

DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE VEDA EN ACUÍFEROS UTILIZANDO UN SIG

• José Teodoro Silva • Salvador Ochoa • Francisco Estrada •
• Fabián Villalpando •

*Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo
Integral Regional, México*

• Gustavo Cruz •
Colegio de Postgraduados, México

Resumen

Se describe un método con criterios de sustentabilidad encaminado a la determinación de índices de veda (esquema de restricción a la apertura de nuevos aprovechamientos) como estrategia de manejo y operatividad de un acuífero. La información fue organizada en un sistema de información geográfica (SIG). El proceso de la información implicó álgebra de mapas. Los aspectos considerados fueron los siguientes: densidad de pozos, volumen de extracción, calidad química del agua, calidad química del suelo, abatimiento piezométrico y subsidencia. La celda de estudio fue de 2 x 2 km. Los valores obtenidos oscilaron entre 6 y 20 puntos. Acorde con lo estipulado en la Ley de Aguas Nacionales, se proponen tres niveles de veda: rígida, flexible y controlada. El mapa obtenido de índice de veda para la Ciénaga de Chapala muestra que aproximadamente 30% del área se ubica en niveles de veda flexible, indicativo de que no hay condiciones justificables para imponer restricciones totales a la autorización de nuevos aprovechamientos.

Palabras clave: veda, sistema de información geográfica, Ciénaga de Chapala.

Introducción

La amplia difusión de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su utilización generalizada en actividades de amplia valoración contextual ha posibilitado la aparición de un sector profesional de usuarios que—independientemente de sus disciplinas—pueden “hacer cartografía” a través del uso de los SIG. Dicha actividad se ha difundido por inclusión de sus conceptos y métodos en el contexto computacional, para llegar a otras ciencias y prácticas sociales mediante procedimientos de aplicación estándar (Buzai, 2004).

Con la aparición de la geomática se busca desarrollar nuevas y mejores formas de interacción entre el hombre y la información espacial, a fin de facilitar y mejorar la comprensión de su medio (Bosque y Zamora,

2002). Como una herramienta para atender a este tipo de demandas están los SIG.

Por otra parte, la gestión integral del recurso hídrico promueve el manejo y desarrollo coordinado de los aprovechamientos del agua, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas involucrados.

Martínez (2001) reflexiona en torno a que todo ser humano debe tener acceso seguro al agua para satisfacer sus necesidades de consumo, saneamiento, producción de alimentos y energía, a un costo razonable. El abastecimiento de agua para la satisfacción de estas necesidades básicas debe realizarse en armonía con la naturaleza.

Analizar el estado que guarda el recurso hídrico en la Ciénaga de Chapala, Michoacán, México, en función de la demanda de un

servicio, es un factor importante para inferir futuras tendencias de oferta-demanda. En este caso, el desarrollo sustentable significa la conservación del agua eliminando su uso irracional, mejorando sus rendimientos y su calidad.

La cuenca Lerma-Chapala es considerada como zona de veda, definida por la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2004), como área restringida totalmente a la perforación de nuevos pozos profundos. Esta política incluye la región de estudio, a pesar de que en un reporte de 1993 de la misma dependencia considera al acuífero de la ciénaga en equilibrio.

Mediante la aplicación de un SIG fue posible elaborar una propuesta metodológica para la definición del índice de veda (Iv) del acuífero, que pretende incidir en el manejo científico del recurso hídrico, fomentando políticas y reglas sustentables de operatividad, basadas principalmente en el conocimiento que se tiene del estado que guarda el acuífero.

En el área de estudio hay cuatro unidades hidrogeológicas en explotación: depósitos lacustres del Plioceno, basaltos y andesitas del Mioceno-Plioceno, rocas volcánicas indiferenciadas, y basaltos pliocénicos y cuaternarios. El mecanismo preferencial de recarga es la comunicación hidráulica con el lago de Chapala y los ríos Duero y Lerma. Silva et al. (2002) demostraron la existencia de flujos del lago al acuífero.

El sistema acuífero local es confinado en la parte central y libre en las márgenes de la ciénaga. Se han encontrado capas de arcilla en los registros geofísicos de los pozos; estas unidades también fueron reportadas en sondeos geoelectrónicos (Silva 2002). Las arcillas son de origen lacustre. La hidroestratigrafía es definida por alternancias continuas de capas de grano fino a muy fino.

Metodología

La propuesta de un Iv sigue los criterios de técnicas paramétricas usadas en hidrogeología,

como los métodos DRASTIC (Aller et al., 1985) y SINTACS (Civita y De Maio, 1997). Está basada en los factores que restringen la localización de pozos nuevos que pueden alterar el balance hidrológico local y regional, limitando los volúmenes de extracción. La celda de estudio fue de 2 x 2 km.

Se eligieron seis factores, considerando como base las restricciones formales impuestas por la Comisión Nacional del Agua: densidad de pozos (Dp), volumen de extracción (Ve), calidad química del agua (Ca), calidad química del suelo (Cs), abatimiento piezométrico (Ap) y subsidencia (S).

Cada factor tiene rangos de valores normalizados en la escala 0-1. Tres rangos son propuestos para cada factor. Los rangos consideran pesos, los cuales representan la relevancia e influencia en el impedimento de nuevos pozos: a mayor influencia, mayor peso. La escala de pesos es de 1 a 5; su rango fue seleccionado de acuerdo con las diferencias relativas de cada factor.

Cabe mencionar que todos los factores son importantes. Se probaron escalas de 1 a 10, pero se decidió optar por la primera debido a la facilidad de manejo de las cantidades involucradas.

El Iv propuesto es entonces la suma de cada factor, considerado:

$$Iv = \sum_{j=1}^6 P_j W_j^6$$

Donde:

Iv : índice de veda.

$P(1, 6)$ = rango de cada uno de los parámetros.
 $W(1, N)$ = pesos en función de la situación hidrogeológica.

Es decir:

$$I_{veda} = Dp Dp_w + Ve Ve_w + Ca Ca_w + Cs Cs_w + Ap Ap_w + S S_w$$

En el caso de estudio, todos los parámetros corresponden a datos de 2005; la información fue manejada por medio de un SIG. El proceso de la información implicó álgebra de mapas en cada caso para obtener como producto final un mapa paramétrico. Se implementó ArcGis de ESRI® para la discretización de áreas, con los siguientes módulos y extensiones: *Spatial Analyst*, *Geostatistical* y *3D Analyst*. Se utilizaron conjuntos de datos vectoriales procesados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Selección de factores

La densidad de pozos (Dp) y el volumen de extracción (Ve) pueden ser codependientes e inducir abatimientos del nivel del agua subterránea. Los rangos de la densidad de pozos por celda fueron definidos tomando en consideración la distancia de interferencia entre dos pozos, 500 m (Conagua, 1993): alta para más de 9; moderada entre 5-9, y baja para 0-4 pozos.

Los rangos de los volúmenes de extracción consideraron rendimientos promedios nacionales de pozos agrícolas: altos para caudales mayores a 534 000 m³/año (más de 20 l/s);

medios para 156 000-534 000 (10-20 l/s), y bajos para caudales menores a 156 000 m³/año.

Para la calidad del agua, los tres intervalos propuestos consideran la salinidad efectiva y potencial, conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS), inicialmente propuesta por Palacios y Aceves (1970): buena (tipo1), condicionada (tipo 2) y no recomendable (tipo 3).

Las características de cada una se presentan en el cuadro 1.

La calidad del suelo fue seleccionada considerando el estudio de clasificación de suelos realizado por la Secretaría de Recurso Hidráulicos (SRH, 1972), en el cual se determinaron cinco series de suelos en función de la degradación causada por la salinidad del agua de riego. La salinidad y el contenido de sodio fueron usados para considerar los tres rangos (cuadro 2).

Los abatimientos piezométricos (Ap) son uno de los mejores indicadores para detectar problemas en el manejo y la potencialidad de un acuífero. Abatimientos mayores a 1.5 m/año fueron considerados como valor de referencia: bajo de 0.0-0.5, medio de 0.5-1.0 y alto mayor que 1.5 m/año.

Cuadro 1. Tipo de agua y categoría.

Tipo	Categoría	Se (meq/l)	Sp (meq/l)	CE (μS/cm)	RAS (meq/l)
1	Buena	< 5	< 5	< 750	< 10
2	Condicionada	5 - 15	5 - 15	750 - 2 250	10 - 25
3	No recomendable	> 15	> 15	> 2 250	> 25

Se: salinidad efectiva; Sp: salinidad potencial; CE: conductividad eléctrica; RAS: relación de adsorción de sodio.

Cuadro 2. Esquema de clasificación de suelos.

Tipo	Categoría	Serie	Nivel de salinidad y sodicidad	CE (μS /cm)	pH
1	Bueno	5	Bajo	< 2 000	< 8.2
2	Regular	1, 2, 3	Ligero	2 000 - 4 000	8.2 - 8.5
3	Malo	4	Alto	> 4 000	> 8.5

Series: 1: Cumuatillo; 2: Junco; 3: Pajacuarán; 4: Guaracha; 5: Jiquilpan.

La subsidencia o hundimientos diferenciales del terreno es un problema asociado con la extracción en áreas con acuitardos (Poland, 1984; Jackson *et al.*, 2004). El máximo rango se dio a las velocidades de subsidencia mayores reportadas en México, 0.4 m/año (Ortega-Guerrero *et al.*, 1999): baja de 0.0-0.05, moderada de 0.05-0.10 y alta mayor que 0.10 m/año.

La densidad de pozos y los volúmenes de extracción tienen peso de 5, el mayor de la escala. Ambos son los factores más importantes en la imposición de restricciones de extracción en México (Conagua, 1993). La calidad del agua es también importante, pero aun flujos de mala calidad pueden ser usados con diferentes propósitos, por lo que se propone un peso de 4.

Los abatimientos del nivel reflejan problemas con la disponibilidad acuífera, pero si el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento, la explotación puede continuar. El peso propuesto es 3.

La subsidencia está asociada con intensos regímenes de extracción. La compactación del suelo, una consecuencia de este fenómeno, puede afectar seriamente la infraestructura urbana (Rodríguez *et al.*, 2000). Las velocidades de subsidencia pueden incrementar con la extracción en nuevos pozos. Por dichas razones, el peso propuesto es 2.

Si la degradación del suelo es causada por la irrigación con agua de mala calidad, la extracción de agua con pozos nuevos puede ser restringida. El peso propuesto para este rubro es el más bajo: 1.

En el cuadro 3 se describen los factores considerados con sus escalas, rangos y pesos.

Resultados

La Ciénaga de Chapala es una subcuenca de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, una de las mayores cuencas mexicanas. La densidad de información disponible validada (datos de cinco de los seis factores considerados) y el carácter prospectivo de la investigación llevó a una primera malla de 2 x 2 km.

Densidad de pozos, D_p

En México, la Conagua impuso una distancia de interferencia entre pozos de 500 m (Conagua, 1993); lo anterior significa que no es aceptable más de cuatro pozos en el tamaño de malla propuesto. El número total de pozos registrados en la ciénaga es de 425 (Conagua, 2004); la densidad de pozos en el mallado varía de 0 a 17. En la figura 1 se muestra la distribución del índice parcial del factor D_p .

Destaca la región sur de la ciénaga, específicamente hacia la zona de Jiquilpan y Emiliano Zapata, como la de menor valor. Por el contrario, hacia el norte de la ciudad de Sahuayo y en el área de El Fortín y San Gregorio (porción norte-centro) se ubican los valores máximos, con índices que sobrepasan los tres puntos, debido a una alta superposición de los dominios de pozos.

Cuadro 3. Factores considerados para el cálculo del I_v , con sus respectivos pesos, escalas y rangos.

Densidad de pozos		Extracciones		Calidad del agua		Calidad del suelo		Abatimiento		Subsidencia	
$P = 5$		$P = 5$		$P = 4$		$P = 1$		$P = 3$		$P = 2$	
Escala	Rango (No/4 km ²)	Escala	Rango (m ³ /año)	Escala	Rango	Escala	Rango	Escala	Rango (m/año)	Escala	Rango (m/año)
0.3	0 - 7	0.3	< 156 000	0.3	1	0.3	1	0.3	0.0 - 1.0	0.3	0.0 - 0.20
0.6	7 - 15	0.6	156 000 - 534 000	0.6	2	0.6	2	0.6	1.0 - 1.5	0.6	0.20 - 0.50
1	> 15	1	> 534 000	1	3	1	3	1	> 1.5	1	> 0.50

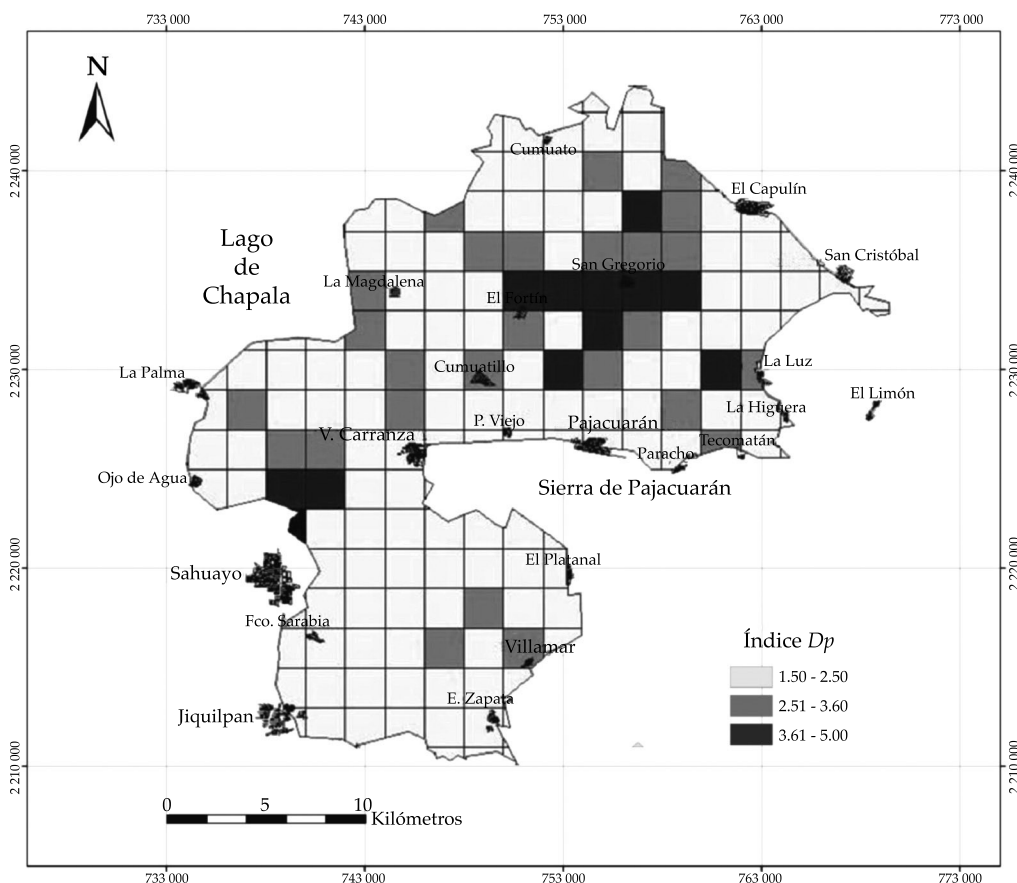


Figura 1. Índice del factor densidad de pozos, D_p .

Volúmenes de extracción, V_e

La extracción fue calculada usando información de la Conagua, aunque se verificaron algunos valores. La extracción total es de 22.676 Mm³/año (Silva, 2002); se estimó una extracción de 91 000 m³/año por pozo. Las áreas con mayor extracción no necesariamente coinciden con las de mayores densidades de pozos (figura 2). Destaca la porción norte de la ciénaga como la que registra los valores máximos, específicamente hacia el poblado de San Gregorio.

Calidad del agua, Ca

Se llevó a cabo un monitoreo de agua subterránea en 125 pozos. En la figura 3 se muestra

el índice parcial Ca . Se delimitan claramente los tres tipos de agua; el 1 (1.2 - 2.1 puntos) representa 10% del área y se localiza en el dominio de las rocas volcánicas. Su afectación es mínima a los suelos, por lo que no presenta restricción al desarrollo de los cultivos.

El tipo 2 (2.11 - 3.0 puntos) tiene calidad regular y representa 60% de la ciénaga. Es agua que puede utilizarse en actividades agrícolas con ciertas restricciones, específicamente en la selección del tipo de cultivos, que deberán ser resistentes a estos rangos de salinidad y sodicidad. El tipo 3, con puntajes de entre 3 y 4, no es recomendado para agricultura y representa un porcentaje elevado para la región, del orden de 30%; su uso acelera los procesos de salinización y sodificación de suelos.

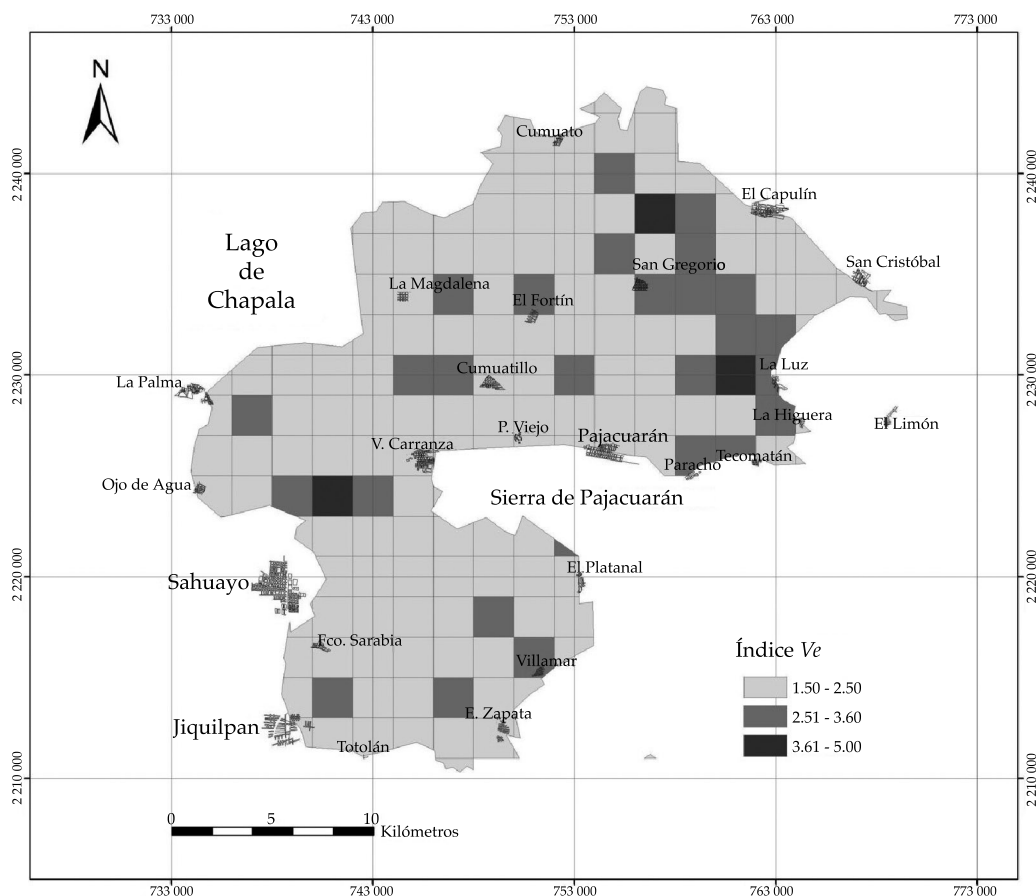


Figura 2. Índice del factor volumen de extracción, V_e .

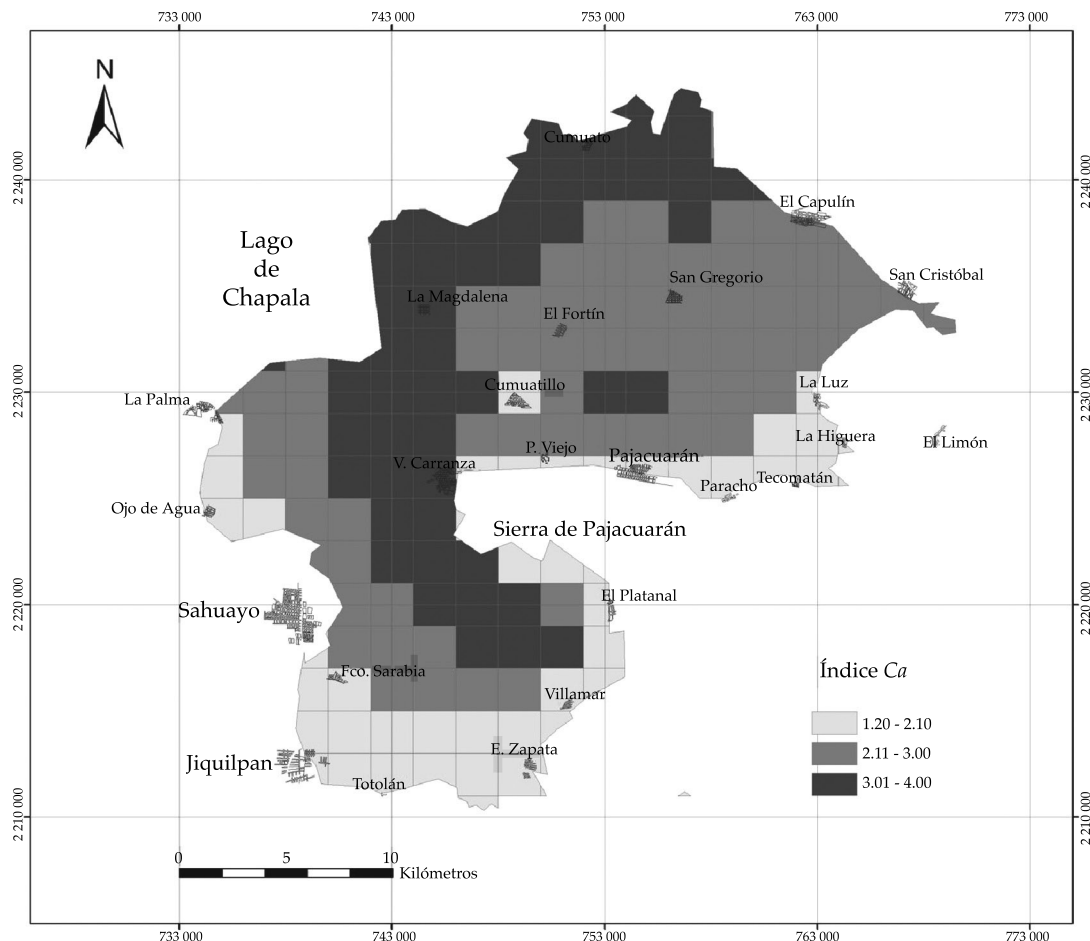
Calidad del suelo, C_s

Los índices de este parámetro reflejan que 80% de la ciénaga se ubica en rangos de 0.51 - 0.7 puntos, suelos donde se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola, con productividades que se han visto paulatinamente afectadas debido a un uso intensivo de agua subterránea de mala calidad. Sólo un reducido porcentaje de los suelos no está afectado por la salinidad (figura 4). Se destaca hacia la porción sureste un área con índices superiores a 0.7 puntos, con influencia de la región geotérmica de Los Negritos, al norte de la comunidad de Villamar; en el área se lleva a cabo agricultura de temporal de baja productividad.

Abatimiento piezométrico, A_p

En la zona de estudio, la profundidad de los niveles estáticos son muy someros, con una variación entre 1.2 m como mínimo hasta 16 m como máximo en algunas áreas pequeñas localizadas en la porción suroeste de la ciénaga. Los recorridos piezométricos de 2003 a 2005 indican recuperaciones locales del nivel.

Aunque en esta región no se presentan actualmente abatimientos importantes del nivel, en muchas otras áreas del país reflejan un balance negativo, como en el bajo guanajuatense, donde se tienen medidas de más de 1.5 m anuales (Rodríguez *et al.*, 2000). La figura 5 muestra los índices obtenidos:

Figura 3. Índice del factor calidad química del agua, *Ca*.

predominan los rangos asociados con valores de abatimiento menores a 0.5 m/año.

Subsidencia, S

La subsidencia es un fenómeno asociado con intensos regímenes de extracción; la compactación del suelo se ha reportado en acuíferos intensamente explotados (Herrera y Dumarts, 1995; Custodio, 2002). La subsidencia puede tener influencia tectónica (Garduño et al., 2000). En la ciénaga no hay reportes de subsidencia. El mapa de este índice no fue incluido, ya que presentaba el valor mínimo en toda la malla.

Índice de Veda, Iv

El *Iv* fue calculado para cada celda. Los valores obtenidos varían de 6 a 20. Tres niveles de veda son propuestos (cuadro 4), acordes con lo estipulado en la Ley de Aguas Nacionales (2004): veda rígida, con restricción total para nuevos pozos, en cuyo caso estas regiones deberán ser sometidas a un plan de recuperación de corto plazo, al estimular un política operativa en donde se contemple el cierre de fuentes de extracción, el rediseño de pozos y la recuperación de suelos salinos; veda flexible, en que sólo se permiten nuevos pozos cuando se demuestre que se ha trabajado

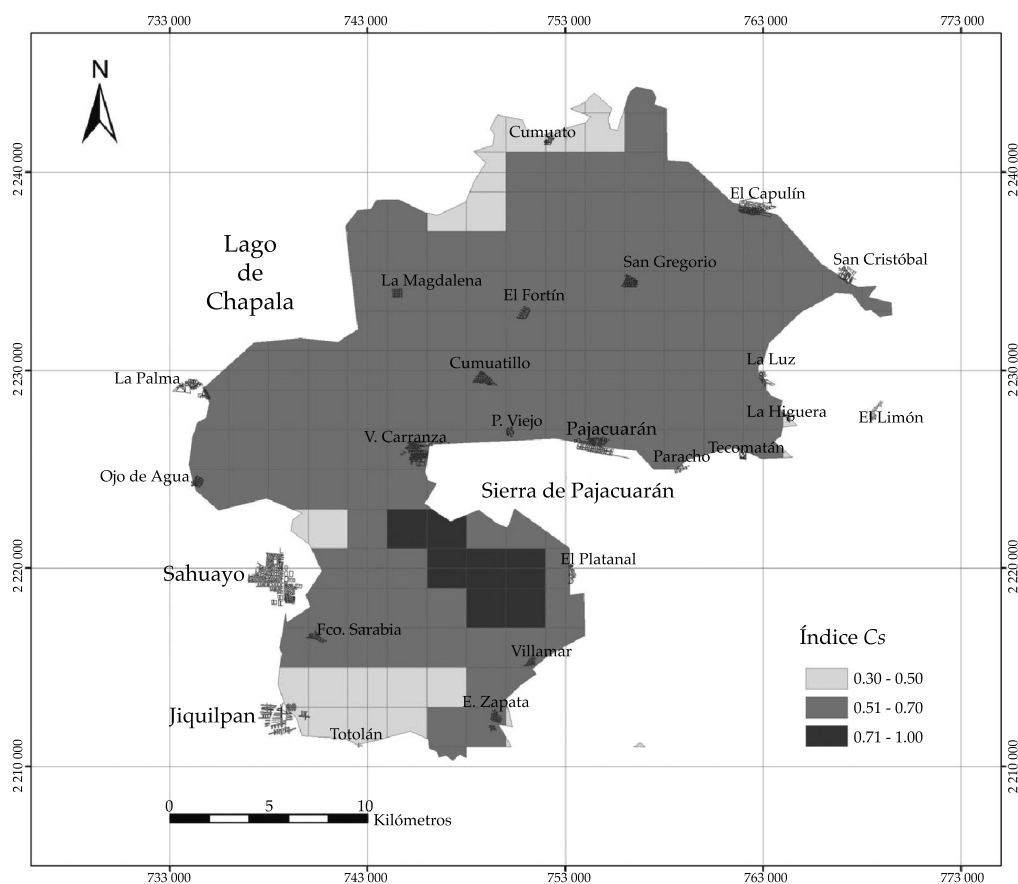


Figura 4. Índice del factor calidad de suelo, Cs.

Cuadro 4. Índices de veda, sus categorías y rangos.

Índice de veda (IV)	Categoría	Rango
1	Controlada	6.00 - 10.00
2	Flexible	10.01 - 16.00
3	Rígida	16.01 - 20.00

adecuadamente en el diseño de los mismos, que podrán ser de uso urbano o agrícola; y veda controlada, para zonas en las cuales es factible la explotación del acuífero, cuidando que se respeten las distancias mínimas entre pozos, así como atender aspectos relacionados con sus diseños constructivos.

El mapa de *Iv* no muestra áreas con categoría 3 (figura 6). Las áreas con extracción condicionada se asocian principalmente con degradación de suelos como consecuencia de irrigación con agua de mala calidad. Por otra parte, 55% del área es categoría 1, sin restricciones para extracción.

El *Iv* indica que en la Ciénaga de Chapala no hay condiciones justificables para imponer restricciones o prohibiciones de extracción. Nuevos pozos o incrementos en la extracción podrían autorizarse sin que conlleven afectaciones inmediatas a la disponibilidad del sistema acuífero. Incluso podrían localizarse nuevos aprovechamientos en áreas con categoría 2.

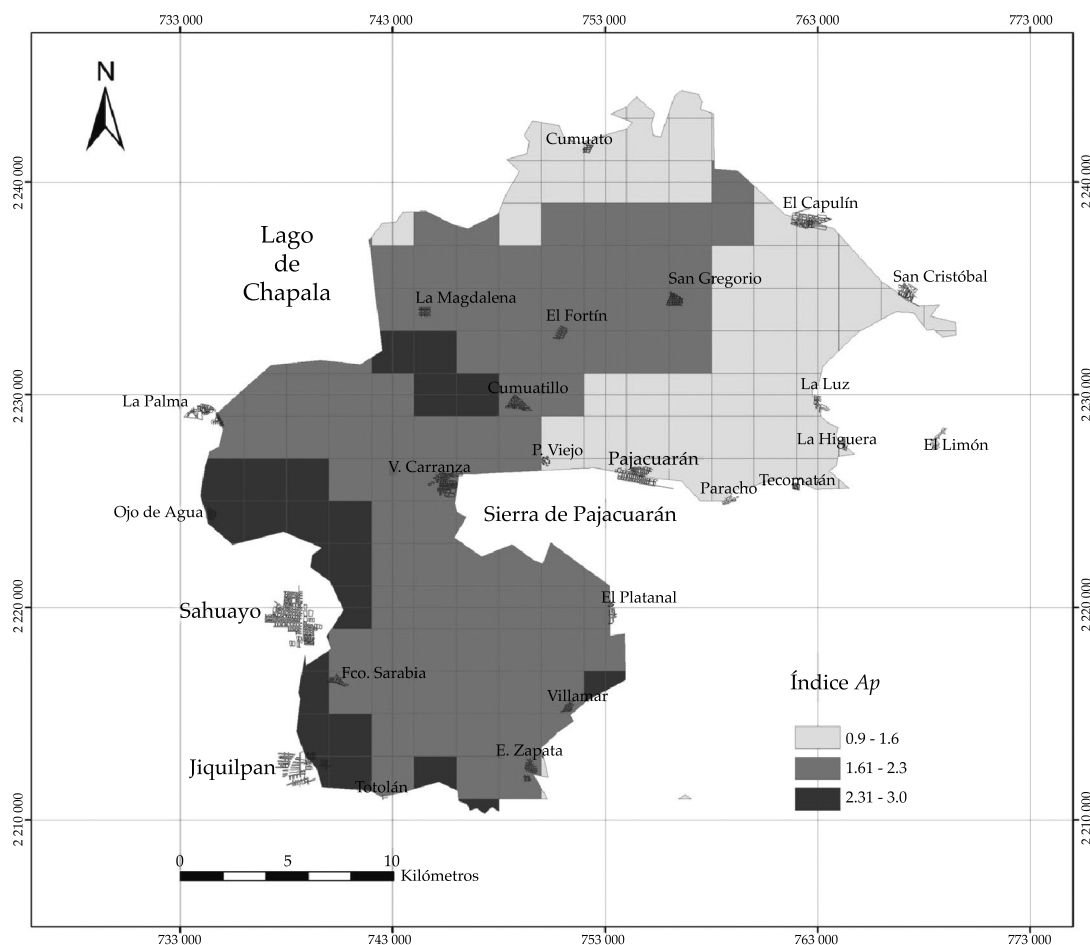


Figura 5. Índice del factor abatimiento piezométrico, A_p .

Derivadas de las condiciones geológicas e hidrogeológicas particulares de la zona de estudio, algunas restricciones se deberían aplicar, como es profundidad mínima de 200 m, a fin de alcanzar el acuífero volcánico y evitar los depósitos lacustres debido a la mala calidad del agua que presentan. Se deben realizar valoraciones periódicas y balances hidrológicos para que los volúmenes de extracción por asignar no afecten a largo plazo la disponibilidad y el almacenamiento del sistema acuífero regional.

Discusión

La definición de áreas de veda en México requiere de un mayor soporte técnico. Más de

40% de las cuencas explotadas de México han sido declaradas como zonas de veda (Conagua, 1993); sin embargo, la extracción urbana no está incluida en las imposiciones de veda.

En áreas con estas restricciones se ha desarrollado un mercado de pozos donde los derechos de los mismos pueden comprarse: un productor de bajos recursos vende sus derechos de pozo y el comprador puede perforar uno nuevo en otro lugar de la cuenca o subcuenca con el mismo volumen de extracción asignado al anterior; el vendedor puede no clausurar su pozo. Estas operaciones pueden explicar la proliferación de pozos en áreas de veda.

Esta propuesta, una primera aproximación al problema descrito, puede proveer criterios técnicos para imponer condiciones de veda

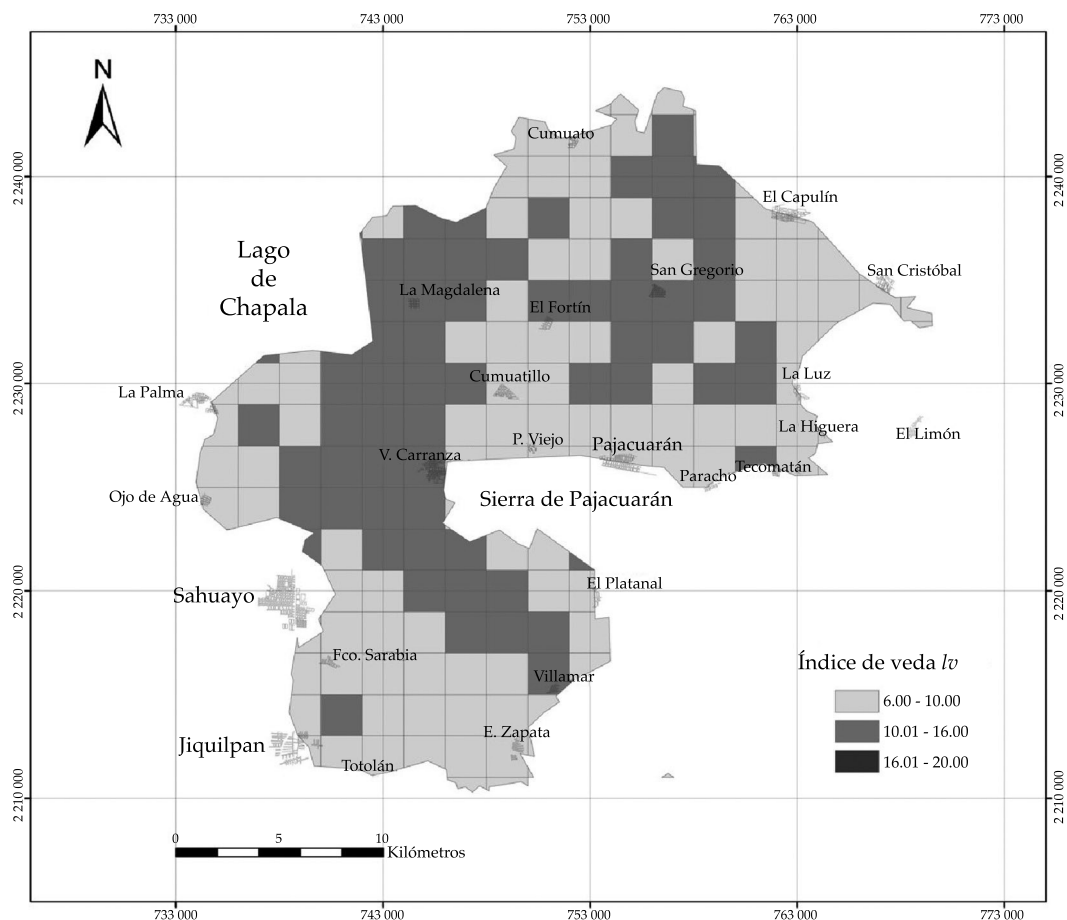


Figura 6. Índice de Veda (I_v) para la Ciénaga de Chapala; 55% del área se sitúa en categoría 1 de veda controlada.

donde realmente se tenga que limitar la extracción de agua subterránea. Los rangos y pesos son propuestos de manera simple, considerando la relevancia de los factores que intervienen en la imposición de veda.

La propuesta del índice está basada en metodologías paramétricas como SINTACS, usando en este caso un SIG; el tamaño de la malla se puede definir en función de la cantidad y calidad de la información disponible. En la ciénaga, los factores de subsidencia y abatimiento del nivel piezométrico no influyen en la sumatoria de subíndices, ya que presentan los valores mínimos en toda la malla.

La principal fuente de agua en la ciénaga es subterránea. A pesar de que no hay reportes

de abatimientos regionales o locales, la ciénaga fue declarada zona de veda, limitando la producción agrícola. Aunque el lago de Chapala está recuperando volumen después de un largo periodo de sequía, el agua extraída del lago es usada sólo para el abastecimiento de la zona metropolitana de la ciudad de Guadalajara.

La calidad del agua del río Lerma sólo permite su uso en agricultura en tierras localizadas en sus márgenes. En la última década, el acuífero de la ciénaga ha sido intensamente explotado sin afectar el balance regional; éste no es el caso en otras regiones del altiplano mexicano, donde ocurre lo contrario.

Esta propuesta de índice puede ayudar en las políticas de manejo del acuífero y a una

mejor definición de los criterios a imponer en la determinación de volúmenes de extracción. Es dinámica, es decir, debe ser periódicamente recalculada (al menos cada cinco años), a efecto de mantener vigente los esquemas de manejo del recurso hídrico.

El balance hidrológico regional fue positivo: + 267.86 Mm³ para 2000. Para 2003, los volúmenes son similares: más de 250 Mm³ (Silva, 2002). Este valor puede ser mayor debido a aportaciones no cuantificables de flujos ascendentes (evidenciados por las manifestaciones de termalismo en pozos al pie de la sierra de Pajacuarán) no considerados en el balance.

Estos flujos también son explicados en términos del fracturamiento de las rocas volcánicas, altamente permeables, contra los sedimentos que dominan en la ciénaga de baja permeabilidad. Como se mencionó, hay evidencias de aportaciones del lago al acuífero que no han sido cuantificadas.

Sólo en áreas donde se obtenga categoría 3 son justificables las restricciones a la extracción, aunque éste no es el caso de la ciénaga, donde predomina la categoría 1.

Conclusiones

El uso de esta tecnología en Michoacán ha mostrado ventajas en la toma de disposiciones ambientales, específicamente en el ámbito hidrogeológico, con la generación de un esquema operativo sustentable del manejo del agua subterránea de la Ciénaga de Chapala.

El índice de veda del acuífero (*Iv*) pretende incidir en el manejo científico del recurso hídrico, fomentando políticas y reglas sustentables de operatividad, basadas principalmente en el conocimiento que se tiene del estado que guarda el acuífero.

El método ofrece la ventaja de ahorrar tiempo de exploración, al obtener un panorama regional discretizado que integra los factores mencionados en la normatividad oficial.

Las metodologías planteadas permiten su extrapolación a otros escenarios, lo que podría involucrar variables socioeconómicas. Lo anterior enriquecería cada vez más la propuesta.

Agradecimientos

Este proyecto se realizó gracias al financiamiento otorgado por Fondos Mixtos Conacyt-Gobierno del Estado de Michoacán y el Instituto Politécnico Nacional. Se agradece el apoyo otorgado por la Conagua, a través del Distrito de Riego 024-Ciénaga de Chapala.

Recibido: 20/10/09

Aprobado: 11/04/11

Referencias

- ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J., and HACKETT, G. *DRASTIC: a standard system for evaluation groundwater pollution using hydrogeologic setting*. EPA/600/2-85/081. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 1985, 622 pp.
- BOSQUE, S.J. y ZAMORA, L.H. Visualización geográfica y nuevas cartografías. *GeoFocus*. Vol. II, 2002, pp. 61-77.
- BUZAI, G. Geografía y tecnologías digitales del siglo XXI: una aproximación a las nuevas visiones del mundo y sus impactos científicos-tecnológicos. *Scripta Nova*. Vol. VIII, núm. 58, agosto de 2004, pp.170-181.
- CIVITA, M. y DE MAIO, M. SINTACS, metodología & automatizzazione. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale*. Vol. 60. Boloña: Pitogora Editrice, 1997, 191 pp.
- CONAGUA. *Acta de acuerdos*. Morelia, México: Comisión Nacional del Agua, Comité Hidráulico del Estado de Michoacán, 1993, 125 pp.
- CONAGUA. *Padrón de concesionarios de pozos profundos del Distrito de Riego 024, Ciénaga de Chapala, Michoacán, México*. Chapala, México: Comisión Nacional del Agua, 2004, 40 pp.
- CUSTODIO, E. Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal*. Vol. X, No. 2, April, 2002, pp. 254-277.
- GARDUÑO, V.H., ARREYGUE, E. y RODRÍGUEZ, G. *Mapa de riesgos de Salamanca, Guanajuato*. Reporte Técnico. Salamanca, México: Municipio de Salamanca: UMSNH-IIM, 2000, 70 pp.
- HERRERA, I. y DUMARTS, Ch. (compiladores) *El agua y la Ciudad de México*. México, D.F.: Consejo Nacional de la Investigación, Academia de la Investigación Científica, 1995, 350 pp.

- JACKSON, J., HELM, D., and BRUMLEY, J. The role of poroviscosity in evaluating land subsidence due to groundwater extraction from sedimentary basin sequences. *Geofísica Internacional*. 2004, Vol. XLIII, núm 4. pp. 689-695.
- MARTÍNEZ, A.P. La Cuenca Lerma-Chapala en el contexto de la gestión integral del agua. *Memorias del Foro Rescatemos Chapala*. CIIDIR-Michoacán, 2001, 85 pp.
- ORTEGA-GUERRERO, A., RUDOLPH, D.L., and CHERRY, J.A. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*. Vol. XXXV, No. 11, May, 1999, pp. 3327-3341.
- PALACIOS, V.O. y ACEVES, N.E. *Instructivos para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola*. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados, 1970, 112 pp.
- POLAND, J.F. *Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal*. Studies and Reports in Hydrology 40. New York: UNESCO, 1984, 340 pp.
- RODRÍGUEZ, R., RAMOS, A., MEJÍA, J.A., and BERLÍN, J. Subsidence and aquifer vulnerability: the Salamanca Case. *Memorias*. International Symposium on Hydrogeology and the Environment. Wuhan, China, octubre 17-21, 2000, pp. 95-100.
- SILVA, G.J.T. *Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de la Ciénega de Chapala, Michoacán, enfocado a una gestión sustentable*. Tesis doctoral. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 2002, 102 pp.
- SILVA, G.J.T., RODRÍGUEZ, C.R., OCHOA, E.S., and LÓPEZ, D.S. Chapala Lake and the Cienega aquifer: chemical evidence of hydraulic communication. *Geofísica Internacional*. Vol. XLI, núm. 1, enero-marzo de 2002, pp. 63-74.
- SRH. *Estudio agrológico especial de salinidad y drenaje agrícola del distrito de riego núm. 24, Ciénega de Chapala*. Morelia, México: Secretaría de Recursos Hidráulico, 1972, 57 pp.

Abstract

SILVA, J.T., OCHOA, S., ESTRADA, F., VILLALPANDO, F. & CRUZ, G. *Assessment of banning indexes for aquifers using a GIS. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. II, No. 4, October-December, 2011, pp. 37-49.*

A method based on sustainability criteria for the assessment of banning indexes (a method for restricting new water resources exploitation) is described as a strategy to manage and operate aquifers. The data was organized in a geographic information system (GIS) and the processing of the data involved map algebra. The variables considered were: well density, extraction volume, chemical quality of the water, chemical quality of the soil, piezometric abatement and subsidence. The study surface was 2 x 2 km wide. The obtained values oscillated between 6 and 20 points. According to that established by the Ley de Aguas Nacionales (National Waters Law), three banning levels are proposed: rigid, flexible and controlled. The map obtained of the banning indexes for the Chapala Ciénaga shows that approximately 30% of the area is located in flexible banning levels, which indicates that there are no justifiable conditions to impose total restrictions on the authorization of new exploitation.

Keywords: *banning, geographic information systems, Chapala Ciénaga.*

Dirección institucional de los autores

*Dr. José Teodoro Silva
M.C. Salvador Ochoa
M.C. Francisco Estrada
Arq. Fabián Villalpando*

Centro Interdisciplinario de Investigación para el
Desarrollo Integral Regional
CIIDIR-IPN-Michoacán-México
COFAA, Justo Sierra 28
59510 Jiquilpan, Michoacán, MÉXICO
Teléfono: +52 (353) 5330 218
tsilva09@hotmail.com
sochoae@ipn.mx
ingestrada01@hotmail.com
fvillalpando@ipn.mx

M.C. Gustavo Cruz

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
Kilómetro 36.5, carretera México-Texcoco
56210 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9544 605
gcruz@colpos.mx