

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POR RETORNO DE RIEGO A TRAVÉS DE LA ZNS EN ÁREAS DE AGRICULTURA INTENSIVA BAJO CLIMA SEMI-ÁRIDO. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

J. Jiménez-Martínez^{1*}, J. Molinero^{1,2} y L. Candela¹

1: Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica
Universidad Politécnica de Cataluña
Campus Nord-Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, España.
e-mail: joaquin.jimenez@upc.edu/lucila.candela@upc.edu, web: <http://www.h2ogeo.upc.es>

2: Amphos XXI Consulting S.L.
Passeig de Rubí 31, 08197 Valdorreix, Barcelona, España.
e-mail: jorge.molinero@amphos21.com, web: <http://www.amphos21.com>

Palabras clave: semi-árido, cultivos, balance, recarga, evapotranspiración

RESUMEN. *Para la evaluación de la recarga al acuífero en el Campo de Cartagena (SE España) correspondiente al periodo 1999-2008 se aplicó el código VisualBALAN v. 2.0. El estudio se realizó en cultivos de regadío clasificados en tres grandes grupos: anuales (lechuga y melón), perennes (alcachofa) y árboles frutales (cítricos). La metodología desarrollada ha permitido estimar la recarga producida por precipitación y riego, siendo los valores medios anuales obtenidos de 394, 201 y 194 mm para cultivos anuales, perennes y árboles frutales, respectivamente en el periodo estudiado. Los resultados muestran el papel preponderante de las lluvias (torrenciales) frente al riego (alta eficiencia) sobre la recarga total, el constante alto contenido de agua en el suelo facilita el proceso de infiltración de las mismas. El análisis de sensibilidad realizado, muestra que los parámetros que tienen una mayor incidencia sobre la recarga son la capacidad de campo, punto de marchitez, coeficiente agotamiento del flujo hipodérmico, CEME y número de curva; para las condiciones iniciales y de contorno son contenido inicial de agua en suelo y riego, respectivamente.*

ABSTRACT. *To evaluate water recharge to the aquifer (1999-2008) in the Campo de Cartagena area (SE Spain) the VisualBALAN v. 2.0 code was applied. The study was carried out for three different groups of crops: annual row crops (lettuce and melon), perennial vegetables (artichoke) and fruit trees (citrus). The annual mean recharge values obtained from the applied methodology and studied period were 394, 201 and 194 mm for annual row crops, perennial vegetables and fruit trees, respectively. The assessment of rainfall events in the final recharge is clearly observed, due to the continuous high water content in soil that facilitates the infiltration process of it. The sensitivity analysis shows that the most important parameters affecting recharge are field capacity, wilting point, hypodermic flow depletion coefficient, CEME parameter and curve number; initial water content in soil and irrigation are the most important to initial and boundary conditions, respectively.*

1. INTRODUCCIÓN

La correcta estimación de la recarga a los acuíferos es un aspecto indispensable para el conocimiento de los recursos hídricos disponibles en una unidad acuífera así como para evaluar su vulnerabilidad a la contaminación. En las regiones áridas y semi-áridas la ausencia de cursos superficiales, los aspectos climáticos relacionados con la distribución espacial y temporal de la precipitación y evapotranspiración, y la existencia de procesos de flujo predominantemente de tipo preferencial (Scanlon et al. 2002), constituyen aspectos añadidos que aumentan la complejidad de su estimación. Por otro lado, dado que las condiciones climáticas favorecen la implantación de agricultura intensiva, en determinadas cuencas la estimación de la recarga resulta un ejercicio complejo debido a la presencia de regadío. Para la gestión sostenible de los generalmente escasos recursos hídricos que caracterizan a estas zonas climáticas la correcta cuantificación de la recarga, evaporación y transpiración es de gran

importancia para una obtención fiable de los recursos disponibles (Garatuzza-Payan et al. 1998).

El Campo de Cartagena (SE España), región climáticamente caracterizada como semi-árida, la horticultura constituye la principal actividad económica. El objetivo principal de este trabajo se centra en la estimación de la recarga por retorno de riego para diferentes cultivos y de la evapotranspiración *real* para un largo periodo de tiempo (9 años) mediante la aplicación de VisualBALAN v. 2.0 (Samper et al. 2005), un código de balance hídrico distribuido. VisualBALAN ha sido aplicado en numerosos casos de estudio, destacar entre otros muchos trabajos: Carrica y Lexow (2004), García-Santos et al. (2005) y Samper et al. (2007).

2. ÁREA DE ESTUDIO

El Campo de Cartagena comprende un área de 1440 km² situada al sureste de España (Murcia). El clima es mediterráneo con una temperatura media anual de 18 °C y una precipitación media anual de 300 mm, distribuida en pocos eventos intensos producidos en primavera y otoño. La evapotranspiración potencial anual (ET_p) oscila entre 800 y 1200 mm año⁻¹, en función del método empleado en su estimación (Sánchez et al. 1989). El uso principal del suelo es para agricultura de secano o regadío, la superficie de regadío cultivada comprende un área aproximada de 299 km², distribuidos en 128.1 km² de cultivos hortícolas de tipo anual (principalmente lechuga y melón) y 34.1 km² de tipo perenne (principalmente alcachofa), y 136.8 km² de árboles frutales (principalmente cítricos) (CARM, 2008). Debido a la escasez de recursos hídricos se aplica riego localizado mayoritariamente.

Para la realización del estudio de recarga se seleccionó una zona experimental con agricultura intensiva desarrollada sobre el acuífero libre superior, constituido por materiales detríticos (principalmente limos) de edad cuaternaria. El acuífero tiene una extensión de 1135 km², un espesor medio de 50 m y presenta un gradiente hidráulico entre 0.001 y 0.005 m/m. La intensa actividad agrícola que se desarrolla sobre la superficie del acuífero derivó en su transformación en un sumidero de agroquímicos y condujo a un descenso continuado del nivel freático. La puesta en funcionamiento del *Trasvase Tajo-Segura* en 1980 tuvo como consecuencia el cese de los bombeos y la recuperación de niveles.

Un estudio preliminar llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1994) estimó en 69 hm³ la recarga anual al acuífero libre superior, de ellos 46 hm³ por recarga natural y 23 hm³ debidos al retorno de riego. El cálculo de la recarga por retorno de riego realizado por el IGME fue basado solo en el agua de riego aplicada y no considera el agua añadida por precipitación. La recarga producida por precipitación en áreas cultivadas fue implícitamente incluida en la estimación de la recarga natural, la cual fue un valor único calculado para toda la región. En nuestro trabajo es calculada la recarga producida conjuntamente por riego y precipitación para diferentes cultivos.

3. METODOLOGÍA

El estudio se realizó en tres parcelas experimentales donde se desarrollaron diversos cultivos: *L* y *M*, cultivo hortícola anual (rotación de lechuga y melón); *A*, cultivo hortícola perenne (alcachofa) y *C*, árboles frutales (cítricos). La superficie de las tres parcelas experimentales es de 1 ha (10000 m²). Alrededor de las parcelas experimentales se llevaron a cabo idénticas prácticas agrícolas y cultivos para evitar efectos de contorno.

La selección de las parcelas experimentales se basó en los siguientes criterios: permanencia de los tipos de cultivo seleccionados a lo largo del periodo estudiado (1999-2008), existencia de un piezómetro para control del acuífero (CHS, 2008) y la presencia de una estación meteorológica en las proximidades de la zona de estudio (SIAM, 2008). En las parcelas experimentales (*L* y *M*; *A*; *C*) se aplicaron prácticas agrícolas habituales en el Campo de Cartagena (Tabla 1), incluyendo rotación en el caso de cultivos hortícolas anuales, riego localizado y necesidades hídricas. Se debe mencionar que los cultivos hortícolas estivales (melón) se realizan bajo plástico para incrementar la eficiencia de riego.

Los suelos son de tipo limo-arenosos según la clasificación textural de suelos USDA, y presentan gran homogeneidad en todo el Campo de Cartagena (Ramírez et al. 1999).

Tabla 1. Principales características de las parcelas experimentales (fuentes: **Allen et al. 1998 y ** CARM, 2007)

Parcela experimental	Cultivo	Altura media cultivo* (cm)	Máxima profundidad raíces* (cm)	Espaciado márgenes (m)	Riego localizado			Necesidades hídricas** (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
					Diámetro interior (mm)	Espaciado emisores (cm)	Caudal (l h ⁻¹)	
L-M	lechuga / melón	30 / 30	30-50 / 80-150	1	16	30	4	3288 / 6169
A	alcachofa	70	60-90	1.7	16	40	4	6623
C	cítricos	400	80-150	6	16	25-125	4	6407

4. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE UN MODELO DE BALANCE

4.1. Modelo de balance hídrico

Para la obtención del balance hídrico se utilizó VisualBALAN v. 2.0 (Samper et al. 2005), un modelo computacional que permite establecer el balance hídrico en el suelo, zona no saturada y acuífero. Para la realización de la estimación el modelo asume propiedades homogéneas en cada una de estas tres zonas.

Para la obtención del balance hídrico en el suelo, uno de los aspectos importantes es la apropiada estimación de la evapotranspiración ET . Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia $ET_0(t)$ se aplicó el método FAO Penman-Monteith y la evapotranspiración potencial $ET_p(t)$ se obtuvo a partir de Allen et al. (1998):

$$ET_p(t) = K_c(t) \cdot ET_0(t) \quad (1)$$

siendo $K_c(t)$ el coeficiente de cultivo específico, que caracteriza la absorción de agua por la planta y la evaporación relativa al cultivo de referencia para cada estadio de crecimiento. Para cultivos hortícolas perennes se aplicó $K_c = 0.95$ como valor medio anual (Allen et al. 1998), y para árboles frutales se utilizó un valor medio mensual (Castel, 2001), aunque el valor medio anual es $K_c = 0.68$ para una superficie de suelo sombreada ≥ 64 %. La evaporación potencial $E_p(t)$ se calculó a partir de:

$$E_p(t) = ET_p(t) \cdot \exp^{-\beta \cdot LAI(t)} \quad (2)$$

donde β (≈ 0.4) es el coeficiente de extinción de la radiación y $LAI(t)$ es el índice foliar calculado mediante:

$$E_p(t) = ET_p f(t) \quad (3)$$

La función $f(t)$ varía entre $f(t) = 1$ para un suelo sin cubierta vegetal donde la evaporación es máxima y la transpiración es cero y $f(t) = 0$ cuando el cultivo alcanza su estadio medio de crecimiento y la evaporación es cero. La transición entre $f(t) = 1$ y $f(t) = 0$ se modela mediante una curva sigmoideal (Jiménez-Martínez et al. 2009).

Finalmente, la transpiración potencial $T_p(t)$ queda definida como:

$$T_p(t) = ET_p(t) - E_p(t) \quad (4)$$

De acuerdo con las prácticas agrícolas en la zona, el cálculo de la $ET_p(t)$ para cultivos de invierno (lechuga) se estimó mediante la Ec. (1). Para el cultivo estival (melón) dado que $E_p(t)$ es cero al realizarse el cultivo bajo plástico, la $T_p(t)$ se obtiene a partir de la Ec. (4). Para cultivos hortícolas perennes y árboles frutales se asumió su total desarrollo por lo que la $ET_p(t)$ se calcula a partir de la Ec. (1).

Los valores de precipitación, P , y riego, I_r , se distribuyen entre interceptación I_n , escorrentía E_s e infiltración I . La fracción de P que es interceptada por la vegetación supone una pérdida de agua por evaporación y la

reducción de la escorrentía. Parte del agua infiltrada por P y I_r se pierde por evapotranspiración, ET , y otra es almacenada en el suelo, $\Delta\theta$. En este trabajo I_n se calculó por el Método de Horton (López, 1997) y E_s mediante el método de Número de Curva (Soil Conservation Service, 1975). Existen varios métodos que permiten relacionar la evapotranspiración real $ET_a(t)$ y la evapotranspiración potencial $ET_p(t)$, para su obtención en este trabajo se utilizó el Método Exponencial (Samper et al. 2005).

Se asumió que el suelo es homogéneo e isótropo, la fase gaseosa no afecta al flujo de agua, el flujo de agua debido a gradientes térmicos es despreciable, y se consideró una recarga difusa para calcular la recarga potencial hacia la zona no saturada, P_e . VisualBALAN ofrece varias opciones para resolver este aspecto, en este caso se ha usado el Método Convencional (Samper et al. 2005). En la zona no saturada, P_e puede subdividirse en flujo hipodérmico, Q_h , y flujo vertical o percolación, Q_p . Ambos son función del volumen de agua almacenado por unidad de superficie, V_h , de la permeabilidad horizontal, K_{hv} , y vertical, K_{vv} , y de un coeficiente de agotamiento para el flujo hipodérmico, α_h , y flujo vertical, α_p . El balance de agua en la zona no saturada se resolvió mediante un esquema explícito.

Para calcular el nivel de agua en el acuífero, el código VisualBALAN establece el balance de agua para cada Δt . Para su cálculo las parcelas experimentales fueron consideradas como una sola celda. El volumen de agua V_a y la altura del nivel h están referidas a un nivel de referencia (nivel base) h_0 , al cual corresponde un volumen V_{a0} . El volumen de agua almacenado respecto al valor de referencia $\Delta V_a = (V_a - V_{a0})$, se relaciona con la variación de nivel $\Delta h = (h - h_0)$, a través de la porosidad efectiva, m_e , mediante $\Delta V_a = m_e \Delta h$. El balance de agua en el acuífero se realiza considerando un flujo de entrada vertical o percolación, Q_p , y la descarga subterránea, Q_s , la cual depende de un coeficiente de agotamiento α_s , y este a su vez es función del coeficiente de almacenamiento del acuífero S .

4.2. Análisis de sensibilidad

En la utilización de los modelos se presentan diversas fuentes potenciales de incertidumbre, que además pueden afectar a la precisión y fiabilidad de las predicciones finales por lo que es necesario un análisis de sensibilidad e incertidumbre. Por un lado se pueden distinguir incertidumbres derivadas de los parámetros y condiciones iniciales del modelo y por otro, las asociadas a las condiciones de contorno. Cuantificar el efecto de la incertidumbre sobre los cálculos de recarga requiere el conocimiento de su variabilidad estadística y correlación estructural. Sin embargo, el análisis de sensibilidad puede aportar información sobre la incertidumbre del modelo dada su estrecha relación.

Para el análisis de la incertidumbre sobre los parámetros y las condiciones iniciales del modelo, el análisis de sensibilidad se realizó a partir de la opción incluida en VisualBALAN. En el segundo caso, incertidumbre asociada a las condiciones de contorno, se realizó un análisis de sensibilidad relativa definida como AS/CP . Para ello se realizó un cambio relativo en las variables de entrada (input) CP definido como $|P_s - P_b|/P_b$ 100, y en los datos de salida (output) AS definido como $|C_s - C_b|/C_b$ 100, donde P_s y P_b son valores de la variable usados para el análisis de sensibilidad y modelo base calibrado, respectivamente, y C_s y C_b son datos de salida calculados en el análisis de sensibilidad y modelo base calibrado, respectivamente.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultado modelación

El periodo para el que se desarrolló el experimento fue de nueve años hidrológicos comprendidos entre Octubre de 1999 y Septiembre de 2008. La calibración y validación se efectuó para cultivos hortícolas anuales (lechuga y melón), para cultivos hortícolas perennes (alcachofa) y árboles frutales (cítricos), aunque en el presente trabajo solo son presentados los resultados de las calibraciones (Figura 1).

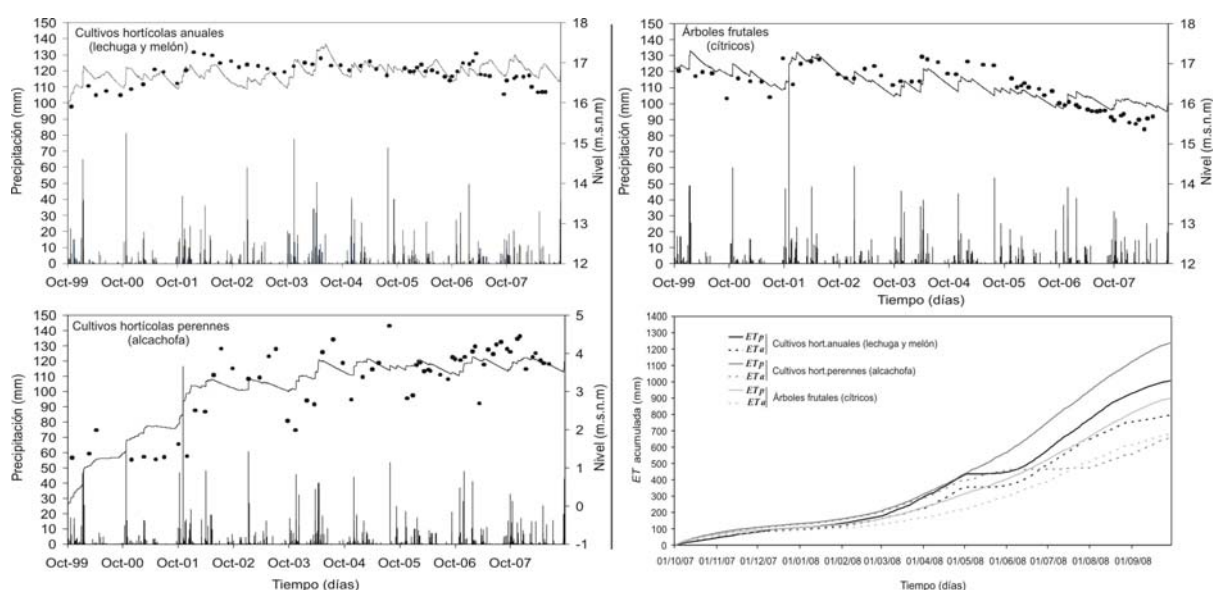


Figura 1. Evolución piezométrica para el modelo calibrado, niveles medidos y precipitaciones en cada tipo de cultivo. ET_p y ET_a acumuladas en el último año hidrológico (Oct 2007-Sept 2008) para cada tipo de cultivo.

Tabla 2. Valores iniciales de los parámetros y valores estimados para los ajustados en cada tipo de cultivo para el periodo completo estudiado (Oct 1999-Sept 2008). Medidas de bondad de ajuste entre nivel medido y simulado.

Parámetros	Cultivos hortícolas ANUALES		Cultivos hortícolas PERENNES		Árboles frutales	
	Valor inicial	Valor ajustado	Valor inicial	Valor ajustado	Valor inicial	Valor ajustado
<i>Calibrados</i>						
Lluvia mínima para aguacero (mm)	2	2	2	2	2	2
Coef. agotamiento flujo hipodérmico, α_s (día ⁻¹)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Coef. Agotamiento descarga subterránea, α_s (día ⁻¹)	0.0173	0.0050050	0.0173	0.0009812	0.0173	0.0009812
Coefficiente de almacenamiento, S	0.2	0.2098	0.2	0.2065	0.2	0.2
Nivel de descarga del acuífero, h_0 (m)	15.80	15.78	1.50	1.50	13.55	13.57
Permeabilidad vertical zona no saturada, K_{vs} (mm día ⁻¹)	432	432	432	432	432	432
Coef. agotamiento flujo vertical, α_p (día ⁻¹)	0.6931	0.6931	0.6931	0.6931	0.6931	0.6931
$CEME$ (mm) [valor límite de déficit hídrico, entre FC y WP]	20	1.549	20	0.965	20	1.006
<i>Fijados*</i>						
Espesor suelo, b_s (cm)	50		100		150	
Porosidad total suelo, Φ_s (cm ³ cm ⁻³)	0.4		0.4		0.4	
Punto de Marchitez, WP (cm ³ cm ⁻³)	0.1		0.1		0.1	
Capacidad de Campo, FC (cm ³ cm ⁻³)	0.2		0.2		0.2	
Número de Curva**	58		58		25	
Permeabilidad vertical suelo, K_{vs} (cm s ⁻¹)	0.0004		0.0004		0.0004	
<i>Bondad del ajuste</i>						
Error cuadrático medio, $RMSE$	0.309		0.590		0.348	
Error medio absoluto, MAE	0.256		0.480		0.294	

*Parámetros fijados, tomados de Jiménez et al. (2007) y Jiménez-Martínez et al. (2009). ** Soil Conservation Service, 1975.

La simulación con los parámetros iniciales del modelo condujo a resultados que presentaban un pobre ajuste respecto a los datos medidos. Por ello, se realizaron numerosos intentos de calibración de parámetros en las tres zonas (suelo, zona no saturada, acuífero) mediante las rutinas de optimización de parámetros incorporadas en VisualBALAN y datos medidos (niveles). Entre las diversas parametrizaciones consideradas, se seleccionó aquella considerada óptima a partir del diagnóstico de la información proporcionada por las rutinas de VisualBALAN (entre otras el error cuadrático medio, $RMSE$), inspección visual y principio de parsimonia. La mejor parametrización está constituida por ocho parámetros seleccionados entre un total de catorce (Tabla 2). Los valores finales de los parámetros ajustados resultaron muy similares para las tres parcelas experimentales,

hecho que confirma la hipótesis inicial sobre la homogeneidad del tipo de suelos (Ramírez et al. 1999) y del relleno Cuaternario.

5.2. Balance hídrico y estimación de la recarga

El balance hídrico y la recarga para cada tipo de cultivo se calculó a partir de los modelos calibrados (periodo completo Oct 1999-Sept 2008). La Figura 2 muestra la evolución de la recarga anual para cada cultivo. Si se tiene en cuenta que la dosis de riego anual es prácticamente invariable a lo largo del tiempo, la variación en la recarga anual se explica a partir de la cantidad de precipitación producida. La recarga media para cultivos hortícolas es de 397 ± 70 mm [media \pm desviación estándar] en anuales, de 201 ± 64 mm para perennes y 194 ± 75 mm para árboles frutales durante el periodo estudiado. Los valores de drenaje son muy similares a los resultados obtenidos por otros autores para este tipo de cultivos (Castel et al. 1987; Hanson et al. 1997; Lidón et al. 1999). Debido a la alta dosis y muy alta frecuencia de riego, el incremento de la recarga se produce durante los intensos episodios de lluvia, coincidiendo con importantes ascensos en los niveles (Figura 1). El rápido ascenso del nivel es debido al escaso espesor de zona no saturada en las parcelas experimentales, siendo 3, 11 y 8 m para *L* y *M*, *A* y *C*, respectivamente. Por otro lado el constante alto contenido de agua en el suelo, facilita el proceso de infiltración durante la lluvia. En los diagramas circulares se han representado valores medios correspondientes a los componentes del balance hídrico en cada cultivo y periodo estudiado (Oct 1999-Sept 2008). Se observa un valor alto de *In* en los cultivos hortícolas perennes y árboles frutales (debido a sus importantes valores de *LAI*). Destacar que *Q_h* y *E_s* son muy bajos en los tres casos, como era de esperar por observaciones de campo.

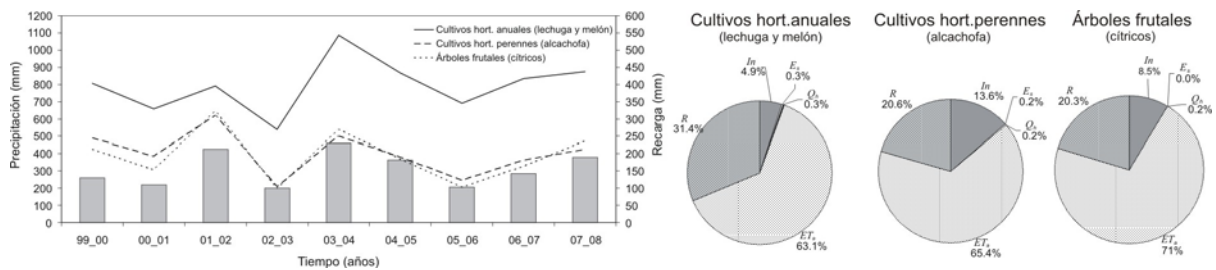


Figura 2. Evolución anual de la recarga para cada cultivo. Cantidad total de precipitación en cada año hidrológico (barras grises). Diagramas circulares con los valores medios de los diferentes componentes del balance hídrico para cada tipo de cultivo.

La Figura 1 muestra los valores acumulados de ET_p y ET_a para el último año hidrológico en los tres cultivos. El valor de ET_a fue generalmente más bajo que ET_p dada la imposibilidad del suelo en determinados momentos de mantener los valores de la T_p . Este hecho se presenta principalmente en cultivos hortícolas perennes, donde no existe riego en los meses de Julio y Agosto.

5.3. Análisis de sensibilidad

La perturbación de cada uno de los parámetros fue llevada a cabo considerando fijos el resto, valores obtenidos en el modelo calibrado (Tabla 2). El resultado del análisis muestra que de todos los parámetros incluidos en el modelo, la recarga es especialmente sensible a cinco de ellos: capacidad de campo FC , punto de marchitez WP , $CEME$ (valor límite de déficit hídrico, entre FC y WP), Número de Curva y coeficiente de agotamiento del flujo hipodérmico α_h (ver Figura 3). Dado que el presente modelo considera cada parcela experimental como una sola celda, la recarga es solo sensible a los parámetros del suelo. La recarga sufre cambios de igual magnitud en los tres tipos de cultivo para perturbaciones en los parámetros FC , WP , $CEME$ y α_h . El Número de Curva supone cambios en la recarga para cultivos hortícolas anuales y perennes, pero no en los árboles frutales.

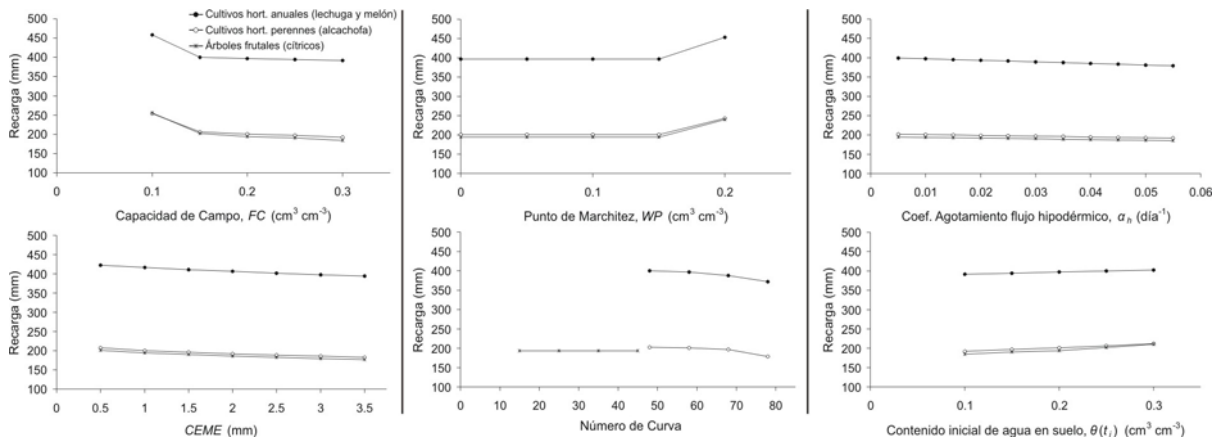


Figura 3. Sensibilidad de la recarga a la perturbación de varios parámetros (p) y condiciones iniciales (c. i.) para cada tipo de cultivo (solo mostrados los p y c. i. a los que es sensible la recarga)

El segundo paso del análisis de sensibilidad consiste en la perturbación de las condiciones iniciales (contenido inicial de agua en suelo $\theta(t_i)$, nivel inicial del acuífero h , volumen de agua almacenado por unidad de superficie en la zona no saturada V_h , nivel de referencia del acuífero h_0). En este caso la recarga fue sensible solo a $\theta(t_i)$, con un patrón de cambio similar para los tres cultivos.

Tabla 3. Resumen del análisis de sensibilidad relativa para las condiciones de contorno en cada tipo de cultivo

Condiciones contorno		Recarga					
		Cultivos hortícolas ANUALES		Cultivos hortícolas PERENNES		Árboles frutales	
		Cambio relativo (%) CP	Sensibilidad relativa (%) AS/CP	Cambio relativo (%) AS	Sensibilidad relativa (%) AS/CP	Cambio relativo (%) AS	Sensibilidad relativa (%) AS/CP
Precipitación, P	10	5.36	0.53	7.39	0.74	11.65	1.16
Evapotranspiración referencia, ET_0	10	9.04	0.90	10.03	1.00	5.57	0.56
Riego, I_r	10	15.08	1.50	16.42	1.64	8.47	0.41
Altura del cultivo	30	4.03	0.13	15.37	0.51	-	-

Para las condiciones de contorno fue desarrollado un análisis de sensibilidad relativo (Tabla 3). En este análisis se incluyeron: P , ET_0 , I_r y altura de la planta. Efectos debidos a temperatura, número de horas de sol, velocidad del viento, humedad relativa ambiental o albedo quedan incluidos en ET_0 . K_c causa efectos similares a los de ET_0 , de acuerdo con la Ec. (1) dada la relación existente entre estos parámetros. Al contrario de lo que cabría esperar, el cambio más importante no siempre lo produce I_r , como es en el caso de los árboles frutales donde lo fue P .

6. CONCLUSIONES

El retorno de riego supone una parte sustancial de la recarga a los acuíferos en zonas semi-áridas con agricultura intensiva, como ocurre en el Campo de Cartagena y cuya precipitación anual es del orden de 300 mm. Sin embargo, las intensas lluvias que de forma episódica se producen en estas zonas juegan un papel fundamental. Los valores medios de recarga a partir del agua aplicada (precipitación + riego) para el periodo estudiado (Oct 1999-Sept 2008) fueron de 397, 201 y 194 mm para cultivos hortícolas anuales, cultivos hortícolas perennes y árboles frutales respectivamente, superiores a las estimaciones previas existentes. La aplicación del regadío en función del estado de humedad del suelo, condiciones climáticas y necesidades hídricas de los cultivos, podría reducir significativamente la recarga por retorno de riego.

En comparación con otras técnicas habituales, la aplicación del modelo en esta zona ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad y sencilla aplicación para la estimación de la recarga en condiciones de regadío.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido desarrollado dentro de los proyectos CGL-2004-05963-C04-01 y CGL2007-66861-C04-03, plan nacional I+D+I del Ministerio de Ciencia e Innovación. También queda incluido en el marco del proyecto 08225/PI/08 “Programa de Generación del Conocimiento Científico de Excelencia” Fundación Seneca, Región de Murcia (II PCTRM 2007-10).

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage. Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- CARM, 2007. *El Agua y la Agricultura en la Región de Murcia. Un Modelo de Eficiencia*. Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia. pp. 111.
- CARM, 2008. Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia. Datos estadísticos agrarios. Disponible: <<http://www.carm.es>>.
- 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*, 39 (2), 281-290.
- Castel, J.R., 2001. Consumo de agua para plantaciones de cítricos en Valencia. *Fruticultura profesional*, 123, 27-32.
- Castel, J.R., Bautista, I., Ramos, C., Cruz, G., 1987. Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). *Irrig. Drain. Syst.* 3, 205-217.
- CHS, 2008. Confederación Hidrográfica del Segura. Datos piezométricos. Disponible: <<http://www.chsegura.es>>.
- Gracia-Santos, G., Mazol, V., Morales, D., Gómez, L. A., Pisani, B., Samper, J., 2005. Groundwater recharge in a mountain cloud laurel forest at Garajonay National Park (Spain). *Geophysical Research Abstract*, Vol. 7, 00942.
- Garatuzza-Payán, J., Shuttleworth, W.J., Encinas, D., McNeil, D.D., Stewart, J.B., DeBruin, H., Watts, C., 1998. Measurement and Modelling evaporation for irrigated crops in Northwest Mexico. *Hydrol. Process.* 12, 1397-1418.
- Hanson, B.R., Schwankl, L.J., Schulbach, K.F., Pettygrove, G. S., 1997. A comparison of furrow, surface drip irrigation on lettuce yield and applied water. *Agric. Water Manage.* 33, 139-157.
- IGME, 1994. *Las aguas subterráneas del Campo de Cartagena (Murcia)*. IGME, Madrid, España, 62 pp.
- Jiménez, J., García, G., Queralt, I., Aragón, R., García-Arostegui, J. L., Solano, F., Candela, L., 2007. Vadose zone characterization in an experimental plot under intensive agriculture. Preliminary results. International conference WATER POLLUTION in natural PORous media at different scales (WAPO2). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Nº 22. 143-148.
- Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., Candela, L., 2009. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *J. Hydrol.* 367 (1-2), 138-149.
- Lidón, A., Ramos, C., Rodrigo, A., 1999. Comparison of drainage estimation methods in irrigated citrus orchards. *Irrig. Sci.* 19,25-36.
- López, J., 1997. Evaluación de la recarga por cambios en la cobertura vegetal. En: Custodio, E., Llamas, R., Samper, J. (Eds.), La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica. Series ITGE, Madrid, España. pp. 455.
- Ramírez, I., Vicente, M., García, J., Vaquero, A., 1999. *Mapa digital de suelos de la Región de Murcia*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente. Guía y CD-ROM. pp. 78.
- Samper, J., García Vera, M. A., Pisani, B., Varela, A., Losada, J. A., Alvares, D., Espinha Marques, J., 2007. Using hydrological models and Geographic Information Systems for water resources evaluation: GIS-VISUAL-BALAN and its application to Atlantic basins in Spain (Valiñas) and Portugal (Serra da Estrela). En: Lobo Ferreira, J. P., Vieira, J. M. P. (Eds.), Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability. *IAHS 310*, 259-266.
- Samper, J., Hugué, Ll., Ares, J., García Vera, M.A., 2005. Manual Usuario. VisualBALAN v.2.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. pp 150.
- Sánchez, M.I., López, F., Del Amor, F., Torrecillas, A., 1989. La evaporación y evapotranspiración en el Campo de Cartagena y Vega Media del Segura. Primeros resultados. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 1239-1251.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.* 10, 18-39.
- SIAM, 2008. Servicio de Información Agraria de Murcia. Datos climáticos. Disponible: <<http://siam.imida.es>>.
- Soil Conservation Service, 1975. Engineering field manual conservation practices. U. S. Department of Agriculture.