

## Disponibilidad sostenible de agua subterránea a partir del control de las descargas de un acuífero

Armando G. Canales<sup>1\*</sup> y Luis A. Islas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico de Sonora  
5 de Febrero 818 Sur, Col. Centro, Cd. Obregón, Sonora, 85000 México

Recibido 15 Noviembre 2004, revisado 13 Junio 2005, aceptado 27 Junio 2005

---

*Sustainable groundwater availability from aquifer discharge controls*

### Abstract

Traditionally the total recharge, as the sum of net horizontal and vertical flow, to an aquifer is considered as sustainable yield. Frans R. P. Kalf and Donald R. Woolley (2005) have mentioned it is necessary to accept the reality of unsustainable groundwater systems and several authors, including John Bredehoeft (2002), have emphasized that it is not possible to control recharge. It can be assessed by estimating the groundwater discharges from the aquifer and changes in storage for defined periods. Then groundwater draft can be determined as the total discharge plus the change in storage minus the volumes required in neighbor areas such as wetlands, estuaries, lagoons or bays. Therefore the allowed storage change is defined explicitly as a function of selected periods. The objective of this paper is to present a method for pumping assessment based on control variables. The application was made in two study cases at Northwestern Mexico, Yaqui and Mayo aquifers, where the assessment of availability by the proposed method renders some results comparable with traditional method and acceptable for practical purposes. The groundwater systems are unsustainable in a frame conscious about the future.

*Keywords:* Groundwater, sustainable yield, recharge, discharge, storage

---

### Introducción

Tradicionalmente la suma de las recargas vertical y por flujo subterráneo horizontal a un acuífero constituía la estimación de la disponibilidad denominada “extracción permanente” o “rendimiento seguro”. Kalf y Woolley (2005) sugieren emplear el término “rendimiento sostenible” cuando se refiere a una cuenca o a un área de balance de un sistema de agua subterránea y aceptar la posibilidad de un uso “no sostenible” del

agua como recurso no renovable de modo que pueda evaluarse los efectos implícitos de las extracciones de agua a largo plazo. Algunos autores, entre los que se encuentra Bredehoeft (2002), han insistido en que la recarga no puede controlarse y que, por el contrario, la descarga es factible de medirse y controlarse si el volumen que extraen los pozos se registra con medidores totalizadores en buenas condiciones de funcionamiento y si se tiene el registro de la piezometría, con mediciones sistemáticas de los

---

\* Autor para correspondencia  
E-mail: acanales@itson.mx; Tel.: +52 644-4100923; Fax: +52 644-4100910

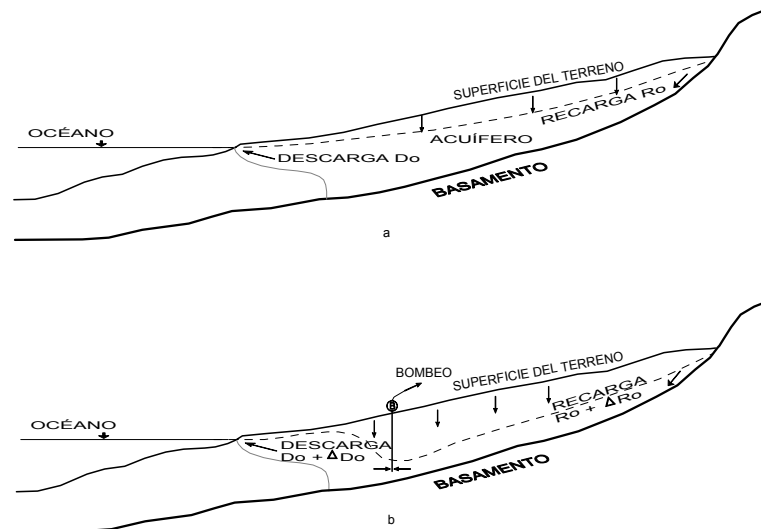


Figura 1. Sección de acuífero costero donde: a) Condición de recarga  $R_0$  horizontal y vertical y de descarga al mar  $D_0$ , originales sin bombeo b) Efecto del bombeo B con la recarga ( $R_0 + \Delta R_0$ ) y descarga al mar ( $D_0 + \Delta D_0$ ).

niveles estáticos, que permitan hacer estimaciones apropiadas de las descargas por flujo subterráneo al aplicar los principios de redes de flujo, balance de agua subterránea y el cálculo de cambios de almacenamiento mediante curvas de igual evolución de niveles estáticos. Este autor considera que la “captura”, como cambio de la descarga natural, es la que determina las dimensiones del desarrollo socioeconómico tanto urbano-industrial como agropecuario. El equilibrio lo define como el estado en el que no hay cambio de almacenamiento o abatimiento de niveles del agua, lo cual en algunos casos no será factible de alcanzar como lo expresan Kalf y Woolley, (2005).

Generalmente, en gran número de acuíferos la disponibilidad de agua subterránea se obtiene calculando las entradas por flujo subterráneo con redes piezométricas y sumando la recarga vertical que se determina de las ecuaciones de balance para dos o más períodos. Sin embargo, estos criterios generalmente son fijados sin una aproximación al efecto que genera en el sistema acuífero, desde el punto de vista de la sostenibilidad de las

extracciones y desde el de los límites de la sobreexplotación. En este estudio se presenta el desarrollo teórico en el que se basa la ecuación para calcular la disponibilidad de acuerdo con el criterio señalado por Bredehoeft (2002) mediante el cual se estima la disponibilidad en función de las descargas, aplicado a dos períodos en dos acuíferos localizados en la planicie costera del Noroeste de México constituidos por materiales no consolidados, semiconfinados en su mayor parte.

### Material y métodos

#### Fundamentación teórica

En la Fig. 1 se ilustra, con la idea de Bredehoeft (2002) y Kalf y Woolley (2005), un ejemplo sencillo de la relación entre la recarga y la descarga en una sección de un acuífero costero, mostrándose las condiciones originales (a) y las modificadas por el bombeo de pozos (b). Así, antes del bombeo se tiene:

$$R_0 = D_0 \quad (1)$$

donde  $R_0$  es la recarga original y  $D_0$  la descarga original. La descarga se presenta como el flujo subterráneo de salida al océano, que se estima con la Ley de Darcy y la transmisividad a lo largo de la playa:

$$D_0 = T \cdot i \cdot L \quad (2)$$

donde  $T$  es la transmisividad [ $L^2/T$ ],  $i$  ( $i=dh/dl$ ) es la variación de la elevación del nivel estático por unidad de longitud [-] y  $L$  la longitud del frente costero [ $L$ ].

Al instalar un pozo que extrae un volumen  $B$  por unidad de tiempo, el nuevo balance se representa como:

$$(R_0 + \Delta R_0) - (D_0 + \Delta D_0) - B + dV/dt = 0 \quad (3)$$

donde  $\Delta R_0$  y  $\Delta D_0$  son los cambios en la tasa de recarga y descarga respectivamente, ocasionadas por el bombeo  $B$  y  $dV/dt$  es el cambio de almacenamiento del acuífero.

Sustituyendo la ecuación (1) en la (3) se tiene que:

$$\Delta R_0 - \Delta D_0 - B + dV/dt = 0 \quad (4)$$

Si posteriormente a una etapa en la que se utilizó el volumen de cambio de almacenamiento, se quiere analizar la sostenibilidad del sistema se plantea la siguiente expresión:

$$\Delta R_0 - \Delta D_0 + dV/dt = B \quad (5)$$

Esta diferencia de cambios en la recarga y la descarga por efecto del bombeo se define como "captura". De acuerdo con Bredehoeft (2002), la respuesta dinámica del sistema acuífero gobierna el proceso de captura. En el caso particular de un acuífero semiconfinado la recarga no se ve afectada por el bombeo:

$$\Delta R_0 = 0 \quad (6)$$

y, por lo tanto:

$$-\Delta D_0 + dV/dt = B \quad (7)$$

De este modo la sostenibilidad de un sistema de agua subterránea se relaciona con el bombeo que captura un volumen igual al cambio de descarga original, sin perder de vista que la recarga encierra serias dudas en su cálculo, principalmente cuando se estima como recarga vertical producto de infiltraciones en sistemas de riego o de aportaciones de acuíferos sub o sobreyacentes (Bredehoeft, 2002).

#### Metodología

La ecuación tradicional del balance de un acuífero semiconfinado para un período de tiempo determinado es:

$$E + R_v - D - B = \Delta V \cdot S \quad (8)$$

donde  $E$  y  $D$  [ $L^3/T$ ] son las entradas y salidas por flujo subterráneo, estimadas como en la ecuación (2);  $R_v$  [ $L^3/T$ ] es la recarga vertical proveniente de los estratos semiconfinados o acuitados superior y/o inferior, que puede ser positiva (si entra al acuífero) o negativa (si éste lo cede a unidades adyacentes);  $B$  es el volumen de extracción [ $L^3/T$ ] debido al bombeo de los pozos;  $\Delta V$  es el cambio en el almacenamiento, que se obtiene de las curvas de igual evolución de niveles estáticos de los pozos en el período en consideración y del área asociada a esas curvas y, finalmente,  $S$  [adimensional] es el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

Tanto  $E$  como  $D$  se pueden cuantificar cuando los pozos están nivelados respecto al nivel del mar y son seleccionados para medir los niveles estáticos, así como cuando se dispone de datos de transmisividad derivados de pruebas de bombeo.

Si se aplican los conceptos de Bredehoeft (2002) y Kalf y Woolley (2005) y se analizan dos periodos distintos, cada uno viene planteado como una ecuación (dos ecuaciones en total), dejando como incógnitas la recarga vertical ( $R_v$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ). Eliminando la recarga vertical por ecuaciones simultáneas se obtiene el coeficiente de almacenamiento, o conocido este coeficiente de estudios anteriores, se estima la recarga vertical.

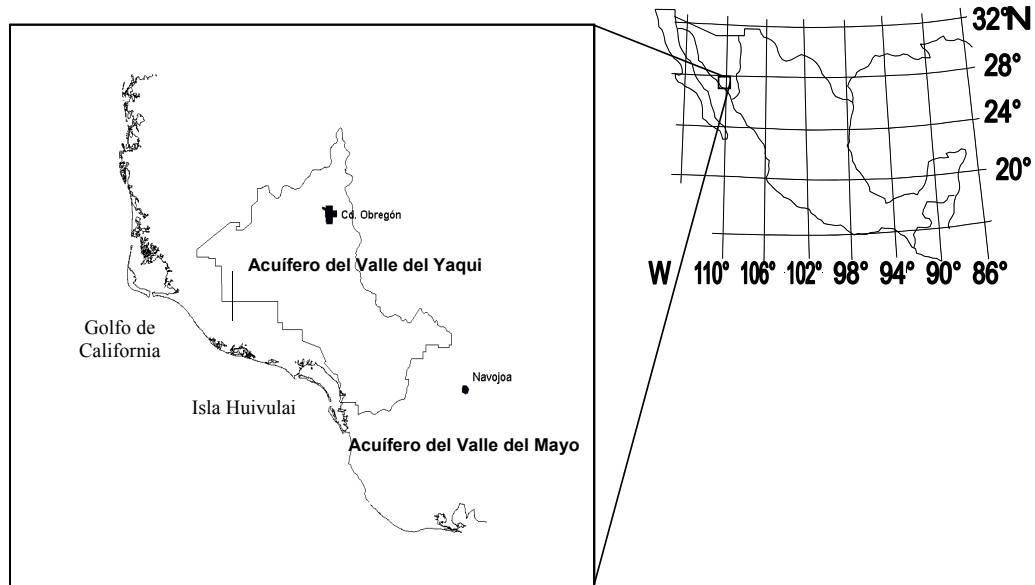


Figura 2. Localización de los acuíferos del Valle del Yaqui y del Valle del Mayo, en el Noroeste de México.

Se puede considerar entonces que los términos de descarga o salida son factibles de controlar, cosa que no ocurre con la recarga. Las salidas por flujo subterráneo pueden constituir la aportación a acuíferos vecinos o a masas de agua como el mar y si se consideran descargas comprometidas, tanto las mínimas que deben ir al mar como las de pozos autorizados y registrados, será factible determinar un bombeo estimado a mediano o largo plazo en función del volumen de almacenamiento susceptible de utilizarse, designado por Kalf y Woolley (2005) como “volumen de minado”:

$$B_{\text{medido}} \pm \Delta V \cdot S = B_{\text{estimado}} \quad (9)$$

Así, considerando la ecuación anterior, si el cambio en el almacenamiento fue positivo, es decir, que hubo recuperación en los niveles, este volumen se suma al bombeo medido para obtener estimaciones a mediano o largo plazo; lo contrario al caso de abatimiento de los niveles, cuando el cambio de almacenamiento resulta negativo y se resta del

bombeo medido.

Esta metodología se aplicó a dos acuíferos situados en la planicie costera del Noroeste de México, en el acuífero del Valle del Yaqui y del Valle del Mayo (Fig. 2). Los valles del Yaqui y del Mayo forman parte de la planicie costera del Noroeste de México, en los límites de la provincia desértica de Sonora, entre los 109° 20' y 110° 37' de longitud Oeste y entre los 26° 45' y 27° 33' de latitud Norte. Los acuíferos están constituidos por depósitos aluviales originados por la acción de los deltas de los ríos Yaqui y Mayo, compuestos por mezclas de arcillas, limos, arenas y gravas, con un espesor de sedimentos que rebasa los 500 m según las perforaciones exploratorias registradas por Planimex (1970); descansan sobre basamento Cretácico de ambiente marino y con intercalaciones de derrames volcánicos en el caso del Valle del Mayo.

Las precipitaciones en el área oscilan entre 200 y 400 mm anuales con una temperatura media anual de 24 a 25°C (INEGI 1997) .Las temperaturas máximas y mínimas oscilan entre 47 y

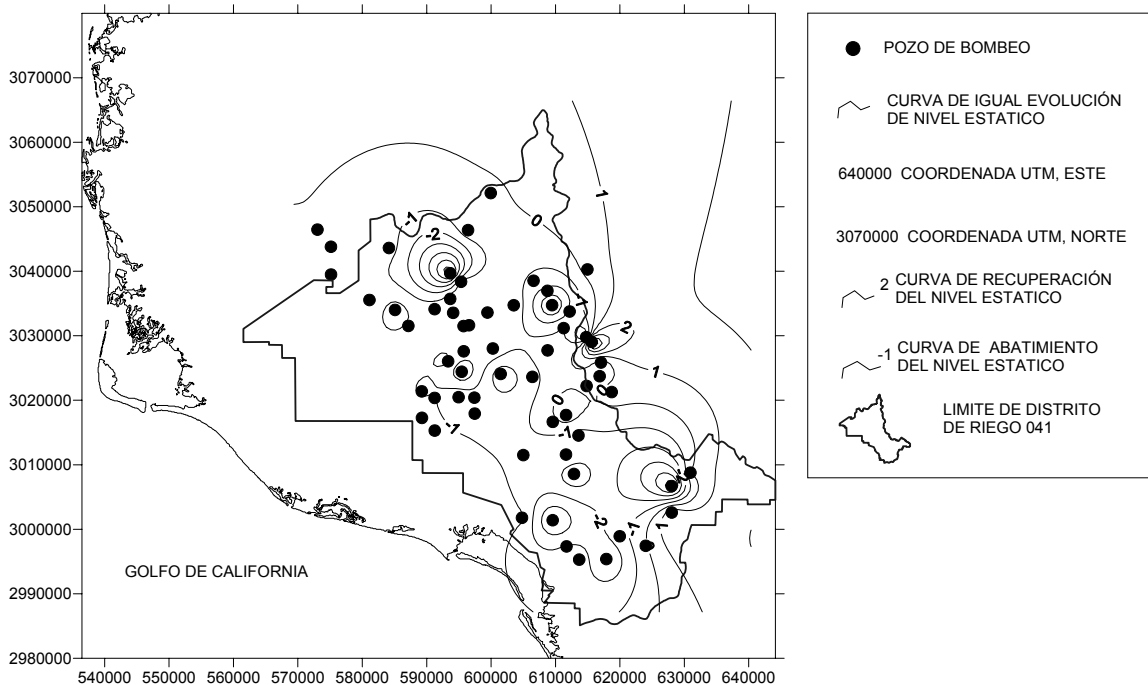


Figura 3. Evolución de los niveles estáticos en el acuífero del Valle del Yaqui para el ciclo 1974-1975.

48° C en verano y entre 0 y 5° C en invierno. La evaporación potencial media anual es de 2,600 mm, con promedios mensuales que van de 100 a 300 mm. La humedad relativa media anual es del 58%.

La superficie agrícola bajo riego en Valle del Yaqui, es de 255,000 ha, que se irriga con 3000 hm<sup>3</sup> de aguas superficiales provenientes de un sistema de presas ubicadas en la Cuenca del río Yaqui, principalmente la de Oviachic (Álvaro Obregón) y con 450 hm<sup>3</sup> de agua subterránea. El escurrimiento medio anual del Río Mayo es de 1,030 hm<sup>3</sup> que se almacenan en la presa Mocúzari (Adolfo Ruiz Cortines) para irrigar una superficie de alrededor de 98,000 ha (Flores, 2005). Adicionalmente, se utiliza un volumen medio anual de 150 hm<sup>3</sup> por bombeo del acuífero del Mayo (Navarro, 2002).

Los valores de los componentes de la ecuación del balance de agua en el acuífero del Valle del Yaqui para dos ciclos: 1974-75 y 1975-76, fueron tomados de Chávez et al. (1978). Para realizar el

balance en el acuífero del Valle del Mayo se utilizaron datos procedentes de la Comisión Nacional del Agua (CNA, México) para el periodo 1996-97-98. Los volúmenes de bombeo de ambos acuíferos fueron proporcionados por la CNA. Para la estimación de las reservas de agua en cada uno de los acuíferos se tomó como espesor saturado de referencia 120 m (el espesor de los sedimentos es superior en el área de estudio), considerando que la extracción de agua por debajo de niveles estáticos inferiores a esa profundidad no resulta rentable económicamente con las tecnologías actuales para la agricultura, que es el sector que consume más del 85-90% del agua.

### Resultados y discusión

Las áreas consideradas para el balance en ambos acuíferos son de 2,300 km<sup>2</sup> en el Valle del Yaqui y de 1,200 km<sup>2</sup> en el Valle del Mayo. Los valores de los componentes de la ecuación de

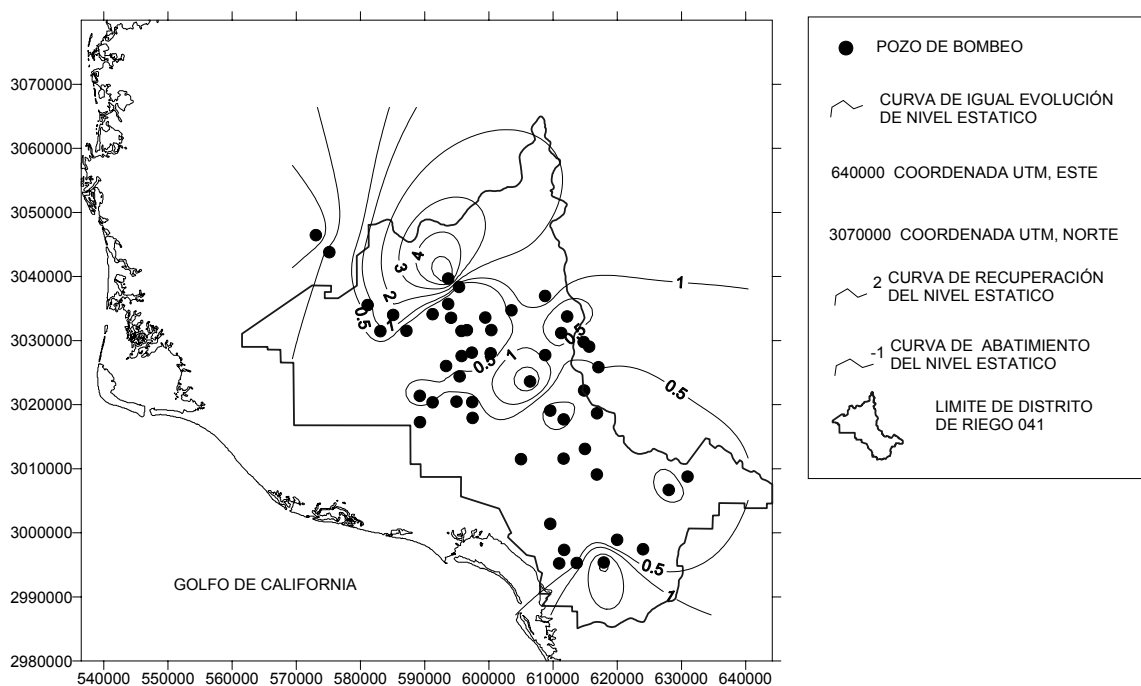


Figura 4. Evolución de los niveles estáticos en el acuífero del Valle del Yaqui para el ciclo 1975-1976.

balance en el acuífero del Valle del Yaqui (1974-75 y 1975-76) y del Mayo (1996-97, 1997-98) se muestran en la Tabla 1. Como puede observarse, en ambas situaciones el bombeo excede a las entradas por flujo subterráneo, por lo que la recarga vertical

Tabla 1. Balance hídrico en los acuíferos del Valle del Yaqui y del Valle del Mayo para dos ciclos hidrológicos consecutivos (en  $\text{hm}^3/\text{año}$ ). E y D ( $\text{hm}^3$ ) son las entradas y salidas por flujo subterráneo; Rv ( $\text{hm}^3$ ) es la recarga vertical proveniente de los estratos semiconfinantes o acuitardos superior y/o inferior (incógnita); B es el volumen de extracción ( $\text{hm}^3$ ) debido al bombeo de los pozos;  $\Delta V$  es el cambio en el almacenamiento, y S (adimensional) es el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

	E	D	B	Rv	$\Delta V \cdot S$
<i>Valle del Yaqui</i>					
1974-75	50	-47	-305	?	-1,228·S
1975-76	45	-38	-372	?	-193·S
<i>Valle del Mayo</i>					
1996-97	6.8	-42	-106	?	+130·S
1997-98	6.9	-38	-116	?	-325·S

(Rv) resulta determinante en la estimación del equilibrio del sistema y su sostenibilidad. En estas condiciones, tanto la recarga vertical (Rv) como el coeficiente de almacenamiento (S) son las incógnitas. La evolución de los niveles estáticos en el Valle del Yaqui para los ciclos 1974-75 y 1975-76 (Figs. 3 y 4) muestran abatimientos significativos para el primer ciclo, como puede apreciarse en los descensos del nivel, de hasta 5 m en un año en algunas áreas centrales del acuífero. Estos conos de abatimientos se relacionan con los bombeos de agua subterránea. La variación en las extracciones por bombeo y en la recarga vertical dan como resultado una elevada variabilidad del cambio en el volumen almacenado ( $\Delta V$ ) interanualmente (Fig. 3 y 4, Tabla 1).

Para el coeficiente de almacenamiento del acuífero del Valle del Yaqui, a partir de las estimaciones de 0.07 y 0.15 propuestas por Salinas (1980) y Chávez et al. (1978) respectivamente, que utilizaron regresiones lineales múltiples, se

Tabla 2. Bombeos estimado y medido ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ) en el acuífero del Valle del Yaqui (para  $S = 0.07$ ) y en el Valle del Mayo (para  $S = 0.015$ ) para dos ciclos hidrológicos consecutivos.

	$\Delta V \cdot S$	$B_{\text{medido}}$	$B_{\text{estimado}}$
<i>Valle del Yaqui</i>			
1974-75	-86 + 161	305	380
1975-76	-14 + 161	372	519
<i>Valle del Mayo</i>			
1996-97	2 + 18	106	126
1997-98	-5 + 18	116	129

seleccionó el valor más conservador (0.07). En el caso del Valle del Mayo, al hacer simultáneas las ecuaciones de los dos periodos se obtuvo un coeficiente de almacenamiento de 0.015.

A partir de aquí, se retoma la discusión sobre el rendimiento no sostenible de las extracciones de agua de un acuífero de acuerdo a la disponibilidad tomando como referencia los casos mostrados anteriormente. Si se considera que en estos sistemas se permite un abatimiento promedio en el acuífero de 1 m en un año, considerando el criterio de no renovabilidad del acuífero, los volúmenes adicionales que se obtienen del almacenamiento por cada metro de descenso del nivel del agua ( $\Delta V = \Delta h \cdot A \cdot S$ , donde A es el área del balance) son para el acuífero del Valle del Yaqui de  $161 \text{ hm}^3$  y para el del Valle del Mayo de  $18 \text{ hm}^3$ . Con estos valores, los volúmenes del cambio en el almacenamiento y el valor del bombeo estimado de acuerdo a los criterios de no sostenibilidad (Tabla 2), resultan diferentes a los considerados inicialmente (Tabla 1). Los valores del bombeo (estimado) se incrementan entre un 25% y un 40% en el acuífero del Valle del Yaqui ( $\approx 450 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), en relación al bombeo medido, y entre un 11% y un 19% en el del Mayo ( $\approx 130 \text{ hm}^3/\text{año}$ ; Tabla 2). Estos resultados son indicativos de que el cambio de almacenamiento depende no solo del bombeo, sino de otras variables como el volumen de agua superficial que se infiltra.

Estimando que las reservas de agua (para un espesor saturado de 100 m y con las áreas y los coeficientes de almacenamiento considerados) en el

acuífero del Valle del Yaqui son de alrededor de  $16,100 \text{ hm}^3$  y en el del Valle del Mayo de  $1,800 \text{ hm}^3$ , los volúmenes adicionales del almacenamiento suponen, en ambos casos, un 1 % del volumen total. Así, con estos valores de bombeo estimado a largo plazo los sistemas llegarían a los límites de explotación en 100 años, lo que implicaría un uso del agua con criterios relativos al de un recurso no renovable.

Tal como apunta Kitheka (1998), las salidas por flujo subterráneo deben mantenerse dentro de los límites de las descargas naturales comprometidas, que en estos ejemplos están dentro de los necesarios para contener la intrusión salina. El uso del bombeo estimado a costa del almacenamiento durante periodos de tiempo prolongados se muestra como un criterio no sostenible del sistema a largo plazo. Sin embargo, la utilización del bombeo estimado durante los periodos de sequía, sólo sería factible si se permite la recuperación del sistema durante los ciclos húmedos, lo que denota una dependencia en el manejo del agua de la ciclicidad del clima, a menudo irregular en zonas semiáridas, y de la fijación de los límites absolutos y en términos cuantitativos de una sequía a nivel regional.

Si se acepta, siguiendo el criterio de Kalf y Woolley (2005), que los volúmenes de bombeo de los acuíferos estudiados no son sostenibles, sería necesario establecer las medidas gestoras pertinentes con anticipación al agotamiento de las reservas que constituyen el volumen almacenado susceptible de recuperarse. La estimación del volumen total de reserva, susceptible de recuperarse, presenta, aún a groso modo, una predicción del periodo que transcurriría para su extracción en el supuesto de un recurso no renovable.

En un sistema de agua subterránea que se reconoce como no sostenible, es factible estimar el volumen de extracción por bombeo de pozos a mediano y largo plazo (bombeo estimado), conociendo la transmisividad en las secciones de entrada y salida del acuífero y vigilando las descargas comprometidas a acuíferos vecinos o a masas de agua, a partir del control sistemático del nivel piezométrico y de las extracciones por bombeo. Las reservas formadas por el volumen almacenado susceptible de recuperarse es la limitación que

marca la explotación sostenible de un acuífero.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a los Drs. Salvador Sánchez Carrillo y Christopher Watts sus revisiones y sugerencias sobre el contenido de este artículo, así como la redacción del abstract. Igualmente, a los estudiantes de maestría I.L.A. Navarro, M.I. Álvarez, L.G. Castillo, J.A. Aguiar, Y.F. Ortiz y A.H. Trujillo, por su ayuda en la estimación del balance del acuífero del Valle del Mayo.

### **Bibliografía**

- Bredehoeft, J. D. 2002. The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model. *Ground Water*, 40: 340-345.
- Bredehoeft, J.D. 1997. Safe Yield and the Water Budget Myth. Editorial. *Ground Water*, 35: 9-29.
- Chávez, G.R., List M.A., Salazar, G.F., López, F. C.A., Rodríguez, L., Murillo, G., Tinajero, G. J., Canales, E.A.G., Chávez, R.S., Díaz, M. 1978. Explotación adicional, exploración y estudio de los acuíferos del sur de Sonora y del norte y centro de Sinaloa. Proyecto IA-167, Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México DF, México.
- Flores, C.M.C. 2005. Funcionamiento del vaso de la presa Adolfo Ruiz Cortinez (Mocuzari) para el ciclo agrícola 2003-2004. Tesis de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, México.
- INEGI 1997. Cuaderno estadístico municipal, Cajeme, Sonora. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Kalf, F.R.P. y Woolley, D.R. 2005. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeology Journal*, 13: 295-312.
- Kitheka J.U. 1998. Groundwater outflow and its linkage to coastal circulation in a mangrove-fringe creek in Kenya. *Estuarine Coastal and Shell Science*, 47: 63-75.
- Navarro I. L.Y. 2002. Tránsito de la avenida máxima en la presa Adolfo Ruiz Cortinez "Mocuzari", utilizando información hidrológica hasta el año 2000. Tesis de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, México.
- Planimex, 1970. Estudio Geohidrológico de los acuíferos en el Valle del Río Mayo, Sonora. Informe Técnico Final. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Ingenieros Consultores, S.A., México, DF, México.
- Sophocleous M. 1997. Managing water resources systems: Why "Safe Yield" is not sustainable, Editorial. *Ground Water*, 35: 561.
- Salinas, S.E. 1980. Aplicación del método de diferencias finitas al análisis de un acuífero confinado. Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en hidrología subterránea. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.