

PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE EN CONDICIONES DE SOBREEXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Sustainable Agricultural Production when Ground Water is Overextracted

L. Pulido-Madriral^{1‡}, R. Simuta-Champo¹, J. González-Meraz² y H. Saucedo²

RESUMEN

Se desarrolló el presente estudio con el propósito de actualizar la información sobre la extracción y uso de agua subterránea de la cuenca de Laguna Seca, Guanajuato, México, así como para proponer medidas para su aprovechamiento de una manera sustentable. A través de inspecciones de campo y aforos en los equipos de bombeo de 1126 pozos existentes, se determinó, que el volumen de agua utilizado para la producción agropecuaria de la cuenca, es de 281 088 Dm³ anuales. La recarga estimada a partir de datos de estudios previos fue de 147 208 Dm³ anuales, lo cual representaría una extracción sostenible de los acuíferos, que requiere de la creación de estrategias que eviten mayores abatimientos del almacenamiento subterráneo. Considerando que cada año se extraen 297 507 Dm³ para usos agropecuarios, domésticos e industriales, el déficit actual de agua subterránea es de 150 299 Dm³ por año. De los 147 208 Dm³ de recarga, los usos de agua urbano e industrial dispondrían de 16 419 Dm³ por año. En el presente trabajo se propusieron alternativas de carácter técnico para equilibrar el volumen extraído con el volumen de recarga. La primera alternativa, consideró la tecnificación de las 21 463 ha físicas de riego de la cuenca, lo cual permitiría un equilibrio entre la recarga y las extracciones de agua, reduciendo las extracciones y limitando la repetición de cultivos anuales. En una segunda alternativa, se propone reducir proporcionalmente la superficie para cada cultivo hasta encontrar un volumen de uso agrícola aproximado a 130 789 Dm³; en esta alternativa se contempla

la tecnificación de la superficie total. La tercera alternativa es una combinación de las anteriores, ya que considera la tecnificación de toda la superficie de riego, así como el cierre de ciertos pozos para reducir el bombeo y así equilibrar las extracciones con la recarga.

Palabras clave: extracción de agua, agricultura de riego, tecnificación, acuíferos en equilibrio.

SUMMARY

This study was conducted to update information on the extraction and use of groundwater in the basin of Laguna Seca, Guanajuato, Mexico, as well as to propose action plans leading to sustainability. From the 1126 well inventory within the basin area, including field inspections and direct outflow measurements in the pumping equipment, an annual extraction of 281 088 Dm³ for crop irrigation was determined. From previous data, an annual recharge of 147 208 Dm³ was estimated, indicating a sustainable extraction rate. If the present annual extraction rate is 297 507 Dm³, then there is a 150 299 Dm³ deficit. Several action plans were proposed to reach a balance in the aquifer, each representing a single alternative. The first alternative considers modernizing 21 463 ha of natural irrigation of the basin, which would allow a balance between recharge and water extraction by limiting withdrawals and reducing repetition of annual crops. The second alternative deals with the proportional reduction in area of each of the crops grown within the basin until finding that which uses 130 789 Dm³ for irrigation, along with the modernization of all the irrigation systems in the reduced irrigated area. The third alternative is a combination of the above, and considers more advanced technology for the entire irrigation area and closure of certain wells to reduce pumping and thus balance extractions against recharge.

Index words: water extraction, irrigated agriculture, technological irrigation development, groundwater balance.

¹ Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Tuxtla Gutiérrez Chiapas. Boulevard Andrés Serra Rojas # 1090, edificio anexo nivel 3B, Torre Chiapas, Col. Paso Limón. 29045 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

[‡] Autor responsable (lpulido@tlaloc.imta.mx)

² Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso. 62550 Jiutepec, Morelos, México.

INTRODUCCIÓN

Para fines de administración del agua subterránea, en la República Mexicana se tienen identificados 653 acuíferos de los cuales 104 están sobreexplotados, en su mayoría se localizan en el centro y norte del país (CONAGUA, 2009). A partir de la década de los setenta, ha venido aumentando sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados; en 1975 se tenían 32, en 1985 eran 80 y en 2006 se contaron 104 acuíferos.

En el estado de Guanajuato, ubicado en el centro del país, están delimitados 18 acuíferos de los cuales nueve están sobreexplotados. Forman parte de este grupo el 1104, acuífero de Laguna Seca (ALS) y el 1108, cuenca alta del Río Laja (CARL) (CONAGUA, 2010). Estos dos acuíferos y los que están identificados con los números 1106, Dr. Mora-San José Iturbide y 1107, San Miguel de Allende, subyacen en la cuenca de Laguna Seca (CLS) (Pulido *et al.*, 2004).

Los acuíferos de Laguna Seca desde hace décadas están sufriendo un deterioro significativo y, de seguir con el ritmo de extracción que actualmente presentan, tendrán como consecuencia agua con altas cantidades de sales y metales pesados como el arsénico, así como caudales y rendimientos reducidos, además del posible abandono de pozos.

En los acuíferos de Laguna Seca la profundidad del nivel estático para un período de 33 años (1970-2003) se ha incrementado en promedio de 40.63 a 109.19 m, esto es 68.56 m y que representa un abatimiento promedio anual de 2.08 m (Hidrotec, S. A., 1970; Estudios Geotécnicos, S. A., 1979; Cartón y Papel de México, 1980; Geomex, 1980; CNA, 1996; IMTA, 1996a; Cotas de Laguna Seca, 2003). La descarga de los acuíferos, en los últimos años, se debe, principalmente, a la extracción de agua para cultivos agrícolas. Según registros históricos, la extracción de agua subterránea en la cuenca se incrementó de 110 720 a 398 000 Dm³ de 1970 a 1996, que en promedio representa un incremento anual de 10 640 Dm³ (CNA, 1996).

En la Cuenca de Laguna Seca la superficie de riego es de aproximadamente 23 000 ha, se localiza en la parte baja y está dedicada a producir principalmente forrajes y hortalizas. Las explotaciones agrícolas presentan gran diversidad tecnológica que van desde el riego tradicional por gravedad, hasta tecnificadas con riego presurizado. Existe un predominio de los métodos de riego por gravedad sobre los presurizados (riego por compuertas,

aspersión y goteo); los primeros ocupan aproximadamente el 60% de la superficie y los presurizados el 40%. La eficiencia de conducción promedio del agua es del 70% y la eficiencia de aplicación del riego parcelario es del 50%, por lo que la eficiencia global del uso del agua es del 35%, y ello explica en parte los considerables volúmenes de agua que se extraen anualmente para riego agrícola, lo que conduce a la sobreexplotación de los acuíferos. Aunado a lo anterior, los equipos de bombeo se manejan con eficiencias electromecánicas bajas, alrededor de un 50% (CNA, 1996; IMTA, 1996a, b; Cotas de Laguna Seca, 2003).

Los objetivos de esta investigación fueron: 1) actualizar la información sobre la extracción y uso de agua subterránea con fines agrícolas en la cuenca de Laguna Seca. 2) Efectuar propuestas de tecnificación integral del área agrícola para propiciar el equilibrio de los acuíferos de la cuenca de Laguna Seca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la Zona de Estudio

La zona de estudio se localiza en la porción nororiental del estado de Guanajuato, México; se encuentra limitada hacia el norte y oriente por la subcuenca del río Santa María, el cual pertenece a la cuenca del río Pánuco; hacia el sur y el poniente, el límite hidrográfico lo constituye la subcuenca del río Laja, que forma parte de la cuenca del río Lerma-Santiago. La cuenca de estudio tiene una extensión de aproximadamente 2443 km², distribuidos en los municipios de San Luis de la Paz, San Diego de la Unión, Dolores Hidalgo, Doctor Mora, San José Iturbide, San Miguel de Allende, Victoria, y Tierra Blanca (Figura 1) (IMTA, 1996a; Cotas de Laguna Seca, 2003; Pulido *et al.*, 2004). La topografía de la cuenca es bastante abrupta, las elevaciones van de 1980 metros en los valles hasta los 2600 metros en las sierras. Las mayores elevaciones se presentan en la sierra del Zamorano y las más bajas al suroeste del municipio de San Luis de la Paz (Pulido *et al.*, 2004).

De acuerdo con los límites administrativos de acuíferos manejados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), dentro de la CLS subyacen: la superficie total del ALS que abarca el 66.8% de la superficie total de la cuenca, el acuífero CARL que contribuye con

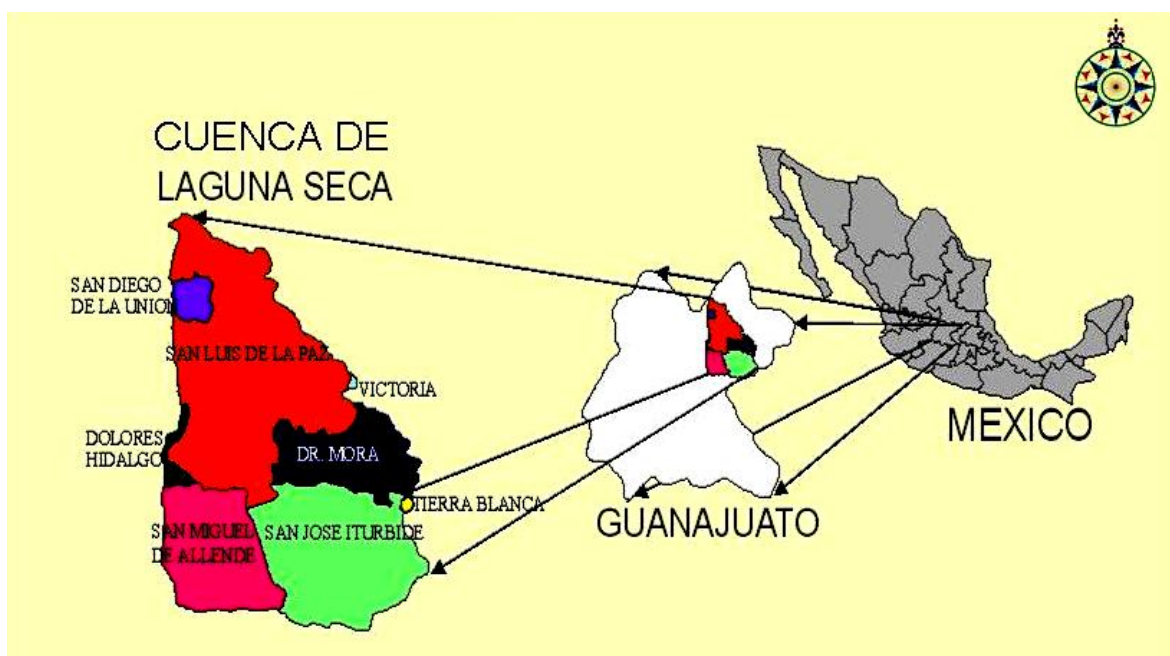


Figura 1. Localización de la cuenca de Laguna Seca y municipios que la integran.

el 8.3 %; mientras que los acuíferos Dr. Mora-San José Iturbide y San Miguel de Allende, ocupan el 22.2 y 2.8% del área total de la cuenca, respectivamente (Figura 2).

En la región noroeste del estado de Guanajuato, considerada como una de las más áridas de la entidad no existen ríos importantes, por lo que la mayor parte del agua es obtenida del subsuelo por medio de pozos profundos. Según la clasificación de Köppen modificada por García (1988) el clima de la cuenca es seco estepario con lluvias en verano (BSw), excepto en la porción norte, donde es seco estepario con escasas lluvias (BS'). En el área existen siete estaciones climatológicas ordinarias de las cuales se obtuvieron datos de precipitación, evaporación y temperatura. Con base en estos datos y utilizando el método de las isoyetas se determinó el valor promedio de cada uno de los parámetros. Así, se tiene que la precipitación media anual es de 457.40 mm, la temperatura media anual de 16.78 °C y la evaporación media anual 1715 mm, para un periodo de observación de 1962-1998 (IMTA, 2000).

En las llanuras, los suelos son derivados de aluviones depositados por la acción del viento y del agua; en las sierras, son más frecuentes los suelos Phaeozem lúvico y Phaeozem háplico, que se intercalan con leptosoles, que han sido fuertemente afectados por la erosión. Los grupos de suelos existentes en la cuenca de acuerdo con los Grupos de Suelos de Referencia de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Grupo

de Trabajo WRB, 2007) y las superficies que ocupan en la cuenca son: Phaeozem háplico (25.2%), Phaeozem lúvico (35.2%), Leptosol (6.91%), Kastanozems cálcico (0.55%), Kastanozems lúvico (6.60%), Luvisol crómico (1.11%), Vertisol pélico (24.3%) (IMTA, 1996a).

Inventario de Aprovechamientos y Eficiencia Electromecánica de los Equipos de Bombeo

Entre los meses de mayo a septiembre del 2004, se llevó a cabo un inventario de pozos y norias activos (aprovechamientos en operación) de uso agrícola, doméstico, urbano e industrial, principalmente a través de la aplicación de cuestionarios *in situ* a los dueños de los ranchos, de los cuales se obtuvieron datos diversos sobre el tipo de infraestructura de bombeo y riego, estado actual, operación y datos de carácter agroeconómico de las fincas asociadas a cada aprovechamiento.

El volumen de extracción anual de agua de la cuenca se determinó con base en el volumen extraído en los pozos inventariados, y la superficie de riego de todos los cultivos establecidos durante 2004, incluyendo los perennes (Pulido *et al.*, 2004). Para cada pozo se obtuvo la superficie por cultivo, el número de riegos por ciclo y por año, y los tiempos de riego; se midió el gasto o caudal en una muestra de 41 pozos distribuidos en la cuenca, en ranchos de productores que tenían sistemas de riego por gravedad, aspersión y goteo en cintilla.

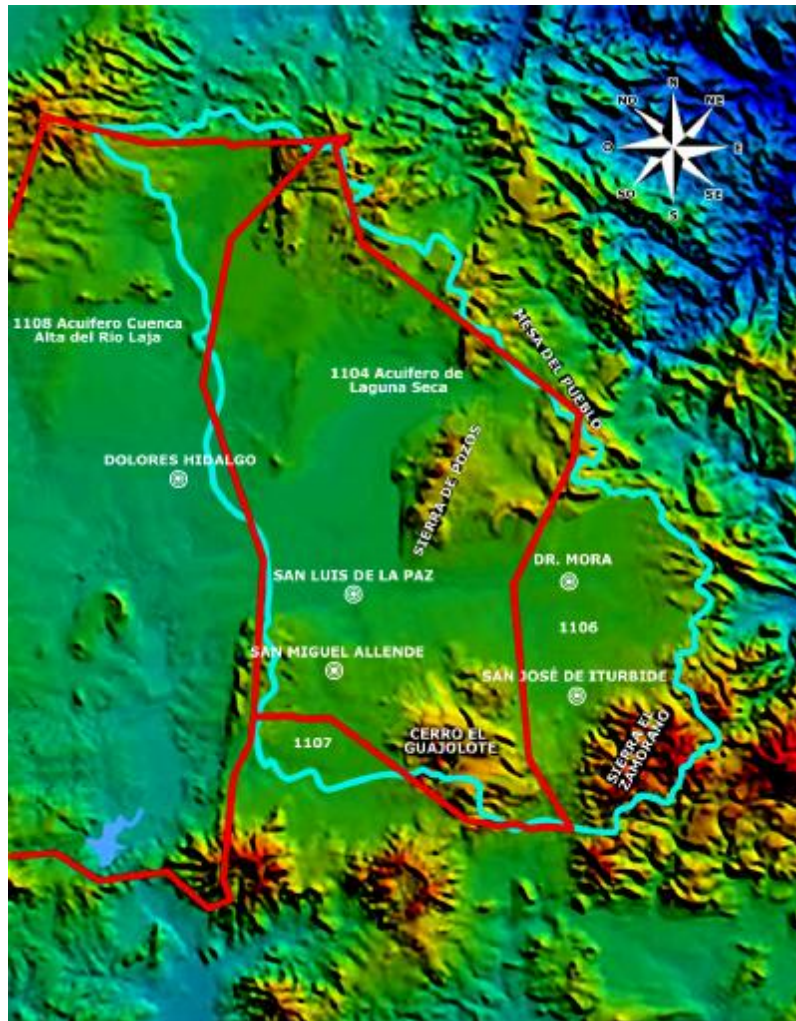


Figura 2. Acuíferos de la cuenca de Laguna Seca.

La cantidad de pozos evaluados se determinó con base en la variabilidad de los caudales registrados, de la precisión y nivel de confianza deseados, según el criterio señalado por Hanson y Grattan (1990).

$$N = \left[\frac{(z)(CV)}{k} \right]^2 \quad (1)$$

donde: $z = 1.96, 1.64$ y 1.28 para niveles de confianza de 95, 90 y 80% respectivamente; $CV =$ coeficiente de variación; $k =$ de 0.1 hasta 0.2, es el error de la media de las muestras.

Para obtener el tamaño de la muestra se llevó a cabo un ejercicio de muestreo en una muestra de 20 pozos, mismos que se aforaron, se calculó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación; donde $z = 1.28$ y $k = 0.1$. Hanson y Grattan (1990)

refieren que un error entre 0.1 y 0.2 de la media de las muestras y un nivel de confianza de 80% son suficientes. El ejercicio dio por resultado un coeficiente de variación de 40%, y un tamaño de muestra de 26 pozos. Hanson y Grattan (1990) consideran que en un muestreo así realizado, el coeficiente de variación puede estar entre 35-45%, por lo que se consideró adecuado el coeficiente de variación obtenido. Posteriormente se consideró un nivel de confianza de 95% y un error de la media de las muestras de 0.13, lo cual dio como resultado una muestra de 41 pozos; en este caso el coeficiente de variación calculado fue de 42%.

Donde no había medidor o no funcionaba, el caudal de descarga se evaluó por medio de algunos métodos ordinarios de aforo en tuberías (medidores ultrasónicos y relación volumen-tiempo); en ciertos casos se obtuvo el gasto midiendo la descarga de la tubería por el método de área-velocidad. Con el dato de gasto por pozo se

estimó la lámina de riego para cada cultivo y el volumen anual de extracción de la cuenca.

Para el cálculo de las eficiencias electromecánicas se siguió el procedimiento señalado en IMTA (2002). Las evaluaciones electromecánicas desarrolladas en la CLS en los municipios de San Luis de la Paz, San José Iturbide y San Miguel de Allende en una muestra de 43 pozos, arrojaron eficiencias medias electromecánicas entre 42 y 55% (IMTA, 1996b). En 2004 se determinaron eficiencias electromecánicas en una muestra de 41 pozos destinados al uso agrícola. Para tal fin, se midieron el nivel dinámico, y el gasto de los pozos, así como las variables eléctricas voltaje, amperaje y factor de potencia, en los arrancadores de los equipos de bombeo (Pulido *et al.*, 2004).

Se hicieron evaluaciones para medir las eficiencias de aplicación del riego a nivel parcelario. La metodología utilizada fue la de uso estandarizado (CONAGUA, 2002). La determinación de la eficiencia de aplicación varió según el método de riego, pero fundamentalmente se evaluaron los requerimientos teóricos de riego, para luego evaluar la eficiencia de aplicación en función del volumen de agua aplicado en campo. Se llevaron a cabo evaluaciones en 33 ranchos donde se cultivó alfalfa, brócoli, maíz forrajero y espárrago, mismos ranchos donde se efectuaron las evaluaciones electromecánicas. Para calcular el número de muestras se utilizó la Ecuación 1.

Estimación de la Recarga Potencial de los Acuíferos

Se estimó un balance de agua subterránea por medio de un modelo de flujo para determinar la disponibilidad o en su defecto déficit hídrico en el acuífero. En el desarrollo del balance se realizaron las siguientes acciones: compilación, medición e interpretación de datos de campo, entendimiento del sistema natural, conceptualización del sistema de agua subterránea, selección del modelo numérico y programa de cómputo utilizado y calibración del modelo; una vez calibrado el modelo, se obtuvo el déficit del acuífero por medio del balance de agua subterránea.

Características hidráulicas de los acuíferos. La conductividad hidráulica saturada (K_s) de los acuíferos se obtuvo a partir de 10 pruebas de bombeo de corta duración interpretadas por el método de Hantush (CNA, 1996). Así, la K_s varía en el intervalo de 0.127 a 2.047 m día⁻¹, con un valor medio de 0.678 m día⁻¹,

una variancia de 0.343 y una desviación estándar de 0.586 m día⁻¹. El valor medio, variancia y desviación estándar fueron calculados por Pulido *et al.*, (2004) a partir de los datos de CNA (1996). Por otro lado se considera que en un acuífero libre el coeficiente de almacenamiento es equivalente al rendimiento específico (S_y) o porosidad efectiva (h_e). Este varía de 1 a 30% (Spitz y Moreno, 1996). Los valores del rendimiento específico (acuífero libre) se tomaron del estudio realizado por Geomex (1980).

Del inventario de pozos activos realizado en el 2004 se estimó una extracción de 297,507 Dm³. El caudal de extracción para cada pozo se obtuvo a partir del inventario de aprovechamientos realizado en 2004 (Pulido *et al.*, 2004).

Modelo de flujo. El área simulada está definida por la poligonal que ocupa la CLS, La topografía de la cima y el basamento se supone conocido.

Para el estudio de la dinámica de las aguas subterráneas en la CLS se utilizó el programa estadístico comercial Visual MODFLOW Pro v.3.1 (Nilson y Grantz, 1996), el cual resuelve numéricamente, para diferentes condiciones iniciales y de frontera, la ecuación diferencial, que resulta de la ecuación de continuidad y la ley de Darcy (Custodio y Llamas, 1976; Martínez, 1987).

El dominio de solución se discretizó espacialmente con una malla en diferencias finitas, que cuenta con 120 filas y 120 columnas para un total de 14 400 celdas, de las cuales 7394 son activas y cada celda cubre una área de 33 ha. En el modelo sólo se consideró una capa debido a que los parámetros que se tienen (conductividad hidráulica y rendimiento específico) están promediados en la vertical. La profundidad del basamento se obtuvo a partir de los cortes geológicos reportados en CNA (1996) y Cartón y Papel de México (1980), va de los 100 a los 400 m. La parte superior de la capa de modelación se asignó de acuerdo con la topografía de la cuenca. En la parte temporal, debido a que no se tiene información suficiente, se simuló únicamente un periodo que va de diciembre de 1999 a diciembre de 2002.

Los modelos numéricos resuelven la ecuación general de flujo de aguas subterráneas utilizando condiciones de frontera y condiciones iniciales específicas. La simulación se realizó en estado transitorio, por lo que para la condición inicial, se consideró la elevación de los niveles estáticos del año de 1999.

Para las condiciones de frontera se utilizaron fronteras de carga asignada y de flujo asignado. En las zonas de recarga y descarga del modelo se asignaron fronteras

de carga asignada. El valor de la carga asignada depende del nivel estático que se tiene en la zona de la frontera en el periodo de modelación. En el resto de la frontera no se tiene flujo. El volumen de extracción fue asignado al modelo considerando el volumen de extracción que se obtuvo en el presente trabajo.

La conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento fueron asignados al modelo con base en el análisis de datos tomados de estudios anteriores, descrito en la sección “características hidráulicas del acuífero” de este trabajo. La conductividad hidráulica se consideró igual en ambas direcciones (x, y). Partiendo de que se conocen las propiedades hidráulicas de los acuíferos en la cuenca (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) y suponiendo que no se tiene incertidumbre en la estimación de estos parámetros, la recarga vertical fue el parámetro con el que se calibró el presente modelo.

Calibración del modelo. Se logró ajustando: distribución de los parámetros, condiciones de frontera y periodos que producen flujo, así como cargas simuladas comparadas con valores de campo obtenidos dentro de un rango de error prestablecido. En el presente trabajo se consideró la raíz del error cuadrático medio como medida del error en el proceso de calibración (Domenico y Schwartz, 1997). El proceso de calibración del modelo, consistió en determinar las cargas observadas en diciembre de 2002. El proceso de calibración terminó cuando la recarga vertical asignada al modelo dio un error en la elevación del nivel estático de 5.85 m.

Necesidades Hídricas de las Plantas Cultivadas

Evapotranspiración potencial de los cultivos (ET_p).

Se determinó utilizando los coeficientes de cultivo (K_c) que relacionan la ET del cultivo (ET_c) con la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o):

$$ET_p = ET_o K_c \quad (2)$$

donde la ET_p está en mm día^{-1} . La ET_o se calculó mensualmente para el período 2000-2005, con datos de siete estaciones climatológicas de los municipios: San Luis de la Paz, San José Iturbide, Dr. Mora, Dolores Hidalgo y San Diego de la Unión. Los valores del K_c utilizados fueron proporcionados por el Campo Experimental de Celaya del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y algunos valores fueron tomados de la FAO

(Allen *et al.*, 2006) y ajustados para las condiciones locales.

Días grado de crecimiento. Cuando sólo se dispone de estaciones climatológicas ordinarias, los Días Grado de Crecimiento (DGC) se pueden estimar con la Ecuación 3.

$$DGC = \begin{cases} T_a - T_{cmin} & T_a < T_{cmax} \\ T_{cmax} - T_{cmin} & T_a \geq T_{cmax} \\ 0 & T_a \leq T_{cmin} \end{cases} \quad (3)$$

donde: T_a = temperatura promedio del aire, T_{cmin} = umbral mínimo de temperatura para el crecimiento del cultivo, T_{cmax} = umbral máximo por encima del cual se detienen el crecimiento del cultivo.

Requerimiento de riego de los cultivos (RR). Los requerimientos de riego o necesidades hídricas de los cultivos se calcularon a partir de los datos climatológicos recabados en las siete estaciones ordinarias y tres estaciones automatizadas existentes en la cuenca; para el cálculo del RR se utilizó el programa CropWat ver. 4.3 desarrollado por la FAO (Clarke, 1998).

Teniendo en cuenta el concepto de los DGC y el cultivo de alfalfa como referencia, cultivo con mayor superficie en la cuenca y el que consume más agua, se zonificó la CLS. Las zonas definidas fueron: 1) San José Iturbide, 2) Dr. Mora-San Antón, 3) Los Rodríguez-San Diego de la Unión y 4) San Luis de la Paz. El requerimiento de riego se manejó por municipio. Con el mosaico de cultivos y los valores de requerimiento de riego se obtuvieron los valores de los volúmenes de agua requeridos para satisfacer las demandas evapotranspirativas de los cultivos para los diferentes municipios de la CLS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aprovechamientos Subterráneos y Volumen de Extracción para Uso Agrícola

Del total de 1126 pozos registrados, resultaron 818 (72.6%) activos y 84 (7.5%) inactivos, quedando 224 (19.9%) pozos activos no inventariados porque no fue posible acceder a las propiedades. De los 818 pozos activos inventariados, 687 (84.0%) son de uso agrícola, 8 (1.0%) de uso ganadero, 115 (14.0%) de uso urbano y 8 (1.0%) de uso industrial.

El volumen de agua determinado para la superficie total regada (31 470 ha) fue de 281 088 Dm³. Entre los cultivos regados, la alfalfa es el cultivo de mayor consumo de agua (44.5%), seguido de brócoli (10.2%), espárrago (9.83%), maíz (9.6%) y chile (7.8%). Del volumen total 80.9% se utiliza en riego por gravedad y 19.1% en riego presurizado. Los volúmenes de agua calculados para los usos urbano e industrial, fueron de 16 064 y 355 Dm³, respectivamente. El volumen de extracción anual en la cuenca resultó de 297 507 Dm³, inferior al reportado por CNA (1996) de 398 000 Dm³, quien hizo la estimación con datos de caudales y tiempos de bombeo reportados por los dueños de los ranchos; CNA (1996) refiere que en los años 1987 y 1992 se extrajeron 236 400 y 280 040 Dm³, respectivamente.

En las evaluaciones electromecánicas desarrolladas se encontró que las eficiencias electromecánicas calculadas resultaron con valores inferiores al 40% en el 56% de los equipos de bombeo muestreados, por lo que estos equipos deben ser rehabilitados ó sustituidos, según la Norma Oficial Mexicana (NOM-006-ENER-1995).

Superficie de Riego

Los 687 pozos activos, inventariados de uso agrícola, son utilizados para regar una superficie física de 15 971.5 ha, de las cuales los cultivos perennes de alfalfa y espárrago principalmente, ocupan 8525 ha y los anuales brócoli, maíz forrajero y para grano, lechuga, col, frijol y tomate principalmente, una superficie de 7446.5 ha; al considerarse para el brócoli, maíz forrajero y lechuga un índice de repetición de dos, se estima una superficie regada total de 23 418 ha. Los principales cultivos en la cuenca por superficie cultivada son: alfalfa (28.8%), brócoli (14.4%), maíz (15.9%), frijol (7.18%) y chile (8.3%). Se estimó que los 224 pozos no inventariados regaban una superficie de 8052 ha, considerando parcelas con dos cultivos al año; la superficie física estimada fue de 5491.5 ha, y conservando la proporción de cultivos perennes y anuales de los pozos inventariados, se infirió que los cultivos perennes ocupaban una superficie de 2931 ha y los anuales 2560.5 ha. De las estimaciones anteriores se determinó que la superficie total regada durante el año 2004 fue de 31 470 ha a partir de una superficie física de 21 463 ha. De la superficie total inventariada, el 71% se riega por gravedad y el 29% con sistemas presurizados. Comparativamente,

CNA (1996) señala que la superficie física de riego en la cuenca de Laguna Seca es de 21 000 ha.

En las evaluaciones para medir las eficiencias de aplicación del riego a nivel parcelario se encontraron eficiencias promedio de 54% en riego por gravedad, 60% en gravedad por multicompuertas, 66% en aspersión y 79% en goteo.

Resultados del Modelo de Simulación

Una vez que se calibró el modelo, se procedió a revisar el balance de aguas subterráneas. La recarga vertical obtenida con Visual MODFLOW para el periodo que va de diciembre de 1999 a diciembre de 2002 fue de 147 208 Dm³. Es importante mencionar que, debido a que no se cuenta con información de los caudales bombeados por pozo, no se pudo estimar la recarga para otros periodos. Considerando que de los acuíferos se extrae 297 507 Dm³ año⁻¹ y la recarga estimada es de 147 208 Dm³ año⁻¹, el déficit de agua subterránea en la cuenca es de 150 299 Dm³ año⁻¹. La recarga para el ALS según la CONAGUA (2000) es de 128 500 Dm³ año⁻¹, sin considerar las aportaciones de los otros tres acuíferos que subyacen esta cuenca. CNA (1996) reportó una recarga de 179 000 Dm³ año⁻¹ y un déficit de agua subterránea en la cuenca de 219 000 Dm³ año⁻¹.

Alternativas para el Manejo Sustentable de los Acuíferos

Se proponen tres alternativas para reducir el volumen de extracción de agua y así equilibrar las extracciones con la recarga. Actualmente se tiene un volumen destinado a los usos urbano e industrial de 16 419 Dm³ que debe conservarse, por lo cual, de los 147 208 Dm³ de recarga estimados (Pulido *et al.*, 2004) quedaría un volumen disponible para el uso agrícola de 130 789 Dm³.

Primera alternativa. Considera la tecnificación de 21 463 ha de riego de la cuenca. La superficie regada por gravedad cubre el 70.7% (15 175 ha) mientras que la superficie con riego presurizado el 29.3% (6288 ha). En consecuencia, el volumen aplicado en la superficie regada por gravedad es de 159 268 (80.9%) Dm³, mientras que en la superficie regada con sistemas presurizados es de 37 597 (19.1%) Dm³. El volumen de agua total aplicado en las condiciones de gravedad y presurizado en la superficie de 21 463 ha es de 196 865 Dm³ (Cuadro 1 y 2).

Cuadro 1. Volumen (Dm³) utilizado por los cultivos en riego por gravedad en los municipios.

Cultivo	San Luis de la Paz	San José Iturbide	San Miguel de Allende	Dolores Hidalgo	San Diego de la Unión	Dr. Mora	Total
	Volumen de agua utilizado						
----- Dm ³ -----							
Alfalfa	23 370.7	18 194.0	22 085.0	8857.9	3313.3	2972.6	78 793.5
Brócoli	4022.1	2723.2	1161.5	-	1048.5	6535.3	15 490.6
Maíz	2509.3	7493.0	4153.9	503.2	92.9	1474.0	16 226.4
Frijol	5902.5	252.4	442.5	1213.6	607.3	612.4	9030.6
Chile	5250.6	333.8	64.6	1896.5	4632.6	365.7	12 543.8
Espárrago	6791.5	3579.8	810.7	-	-	368.5	11 550.5
Zanahoria	1230.6	-	849.5	115.5	2270.5	-	4466.2
Lechuga	438.2	237.6	-	-	365.7	-	1041.4
Avena	223.8	1991.6	761.8	158.3	-	29.2	3164.7
Cebolla	23.8	1.4	0.0	137.5	1100.5	-	1263.1
Tomate	339.3	11.0	16.5	45.6	25.3	-	437.7
Ajo	368.4	373.5	-	49.0	-	-	790.9
Col	159.5	9.7	-	-	-	25.3	194.5
Otros	147.9	-	2432.4	117.7	1547.7	28.6	4274.2
Total	50 778.2	35 201.0	32 778.4	13 094.7	15 004.3	12 411.5	159 268.2

Se calcularon los volúmenes de agua requeridos con riego con gravedad, así como el posible incremento esperado de las eficiencias si se accediera a sistemas de riego de multicompuertas (75% de eficiencia), aspersión (80% de eficiencia) y goteo (90% de eficiencia) (CONAGUA, 2002). Se estimó que

la tecnificación de las 15 175 ha, que actualmente se riegan por gravedad, requeriría un volumen medio de 98 560 Dm³, considerando los tres métodos de riego se obtendría un ahorro medio de 60 708 Dm³ de agua al año; el mayor ahorro se lograría en superficies cultivadas con alfalfa, brócoli, chile, maíz y espárrago. El volumen

Cuadro 2. Volumen (Dm³) utilizado por los cultivos en riego presurizado en los municipios.

Cultivo	San Luis de la Paz	San José Iturbide	San Miguel de Allende	Dolores Hidalgo	San Diego de la Unión	Dr. Mora	Total
	Volumen de agua utilizado						
----- Dm ³ -----							
Alfalfa	1804.7	2999.9	615.4	2218.4	608.9	561.7	8809.0
Brócoli	852.7	517.7	2568.4	10.5	167.6	460.5	4577.4
Maíz	91.4	1429.0	370.9	185.9	-	651.7	2729.0
Frijol	550.1	-	-	137.5	15.8	-	703.3
Chile	1599.8	348.6	88.8	446.5	283.5	-	2767.1
Espárrago	1217.1	538.5	2640.3	-	3303.7	111.4	7811.1
Zanahoria	809.3	-	389.0	76.9	64.8	230.8	1570.9
Lechuga	2.4	-	2295.5	-	-	783.7	3081.6
Avena	4.8	167.1	-	-	-	21.4	193.2
Cebolla	394.1	23.0	-	-	167.1	-	584.1
Tomate	1256.8	-	-	-	-	-	1256.8
Ajo	98.2	-	-	28.5	-	432.3	558.9
Col	-	-	-	-	-	-	-
Otros	966.4	1497.2	490.8	-	-	-	2954.4
Total	9647.8	7520.9	9459.2	3104.1	4611.4	3253.5	37 596.9

calculado de 98 560 Dm³ más el volumen de 37 597 Dm³ que se consumen en las 6288 ha ya tecnificadas, resulta en un volumen total de 136 157 Dm³. La superficie regada durante 2004 se estimó en 31 470 ha, incluyendo la repetición de cultivos, el volumen para riego utilizado en ese año fue de 281 088 Dm³ (Cuadro 3). Por lo tanto, el volumen que demandaría la superficie física de 21 463 ha en la condición tecnificada, considerando la repetición de cultivos (31 470 ha), sería de 199 640 Dm³ (Cuadro 3).

El volumen disponible para uso agrícola es de 130 789 Dm³ año⁻¹ y el volumen demandado por la primera alternativa de ahorro de agua planteada en este trabajo es de 199 640 Dm³, entonces su aplicación produciría un déficit de 68 851 Dm³. De esta manera, con la introducción de riego presurizado en toda la superficie de riego de la cuenca (21 463 ha), no sería posible alcanzar un equilibrio entre la recarga estimada y el volumen de agua requerido. La puesta en práctica de esta alternativa requeriría de una inversión de 442.60 millones de pesos con precios de los sistemas de riego del año 2011 (Cuadro 4). Esta alternativa podría ser viable si se limitara la repetición de cultivos, lo cual demanda una superficie de 10 007 hectáreas-riego, ya que sin la repetición de cultivos el volumen demandado por las 21 463 ha tecnificadas en su totalidad sería de 136 157 Dm³ año⁻¹, que superan en 5368 Dm³ a los 130 789 Dm³ año⁻¹ disponibles para aprovechamiento agrícola. El déficit se podría resolver a través del incremento de las eficiencias de riego parcelarias en la superficie actualmente tecnificada de 6288 ha, ya que éstas son factibles de incrementarse de acuerdo con las evaluaciones de campo realizadas.

Segunda alternativa. Contempla reducir proporcionalmente la superficie de todos los cultivos que actualmente se siembran hasta alcanzar el volumen actual para uso agropecuario (130 789 Dm³). El patrón de cultivos y la repetición de siembras se mantendrían.

De acuerdo con la proporción de superficies con riego por gravedad y presurizado, considerando que 6 288 ha ya están tecnificadas, se estimó que 9 525 ha requerirían tecnificarse, resultando así una superficie total de riego de 15 813 ha (Cuadro 4), es decir, 5650 ha físicas menos que en la primera alternativa. El costo para la puesta en operación de la segunda alternativa sería de 277.81 millones de pesos con precios de los sistemas de riego del año 2011, menor que los 442.60 millones de pesos que requiere la primera alternativa (Cuadro 4).

Con la tecnificación se incrementarían los rendimientos por hectárea de los cultivos y se mejoraría la relación beneficio-costos (RBC) de la superficie de riego. En la situación actual la RBC es de 1.86 mientras que con la primera alternativa sería de 2.45, y con la segunda alternativa la RBC equivaldría a 2.44. Esta alternativa que involucra la reducción proporcional de superficie de riego por cada pozo, afectaría a todos los usuarios.

Tercera alternativa. Esta es una combinación de las dos anteriores, ya que considera la tecnificación de toda la superficie de riego y la disminución del área de riego mediante el cierre de pozos. Los 901 pozos que abastecen la superficie actual de riego, proporcionan agua en promedio a 23.6 ha cada uno, por lo cual 239 pozos agrícolas riegan 5650 ha. Éste es el número de pozos que deberían cerrarse quedando en operación 662 pozos en la cuenca. Se cerrarían aquellos pozos que: extraen el agua a una profundidad mayor de 150 m (26% de los pozos), cuyos equipos de bombeo presenten bajas eficiencias electromecánicas (44% de los pozos), aquellos que no están regularizados o que extraen agua de baja calidad, por salinidad y metales (30% de los pozos). Sin embargo, la tercera alternativa resultaría más costosa para su implementación que la segunda, debido a que el cierre de los pozos representa un pago a los dueños por indemnización; además habría que considerar el costo de la tecnificación. Se estimó que el costo que implica el cierre de los pozos sería de 135.43 millones de pesos;

Cuadro 3. Estimación de Ahorro de agua mediante la tecnificación de los sistemas de riego en los municipios de la cuenca de Laguna Seca.

Sistema de riego	San Luis de la Paz	San José Iturbide	San Miguel de Allende	Dolores Hidalgo	San Diego de la Unión	Dr. Mora	Total
	Volumen de agua utilizado						
	Dm ³						
Actual	86 277.4	60 999.2	60 307.7	23 129.1	28 007.7	22 366.7	281 087.8
Tecnificado	68 547.0	42 459.1	44 931.3	17 041.6	15 499.4	11 161.9	199 640.1
Ahorro	17 730.4	18 540.1	15 376.4	6087.5	12 508.4	11 204.9	81 447.7

Cuadro 4. Superficie de riego, volumen requerido y costos de la primera y segunda alternativa.

Municipio	Tecnificación de la superficie de riego					
	Primera alternativa			Segunda alternativa		
	Superficie	Volumen	Costo	Superficie	Volumen	Costo
	ha	Dm ³	millones de pesos	ha	Dm ³	millones de pesos
San Luis de la Paz	6715.1	68 547.0	147.4	4947.3	44 906.8	95.8
San José Iturbide	4632.0	42 459.1	110.8	3412.6	27 816.0	75.2
San Miguel de Allende	5225.5	44 931.3	80.4	3849.9	29 435.6	40.3
Dolores Hidalgo	1497.2	17 041.6	32.6	1103.0	11 164.4	21.1
San Diego de la Unión	1957.5	15 499.4	41.7	1442.2	10 154.0	26.7
Doctor Mora	1435.9	11 161.9	29.8	1057.9	7312.4	18.8
Total	21 463.2	199 640.1	442.6	15 813.0	130 789.2	277.8

esta cifra resultó de asignar un volumen de extracción medio por pozo de 227 Dm³, con un precio de dos pesos con cincuenta centavos por metro cúbico de agua de acuerdo con el Programa de Adecuación de Derechos de Agua (PADUA) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). El costo total de implementar esta alternativa equivaldría a 413.24 millones de pesos.

Las tres alternativas consideran el mismo patrón de cultivos. La primera de ellas podría tener menores repercusiones en el aspecto social ya que no contempla la disminución de superficie física de riego. La segunda y tercera alternativas consideran la repetición de cultivos, importante en el caso específico del brócoli por su alto valor en el mercado.

Cualquier medida que se aplique para equilibrar los acuíferos debe considerar un plan de acciones que incluya las estrategias de medición volumétrica del agua mediante la instalación de medidores de flujo en los equipos de bombeo, reglamentación de la operación de los acuíferos para ajustar los volúmenes concesionados según la recarga potencial, ordenamiento de los aprovechamientos con base en los títulos de concesión evitando la perforación ilegal de pozos, y la tecnificación que está considerada en el presente trabajo (Pulido, 2006). Para ello la participación del Consejo Técnico de Aguas Subterráneas de Laguna Seca (Cotas de Laguna Seca, 2003) es fundamental.

CONCLUSIONES

En la Cuenca de Laguna Seca, la agricultura y ganadería consumen el 94% de los 297 507 Dm³

extraídos de los acuíferos anualmente, a través de 919 pozos agrícolas. Si se considera que la extracción sostenible en los acuíferos de esta cuenca es aproximadamente de 147 208 Dm³ anuales, y que cada año se extraen aproximadamente 297 507 Dm³, el déficit de agua subterránea anual es de alrededor de 150 299 Dm³. Para equilibrar este déficit, se propone la tecnificación de toda la superficie de riego con la exclusión de la práctica de repetir cultivos, que se podría implementar en un periodo de cinco años, lo que se reflejaría en un ahorro de agua suficiente para equilibrar las extracciones con la recarga. Otra opción sería la reducción proporcional de una superficie agrícola de 5650 ha que no están tecnificadas, para disminuir la demanda de agua de riego hasta alcanzar el volumen de equilibrio estimado para el uso agrícola de 130 789 Dm³. La disminución proporcional de la superficie de riego sin tecnificar demandaría la reducción del 26.3% de la superficie de riego de todas las explotaciones agrícolas. Con esta disminución la superficie de riego que resulta es de 15 813 ha en la cual se podrían aplicar los 130 789 Dm³ disponibles para riego agrícola, y si se considera que actualmente están tecnificadas 6288 ha, entonces la superficie que se tendría que tecnificar es la diferencia entre 15 813 y 6288 ha, la cual asciende a 9525 hectáreas.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Roma, Italia.

- Cartón y Papel de México. 1980. Estudio Geohidrológico en el Valle de San José Iturbide, Guanajuato. Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados. México, D. F.
- Clarke, D. 1998. Cropwat for Windows: user guide. Version 4.3. FAO, NWRC, IIDS. University of Southampton. Southampton, UK.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 1996. Actualización del estudio geohidrológico de la cuenca de Laguna Seca, Guanajuato. Realizado por la empresa Proyectos Antares S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua (contrato GAS-011-96). México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2000. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Laguna Seca, estado de Guanajuato. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrológica. México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2002. Manual para la elaboración y revisión de proyectos ejecutivos de sistemas de riego parcelario. Gerencia de Distritos y Unidades de Riego. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2009. Atlas del agua en México 2009. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. Disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos del estado de Guanajuato, publicados en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 2009.
- Cotas de Laguna Seca. 2003. Actualización del inventario de aprovechamientos del acuífero de Laguna Seca, Guanajuato, México. Convenio de Colaboración CEAG/Cotas Laguna Seca/2002-061. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. Secretaría de Desarrollo Social y Humano de Guanajuato. Guanajuato, México.
- Custodio, E. y M. R. Llamas. 1976. Hidrología Subterránea, Tomos 1 y 2. Ed. Omega. Barcelona, España.
- Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995. 1995. Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. -Límites y método de prueba. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Domenico P. A. y F. W. Schwartz. 1997. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.
- Estudios Geotécnicos, S. A. 1979. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos de la zona de San Luis de la Paz, Guanajuato. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas. Contrato GZA-79-6-ED.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F.
- Geomex (Generadores Eólicos de México). 1980. Actualización del estudio geohidrológico de la cuenca del Río La Laja Guanajuato. México, D. F.
- Hanson, B. R and S. R. Grattan. 1990. Field sampling of soil, water, and plants. pp 186-200. *In*: Kenneth K. Tanji (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. New York, NY, USA.
- Hidrotec, S. A. 1970. Informe preliminar del estudio geohidrológico de la zona de San Luis de la Paz y Dr. Mora Guanajuato, México. México, D. F.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1996a. Propuesta para la rehabilitación de la cuenca de Laguna Seca, Guanajuato. Proyecto contratado entre el Gobierno del Estado de Guanajuato e IMTA. Gobierno del Estado de Guanajuato; Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural. Jiutepec, Morelos, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1996b. Proyectos ejecutivos para la rehabilitación y tecnificación del riego. Laguna Seca, Gto. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, Subcoordinación de Ingeniería de Riego. Informe final de proyecto. Jiutepec, Morelos, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Eric II: Extractor rápido de información climatológica, 1929-1998. Comisión Nacional del Agua; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2002. Informe Final del Proyecto RD-0205: Tecnificación Integral del DR 037 "Altar-Pitiquito-Caborca", Sonora, para la estabilización del acuífero. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. Jiutepec, Morelos, México.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB (International Union of Soil Sciences). 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Roma.
- Martínez, L. P. 1987. Modelos matemáticos en el estudio del agua subterránea. Geohidrología. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.
- Nilson, G. and F. Grantz. 1996. Visual MODFLOW, User's manual. Waterloo hydrogeologic software. Waterloo, Ontario, Canada.
- Pulido, L., P. Lázaro, J. González, C. Fuentes, J. Castro y L. Esqueda. 2004. Propuestas de operación para el manejo sustentable del acuífero de Laguna Seca, Guanajuato, en el uso agrícola de riego. Informe final del Proyecto IMTA-SAGARPA. Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido, M. L. 2006. Participación institucional para la puesta en operación de un plan de acciones para el manejo sustentable del acuífero Casas Grandes, Chihuahua. IMTA, SAGARPA; informe interno. Jiutepec, Morelos, México.
- Spitz, K. and J. Moreno. 1996. A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.