden, por tanto, a los valores comprendidos entre 0,35 y 0,65.

En la tabla 6 el porcentaje de lluvia útil sobre la precipitación acaecida es idéntico para los cuatro acuíferos al haberse usado los mismos datos de precipitación y temperatura en todos ellos. El valor medio anual para toda la serie se sitúa en un 50,2%. Los por-

centajes más elevados corresponden a las dos primeras décadas, coincidiendo con los períodos más húmedos (Tabla 6 y Fig. 6), y la tendencia es decreciente a lo largo de toda la serie.

Con el fin de obtener una visión más clara y amplia de la evolución de la recarga a lo largo de períodos de tiempo mayores al año natural, se han agrupado los resultados por décadas para las que se ha calculado

Año hidrológico	Lluvia útil (P <sub>u</sub> )	SOLANA	JUMILLA-VILLENA	SERRAL-SALINAS	PENARRUBIA	Tipo de año
		R (m m)	R (m m)	R (m m)	R (m m)	
1950-1951	309,25	300,46	149,41	24,03	223,39	HUMEDO
1951-1952	205,76	200,05	100,66	15,86	148,19	HUMEDO
1952-1953	94,56	91,42	41,51	7,73	69,69	SECO
1953-1954	261,22	253,16	119,78	20,79	190,56	HUMEDO
1954-1955	68,73	65,73	24,19	6,25	52,87	SECO
1955-1956	190,71	183,91	79,80	15,99	141,99	MEDIO
1956-1957	122,27	117,77	50,15	10,39	91,49	SECO
1957-1958	47,50	45,38	16,33	4,37	36,71	SECO
1958-1959	449,65	436,67	214,63	35,05	325,31	HUMEDO
1959-1960	131,56	126,32	50,32	11,50	99,61	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>188,12</b>	<b>182,09</b>	<b>84,68</b>	<b>15,20</b>	<b>137,98</b>	
1960-61	151,67	146,26	63,08	12,68	112,84	MEDIO
1961-62	261,80	253,85	121,91	20,77	190,65	HUMEDO
1962-63	224,52	216,40	92,07	18,87	167,40	HUMEDO
1963-64	219,00	212,18	100,09	17,50	159,97	HUMEDO
1964-65	145,76	141,60	70,49	11,35	105,36	MEDIO
1965-66	154,81	149,32	64,77	12,94	115,15	HUMEDO
1966-67	174,19	168,88	80,89	13,83	126,90	MEDIO
1967-68	159,08	153,31	65,40	13,39	118,67	MEDIO
1968-69	105,96	101,43	37,84	9,54	81,21	MEDIO
1969-70	99,29	95,59	39,94	8,46	74,42	SECO
<b>Promedio</b>	<b>169,61</b>	<b>163,88</b>	<b>73,65</b>	<b>13,93</b>	<b>125,26</b>	
1970-71	287,50	277,94	125,52	23,45	211,81	HUMEDO
1971-72	310,37	300,38	138,58	25,05	227,66	HUMEDO
1972-73	316,48	307,28	151,28	24,77	229,23	HUMEDO
1973-74	244,01	236,36	110,48	19,50	178,33	HUMEDO
1974-75	236,95	229,69	109,70	18,84	172,73	HUMEDO
1975-76	162,06	156,15	65,96	13,66	120,98	MEDIO
1976-77	174,49	168,64	75,72	14,28	128,72	HUMEDO
1977-78	33,46	31,99	11,73	3,06	25,79	SECO
1978-79	32,96	31,43	10,88	3,09	25,66	SECO
1979-80	213,90	206,61	91,39	17,58	158,10	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>201,22</b>	<b>194,65</b>	<b>89,12</b>	<b>16,33</b>	<b>147,90</b>	
1980-81	70,03	67,52	29,23	5,90	52,20	SECO
1981-82	73,21	70,24	27,49	6,44	55,60	SECO
1982-83	188,45	183,61	96,46	14,25	134,63	MEDIO
1983-84	113,59	109,08	43,29	9,90	85,93	MEDIO
1984-85	135,61	131,36	61,58	10,85	99,12	SECO
1985-86	105,16	101,39	43,66	8,83	78,34	MEDIO
1986-87	47,98	45,86	16,62	4,39	37,02	SECO
1987-88	267,02	258,78	122,65	21,26	194,80	HUMEDO
1988-89	239,33	232,31	113,47	18,76	173,51	HUMEDO
1989-90	197,71	191,22	87,58	16,09	145,46	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>143,81</b>	<b>139,14</b>	<b>64,20</b>	<b>11,67</b>	<b>105,66</b>	
1990-91	83,09	79,81	31,90	7,23	62,81	SECO
1991-92	112,54	108,25	44,23	9,64	84,58	SECO
1992-93	118,52	114,22	48,65	9,98	88,41	MEDIO
1993-94	61,21	58,74	23,10	5,37	46,42	SECO
1994-95	73,78	71,02	29,69	6,30	55,32	SECO
1995-96	117,42	112,56	43,20	10,43	89,51	MEDIO
1996-97	313,37	303,34	140,28	25,25	229,71	HUMEDO
1997-98	124,28	120,13	54,05	10,14	91,58	MEDIO
1998-99	46,07	44,43	19,13	3,86	34,30	SECO
1999-00	7,40	6,97	1,92	0,78	6,03	SECO
<b>Promedio</b>	<b>105,77</b>	<b>101,95</b>	<b>43,61</b>	<b>8,90</b>	<b>78,87</b>	
<b>Promedio total 1900-2000</b>	<b>223,96</b>	<b>217,38</b>	<b>106,84</b>	<b>17,60</b>	<b>161,97</b>	

Tabla 5.b. Ídem para el período 1950-2000 y promedios totales de la serie  
 Table 5.b. Idem for the 1950-2000 period and average values for the whole 1900-2000 series

la precipitación total y media anual acaecida, la temperatura media y después, para cada acuífero, la recarga total y la recarga media anual.

Se observa cierta variabilidad de la pluviometría y la temperatura a lo largo de las diez décadas, aunque

la tendencia general parece ser decreciente en el primer caso y creciente en el segundo (Fig. 6 y 7). Este hecho ha sido comprobado estadísticamente aplicando el test de correlación de Spearman a la serie de 100 años. Este procedimiento ya ha sido usado

Año hidrológico	% P <sub>u</sub> /P	SOLANA		JUMILLA-VILLENA		SERRAL-SALINAS		PENARRUBIA		Tipo de año
		% R/P	% R/P <sub>u</sub>	% R/P	% R/P <sub>u</sub>	% R/P	% R/P <sub>u</sub>	% R/P	% R/P <sub>u</sub>	
1900-1901	75,26	73,72	97,95	43,32	57,57	5,41	7,18	52,65	69,95	HÚMEDO
1901-1902	63,97	61,95	96,84	28,95	45,25	5,13	8,02	46,81	73,17	HÚMEDO
1902-1903	63,40	61,69	97,30	31,57	49,79	4,85	7,65	45,52	71,79	HÚMEDO
1903-1904	80,66	78,54	97,37	40,46	50,17	6,12	7,58	57,73	71,57	HÚMEDO
1904-1905	69,96	68,06	97,28	34,63	49,50	5,36	7,66	50,26	71,85	HÚMEDO
1905-1906	83,70	82,10	98,09	48,89	58,41	5,91	7,06	58,18	69,52	HÚMEDO
1906-1907	66,33	64,29	96,91	30,41	45,84	5,28	7,96	48,39	72,95	HÚMEDO
1907-1908	61,62	58,56	96,92	27,82	46,04	4,81	7,96	44,97	72,99	HÚMEDO
1908-1909	66,75	64,87	97,19	32,58	48,82	5,17	7,75	48,16	72,15	HÚMEDO
1909-1910	54,64	53,11	97,20	26,80	49,05	4,24	7,76	39,42	72,15	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>68,63</b>	<b>66,69</b>	<b>97,31</b>	<b>34,54</b>	<b>50,04</b>	<b>5,23</b>	<b>7,66</b>	<b>49,21</b>	<b>71,81</b>	
1910-1911	69,42	67,09	96,64	29,99	43,21	5,68	8,18	51,22	73,78	MEDIO
1911-1912	66,58	64,65	97,10	31,70	47,61	5,20	7,81	48,21	72,40	SECO
1912-1913	60,86	59,49	97,75	33,41	54,90	4,46	7,33	42,91	70,52	MEDIO
1913-1914	55,87	54,22	97,05	26,39	47,23	4,39	7,85	40,53	72,55	MEDIO
1914-1915	77,25	75,63	97,91	43,71	56,58	5,56	7,20	54,11	70,05	HÚMEDO
1915-1916	64,59	62,74	97,14	31,13	48,20	5,03	7,78	46,69	72,28	MEDIO
1916-1917	74,51	72,89	97,82	41,44	55,61	5,42	7,27	52,39	70,31	MEDIO
1917-1918	73,70	71,59	97,14	35,34	47,95	5,73	7,77	53,27	72,27	HÚMEDO
1918-1919	67,87	66,42	97,88	38,20	56,28	4,91	7,23	47,61	70,15	SECO
1919-1920	59,34	57,45	96,81	26,73	45,05	4,78	8,05	43,48	73,28	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>67,00</b>	<b>65,22</b>	<b>97,32</b>	<b>33,80</b>	<b>50,26</b>	<b>5,11</b>	<b>7,65</b>	<b>48,04</b>	<b>71,76</b>	
1920-1921	63,76	61,66	96,72	28,13	44,12	5,18	8,13	46,90	73,56	HÚMEDO
1921-1922	44,88	43,48	96,87	20,38	45,40	3,59	8,00	32,80	73,08	SECO
1922-1923	66,83	65,13	97,47	34,62	51,81	5,04	7,54	47,67	71,34	MEDIO
1923-1924	64,49	62,44	96,82	29,02	45,00	5,19	8,05	47,24	73,25	MEDIO
1924-1925	51,88	50,27	96,90	23,86	45,99	4,14	7,99	37,87	73,01	SECO
1925-1926	59,61	58,02	97,33	29,83	50,04	4,55	7,63	42,76	71,73	MEDIO
1926-1927	53,80	52,17	96,97	25,30	47,03	4,27	7,94	39,18	72,82	MEDIO
1927-1928	35,75	34,27	95,85	13,13	36,74	3,18	8,88	27,25	76,23	SECO
1928-1929	50,32	48,77	96,92	23,18	46,07	4,01	7,97	36,71	72,95	MEDIO
1929-1930	37,26	35,77	95,99	14,16	38,00	3,27	8,77	28,25	75,82	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>52,86</b>	<b>51,20</b>	<b>96,78</b>	<b>24,16</b>	<b>45,02</b>	<b>4,24</b>	<b>8,09</b>	<b>38,66</b>	<b>73,38</b>	
1930-1931	62,35	61,07	97,94	35,38	56,74	4,47	7,17	43,61	69,94	SECO
1931-1932	65,13	63,11	96,91	29,91	45,92	5,19	7,97	47,53	72,98	HÚMEDO
1932-1933	54,61	52,85	96,77	24,33	44,56	4,41	8,08	40,07	73,37	HÚMEDO
1933-1934	44,54	43,00	96,54	18,89	42,41	3,68	8,27	32,99	74,08	MEDIO
1934-1935	56,28	54,63	97,06	26,57	47,21	4,41	7,83	40,80	72,49	MEDIO
1935-1936	63,41	61,66	97,23	31,06	48,98	4,88	7,70	45,65	71,99	HÚMEDO
1936-1937	62,15	60,59	97,48	32,19	51,79	5,65	7,52	44,31	71,29	HÚMEDO
1937-1938	60,05	58,77	97,87	33,85	56,37	4,35	7,25	42,15	70,20	SECO
1938-1939	30,72	29,54	96,17	12,11	39,43	2,64	8,61	23,12	75,26	HÚMEDO
1939-1940	60,86	59,50	97,77	33,53	55,10	4,45	7,31	42,88	70,45	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>56,01</b>	<b>54,47</b>	<b>97,17</b>	<b>27,78</b>	<b>48,85</b>	<b>4,41</b>	<b>7,77</b>	<b>40,31</b>	<b>72,21</b>	
1940-1941	50,00	48,49	96,98	23,38	46,77	3,96	7,92	36,38	72,77	SECO
1941-1942	59,18	57,37	96,94	27,35	46,21	4,70	7,95	43,14	72,89	HÚMEDO
1942-1943	49,66	47,96	96,58	21,25	42,79	4,09	8,24	36,74	73,98	MEDIO
1943-1944	44,53	43,36	97,38	22,61	50,78	3,39	7,61	31,88	71,60	SECO
1944-1945	41,55	40,15	96,63	18,08	43,52	3,41	8,21	30,67	73,83	SECO
1945-1946	67,56	65,73	97,29	33,69	49,86	5,19	7,67	48,55	71,86	HÚMEDO
1946-1947	56,73	54,88	96,74	25,22	44,47	4,60	8,11	41,68	73,48	MEDIO
1947-1948	45,87	44,29	96,57	19,59	42,70	3,78	8,25	33,94	74,01	HÚMEDO
1948-1949	60,70	58,90	97,03	28,51	46,97	4,77	7,87	44,07	72,60	HÚMEDO
1949-1950	53,58	51,86	96,80	23,88	44,56	4,31	8,05	39,27	73,29	SECO
<b>Promedio</b>	<b>52,93</b>	<b>51,30</b>	<b>96,89</b>	<b>24,36</b>	<b>45,86</b>	<b>4,22</b>	<b>7,99</b>	<b>38,63</b>	<b>73,03</b>	

Tabla 6.a. Porcentajes de lluvia útil y recarga al acuífero sobre la precipitación acaecida (% P<sub>u</sub>/P y % R/P), y porcentaje de recarga al acuífero sobre la lluvia útil (% R/P<sub>u</sub>), incluyendo los promedios por década, para el período 1900-1950

Table 6.a. Effective precipitation and aquifer recharge as percentage of total precipitation (%P<sub>u</sub>/P and % R/P), and aquifer recharge as percentage of effective precipitation (% R/P<sub>u</sub>), including average values for each decade, for the 1900-1950 period

por otros autores (González-Hidalgo *et al.*, 2001; Labajo y Piorno, 2001) para analizar tendencias en series temporales de precipitación. Se ha obtenido un coeficiente de correlación de -0,3 para la precipitación y 0,7 para la temperatura, ambos significati-

vos al nivel 0,01, es decir, con un 99% de confianza. Se deduce, por tanto, que la tendencia es mucho más fuerte en el caso de la temperatura. Estas observaciones concuerdan con las de otros autores en otras regiones de la península (González-Hidalgo *et*

Año hidrológico	% P <sub>u</sub> /P	SOLANA		JUMILLA-VILLENA		SERRAL-SALINAS		PEÑARRUBIA		Tipo de año
		% R/P	% R/P <sub>u</sub>	% R/P	% R/P <sub>u</sub>	% R/P	% R/P <sub>u</sub>	% R/P	% R/P <sub>u</sub>	
1950-1951	56,15	54,55	97,16	27,13	48,31	4,36	7,77	40,56	72,23	HUMEDO
1951-1952	52,75	51,28	97,23	25,80	48,92	4,07	7,71	37,99	72,02	HUMEDO
1952-1953	37,24	36,00	96,68	16,35	43,90	3,04	8,17	27,45	73,70	SECO
1953-1954	70,48	68,30	96,91	32,32	45,85	5,61	7,96	51,41	72,95	HUMEDO
1954-1955	30,55	29,21	95,64	10,75	35,20	2,78	9,09	23,50	76,93	SECO
1955-1956	56,12	54,11	96,43	23,48	41,84	4,71	8,39	41,78	74,45	MEDIO
1956-1957	38,88	37,45	96,32	15,94	41,01	3,30	8,50	29,09	74,82	SECO
1957-1958	27,78	26,54	95,52	9,55	34,38	2,55	9,20	21,47	77,29	SECO
1958-1959	68,44	66,46	97,11	32,67	47,73	5,33	7,79	49,51	72,35	HUMEDO
1959-1960	35,91	34,48	96,02	13,73	38,25	3,14	8,74	27,19	75,72	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>47,43</b>	<b>45,84</b>	<b>96,50</b>	<b>20,77</b>	<b>42,54</b>	<b>3,89</b>	<b>8,33</b>	<b>34,99</b>	<b>74,25</b>	
1960-61	41,20	39,74	96,44	17,14	41,59	3,45	8,36	30,66	74,40	MEDIO
1961-62	50,33	48,80	96,96	23,44	46,57	3,99	7,93	36,65	72,82	HUMEDO
1962-63	44,89	43,26	96,38	18,41	41,01	3,77	8,40	33,47	74,56	HUMEDO
1963-64	50,85	49,26	96,89	23,24	45,70	4,06	7,99	37,14	73,05	HUMEDO
1964-65	43,76	42,51	97,14	21,16	48,36	3,41	7,79	31,63	72,28	MEDIO
1965-66	35,24	33,99	96,45	14,74	41,84	2,95	8,36	26,21	74,38	HUMEDO
1966-67	49,63	48,11	96,95	23,05	46,44	3,94	7,94	36,15	72,85	MEDIO
1967-68	49,02	47,25	96,38	20,15	41,11	4,13	8,42	36,57	74,60	MEDIO
1968-69	32,68	31,29	95,72	11,67	35,71	2,94	9,00	25,05	76,64	MEDIO
1969-70	44,13	42,48	96,26	17,75	40,22	3,76	8,52	33,08	74,95	SECO
<b>Promedio</b>	<b>44,17</b>	<b>42,67</b>	<b>96,56</b>	<b>19,07</b>	<b>42,86</b>	<b>3,64</b>	<b>8,27</b>	<b>32,66</b>	<b>74,05</b>	
1970-71	60,68	58,66	96,67	26,49	43,66	4,95	8,16	44,70	73,67	HUMEDO
1971-72	57,04	55,21	96,78	25,47	44,65	4,60	8,07	41,84	73,35	HUMEDO
1972-73	57,61	55,94	97,09	27,54	47,80	4,51	7,83	41,73	72,43	HUMEDO
1973-74	52,36	50,72	96,87	23,71	45,28	4,19	7,99	38,27	73,08	HUMEDO
1974-75	50,30	48,76	96,94	23,29	46,30	4,00	7,95	36,67	72,90	HUMEDO
1975-76	39,36	37,93	96,35	16,02	40,70	3,32	8,43	29,39	74,65	MEDIO
1976-77	38,90	37,59	96,64	16,88	43,40	3,18	8,19	28,69	73,77	HUMEDO
1977-78	15,06	14,40	95,60	5,28	35,05	1,38	9,14	11,61	77,07	SECO
1978-79	14,24	13,57	95,34	4,70	33,00	1,33	9,36	11,09	77,86	SECO
1979-80	54,22	52,37	96,59	23,17	42,72	4,46	8,22	40,08	73,91	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>43,98</b>	<b>42,52</b>	<b>96,49</b>	<b>19,25</b>	<b>42,25</b>	<b>3,59</b>	<b>8,33</b>	<b>32,41</b>	<b>74,27</b>	
1980-81	29,99	28,91	96,41	12,52	41,73	2,52	8,42	22,36	74,54	SECO
1981-82	32,32	31,01	95,95	12,14	37,54	2,85	8,80	24,55	75,94	SECO
1982-83	45,69	44,51	97,43	23,38	51,18	3,45	7,56	32,64	71,44	MEDIO
1983-84	34,16	32,81	96,03	13,02	38,11	2,98	8,71	25,84	75,65	MEDIO
1984-85	44,98	43,57	96,87	20,42	45,41	3,60	8,00	32,88	73,09	SECO
1985-86	28,44	27,42	96,41	11,81	41,52	2,39	8,40	21,19	74,50	MEDIO
1986-87	19,71	18,83	95,57	6,83	34,65	1,80	9,16	15,20	77,16	SECO
1987-88	51,75	50,15	96,91	23,77	45,93	4,12	7,96	37,75	72,95	HUMEDO
1988-89	45,79	44,44	97,07	21,71	47,41	3,59	7,84	33,20	72,50	HUMEDO
1989-90	51,46	49,77	96,72	22,80	44,30	4,19	8,14	37,86	73,57	MEDIO
<b>Promedio</b>	<b>38,43</b>	<b>37,14</b>	<b>96,54</b>	<b>16,84</b>	<b>42,78</b>	<b>3,15</b>	<b>8,30</b>	<b>28,35</b>	<b>74,13</b>	
1990-91	34,91	33,53	96,06	13,40	38,39	3,04	8,70	26,39	75,59	SECO
1991-92	38,59	37,12	96,19	15,17	39,30	3,31	8,57	29,01	75,16	SECO
1992-93	32,97	31,77	96,37	13,53	41,05	2,78	8,42	24,59	74,60	MEDIO
1993-94	23,60	22,65	95,98	8,90	37,74	2,07	8,77	17,89	75,84	SECO
1994-95	24,83	23,90	96,26	9,99	40,24	2,12	8,53	18,62	74,98	SECO
1995-96	32,50	31,15	95,85	11,96	36,79	2,89	8,88	24,77	76,23	MEDIO
1996-97	51,41	49,76	96,80	23,01	44,76	4,14	8,06	37,68	73,30	HUMEDO
1997-98	38,74	37,45	96,67	16,85	43,49	3,16	8,16	28,55	73,69	MEDIO
1998-99	26,15	25,21	96,43	10,86	41,53	2,19	8,38	19,46	74,44	SECO
1999-00	6,31	5,95	94,23	1,64	26,02	0,66	10,52	5,15	81,59	SECO
<b>Promedio</b>	<b>31,00</b>	<b>29,85</b>	<b>96,08</b>	<b>12,53</b>	<b>38,93</b>	<b>2,64</b>	<b>8,70</b>	<b>23,21</b>	<b>75,54</b>	
<b>Promedio total 1900-2000</b>	<b>50,24</b>	<b>48,69</b>	<b>96,76</b>	<b>23,31</b>	<b>44,94</b>	<b>4,01</b>	<b>8,11</b>	<b>36,65</b>	<b>73,44</b>	

Tabla 6.b. Ídem para el período 1950-2000 y promedios totales de la serie  
 Table 6.b. Idem for the 1950-2000 period and average values for the whole 1900-2000 series

al., 2001; Labajo y Piorno, 2001; Quereda y Montón, 1999; Brunet *et al.*, 1999; Capó *et al.*, 1999). En el caso de la precipitación, la figura 8 representa gráficamente la distribución de años húmedos, medios y secos a lo largo de los 100 años hidrológicos de la serie. Se observa un período muy húmedo al inicio de la serie y un incremento de años secos durante el tramo final del mismo. La desviación acumulada respecto a la precipitación media anual viene a corroborar el descenso generalizado de la pluviometría durante el período considerado. Los pequeños picos de descenso representarían los eventos de sequía más pronunciados.

El incremento medio de temperatura por década ha sido de 0,16 °C, mientras que la disminución media en la precipitación anual fue de 32,5 mm por década. Las dos primeras décadas junto con los 70, fueron las más húmedas y también de las más frías, especialmente la primera con valores anormalmente altos de precipitación de casi 600 mm/año. Por otra parte, los años 20, los 40, los 80 y los 90 fueron los períodos más secos y, a excepción de la década de los 20, los más cálidos.

Un análisis de la varianza de un factor (ANOVA) tomando la década como factor y la precipitación media anual y la temperatura media como variables

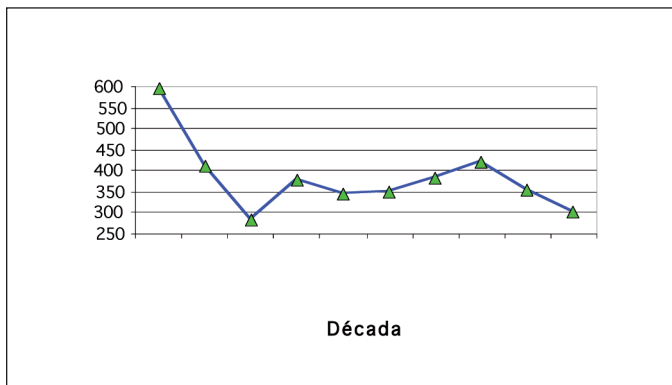


Figura 6. Precipitación media en la estación 8007 (Villena) en cada década  
 Figure 6. Mean decade rainfall at the 8007 station (Villena)

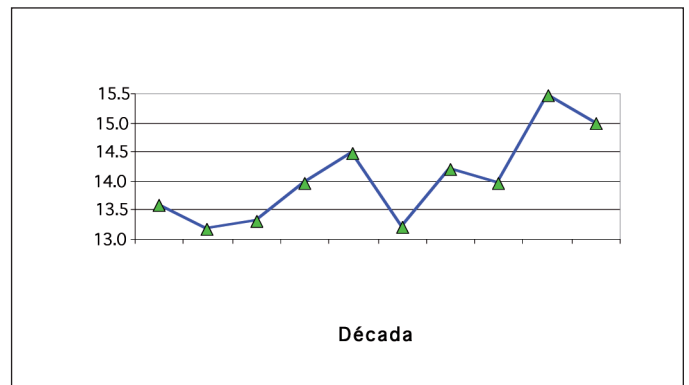


Figura 7. Temperatura media en la estación 8007 (Villena) en cada década  
 Figure 7. Mean decade temperature at the 8007 station (Villena)

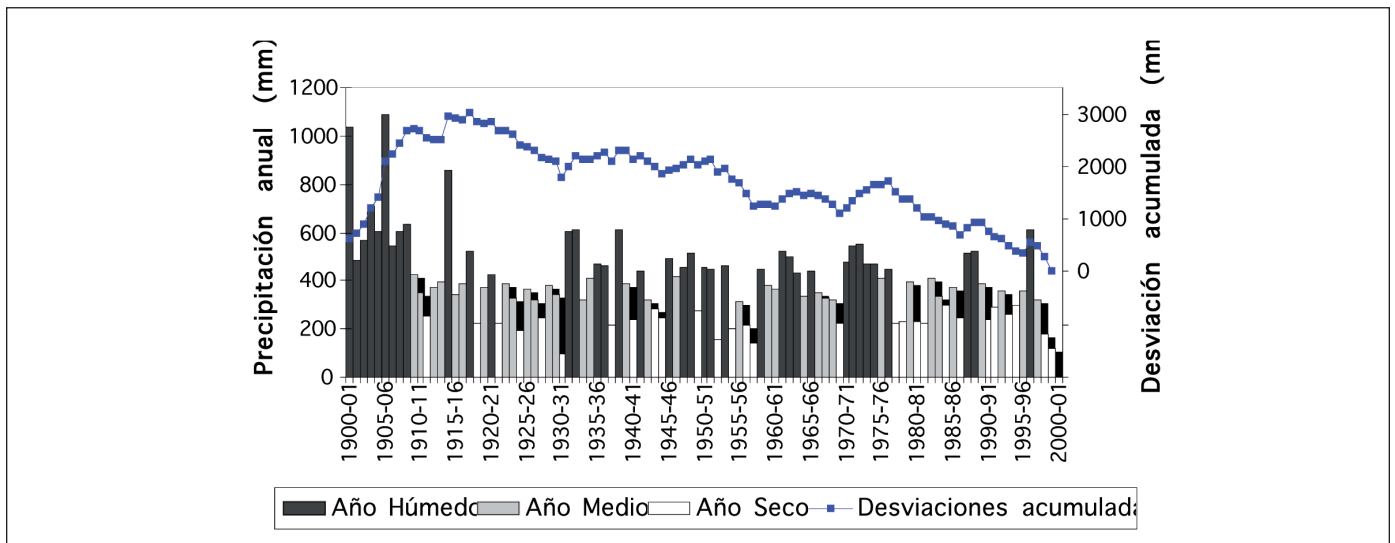


Figura 8. Precipitaciones anuales en la estación 8007 (Villena) durante el período 1900-2000. Tipo de año hidrológico a partir de la función de distribución de Goodrich  
 Figure 8. Annual precipitation at the 8007 station (Villena) along the 1900-2000 period. Hydrologic year typology based on the Goodrich distribution function

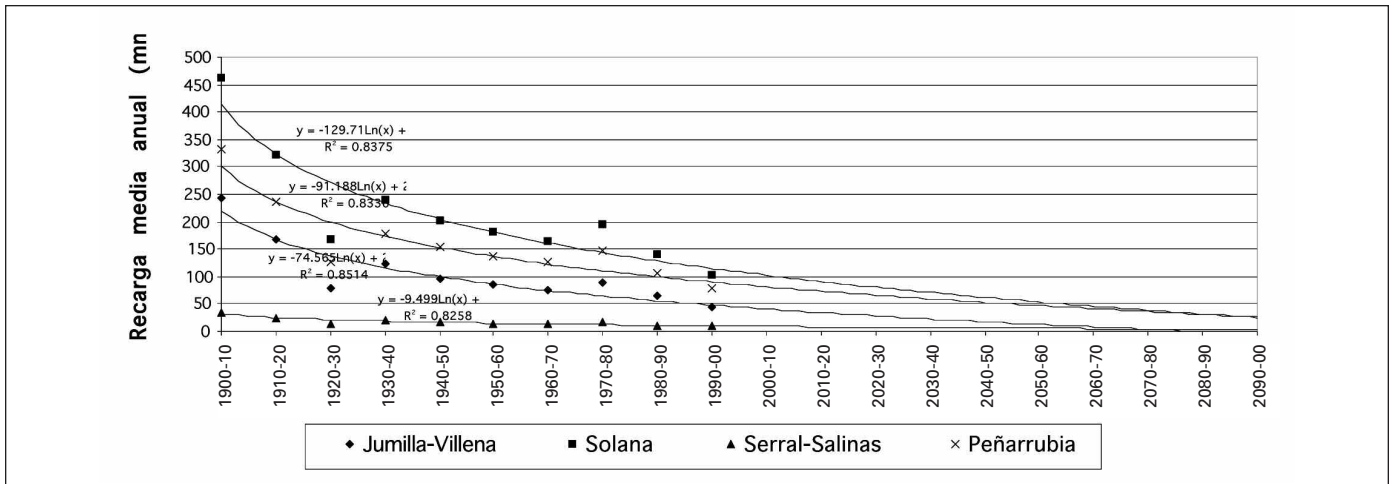


Figura 9. Ajuste logarítmico de la recarga media anual a lo largo de las cuatro décadas en los acuíferos de Jumilla-Villena, Serral-Salinas, Solana y Peñarrubia  
 Figure 9. Logarithmic fit for the mean annual recharge into Jumilla-Villena, Serral-Salinas, Solana and Peñarrubia aquifers, along the four decades

dependientes, constata la existencia de diferencias altamente significativas entre los valores registrados por estas variables a lo largo de las diez décadas, concretamente con  $p < 0,001$ , o lo que es lo mismo, con un nivel de confianza de casi el 100% ("p" es la probabilidad de obtener valores del estadístico mayores o iguales al obtenido en el test)

La evolución de la recarga estimada por el modelo muestra, en los cuatro acuíferos, una clara tendencia decreciente de tipo logarítmico a lo largo de las diez décadas del siglo XX (Fig. 9). De hecho, las fun-

ciones de ajuste de tipo logarítmico presentan valores del coeficiente de determinación R<sup>2</sup> superiores a 0,8 en todos los casos. Destaca el rápido descenso de los valores de recarga anual media durante las tres primeras décadas del siglo. En la figura 9 se puede observar como en los cuatro acuíferos la recarga anual media se ha reducido en más de un 50% entre 1900-1910 y 1990-2000. La gráfica ha sido extendida al siglo XXI para ver el momento en que hipotéticamente se anularía la recarga media anual de seguir la misma tendencia. Se observa que todas las curvas

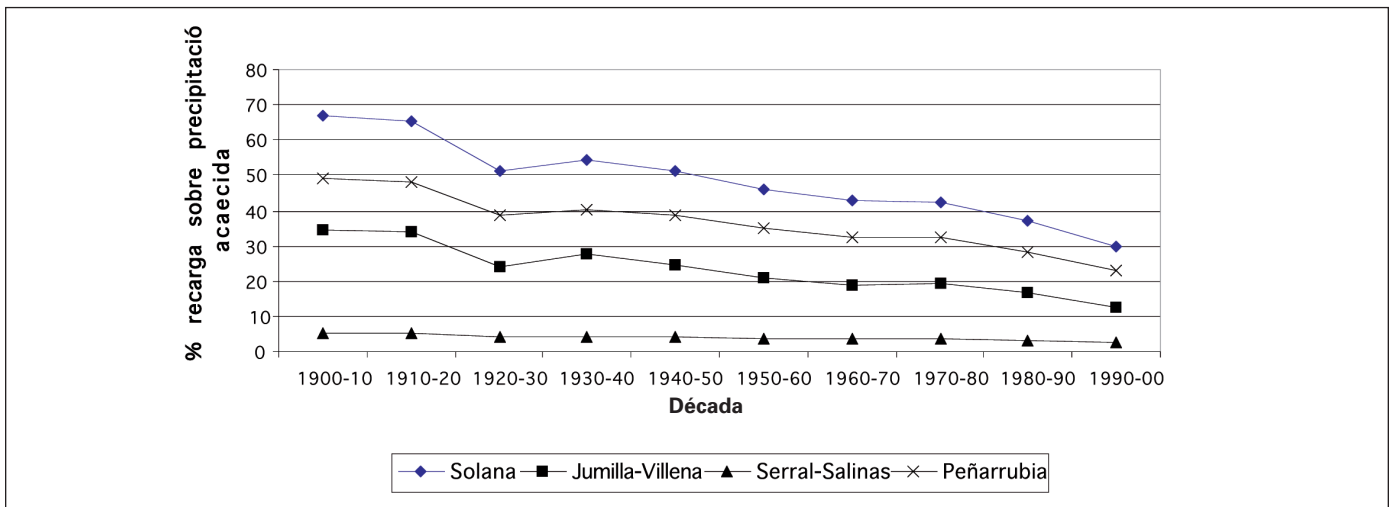


Figura 10. Porcentajes de recarga sobre precipitación acaecida por acuífero y década  
 Figure 10. Recharge as percentage of total precipitation for each aquifer and decade

siguen una trayectoria asintótica al eje de abcisas y que Jumilla-Villena alcanzaría el 0 de recarga media anual entre los años 2070 y 2080. De nuevo, se ha realizado un ANOVA para cada acuífero, tomando la recarga media anual estimada como variable dependiente y la década como factor. En los cuatro casos se han encontrado diferencias significativas entre los valores medios de cada década con  $p < 0,005$ , con lo que la tendencia decreciente adquiere, si cabe, mayor rigor estadístico.

Por último, se ha observado la evolución del porcentaje de recarga sobre la precipitación total acaecida en cada acuífero a lo largo de las diez décadas (Fig. 10). Éste sigue una tendencia decreciente en todos los casos con un pico de descenso más acusado en la década de 1920-30, que fue la de menor precipitación. De nuevo, se ha aplicado el test de correlación de Spearman a los valores anuales de la serie para comprobar la significación estadística de esta tendencia. Se han obtenido coeficientes de correlación entre -0,61 y -0,72, todos al nivel 0,01. Por tanto, la recarga relativa se ve reducida progresivamente a lo largo del siglo a medida que disminuye la precipitación total (menor infiltración) y aumenta la temperatura (mayor evapotranspiración).

## Conclusiones

Los valores del parámetro N, exponente en la ecuación potencial (2) que estima la recarga, han resultado ser próximos a la unidad en todos los casos, lo que sugiere una ligera tendencia hacia la linearización, y por tanto, una posible simplificación del modelo ERAS.

Las series históricas de recarga agrupadas por décadas muestran una clara tendencia decreciente de tipo logarítmico en los cuatro acuíferos.

El porcentaje de recarga sobre la precipitación acaecida disminuye progresivamente a lo largo del siglo XX, lo que puede indicar una disminución efectiva de los recursos subterráneos disponibles.

El modelo ERAS se ha mostrado eficaz y, por tanto, puede ser válido para simular, en una primera aproximación, los distintos escenarios de CC en acuíferos sobreexplotados. Para una mayor concreción, en un futuro próximo será necesario elaborar herramientas matemáticas capaces de suministrar una mayor precisión. Dichas herramientas deberán contemplar un paso de tiempo de tipo horario.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Diputación

Provincial de Alicante y a la Comunidad de Usuarios del Vinalopó su perfecta disposición en todo momento para facilitar los datos requeridos para elaborar el presente estudio.

## Referencias

- Andreo, B., Vías, J., López Geta, J.A., Carrasco, F., Durán, J.J. y Jiménez, P. 2004. Aproximación metodológica para evaluar la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (2), 211-222.
- Andreu, J.M., Delgado, J., García-Sánchez, A., Pulido-Bosch, A., Bellot, J., Chirino, E. y Ortiz de Urbina, J.M. 2001. Caracterización del funcionamiento y la recarga del acuífero del Ventós-Castellar (Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14 (3-4), 247-254.
- Aragón, R., Barba-Romero, J., Rodríguez, L. y Virgos, L. 1995. Determinación del grado actual de regulación de embalses subterráneos mediante la utilización de modelos de precipitación-escurrentía. *VI Simposio de Hidrogeología*, Sevilla, 23, 97-111.
- Armayer, J.L., De la Orden, J.A. y Murillo, J.M. 2001. Artificial recharge as a technique to alleviate the overexploitation of small aquifers located on the Spanish mediterranean coast. *3<sup>rd</sup> International Conference on Future Groundwater Resources at Risk*, Lisboa, 8 pp.
- Beekamn, H.E. y Xu, Y. 2003. Review of groundwater recharge estimation in arid and semi-arid Southern Africa. En: Xu & Beekman (ed.), *Groundwater recharge estimation in Southern Africa*. UNESCO, Paris, 3-18.
- Brunet, M., Aguilar, E., Saladie, O., Sigró, J. y López, D. 1999. Variaciones y tendencias contemporáneas de la temperatura máxima, mínima y amplitud térmica diaria en el NE de España. En: *La Climatología española en los albores del siglo XXI*. Oikos-Tau y Asociación Española de Climatología, Serie A, nº 1, Barcelona, 103-112.
- Capó, E., Llasat, M.C., Quintas, L. 1999. Caracterización pluviométrica espacio temporal de España dentro del proyecto AMHY/FRIEND. En: *La Climatología española en los albores del siglo XXI*. Oikos-Tau y Asociación Española de Climatología, Serie A, nº 1, Barcelona, 123-130.
- Carrica, J.C. y Lexow, C. 2004. Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (2), 281-290.
- Conrad, J., Nel, J., and Wentzel J., 2004. The challenges and implications of assessing groundwater recharge: A case study - northern Sandveld, Western Cape, South Africa. *Water SA*, 30 (5), 75-81.
- Departamento de Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante. 2002. Estudio de la actualización de la explotación del acuífero de Jumilla-Villena en la Región de Murcia en el año 2002. Informe no publicado.
- DGOHCA-ITGE. 1998. *Programa de ordenación de acuíferos sobreexplotados / salinizados*. Formulación de estudios y actuaciones. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas-Instituto Tecnológico Geominero de España, 66 pp.



- DPA-IGME. 1982. Las Aguas Subterráneas en la Provincia de Alicante. Diputación Provincial de Alicante e Instituto Geológico y Minero de España. Informe no publicado, 754 pp.
- DPA-IGME. 2003a. Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero de Solana (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Informe no publicado, 98 pp.
- DPA-IGME. 2003b. Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero de Serral-Salinas (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Informe no publicado, 127 pp.
- DPA-IGME. 2005. Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero de Jumilla-Villena (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Informe no publicado, 130 pp.
- Elías, F. y Giménez, R. 1965. *Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España*. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Agricultura, Madrid, 293 pp.
- González-Hidalgo, J.C., De Luis, M., Raventós, J. y Sánchez, J.R. 2001. The spatial and temporal structure of precipitation trends in the Valencia Region (eastern of Spain) over the second half of the 20th century. En: *Detecting and Modelling Regional Climate Change*. Springer-Verlag, New York, 175-189.
- Heredia, J. y Murillo, J. M. 2002. Balance hídrico y estimación de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector suroriental de la isla de Gran Canaria. *XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia*, Zaragoza, 19 pp.
- Iglesias López, A. 1984. Diseño de un modelo para el estudio de descargas de acuíferos. Modelo Meda. *Boletín Geológico y Minero*, 95 (1), 52-57.
- IGME. 2000. Caracterización básica de la climatología del Alto Vinalopó (Alicante). Informe no publicado, 16 pp.
- IGME-DPA. 2002. Posibilidades de almacenamiento de las aguas del trasvase Júcar-Vinalopó en los embalses subterráneos provinciales mediante recarga artificial. Simulación de la Gestión de los recursos hídricos en el Alto Vinalopó. Informe no publicado, 88 pp.
- ITGE-DPA. 2000. Posibilidades de almacenamiento de las aguas del trasvase Júcar-Vinalopó en los embalses subterráneos provinciales mediante recarga artificial. Estimación de los consumos de agua para usos agrícola y urbano en le Alto Vinalopó. Instituto Tecnológico Geominero de España y Diputación Provincial de Alicante. Informe no publicado, 150 pp.
- Kumar, C.P. 2003. Estimation of ground water recharge using soil moisture balance approach. *Journal of Soil and Water Conservation, Soil Conservation Society of India*, 2 (1-2), 53-58.
- Labajo, J.L. y Piorno, A. 2001. Regionalization of precipitation in Castilla and Leon. Analysis of its temporal behaviour. En: *Detecting and Modelling Regional Climate Change*. Springer-Verlag, New York, 163-174.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. y Simmers, I. 1990. Groundwater recharge: *A guide to understanding and estimating natural recharge*. International Contributions to Hydrogeology. I.A.H. Verlag Heinz Heise, Hannover, (8), 345 pp.
- López Rodríguez, J.J. y Giráldez Cervera, J.V. 1997. Evaluación de la modificación de la recarga por cambios en la cobertura vegetal. En: Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (ed.), *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español, Las Palmas de Gran Canaria, 209-227.
- Martín Machuca, M. y Virgos, L. 1995. Modelo matemático del acuífero de Almonte-Marsimas. *VI Simposio de Hidrogeología*, Sevilla, 19, 639-660.
- Martín, A., Arjona García-Borreguero, J., Hervás Maldonado, M., Mera Merino, A. e Iglesias López, A. 1992. Aplicaciones informáticas para estudios de descarga de acuíferos. Modelo Meda. *V Simposio de Hidrogeología*, Alicante, 17, 37-48.
- Mendes, M., Novo, M.E. y Lobo, J.P. 2005. Models to predict the impact of the climate changes on aquifer recharge. *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, Guimaraes, 11 pp.
- Murillo, J.M. 2004. *Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del Bajo Guadalquivir*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 749 pp.
- Murillo, J.M. y De la Orden, J.A. 1996. Sobreexplotación, alternativas de gestión y evaluación del efecto del cambio climático en la recarga natural del acuífero kimmeridgiense de Cabezón de Oro (Alicante). En: *Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 73-88.
- Murillo, J.M. y Roncero, F.J. 2005. Recarga natural y simulación de alternativas de gestión mediante el modelo "ERAS". Aplicación al acuífero de Peñarrubia (Alicante). *Boletín Geológico y Minero*, 116 (1), 97-112.
- Ortiz López, J.I., Iglesias Delgado de, T.E., Hernández Manchado, R., De Mera Merino, A., Gómez Sánchez, M., López Bravo, J. y Ballester Rodríguez, A. 2001. Desarrollo de programas para el tratamiento de series hidrológicas y evaluación de aportaciones hídricas subterráneas (HIDROBAS v. 3.0). *VII Simposio de Hidrogeología*, Murcia, 23, 333-341.
- Peña, S. y Arcos, D. 2004. Estimación inicial de la recarga natural vertical para su introducción en modelos de simulación de flujo con la ayuda de sistemas de información geográfica. *Seminario: Sistematización y automatización como herramienta para la gestión del agua*, Guanajuato, 9 pp.
- Querada Sala, J. y Montón Chiva, E. 1999. La hipótesis de la estabilidad climática en el Mediterráneo español. En: *La Climatología española en los albores del siglo XXI*. Oikos-Tau y Asociación Española de Climatología, Serie A, nº 1, Barcelona, 427-438.
- Ruiz García, J.M. 1999. *Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Ministerio de Fomento, 245 pp.
- Samper, F.J. 1997. Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores. En: Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (ed.), *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la*

- Planificación Hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español, Las Palmas de Gran Canaria, 41-81.
- Samper, F.J., García Vera, M.A., Pisani, B., Varela, A., Losada, J.A., Alvares, D. y Espinha Marques, J. 2005. Aplicación de modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: GIS-VISUAL-BALAN y su aplicación a cuencas atlánticas en España (Valiñás) y Portugal (Serra da Estrela). *VII Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*, A Coruña, 296-274.
- Samper, J., Llorens, H., Arés, J. y García, M.A. 1999. *Manual del usuario del programa Visual Balan v. 1.0. Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. ENRESA, Publicación Técnica número 05/99, 134 pp.
- Sanford, W. 2002. Recharge and groundwater models: an overview. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 110-120.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. y Cook, P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 18-39.
- Tapia, F.O. y Mora, F.E. 2004. The Information Society: New Horizons for Science. *19<sup>th</sup> International CODATA Conference*, Berlín, 13 pp.

Recibido: mayo 2006

Aceptado: febrero 2007