

DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL EN REGIONES MONTAÑOSAS SEMIÁRIDAS. APLICACIÓN A SIERRA DE GÁDOR (ALMERÍA)

CONTRERAS, Sergio*; ALCALÁ, Francisco Javier**; DOMINGO, Francisco*; GARCÍA, Mónica*;
PUIGDEFÁBREGAS, Juan*; PULIDO-BOSCH, Antonio***

* Estación Experimental de Zonas Áridas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. C/ Gral. Segura, 1. 04001 Almería.

** Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Almería. Ctra. de Sacramento s/n. 04120 La Cañada de San Urbano (Almería)

*** Dpto. de Hidrogeología y Química Analítica, Universidad de Almería. Ctra. de Sacramento s/n. 04120 La Cañada de San Urbano (Almería)

Resumen.

Se presenta una aproximación metodológica de fácil aplicación y moderado coste para la cuantificación del balance hídrico anual en regiones semiáridas. El modelo se basa en el cálculo de la escorrentía total como diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. Para estimar la evapotranspiración se utiliza la hipótesis de equilibrio hidrológico y el análisis de las anomalías espaciales de la densidad de vegetación respecto dos condiciones consideradas de referencia y que se definen por la climatología local. El modelo proporciona estimas de evapotranspiración y escorrentía total en un marco espacialmente distribuido y por tanto sus resultados resultan de gran valor para identificar áreas de recarga. Ha sido aplicado a Sierra de Gádor, región montañosa y principal área de recarga de los acuíferos inferiores del Campo de Dalías (Almería). Las estimaciones de evapotranspiración y recarga (asumiendo que las pérdidas por escorrentía directa son despreciables) han sido verificadas a diferentes escalas espaciales: a) puntalmente, mediante determinación del balance hídrico en el suelo en un área representativa del área de estudio; y b) regionalmente, mediante aplicación del método del balance del ión cloruro.

Palabras clave: balance hídrico anual, evapotranspiración, hipótesis de equilibrio hidrológico, recarga, balance del ión cloruro

1. Introducción

Actualmente los países ribereños de la cuenca del Mediterráneo concentran el 7% de la población mundial y sólo disponen del 3% de los recursos hídricos de todo el mundo, 50% de los cuales son explotables y sólo un 30% están regulados (PNUE/PAM/PLAN BLEU, 2004). Sin embargo, las proyecciones de demanda no cesan de crecer y diversos organismos internacionales han alertado de la situación de *déficit social* de agua a la que se enfrenta el Mediterráneo, especialmente agravada en las regiones semiáridas (países del arco sur y del Cercano Oriente). Hasta la fecha, las aguas subterráneas constituyen una de las principales fuentes de abastecimiento de agua en estas regiones aunque en ocasiones su uso ha estado al amparo de dinámicas de sobreexplotación y la generación de graves impactos ambientales. En estos casos, la adopción de una política de gestión sostenible del agua debe regirse por la consecución de un equilibrio a largo plazo entre la tasa de recarga a los acuíferos y la tasa de explotación (Comisión Europea, 2000). Para lograrlo es conveniente aplicar metodologías que permitan identificar áreas potenciales de recarga en las que poder implementar mecanismos que la favorezcan. La recarga en regiones semiáridas suele concentrarse en las cabeceras de las cuencas, generalmente áreas montañosas caracterizadas por la gran variabilidad de la precipitación, la heterogeneidad de los atributos del terreno y la escasez de datos. Estas propiedades, que dificultan la cuantificación directa de la recarga, hacen aconsejable evaluar con carácter previo la magnitud de los principales componentes del balance hídrico (precipitación y evapotranspiración) en un marco espacialmente distribuido. Adoptar una

aproximación espacialmente distribuida facilita la incorporación de atributos del terreno cuyos patrones espaciales ofrecen información valiosa para comprender el balance hídrico. Sin embargo, la observación de estos patrones con ayuda de técnicas de teledetección no ha recibido la suficiente atención en la modelización hidrológica y por tanto su integración en los estudios de evaluación complementaría a las más clásicas herramientas de simulación del balance de agua.

Se presenta en este trabajo, una aproximación metodológica simple y de coste moderado para la evaluación espacialmente distribuida del balance hídrico anual en regiones montañosas semiáridas. El modelo ha sido aplicado a Sierra de Gádor, principal área de recarga de los acuíferos inferiores del Campo de Dalías, una comarca del sureste español caracterizada por un pujante sistema agroindustrial y turístico (Contreras, 2002). Para contrastar los resultados y obtener una cota del error de estimación, se ofrecen valores de recarga obtenidos: a) a escala regional, mediante la aplicación de técnicas complementarias basadas en el balance químico ambiental (balance del ion cloruro); y b) a escala local, mediante el cálculo de la fracción no evapotranspirada de la precipitación en un área representativa de Sierra de Gádor.

2. Metodología

2.1. Base conceptual

La evaluación de los recursos hídricos potencialmente disponibles para gestión humana en regiones semiáridas puede simplificarse al cálculo de la escurrimiento total (lluvia útil, precipitación efectiva o drenaje según otros autores) que es la fracción a partir de la cual se genera la recarga. La metodología que se propone estima la escurrimiento total de forma indirecta como diferencia entre los valores medios de precipitación anual -P- y la evapotranspiración anual -E- (Contreras *et al.*, 2005; Contreras, 2006). Para el cálculo de la precipitación espacialmente distribuida hemos usado series históricas de datos meteorológicos y técnicas de interpolación. Para la estimación de la evapotranspiración se ha desarrollado un modelo que asume la hipótesis de equilibrio hidrológico (Nemani y Running, 1989). El uso de esta hipótesis, que sugiere la linealidad entre el índice de área foliar -IAF- y E y que ha sido contrastada con datos experimentales y simulados (Contreras, 2006), posibilita la estimación de E a partir del IAF observado y del conocimiento previo de dos condiciones de contorno cuyos valores de IAF y E se consideran de referencia (Boer y Puigdefábregas, 2005; Contreras *et al.*, 2005). En ausencia de datos de IAF hemos empleado un índice espectral de vegetación, el NDVI o índice verde normalizado (Tucker, 1979; Pettorelli *et al.*, 2005), como un indicador fiable del primero (Zhang *et al.*, 2006). Para la estimación del NDVI en las condiciones de contorno se propone un procedimiento empírico que, aplicado a escala regional y para una muestra de celdas sin aportes laterales de agua, evalúa la desviación espacial del NDVI a lo largo de un gradiente climático (Boer y Puigdefábregas, 2003). Para la estimación de los valores de E en las condiciones de contorno se emplea la hipótesis de balance de Specht (Specht, 1972) que establece una relación lineal a escala mensual entre la disponibilidad hídrica y la razón entre evapotranspiración y evapotranspiración potencial. La pendiente de esta relación, o coeficiente evaporativo de Specht -k-, es un valor constante que la vegetación ajusta para maximizar el uso del agua disponible sin llegar a agotar la reserva de agua durante ningún periodo del año. Cuando se asume un suelo con capacidad de retención hídrica infinita, este coeficiente puede emplearse como índice climático. Sin embargo, cuando el objetivo es estimar E en las condiciones de contorno habrá de tenerse en cuenta la capacidad de retención hídrica del suelo ya que condiciona la cantidad de agua disponible en cada periodo mensual (Contreras, 2006).

Finalmente, la evapotranspiración anual media para cada porción o celda de territorio caracterizada por unas condiciones climáticas locales y un valor de k, se calcula según la ecuación:

$$E = E_{\min} + (E_{\max} - E_{\min}) \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}$$

donde: E es la evapotranspiración (mm/año); E_{\min} es la evapotranspiración (mm/año) estimada para una superficie desprovista de vegetación ($NDVI=NDVI_{\min}$); y E_{\max} es la evapotranspiración para una superficie con la máxima vegetación observada para un valor específico de k.

2.2. Área de estudio

Sierra de Gádor, con una superficie aproximada de 600 km², se localiza en el sureste de España y al oeste de la ciudad de Almería (Fig. 1). Se trata de un sistema montañoso perteneciente al Complejo Alpujarride dentro de la Zona Interna Bética. La serie de este complejo comprende un basamento paleozoico de esquistos y cuarcitas sobre el que descansa un tramo de filitas y cuarcitas permo-triásicas y al que le sigue finalmente un potente tramo carbonatado triásico (calizas y dolomías) muy permeable y fracturado y que presenta algunas intercalaciones metapelíticas que confieren al sistema un alto grado de heterogeneidad y que justifican la existencia de manantiales locales (Martín-Rojas, I., 2004). De acuerdo con estudios previos basados en datos isotópicos, Sierra de Gádor constituye la principal área de recarga de los acuíferos inferiores del Campo de Dalías, una llanura costera con más de 20000 has de invernaderos y una elevada actividad turística (Pulido Bosch *et al.*, 2000; Contreras, 2002). Actualmente la tasa de bombeo de aguas subterráneas procedentes de los acuíferos del Campo de Dalías para el mantenimiento de la actividad agrícola, turística y de abastecimiento a la ciudad de Almería, asciende a 140 hm³/año, 85% de los cuales se extraen de los acuíferos inferiores (González Asensio *et al.*, 2003).

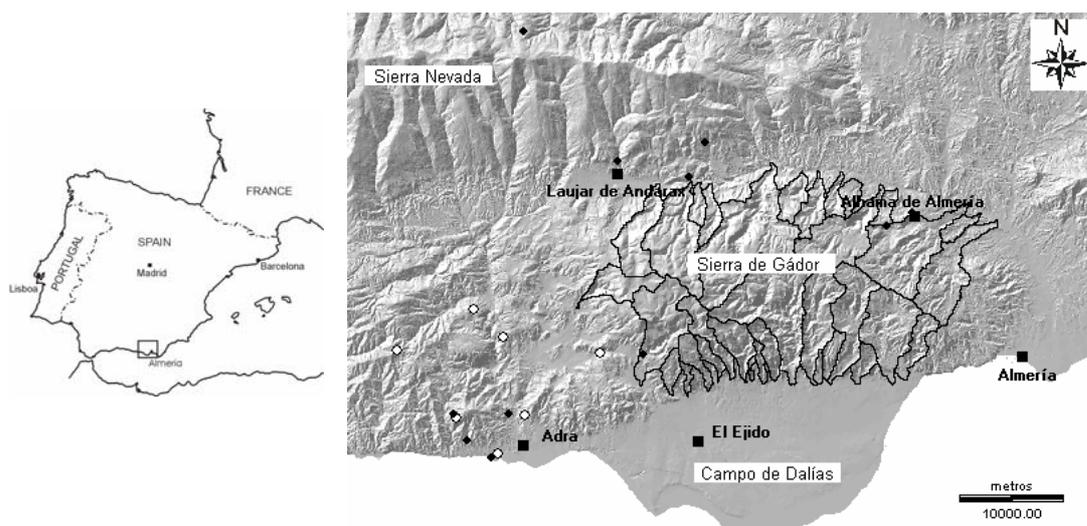


Figura 1. Localización de Sierra de Gádor-Campo de Dalías (provincia de Almería, España) y distribución de la red pluviométrica totalizadora para el análisis de la deposición total de CI (círculos blancos) y de los puntos de muestreo de aguas de recarga no modificadas (círculos negros).

El clima en Sierra de Gádor es típicamente mediterráneo y presenta un régimen predominantemente semiárido (78.5%) si bien existe un gradiente de aridez oeste-este desde

la cumbre hacia las faldas de Sierra de Gádor. Los valores medios de precipitación oscilan entre 260 mm/año (Alhama de Almería, 520 m) hasta 650 mm/año aproximadamente en las cotas más altas (Morrón Alto, 2246 m). El gradiente pluviométrico deducido para la región de estudio es 23 mm/100 mm. La temperatura media anual oscila entre 9 °C en las cotas más elevadas hasta 18 °C en las más bajas. El gradiente termométrico estimado es -0.4 °C/100 m.

La minería del plomo durante el s. XIX provocó una intensa deforestación. Actualmente la cubierta vegetal es dispersa y los suelos son delgados y presentan una elevada pedregosidad lo que los convierte en muy vulnerables a las avenidas de aguas y a la erosión. Un 73% de la superficie total de Sierra de Gádor está cubierta por un matorral disperso con una cobertura inferior al 50% y que se entremezcla con pasto, roca o suelo. Las áreas cultivadas representan 9% de la superficie total mientras que la superficie reforestada con pinos sólo representa 1.5%.

2.3. Técnicas complementarias para la estimación de la recarga

2.3.1 Estimación de la recarga regional mediante métodos químicos ambientales.

Los métodos químicos ambientales permiten estimar la tasa de recarga mediante el balance en el terreno de un trazador natural conservativo (Lerner et al., 1990; Custodio, 1997). El ión cloruro es por sus características (ausencia de intercambio con el medio, estabilidad química, alta solubilidad, origen conocido y medida relativamente fácil y precisa) el trazador más empleado, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Hendrickx y Walter, 1997). En régimen estacionario y en ausencia de aportes de Cl por el terreno o actividades antrópicas, el agua subterránea freática o en eventuales acuíferos colgados, recibe un flujo másico de Cl que coincide con la aportación de agua precipitada una vez restado el flujo de salida por escorrentía directa (superficial y subsuperficial) (Wood y Sanford, 1995; Custodio, 1997). Los cálculos se establecen para un periodo de tiempo lo suficientemente amplio para que no tengan influencia los efectos de los periodos vecinos. La ecuación de balance queda:

$$PC_p = RC_r + EC_e$$

donde P, R y E son la precipitación, la recarga y la escorrentía directa en mm. C_p , C_r y C_e son respectivamente las concentraciones medias de ión Cl en la precipitación, en el agua de recarga y en la escorrentía directa en $mg \cdot L^{-1}$. Los productos $P \cdot C_p$, $R \cdot C_r$ y $E \cdot C_e$ son los flujos másicos en el periodo considerado o bien los flujos másicos medios. En zonas donde el flujo másico de salida de Cl por la escorrentía directa es relativamente pequeño, asunción adoptada como primera aproximación en Sierra de Gádor, el balance queda como:

$$PC_p = RC_r$$

Durante 2004 se instalaron 7 colectores de precipitación en las proximidades de Sierra de Gádor (Fig. 1). El contenido en Cl del agua de recarga no modificada se ha obtenido muestreando pequeños manantiales que representan un flujo de descarga local asociado a los primeros metros de alteración del terreno, a acuíferos colgados o a zonas fracturadas someras con escasa interacción agua-roca (Fig. 1). Los criterios de selección de muestras y los procedimientos de muestreo y de cálculo quedan explícitos en Alcalá (2006).

La determinación de los contenidos de Cl en las muestras de precipitación y de agua de recarga se realizó en el laboratorio del IGME en Tres Cantos (Madrid) mediante cromatografía iónica de alto rendimiento (paso lento, HPLC). Para las muestras recogidas con anterioridad a 1995 se aplicaron métodos colorimétricos con tiempo de reacción controlado.

2.3.2. Recarga potencial en el Llano de los Juanes mediante el método de balance de agua

El Llano de los Juanes es una pequeña plataforma amesetada con una superficie aproximada de 2 km² y localizada a 1600 m. Por su ubicación y características, se trata de un área representativa de las llanuras culminales que se desarrollan en Sierra de Gádor entre los 1200 y 1800 m. Este paraje, con una vegetación dominada por genistáceas y lastonar, ha sido seleccionado por el grupo de investigación de Desertificación y Geoecología de la EEZA-CSIC como área piloto para el estudio del balance hídrico y los factores que lo controlan. Los dispositivos de medida instalados consisten en un pluviómetro normalizado, una estación meteorológica (temperatura, dirección e intensidad de viento, humedad del aire), un anemómetro sónico y un higrómetro de krypton acoplados para el cálculo de la evapotranspiración mediante la técnica de correlación de remolinos y 7 sensores capacitivos SBIB ubicados a 6 cm de profundidad para estudiar la dinámica de humedad en el suelo. Adicionalmente y desde el 2003 se realizan pruebas experimentales para caracterizar los procesos ecohidrológicos y las propiedades hidropedológicas de la zona. El área experimental del Llano de los Juanes pertenece a la red nacional CARBOSPAIN para la medida de flujos de agua y carbono en ecosistemas de matorral mediterráneos.

3. Resultados y discusión

En la figura 2 se muestra el diagrama de dispersión entre los valores del coeficiente evaporativo de Specht -k- y el valor de NDVI observado para las celdas que no reciben aportes adicionales de agua. Para el trazado de las envolventes se calcularon los percentiles 5 y 95 del valor del NDVI observado para cada intervalo de valor de k. Adoptando este criterio, el 90% de la muestra queda entre los límites impuestos por ambas envolventes. En la figura 3 se presenta el mapa de evapotranspiración anual media estimado en Sierra de Gádor. El valor espacialmente promediado para el conjunto de Sierra de Gádor es 288 mm/año que representa un 71% de la precipitación anual media. Los valores del índice de evapotranspiración según las clases de vegetación y uso de suelo inventariadas en el área de estudio se presentan en la figura 4. Los máximos valores de evapotranspiración corresponden a superficies naturales con vegetación densa a excepción de las superficies agrícolas en regadío cuyos aportes adicionales de agua justifican unos valores de evapotranspiración próximos o superiores a la precipitación anual. Los sectores con pastizal o matorral disperso con predominio de roca y/o suelo presentan valores más bajos. Considerando que a largo plazo las pérdidas de agua por escorrentía directa (superficial y subsuperficial) fuera de los dominios de Sierra de Gádor son despreciables, asunción adoptada como primera aproximación, puede asumirse que el valor de escorrentía total estimada es equivalente al valor de la recarga. Así, la recarga estimada para el conjunto de Sierra de Gádor durante un año hidrológico de precipitación media es 75 hm³/año, aproximadamente la mitad del volumen total bombeado desde los acuíferos del Campo de Dalías y un 62% de los bombeos realizados sobre los acuíferos inferiores. A partir de los valores espacialmente distribuidos, se ha estimado la variación de la recarga según la altitud. Esta respuesta no es lineal pudiéndose diferenciar dos dominios (Fig. 5). En el primero, el gradiente de recarga estimado es de 5.8 mm a⁻¹/100 m (R²=0.91). Para cotas superiores a 13000 m, la tasa de recarga se incrementa hasta 25 mm a⁻¹/100 m. A partir de datos isotópicos de aguas de lluvia y de recarga, Vallejos *et al.* (1997) deducen que la principal área de recarga en Sierra de Gádor se sitúa entre 1200 y 1800 m. El límite inferior de este rango se aproxima al umbral de 1300 m obtenido en este estudio para el cambio de la tasa recarga.

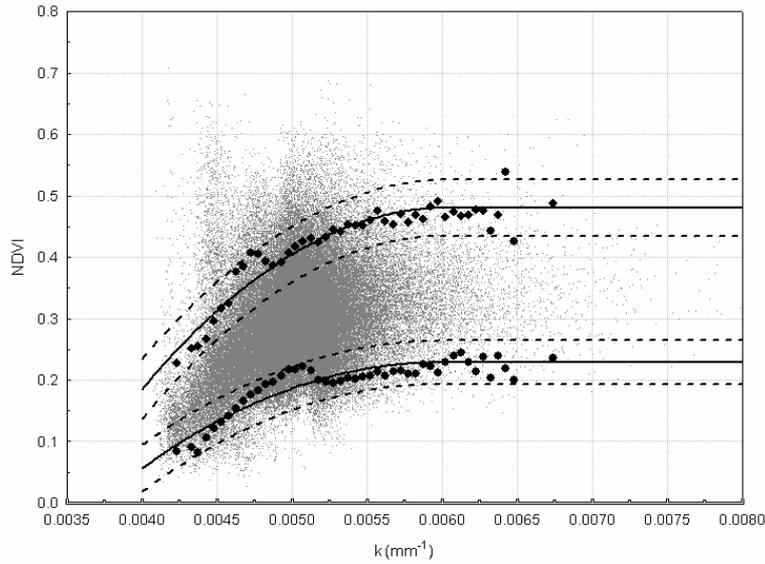


Figura 2. Diagrama de dispersión k-NDVI en Sierra de Gádor y envolventes definidas (línea continua). Las líneas discontinuas representan los límites de predicción para un nivel de significación del 95%.

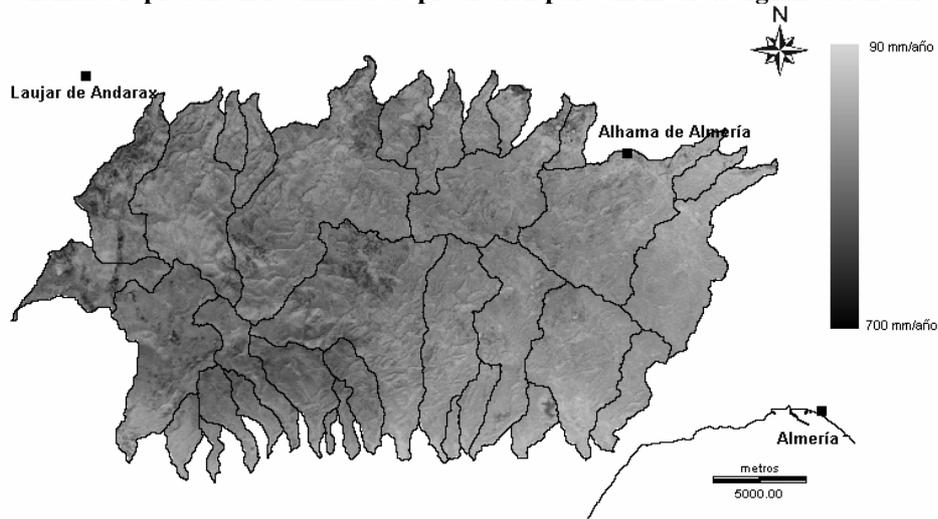


Figura 3. Mapa de evapotranspiración anual media (mm) estimado en Sierra de Gádor.

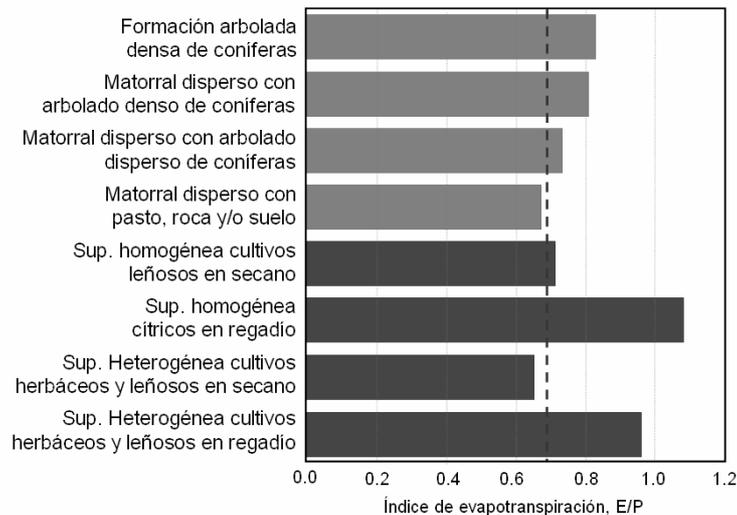


Figura 4. Índice de evapotranspiración (E/P) según clases de vegetación y usos del suelo. La línea discontinua marca el valor medio estimado en Sierra de Gádor.

La estimación de la tasa de recarga media anual por el método de balance del ión cloruro se ha basado en la obtención de los gradientes de variación altitudinal de la deposición total atmosférica y del contenido en Cl en el agua de recarga. Se distinguen igualmente dos dominios de variación de la recarga en función de la altitud. Hasta 1250 m, el gradiente medio de recarga se cifra en $7 \text{ mm a}^{-1}/100 \text{ m}$. A partir de esa cota, el gradiente estimado es de $15 \text{ mm a}^{-1}/100 \text{ m}$ (Fig. 5). Asumiendo estos gradientes para el conjunto de Sierra de Gádor, el volumen total de recarga estimado se cifra en $58 \text{ hm}^3/\text{año}$ esto es, un 77% de la recarga potencial estimada con el método del balance hídrico y un 45% el volumen total bombeado de los acuíferos inferiores del Campo de Dalías. Considerando la evolución de los bombeos realizados sobre estos acuíferos durante los últimos 35 años y la tasa de recarga estimada por balance de cloruros, la sobreexplotación consumada en este periodo se cifra aproximadamente en 870 hm^3 . En principio, este “hueco” habría sido parcialmente cubierto por agua de mar si bien las evidencias hidrogeoquímicas no apoyan la existencia de intrusión marina generalizada (González Asensio *et al.*, 2003; Pulido-Bosch, 2005). Aunque se reproduzcan las tendencias encontradas con el método del balance de agua, los resultados de la aplicación del método del balance de Cl requieren ser verificados con mayor detalle incrementando el número de datos, especialmente en Sierra de Gádor y a cotas entre 1200 y 2000, y considerando tasas de escorrentía superficial no despreciables tal y como sugieren Martín-Rosales *et al.* (2006).

A escala puntual, la evapotranspiración medida en el Llano de los Juanes durante el año hidrológico 2003/2004 (año de precipitación medio) fue 292 mm. Este valor representó 57.5% de la precipitación total y es un 8% inferior al valor medio estimado con el modelo de balance hídrico propuesto.

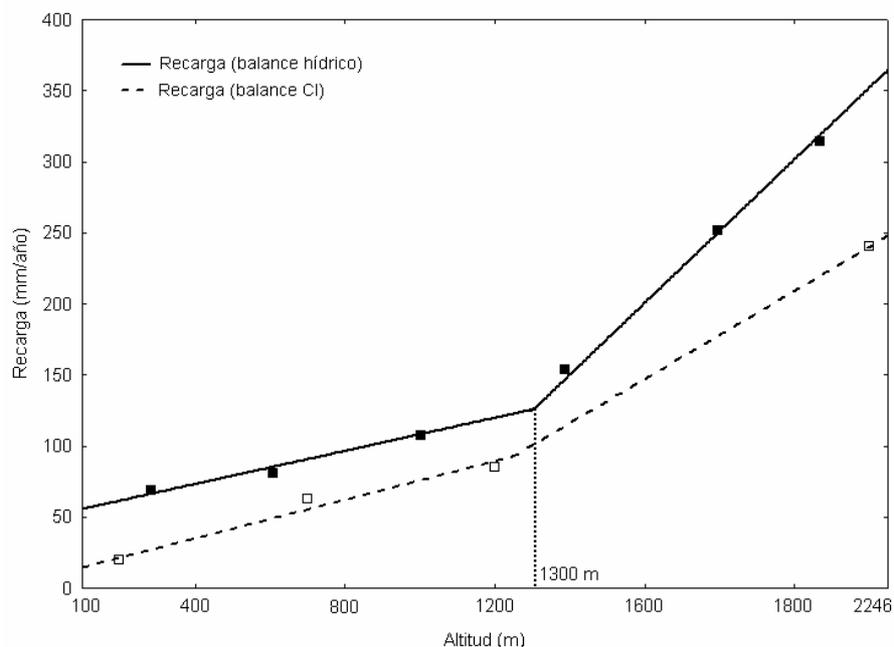


Figura 5. Gradiente altitudinal para la tasa media de recarga (mm/año) estimada según: a) método de balance hídrico (línea continua); y b) método de balance del ión cloruro (línea discontinua).

4. Conclusiones

El análisis espacial de las anomalías de la densidad de vegetación respecto dos condiciones de referencia de balance hídrico conocidas proporciona una aproximación robusta para la evaluación espacialmente distribuida del balance hídrico anual. En regiones que han sufrido una degradación severa de la cubierta vegetal, como es el caso de Sierra de Gádor, el modelo exige caracterizar el balance hídrico en las condiciones de referencia considerando la capacidad limitada del suelo para almacenar el agua disponible. El modelo ha sido aplicado en Sierra de Gádor con relativo éxito. La metodología, de coste moderado, es extrapolable a otras regiones mediterráneas con clima semiárido y moderadamente extensas (500-5000 km²).

Para un año de precipitación medio, la evapotranspiración en Sierra de Gádor representa un 70% de la precipitación anual. El 30% restante, 74 hm³/año, corresponde a recarga. El valor de evapotranspiración medido en el Llano de los Juanes durante el año hidrológico 2003/2004 fue 292 mm frente a 315 mm estimados con el modelo de balance hídrico. El patrón espacial de evapotranspiración estimado es coherente con las clases de vegetación y usos del suelo existentes en Sierra de Gádor encontrándose los valores más bajos en cultivos herbáceos y leñosos de secano y los mayores valores en cítricos en regadío. Entre estos valores extremos, existe una variabilidad que es función de la cobertura vegetal y de las aportaciones adicionales de agua de riego. Se han descrito dos dominios de variación de la tasa recarga en función de la altitud. El gradiente de recarga es 5.8 mm a⁻¹/100 m hasta una altitud de 1300 m y 25 mm a⁻¹/100 m a partir de esta cota. Los volúmenes de recarga estimados según el método de balance del ión Cl son inferiores aunque se diferencian igualmente dos gradientes de variación de la recarga según la altitud. La tasa es de 7 mm a⁻¹/100 m hasta cota 1250 m y pasa a 15 mm a⁻¹/100 m a altitudes superiores. El volumen total de recarga estimada por el método de balance del ión cloruro es 58 hm³/año si bien los resultados derivados de la aplicación de este método son preliminares y deben tomarse con cautela a falta de un estudio más detallado en la región de estudio.

Agradecimientos

La investigación se abordó en el marco de los proyectos coordinados RECLISE (REN2002-04517-CO2) y CANOA (CGL2004-04919-CO2-01/HID) y el contrato de investigación IRASEM financiado por el Instituto del Agua de Andalucía. Los autores agradecen el esfuerzo realizado por Alfredo Durán, Montse Guerrero y Miguel Ángel Domene en el apoyo de los trabajos de campo y laboratorio.

Referencias bibliográficas

- Alcalá F.J. (2006): *Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Boer, M.M., Puigdefabregas, J. (2003): "Predicting potential vegetation index values as a reference for the assesment and monitoring of dryland condition", *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1135-1141.
- Boer, M.M., Puigdefabregas, J. (2005): "Assessment of dryland condition using spatial anomalies of vegetation index values", *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4045-4065.
- Comisión Europea (2000). "Directiva Marco del Agua". Directiva 2000/60/EC, Oficial Journal of the European Communities, OJ L 327/1. http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html
- Contreras, S. (2002). "Los regadíos intensivos del Campo de Dalías". En J. Martínez Fernández y M.A. Esteve Selma (eds.) *Agua, regadío y sostenibilidad en el Sudeste ibérico*, Cap. 7, 151-191. Bilbao, Bakeaz.
- Contreras, S., Boer, M.M., Domingo, F., Puigdefabregas, J., Lázaro, R. (2005): "Desarrollo y aplicación de una aproximación descendente para la estimación local del drenaje anual medio en Sierra de Gádor (Almería)". En

J.A. López-Geta, J.C. Rubio, M.I. Martín-Machuca (eds.) *VI Simposio del Agua en Andalucía*, Tomo I, 377-388. Madrid, IGME.

Contreras, S. (2006): *Distribución espacial del balance hídrico anual en regiones montañosas semiáridas. Aplicación en Sierra de Gádor (Almería, España)*. Tesis doctoral, CD-Rom. Almería, Servicio de publicaciones de la Universidad de Almería. En prensa.

Custodio, E. (1997): "Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos". En E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper (eds.) *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*, 83-109. Madrid, Instituto Tecnológico Geominero de España

González Asensio, A., Domínguez Prat, P., Franqueza Montes, P.A. (2003): *Resultados del proyecto sobre conocimientos alcanzados de los acuíferos del sur de Sierra de Gádor-Campo de Dalías*. Madrid, IGME – Oficina de proyectos de Almería.

Hendrickx, J.M.H., Walker, G.R. (1997): "Recharge from precipitation". En I. Simmers (ed) *Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas*, Cap. 2, 19-111. Rotterdam, A.A. Balkema.

Lerner, D.N. (1990): "General principles of techniques for estimating recharge". En D.N. Lerner, A.S. Issar y I. Simmers (eds) *Groundwater recharge*, Cap. 10, 101-110. Hannover, Verlag Heinz Heise.

Martín-Rojas, I. (2004): *Las Unidades Internas del sector de la Sierra de Gádor: estructura y evolución geodinámica*. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.

Martín-Rosales, W., Gisbert, J., Pulido-Bosch, A., Vallejos, A., Fernández-Cortés, A. (2006). "Estimating groundwater recharge induced by engineering systems in a semiarid area (southeastern Spain)". *Environmental Geology*, en prensa.

Nemani, R.R., Running, S.W. (1989). "Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation", *Agricultural and Forest Meteorology*, 44, 245-260.

Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C. (2005): "Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change", *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 503-510.

PNUE/PAM/PLAN BLEU. (2004): *L'eau des Méditerranéens: situation et perspectives*. Technical report 158, Athènes.

Pulido-Bosch, A., Pulido-Lebouf, P., Molina, L., Vallejos, A., Molina, L., Martín-Rosales, W. (2000): "Intensive agriculture, wetlands, quarries and water management. A case study (Campo de Dalías, SE Spain)", *Environmental Geology*, 40(1-2), 163-168.

Pulido-Bosch, A. (coord) (2005): *Recarga en la Sierra de Gádor e hidrogeoquímica de los acuíferos del Campo de Dalías*. Almería, Cajamar.

Specht, R.L. (1972): "Water use by perennial evergreen plant communities in Australia and Papua New Guinea", *Australian Journal of Botany*, 20, 273-299.

Tucker, C.J. (1979): "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", *Remote Sensing of Environment*, 20(9), 127-150.

Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., Calvache, M.L. (1997): "Contribution of environmental isotopes to the knowledge of complex hydrologic systems. A case study: Sierra de Gador (SE Spain)", *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 1157-1168.

Wood, W.W., Sanford, W.E. (1995). "Chemical and isotopic methods for quantifying ground-water recharge in a regional, semi-arid environment". *Ground Water*, 33(3), 458-468.

Zhang, Y., Lui, C., Lei, Y., Tang, Y., Yu, Q., Shen, Y., Sun, H. (2006) "An integrated algorithm for estimating regional latent heat flux and daily evapotranspiration", *International Journal of Remote Sensing*, 27, 129-152.