

## Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero transfronterizo del Río San Pedro en Sonora, México

Socorro Herrera-Carbajal<sup>1\*</sup>, Arturo I. Villalba-Atondo<sup>2</sup> y Martín E. Molinar-Tabares<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora  
Bld. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, CP: 83000, México

<sup>2</sup>Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora

<sup>3</sup>Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional del Noroeste, Paseo de la Cultura y Comenfort, Edif. Mexico Piso 3,  
Col. Villa De Seris, Hermosillo, Sonora, CP: 83280, México

Recibido 28 Septiembre 2006, revisado 21 Febrero 2007, aceptado 6 Marzo 2007

---

*Hydrogeological modelling and evaluation of the sustainability in the transborder San Pedro River aquifer at Sonora, Mexico*

### Abstract

The transborder Mexico-US San Pedro River basin is one of most important and representative watershed of the semi-arid North America due to the significant ecological value of riparian ecosystems sustained by its aquifer. However, groundwater overexploitation within the Mexican area could suppose an environmental risk to maintain riverine habitats. In order to establish the aquifer performance for management purposes an aquifer modelling using MODFLOW procedures is shown in this study. Combining historical records and current groundwater flow and level measurements the model shown a cuasi-equilibrium aquifer with a trend to slight level decline under low water storage (i.e. overexploitation). Because model calibration pointed out an 98% of confidence ( $p < 0.05$ ), the use of this conceptual model is considered suitable to represent the San Pedro aquifer groundwater budget. Groundwater exploitation creates an annual groundwater drawdown of  $-1.47 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  ( $-0.55 \text{ m/year}$ ), supposing a serious risk for the system sustainability (groundwater reserves decreases to an annual rate of 6.33%). On the contrary, short-time simulations show that current groundwater uses did not represent a serious damage to overexploitation –whenever climatic conditions remain stables– but a groundwater level recovery could be not expected. However, whatever increase on groundwater pumping could revert this stationary situation doing necessary to implement an artificial recharge in some critical aquifer areas.

*Keywords:* Groundwater modelling, San Pedro River Basin, semi-arid, groundwater sustainability.

### Resumen

La cuenca transfronteriza (México-Estados Unidos) del Río San Pedro es una de las más importantes y representativas de la franja semiárida de Norte América debido al elevado valor ecológico que presentan los ecosistemas ribereños que sostiene el acuífero. Sin embargo, la explotación de agua subterránea dentro del área mexicana podría suponer un serio riesgo ambiental para el mantenimiento de estos hábitats. Este estudio muestra una modelación del acuífero usando MODFLOW para establecer las bases de su funcionamiento de modo que puedan ser utilizadas como criterios de manejo del agua. Combinando datos históricos y medidas de flujo y nivel de agua los resultados de la modelación muestran que el acuífero sobreexplotado puede considerarse como en estado de cuasi-equilibrio con una ligera tendencia al descenso del nivel y en condiciones de bajo almacenamiento de agua. La calibración del modelo muestra un excelente ajuste entre datos modelados y observados ( $R^2 = 0.986$ ;  $p < 0.05$ ), lo que implica que representa correctamente el balance del acuífero. A pesar de que el balance hídrico muestra que la reducción de las reservas anuales, en torno a  $-1.47 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  ( $-0.55 \text{ m/año}$ ), suponen un grave riesgo de insostenibilidad del sistema (reducción anual del 6.33% de las reservas), las simulaciones a corto plazo indican que, con la explotación actual y de mantenerse las entradas de agua anuales, el acuífero no generaría cambios significativos, pero tampoco podría dar lugar a la recuperación de los niveles previos a la sobreexplotación; sin embargo, si se requiere aumentar la extracción, esta tendencia podría cambiar, siendo necesario implementar sistemas de recarga artificial en las áreas críticas.

*Palabras clave:* Modelación de aguas subterráneas, Cuenca del Río San Pedro, semi árido, sostenibilidad.

---

\* Autor para correspondencia

E-mail: sherrera@guayacan.uson.mx

## Introducción

En México, actualmente, de los 653 acuíferos considerados administrativamente, 102 se encuentran sobreexplotados. Desde 1975 ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados: 32 en 1975; 36 en 1981; 80 en 1985; 97 en 2001 y 102 en el 2003. (CNA 2004). Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea se está minando a un ritmo de cerca de  $6 \text{ km}^3$  por año (CNA 2004). En el Estado de Sonora se tienen registrados un total de 17 acuíferos sobreexplotados, de los cuales 5 presentan problemas de intrusión salina.

En los últimos años el Río San Pedro ha recibido considerable atención, tanto en el ámbito nacional como internacional, debido, en gran parte, a que este río sostiene un ecosistema de bosque ribereño que se considera de importancia crítica para la biodiversidad regional, es un corredor muy importante para las aves migratorias de América del Norte (Moot y Gutiérrez, 2001) y hábitat de peces nativos considerados en peligro de extinción (Varela et al., 1992). Sin embargo, en territorio mexicano, los mantos acuíferos del Río San Pedro están siendo sometidos a una fuerte presión extractiva, considerada por ciertos autores, como cercana a la sobreexplotación (e.g. Gómez-Álvarez et al., 1996). Mexicana de Cananea (2000) establece un déficit en el acuífero de  $-6.31 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ , mientras De Aguinaga (2002) marca el desequilibrio en  $-14.11 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ . Estas diferencias sugieren una importante incertidumbre en cuanto al comportamiento hidráulico del acuífero en relación con su explotación, lo que dificulta la proyección de planes de manejo acordes con la sostenibilidad del acuífero a largo plazo. Mexicana de Cananea (2000) maneja aproximadamente un 30 % más respecto al presente estudio y, De Aguinaga (2002) contempla toda la cuenca, lo cual representa aproximadamente un 100% más. En términos generales el resto de los parámetros geohidrológicos como precipitación, extracción por bombeo, transmisibilidad y permeabilidad son utilizadas de manera parecida en los diferentes estudios.

El agua subterránea del acuífero del Río San Pedro en su margen mexicana se utiliza como fuente de abastecimiento para actividades mineras, agrícolas,

ganaderas y para suplir las necesidades de los asentamientos humanos localizados en las cercanías de la cuenca. Tradicionalmente se considera que las actividades mineras son las que mayor impacto causan en la explotación del acuífero, ya que al utilizar grandes cantidades de agua, podrían exponer al acuífero a sobreexplotación, sin embargo, no existen datos que confirmen esta hipótesis.

La información disponible sobre la hidrogeología e hidráulica del acuífero del río San Pedro es escasa hasta la fecha. Existe la definición de un modelo conceptual del funcionamiento (De Aguinaga, 2002), pero no se conoce con detalle su variabilidad espacial ni temporal, así como los efectos de su explotación. Por esta razón, se considera de gran importancia ampliar los conocimientos geohidrológicos de esta cuenca, de modo que puedan plantearse criterios de manejo del agua acordes con la sostenibilidad del recurso.

Este trabajo muestra el funcionamiento y el estado de explotación en que se encuentra el acuífero del Río San Pedro en el área mexicana, utilizando tanto información histórica como mediciones trimestrales de niveles estáticos para un periodo de año y medio, a partir de la construcción de un modelo conceptual procesado con MODFLOW. El objetivo de este estudio es evaluar la sostenibilidad del acuífero a corto y largo plazo en relación con el manejo de las extracciones de agua, con la intención de dar pautas para su óptima utilización y manejo.

## Material y métodos

### *Descripción del Área de Estudio*

La Cuenca del Río San Pedro se sitúa en el Noroeste de México (Estado de Sonora) y Suroeste de Estados Unidos (Estado de Arizona), y cuenta con un área de  $1,895.51 \text{ km}^2$  ( $30^{\circ}21'$  Norte y  $110^{\circ}31'$  Oeste; Figura 1). El Valle del Río San Pedro está rodeado por sierras, quedando abierto en su parte Norte, donde conecta con territorio de Estados Unidos (INEGI, 1993) hasta unirse con el Río Gila (Villalba-Atondo et al., 2000). En los últimos años, un área de aproximadamente  $7600 \text{ km}^2$  ha recibido mucha atención internacional, enfocada específicamente a las áreas perennes que sostienen un ecosistema de bosque ribereño de vital

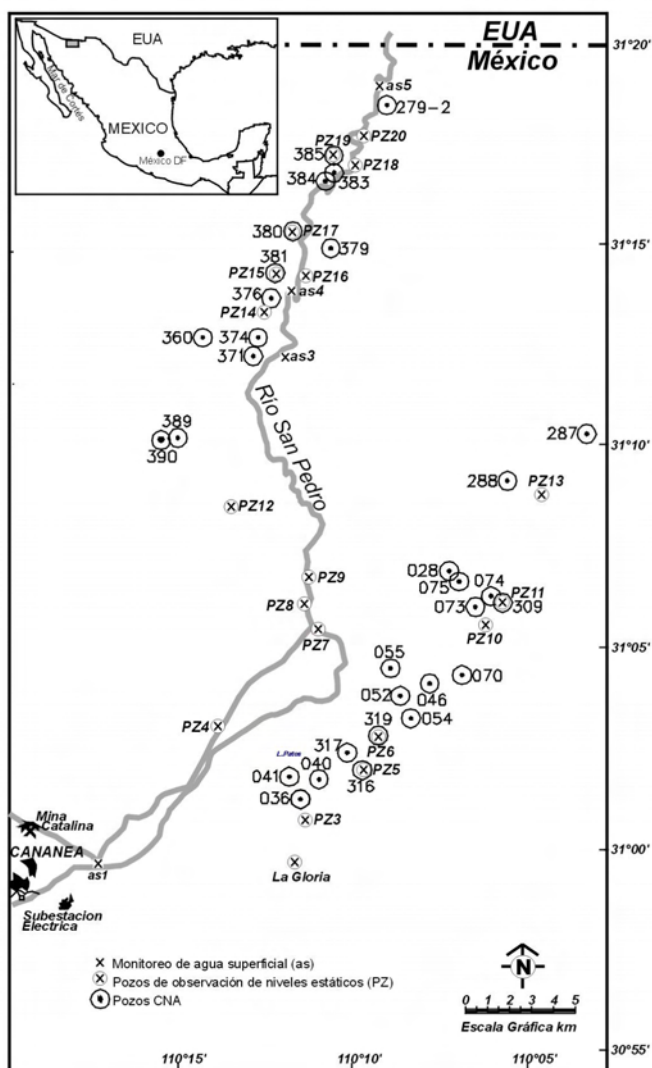


Fig. 1. Localización del área de estudio y ubicación de los puntos de medición, tanto para pozos como para agua superficial.

importancia para la biodiversidad regional. Es un corredor muy importante para las aves migratorias de América del Norte, albergando a más de 350 especies. Actualmente, se ha dado la voz de alarma respecto a su conservación debido a que la extracción de agua subterránea en la cuenca sobrepasa la recarga natural (Moote y Gutiérrez,

2001).

En su porción Mexicana, que es lo que considera la presente investigación, la subcuenca está formada por un valle intermontano de orientación Norte-Sur, con dimensiones de 35 km de largo por 42 km en su parte alta y 50 km en su parte baja de anchura. El rango de elevaciones del valle está

entre 1400 y 1500 msnm, con valores mínimos en el cauce del río y aumenta paulatinamente hacia las sierras donde varía entre 1700 y 2500 msnm (De Aguinaga, 2002).

Según la clasificación climática utilizada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), la mayor parte de la cuenca pertenece al clima semiseco ( $BS_{1kw}(x')$ ), mientras hacia la porción noreste el clima es seco ( $BS_{0kw}(x')$ ) y, tan sólo, en una reducida superficie en la Sierra Los Ajos el clima es subhúmedo ( $C(W_0)(x')$ ). El régimen predominante de lluvias es durante el verano (70% de la lluvia anual), con una distribución bimodal con máximos en julio-agosto y en diciembre, con una precipitación media que varía de 384 mm/año en Naco a 539 mm/año en Cananea (De Aguinaga, 2002). La temperatura media diaria varía de 38.7° C a -5.3° C (De Aguinaga, 2002).

Desde el punto de vista geológico, los lomeríos que forman la cuenca están compuestos por rocas vulcanosedimentarias del Cretácico Superior (Grupo Cabullona), mientras que las sierras están formadas por rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico Inferior (Grupo Bisbee) y sedimentarias del Paleozoico (De Aguinaga, 2002).

La hidrología de la cuenca se caracteriza por la existencia de corrientes intermitentes que forman un patrón dendrítico y subparalelo. Su coeficiente de escurrimiento varía de 0 a 20%, con los índices más altos en las zonas donde predominan las sierras de formaciones impermeables con vegetación baja, pero en promedio predominan coeficientes de 5 a 10%. Las zonas aluviales presentan los rangos de escurrimiento más bajos (INEGI, 1995a).

En general, en las zonas altas dominan las asociaciones Regosol-Redzina-Leptosol, mientras que en las planicies lo hacen Vertisol-Planosol-Fluvisol-Castañozem y Feozem (INEGI, 1995b).

El estudio consideró seis levantamientos de información de campo en un periodo de 14 meses (Octubre de 2002 a Diciembre de 2003), con mediciones cada dos o tres meses, intentando abarcar diferentes condiciones de humedad. Se seleccionaron 20 pozos a lo largo de la cuenca para la medición del nivel estático (Figura 1), la cual se llevó a cabo mediante una sonda eléctrica (Slope

Indicador, modelo 15298). Así mismo, fue utilizada información histórica de niveles estáticos de 50 pozos que son monitoreados por la CNA desde 1997 (Figura 1). El monitoreo del flujo de agua superficial se realizó en 5 zonas donde existió un flujo de agua perenne anual (Figura 1), donde se midió el caudal usando una sonda Global Flow Probe Modelo EP101. Toda la información hidrodinámica fue procesada con el Software Visual ModFlow Pro V.3.0. El modelo MODFLOW usa la aproximación de diferencias finitas para simular el flujo subterráneo transitorio o variable con el tiempo en tres dimensiones en un medio poroso heterogéneo y anisótropo. Visual Modflow es una interfase gráfica de Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988)

#### *Condiciones de la modelación y características del modelo conceptual*

La geometría en planta y en sección transversal se obtuvo a partir de cartas topográficas escala 1:50,000 de INEGI (1995c), que fue transferida a cada una de las celdas, a través de un modelo digital de elevación del terreno realizado con el software Surfer V6.01 (Golden Software Inc.). Usando este resultado y la información generada a partir de las secciones fue posible obtener las condiciones de contorno del acuífero. La Figura 2 muestra la morfometría del modelo del acuífero en relación con sus límites físicos. El valor de 50  $\Omega$ m se tomó como referencia de permeabilidad baja (Compañía. Minera de Cananea, 1982), definiendo el límite inferior del acuífero (basamento). De esta forma, el espesor saturado abarca profundidades variables desde 92 m hasta 680 m. El límite de la capa intermedia fue obtenido del citado estudio con resistividades de hasta 20  $\Omega$ m. Esto ocurre en un promedio de profundidad de 300 m respecto a la superficie topográfica, en la zona próxima al cauce principal. La superficie freática puede encontrarse desde aproximadamente 2 hasta 71 m de profundidad respecto a la superficie topográfica. El número de filas y columnas que constituyen la malla, así como el tamaño de cada una de ellas fue común en todas las capas. La malla, que es de forma regular, cubre un área de 27 por 52 km y tiene una orientación norte-sur, con celdas de 500 x 500 m (malla de 104 x 54 celdas). Las celdas

activas e inactivas fueron seleccionadas siguiendo los criterios topográficos, geológicos y edafológicos extraídos de las cartas de INEGI.

La transmisividad fue tomada del estudio hidrogeológico realizado por la Compañía Minera de Cananea (1989 y 1992), que fue obtenida a partir de 15 pruebas de bombeo. El resto de la información –topográfica, escurrimientos, niveles estáticos, extracción, pruebas de bombeo, geofísica, geología y edafología– requerida para el modelo se tomó de los estudios de De Aguinaga (2002), Compañía Minera de Cananea (1989 y 1992), IPESA (1980), Mexicana de Cananea (1992 y 2000) y CNA (2004).

En el modelo se dieron de alta 50 pozos de bombeo, seleccionados en función de sus coordenadas, características constructivas y régimen de operación, la mayoría ubicados en la parte baja y media de la cuenca. Entre los pozos de observación se incluyeron los 20 pozos monitoreados, distribuidos a lo largo de la cuenca. La mayoría de los pozos de bombeo se encuentran de la parte baja a la media de la cuenca.

Mediante referencias estratigráficas se estableció que el lecho arenoso del río tiene un espesor

promedio de 20 m. El tirante de agua superficial se consideró con valores de 0 a 25 cm a partir de mediciones directas.

Para la recarga del acuífero por agua de lluvia se consideraron las estaciones meteorológicas de Cananea (539 mm/año), Naco (384 mm/año) y la de Huachuca (387 mm/año), utilizando polígonos de Thiessen y considerando una tasa promedio de infiltración de 7.96 %. Se tiene registrado para el periodo 1996 – 2000 un bombeo para uso agrícola 8,380,000 m<sup>3</sup>/año, considerándose que retorna al acuífero, aproximadamente, el 30% (Mexicana de Cananea, 2000). La extinción de la evapotranspiración (534 mm/año) se consideró a una profundidad de 5 m (De Aguinaga, 2002)

Finalmente, para evaluar los cambios en los niveles estáticos del acuífero se consideró como referencia inicial las condiciones en el año 1995.

## Resultados y discusión

### Calibración del modelo

La Figura 3 muestra el resultado de la calibración del modelo, correlacionando las observaciones realizadas en campo con las modeladas con

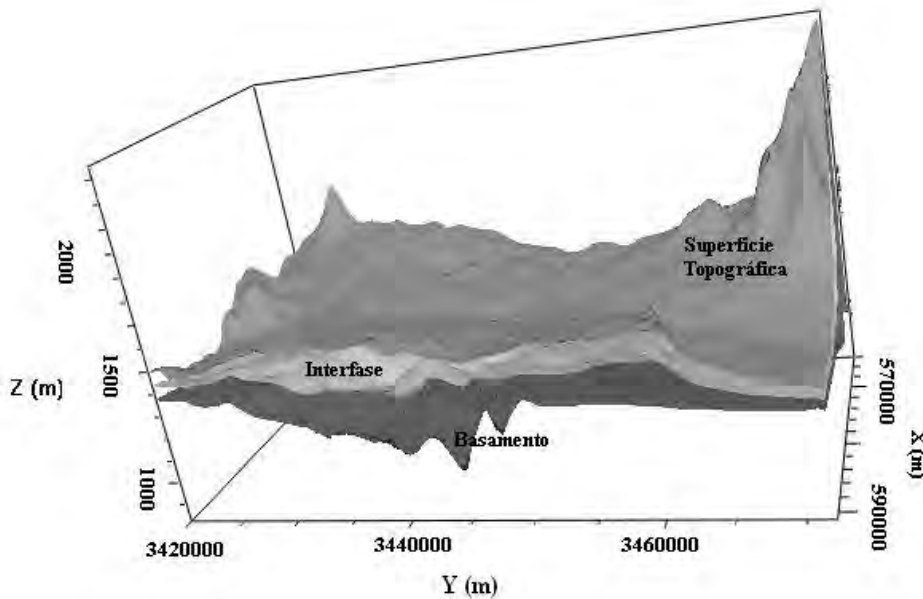


Fig. 2. Superficie topográfica interfase y basamento del área de estudio.

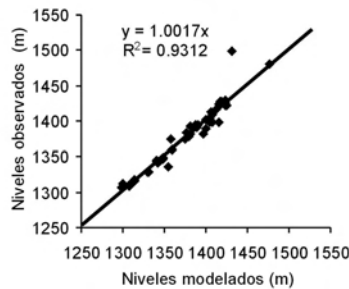


Fig. 3. Correlación de niveles observados en el año 2003 con modelados para el año 2002.

Modflow para octubre de 2002. El error estándar fue inferior a 1 m (0.869 m) con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.9890. El máximo residual correspondió al pozo de bombeo 36, localizado a 5 km al NE de la Ciudad de Cananea. Para el último monitoreo de este estudio (diciembre de 2003), el error estándar es ligeramente inferior (0.856 m), el grado de ajuste muy similar ( $R^2= 0.9890$ ), y el máximo residual continúa siendo para el mismo pozo (036). En este sentido, la correlación gráfica entre las líneas equipotenciales observadas y calculadas por Modflow muestra también variaciones mínimas (Figura 4). De este modo, es posible afirmar que el modelo representa fielmente la realidad hidrodinámica e hidrogeológica del acuífero del Río San Pedro.

#### *Flujo subterráneo y balance hídrico del acuífero*

El modelo muestra que, en términos generales, las líneas de flujo subterráneo convergen hacia el cauce del río San Pedro (Figura 5), ilustrando la importancia del acuífero en el sostenimiento de las zonas ribereñas, principalmente en periodos de estiaje. Igualmente, puede comprobarse que existe un flujo de agua subterránea preferente en el margen NE hacia la frontera con Estados Unidos. En la estación de monitoreo 4 (Los Corrales as4), el flujo de salida por el lecho del río obtenido con la modelación es de  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ , ligeramente superior al promedio anual medido durante 2003 ( $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ ), e inferior al registrado aguas abajo, a 15 km de la frontera con Estados Unidos, en la estación hidrométrica Palominas ( $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En cualquier

caso, estas diferencias pueden considerarse mínimas y debidas, principalmente, a la irregularidad hidráulica del sustrato.

En ciertas zonas próximas al cauce las líneas de flujo convergen fuera del trazo del río (zona intermedia y en la cercanía a Cananea; Figura 5) pudiendo indicar la presencia de cambios en las relaciones hidráulicas entre el río y el acuífero, con la aparición de áreas con una depresión del nivel de agua subterránea que da lugar a una desconexión con el lecho del río. Este fenómeno tiene importantes implicaciones en la hidrodinámica de las zonas ribereñas y su conservación.

El balance hídrico del acuífero se estableció considerando como entradas la recarga de la lluvia, la procedente del retorno de riego agrícola y la generada por las descargas de aguas residuales en el río, y como salidas la evapotranspiración, el flujo base en el río y la salida por bombeo para los diferentes usos (Tabla 1). El balance da como resultado un déficit anual de  $-1.47 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ , dominado por las extracciones por bombeo, que suponen 53% de las salidas totales del acuífero. El resultado del presente estudio es considerablemente inferior a los obtenidos por Mexicana de Cananea (2000), con un promedio de  $-6.31 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ , y por De Aguinaga (2002) con  $-14.11 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ . Estas diferencias reflejan, principalmente, una cierta disparidad en cuanto a la extensión de las áreas del acuífero consideradas. Por ejemplo, De Aguinaga (2002) contempló toda la subcuenca en la parte mexicana, lo cual es aproximadamente el doble del área que se analiza en este estudio; Mexicana de

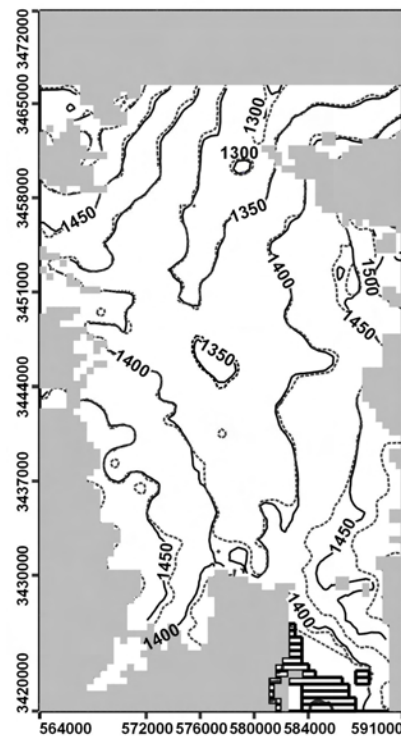


Fig. 4. Condiciones del nivel de agua observadas en (línea más clara) contra los calculados con MODFLOW en 1997, en la Cuenca del Río San Pedro, Sonora (coordenadas UTM).

Tabla 1. Balance hídrico del acuífero del Río San Pedro para el periodo 1995-2003.

Entradas ( $10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ):		Salidas ( $10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ):	
Retorno por agua de lluvia	35.61	Descargas al río	10.85
Retorno de riego	2.15	Bombeo	22.35
Infiltración de aguas residuales	2.97	Evapotranspiración	9.00
Total entradas	40.73	Total salidas	42.20
		Déficit	1.47

Cananea (2000), por su parte, no abarcó toda la subcuenca, aunque sí consideró aproximadamente un 30 % más de área que la definida en la presente investigación. A pesar de ello, en términos generales, las variables hidrológicas e hidráulicas (precipitación, bombeo, transmisibilidad y permeabilidad) utilizadas en este y aquellos estudios son muy similares, apareciendo sólo ligeras variaciones en su distribución espacial. Este aspecto y las

diferencias en el tamaño de las áreas contempladas son, probablemente, los factores que pueden estar influyendo en las variaciones observadas en el balance hídrico del acuífero.

El flujo del acuífero y el balance muestran cómo la zona de drenaje natural del acuífero, el río, ha visto reducidas sus descargas considerablemente. Con la proliferación del bombeo, las descargas hacia la zona ribereña han disminuido en un 53%, lo que

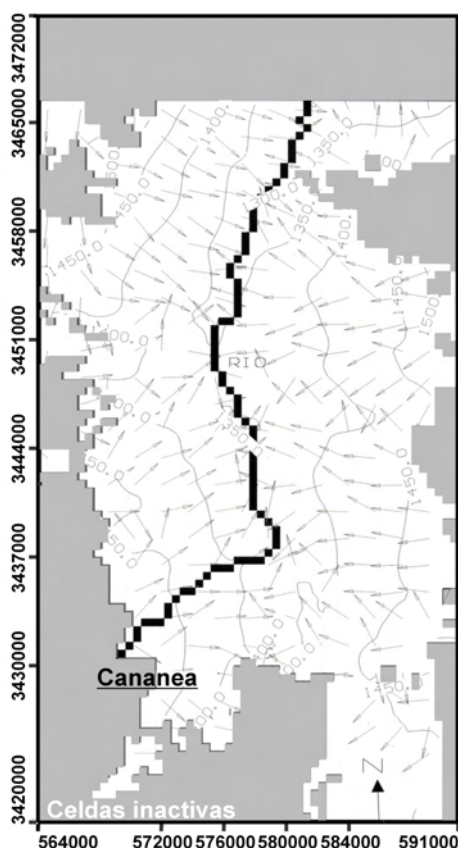


Fig. 5. Dirección dominante del flujo de agua subterránea en el área de estudio en 2003.

implica un valor relativamente alto para mantener la extensión de las zonas de ribera a largo plazo. Igualmente, aunque en apariencia el descenso del volumen anual no es muy significativo, existe un equilibrio inestable del manto acuífero con tendencia a la reducción del nivel de agua.

El volumen potencial total calculado para este acuífero, considerando la morfometría del sistema, es de  $290 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Considerando un coeficiente de almacenamiento de 0.08, el volumen de agua almacenado sería de  $23 \times 10^6 \text{ m}^3$ . El déficit anual obtenido ( $-1.47 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) representa un 6.33 % anual de pérdida de la reserva o desequilibrio hídrico, motivo por el cual se reportamos una tendencia a la sobreexplotación (en 15-16 años el acuífero estaría agotado).

#### *Evolución temporal de los niveles estáticos y evaluación de la sostenibilidad del acuífero*

La Figura 6 muestra la variación de los niveles estáticos para el periodo de estudio (2002-2003). Como puede observarse, existe un descenso generalizado del nivel, excepto en el punto de monitoreo 9. En promedio, el descenso para todo el periodo es inferior a -1 m (-0.82 m; -0.55 m/año). Esto representa un descenso cercano a 11 m en 20 años, que puede considerarse como una condición de no sostenibilidad del sistema. Sin embargo, las simulaciones realizadas a corto plazo (2010 y 2015), considerando las condiciones de explotación actuales, arrojan un status cercano al equilibrio. La correlación de niveles estáticos observados con los predichos presenta un error estándar de 0.905690 m con un coeficiente de correlación de 0.988 para el



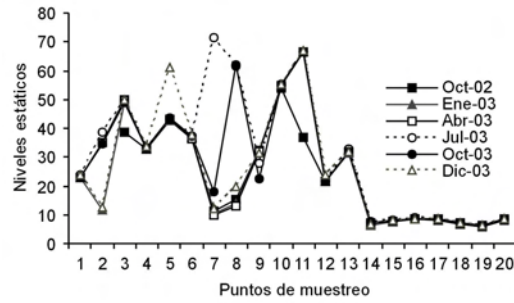


Fig. 6. Profundidad de los niveles estáticos durante cada periodo de observación en los diferentes pozos muestreados del acuífero del río San Pedro.

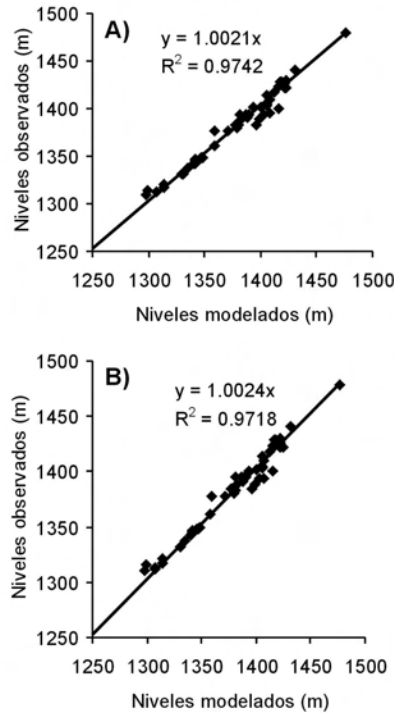


Fig. 7. Correlación de niveles observados en 2003 con los modelados para el año 2010 (A) y 2015 (B).

año 2010 y de 0.939948 m con un coeficiente de correlación de 0.987, para el caso del año 2015. Esto implica que el acuífero podría mantener su condición de equilibrio. En la Figura 7 puede comprobarse como la variación de la pendiente de

la recta de regresión es muy pequeña (1.0017 en 2002, 1.0021 en 2010 y 1.0024 en 2015), con una tendencia al incremento del nivel, por lo que puede considerarse que el grado de variación en los niveles estáticos es, en general, muy pequeño y

contrario, en promedio, a lo que arroja el balance hídrico.

Los resultados mostrados en este trabajo tienen unas implicaciones muy importantes en relación a la extracción de agua subterránea que se está realizando en la actualidad y con las posibilidades de manejo futuras. Si el manejo del acuífero se plantea con el objetivo de recuperarlo de la sobreexplotación actual es preciso reducir considerablemente las extracciones de agua para permitir un balance positivo. Además, considerando la irregularidad meteorológica propia del clima semiárido (Gochis et al., 2003) y las predicciones a corto plazo en relación con el cambio global (IPCC, 2001), es muy probable que el balance de entradas se reduzca o se vea alterado por fuertes irregularidades, lo que limitaría las posibilidades de recuperación, aumentaría las de sobreexplotación y despertaría numerosos intereses socioeconómicos en periodos húmedos que no podrían mantenerse en periodos secos.

#### Agradecimientos

Los autores agradecemos a Enlace Ecológico A. C., por su apoyo económico al proyecto del cual surgió la presente investigación. Así mismo, al Dr. Salvador Sánchez Carrillo por sus oportunas aportaciones al manuscrito.

#### Bibliografía

- Compañía Minera de Cananea, 1989. Solicitud de ampliación de los permisos de operación de los 48 pozos con que cuenta el sistema de abastecimiento de agua fresca para el proceso productivo de la empresa. Informe Técnico de la Compañía Minera de Cananea, S.A., Hermosillo, México.
- Compañía Minera de Cananea, 1992. Segundo estudio geofísico realizado en el valle del Río San Pedro, Sonora. Informe Técnico, Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S.A., Hermosillo, México.
- CNA, 2004. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México DF.
- De Aguinaga, J. G., 2002. Modelación Geohidrológica del acuífero del Río San Pedro. Tesis de Ingeniería en Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, México.
- Gochis, D.J., Leal J.C., Shuttleworth W.J., Watts C.J. y Garatuza-Payan J., 2003. Preliminary diagnostics from a new event-based precipitation monitoring system in support of the north american monsoon experiment. *Journal of Hydrometeorology*, 4: 974-981.
- Gómez-Álvarez, A., Villalba-Atondo, A. y Romero-Acosta, A., 1996. Investigación de la calidad del agua en la cuenca hidrológica del Río San Pedro, Sonora México (2a etapa). Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia y Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. Informe técnico final. Hermosillo, México.
- INEGI, 1993. Estudio Hidrológico del Estado de Sonora. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México DF., México.
- INEGI, 1995a. Carta de Aguas Superficiales H12-2, 1:250000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México DF., México.
- INEGI, 1995b. Carta de Edafología H12-2, 1:250000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México DF., México.
- INEGI, 1995c. cartas topográficas H12B33, H12B43 y H12B53, 1:50,000 Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México DF., México.
- IPESA, 1980. Estudio para el abastecimiento de agua a la Minera de Cananea S.A.. Informe técnico. IPESA Consultores, Cananea, México.
- IPCC, 2001. Special Report on The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss, D.J. Dokken (Editores). Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environmental Programme and World Meteorological Organization (<http://www.grida.no/climate/ipcc/regional/index.htm>).
- McDonald, M.G. y Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model: U.S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations, Book 6. Washington DC.
- Mexicana de Cananea, 1992. Sistemas de abastecimiento y recuperación de agua. Informe Técnico de Mexicana de Cananea S.A. de C.V, Cananea, México.
- Mexicana de Cananea, 2000. Actualización del estudio geohidrológico de las cuencas del Río San Pedro y Norte del río Sonora en Cananea, Sonora. Informe Técnico, Mexicana de Cananea, S.A. de C.V., Hermosillo, México.
- Moote, A. y Gutiérrez, M., 2001. Opiniones desde la cuenca alta del Río San Pedro: participaciones locales sobre temas relacionados con el agua. Udall Center for Studies in Public Policy, The University of Arizona, Tucson, Estados Unidos.
- Varela, A., 1992. Prospección de peces nativos en la cuenca del Río San Pedro, Sonora, área de ecología acuática. Hermosillo, Sonora, México.
- Villalba-Atondo, A.I., Gómez-Álvarez, A., Nubes-Ortiz, G., Solís-Garza, G., Herrera-Carbajal, S., Bringas-Alvarado, L., De la O Villanueva, M. y Cantúa-Sesteaga, S., 2000. Estudio de la calidad del agua en la región fronteriza noroeste del Estado de Sonora, México. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. Informe Técnico final de proyecto, Hermosillo, México.