

## **CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POBREZA DEL AGUA EN ZONAS SEMIÁRIDAS: CASO VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ**

Briseida LÓPEZ ÁLVAREZ<sup>1\*</sup>, José Alfredo RAMOS LEAL<sup>2</sup>, Germán SANTACRUZ<sup>1</sup>,  
Janete MORÁN RAMÍREZ<sup>3</sup>, Simón Eduardo CARRANCO LOZADA<sup>3</sup>,  
María Cristina NOYOLA MEDRANO<sup>4</sup> y Luis Felipe PINEDA MARTÍNEZ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Programa Agua y Sociedad, El Colegio de San Luis, A. C. Parque de Macul 155, Fracc. Colinas del Parque, San Luis Potosí, C.P. 78299 S.L.P., México

<sup>2</sup> División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C., Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas, 4ª sección, CP. 78216. San Luis Potosí S.L.P., México

<sup>3</sup> Posgrado en Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas, 4ª sección, CP. 78216. San Luis Potosí S.L.P., México

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Dr. Manuel Nava 8, Zona Universitaria, San Luis Potosí, S.L.P., 78240, México

<sup>5</sup> Programa de Estudios e Intervención para el Desarrollo Alternativo, Universidad Autónoma de Zacatecas, Calzada Universidad 108, C.P. 98000 Progreso, Zacatecas, México

\*Autora responsable: blopez@colsan.edu.mx

*(Recibido mayo 2012, aceptado junio 2013)*

Palabras clave: recursos hídricos, acceso, capacidad, uso, calidad, ambiente, altiplano potosino

### **RESUMEN**

El índice de pobreza del agua permite evaluar la pobreza de agua tomando en cuenta tanto factores físicos como socioeconómicos relacionados con la disponibilidad de agua. La metodología fue propuesta por Lawrence y colaboradores en 2002. El índice de pobreza del agua resulta de la suma ponderada de cinco componentes clave: recursos, acceso, uso, capacidad y ambiente en una escala de evaluación de 0 a 100. Sin embargo, en la aplicación del índice para el Valle de San Luis Potosí para el año 2005, se tomó en cuenta la calidad del agua como un componente adicional a la metodología original. En el Valle de San Luis Potosí predominan climas secos con una precipitación media anual de 351 mm, una temperatura media anual de 17.5 °C y con evaporación potencial media anual de 2038.7 mm. En la zona de estudio se tiene una dependencia del 92 % del agua subterránea y 8 % de agua superficial para diferentes usos, además concentra el 40 % de la población estatal y se genera el 80 % del PIB estatal. Lo anterior explica la importancia económica que tiene el acuífero de esta región. El índice de pobreza del agua obtenido para Valle de San Luis Potosí fue de 46 puntos. El objetivo de este trabajo es estimar el índice de pobreza del agua en una región semiárida como el Valle de San Luis Potosí y vincular el bienestar de los hogares con la disponibilidad de agua.

Key words: water resources, access, capacity, use, quality, environment, Potosino highland

## ABSTRACT

The water poverty index allows water poverty assessment taking into account both physical and socioeconomic factors related to water availability. The methodology was proposed by Lawrence *et al.*, in 2002. The water poverty index is the weighted sum of five key components: resources, access, use, capacity and environmental assessment on a scale of 0 to 100. However, in applying the index to the Valley of San Luis Potosí to the year 2005, we took into account the quality of water as an additional component to the original methodology. In the Valley of San Luis Potosí dry climate, with an average annual rainfall of 351 mm, an average annual temperature of 17.5 °C and a mean annual potential evaporation of 2038.7 mm. The study area has a 92 % dependence on groundwater and 8% on surface water for different uses; the area also concentrates 40 % of the state's population and generates 80 % of state GDP. This explains the economic importance of the aquifer in this region. The water poverty index obtained for Valle de San Luis Potosí was 46 points. The aim of this paper is to estimate the poverty rate of water in a semiarid region as the Valley of San Luis Potosí and link household welfare with water availability.

## INTRODUCCIÓN

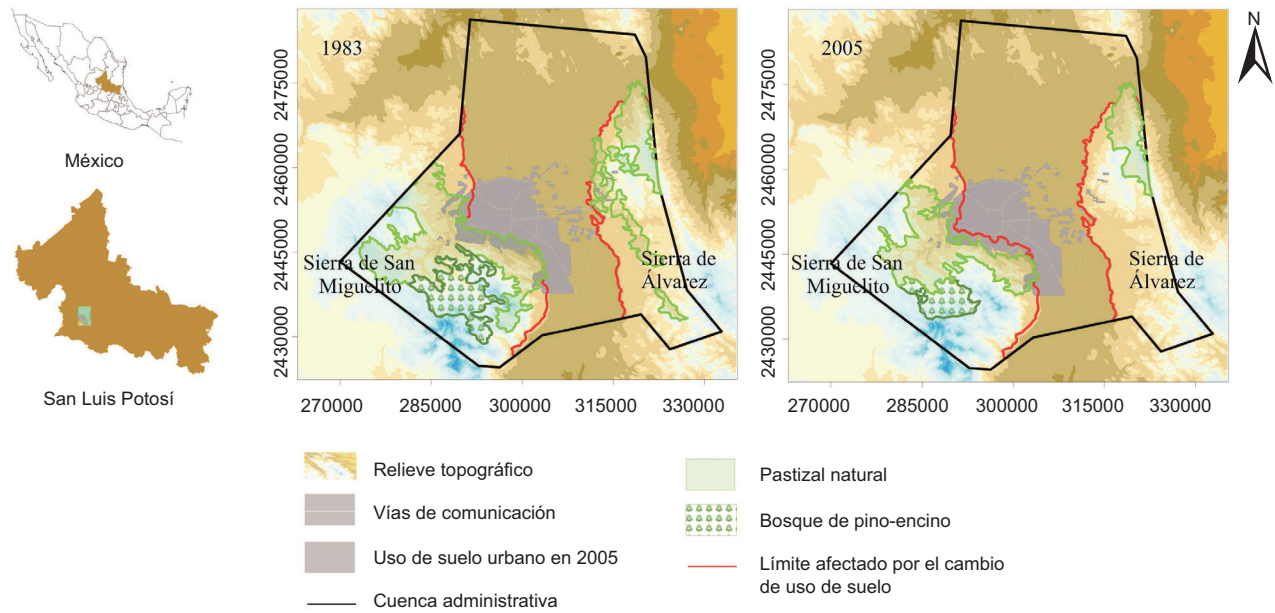
El Índice de Pobreza del Agua (IPA) fue desarrollado por un equipo de investigadores, profesionales y actores sociales del agua en el mundo, bajo la dirección del Centro de Ecología e Hidrología (CEH) en Wallingford, Reino Unido, como parte del Consejo de Investigación del Ambiente del gobierno británico. El IPA es una nueva herramienta holística, diseñada para contribuir a un efectivo manejo del agua (Sullivan *et al.* 2003). Este índice permite evaluar la pobreza de agua en los países, regiones o comunidades, tomando en cuenta tanto factores físicos como socioeconómicos relacionados con la disponibilidad de agua (Lawrence *et al.* 2002). La metodología desarrollada fue aplicada a 140 países considerando aspectos como los recursos hídricos, el acceso, la capacidad, el uso y el ambiente, en una escala de evaluación de 0 a 100.

El propósito del IPA consiste en expresar una medida interdisciplinaria que vincula el bienestar de los hogares con la disponibilidad de agua e indica el grado de los efectos de la escasez de agua en las poblaciones humanas. Los componentes permiten establecer nexos entre pobreza, marginación social, integridad ambiental, disponibilidad del agua y salud. Esto permite dirigir políticas públicas a grupos interés e identificar dónde existen problemas y proponer medidas apropiadas para encarar sus causas. El IPA demuestra que no es la cantidad de recursos disponibles la que determina los niveles de pobreza en un país, sino la eficacia en el uso de esos recursos (Sullivan 2001, 2002, Sullivan *et al.* 2002, 2003).

En el trabajo de Lawrence *et al.* (2002), se muestra en orden descendente que los diez países más ricos en función de recursos hídricos del mundo fueron: Finlandia, Canadá, Islandia, Noruega, Guyana, Surinam, Austria, Irlanda, Suecia y Suiza; y que los diez países con mayor carencia hídrica en orden ascendente fueron: Haití, Níger, Etiopía, Eritrea, Malawi, Djibouti, Chad, Benin, Ruanda y Burundi. La diferencia entre el país con mayor puntuación (Finlandia, 78), y el de menor puntuación (Haití, 35), fue de 43 puntos.

En este mismo reporte México obtuvo una puntuación de 57. Este valor podría explicarse toda vez que el 51 % del territorio mexicano pertenece a zonas áridas, cuyo régimen de aridez va de 7 a 12 meses de sequía; es decir, es altamente vulnerable desde el punto de vista hídrico (Verbist *et al.* 2010). El clima en la parte norte del país es árido a semiárido, y en ella se encuentran las ciudades más grandes y que concentran las principales actividades industriales y agrícolas, en las que además el agua subterránea juega un papel esencial en la economía (Marín 2002), lo que ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos, que en algunos casos alcanzan el estado de minado (Noyola *et al.* 2009).

El objetivo de este trabajo es estimar el IPA en una región semiárida como es el Valle de San Luis Potosí (VSLP) localizado en el noreste de México a 1800 msnm, en la región conocida como el Altiplano Mexicano (**Fig. 1**). El VSLP está limitado al oriente por la Sierra de Álvarez y al occidente por la Sierra de San Miguelito (**Fig. 1**). En él predominan los climas secos, con tipos: i) semiseco, ii) seco y iii) muy seco; con una precipitación media anual de 351 mm, una temperatura media anual de 17.5 °C y con evaporación potencial media anual de 2038.7 mm (García



**Fig. 1.** Localización del Valle de San Luis Potosí y cambios de uso de suelo durante el periodo de 1983 a 2005

2004, Moreno *et al.* 2004). Lo anterior explica la importancia económica que tiene el acuífero para el VSLP, que depende en un 92 % del agua subterránea y del 8 % de agua superficial para diferentes usos (SEMARNAT 2008). Por otro lado concentra el 40 % de la población estatal y genera el 80 % del PIB estatal (SEMARNAT 2008).

### Desarrollo del IPA para el Valle de San Luis Potosí

El enfoque del índice compuesto se basa en la estructura y metodologías usadas para el Índice de Desarrollo Humano propuesta por la UNESCO en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2002), está basado en la premisa de que una combinación de variables relevantes puede proporcionar una perspectiva más completa, en una situación particular, que lo que puede una sola. Las variables forman un componente que es colectado y sumado, para generar un valor global del IPA.

La metodología propuesta por Lawrence *et al.* (2002), considera cinco componentes clave; sin embargo, en la aplicación del IPA para el VSLP, considerando información del año 2005, se tomó en cuenta la calidad del agua, debido a que en México el agua subterránea presenta graves niveles de contaminación tanto de origen natural como antrópica (CONAGUA 2011).

Cada subcomponente se normaliza como un índice en sí, basado en el rango de valores en cada variable en ese lugar (Sullivan 2002). La estructura matemática en la que se basa el IPA se expresa como sigue:

$$IPA_i = \frac{\sum_{i=1}^N w_{Xi} X_i}{\sum_{i=1}^N w_{Xi}} \quad (1)$$

Donde  $IPA_i$  es el Índice de Pobreza del Agua para una región en particular, resulta de la suma ponderada de seis componentes: Recursos (R); Acceso (A); Uso (U); Capacidad (C); Ambiente (E) y Calidad del Agua (Q). De manera que la estructura del IPA para el VSLP quedó definida por seis componentes (**Cuadro I**). Los componentes del IPA, son ponderados con respecto a su importancia relativa, usando funciones de peso  $W$ .

El peso  $w$  se aplica a cada componente ( $X_i$ ) de la estructura de IPA, para esa región;  $X_i$  se refiere al valor de cada componente.

La ecuación (1) también puede ser expresada en forma desarrollada (ecuación 2). Para poder comparar los resultados del IPA con otras regiones es necesario normalizar los valores obtenidos y así tener un rango de valores de IPA de entre 0 y 1, la suma tiene que ser dividida entre la suma de pesos como se muestra:

$$IPA_i = \frac{w_r R + w_a A + w_c C + w_u U + w_e E + w_q Q}{w_r + w_a + w_c + w_u + w_e + w_q} \quad (2)$$

Este método es en cierta forma iterativo, permite validar y evaluar la consistencia de los resultados analíticos y proporciona las bases para modificar los pesos y evaluar de nuevo los pesos asignados a los parámetros.

**CUADRO I.** COMPONENTES CLAVE EN EL IPA (MODIFICADA DE LAWRENCE *et al.*, 2002)

| Componente del IPA   | Definición                                                                                                            | Datos usados                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Recursos (R)         | Disponibilidad física del agua superficial y subterránea, tomando en cuenta su uso y el balance hídrico.              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua superficial</li> <li>• Agua subterránea</li> <li>• Volumen aprovechados</li> </ul>                                                                                   |
| Acceso (A)           | Nivel de acceso al agua segura para uso humano.                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• % De población con acceso a agua potable</li> <li>• % De población con acceso a drenaje.</li> <li>• % De tierras arables con acceso al riego.</li> </ul>                  |
| Capacidad (C)        | Eficacia de la capacidad de la población en el manejo del agua.                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingresos.</li> <li>• Tasa de mortalidad de niños menores de 5 años.</li> <li>• Índice de educación.</li> <li>• Coeficiente de Gini.</li> </ul>                            |
| Uso (U)              | Las formas en la cual es usada el agua para diferentes propósitos. Incluye los usos doméstico, agrícola e industrial. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso doméstico del agua en litros por día.</li> <li>• Porcentaje de agua usada para la agricultura e industria ajustada a su participación como sector del PIB.</li> </ul> |
| Ambiente (A)         | Evaluación de la integridad ambiental relacionada al gua.                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos de suelo</li> <li>• Áreas Naturales Protegidas</li> </ul>                                                                                                            |
| Calidad del agua (Q) | Evaluación de la calidad del agua para uso humano.                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos de calidad del agua superficial y subterránea.</li> </ul>                                                                                                           |

Cada componente tiene una influencia en el IPA, expresada en pesos efectivos. El peso efectivo  $W_{xi}$ , puede ser calculado para cada componente de acuerdo a la ecuación 3 (Napolitano y Fabbri 1996, Ramos 2002).

$$W_{xi} = \frac{Xr_i * Xw_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (3)$$

Donde  $Xr_i$  y  $Xw_i$  son las puntuaciones para cada componente  $X_i$  y sus pesos teóricos y  $W_i$  es la sumatoria de pesos teóricos. Los pesos obtenidos a partir de la expresión anterior se muestran en el **cuadro II**. En el que se observa que el componente R, tiene un mayor peso seguido de Q y U y los de menor peso son A, C y E.

### Recursos (R)

El sistema acuífero del VSLP abarca 1980 km<sup>2</sup>, comprende parcial o totalmente los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y Zaragoza (SEMARNAT 2008). Este sistema está definido por un acuífero somero formado por material de relleno

**CUADRO II.** VALORES OBTENIDOS PARA CADA COMPONENTE DEL IPA PARA VSLP

| Componente     | Calificación | $W$ | IPA |
|----------------|--------------|-----|-----|
| Recurso        | 0.26         | 30  | 46  |
| Calidad        | 0.74         | 20  |     |
| Uso            | 0.29         | 20  |     |
| Acceso         | 0.75         | 10  |     |
| Capacidad      | 0.63         | 10  |     |
| Medio Ambiente | 0.40         | 10  |     |

y uno profundo constituido por roca volcánica fracturada (Cardona 2007, Ramos *et al.* 2007, Noyola *et al.* 2009). Como ya se mencionó en el VSLP se destina el 92 % del agua subterránea y el 8 % de agua superficial extraída para diferentes usos.

En el caso del agua subterránea, el acuífero somero aporta el 3 % del agua empleada para diferentes usos; tiene una recarga de 4 Mm<sup>3</sup>/año y una extracción de 5 Mm<sup>3</sup>/año (López 2012). Mientras que el acuífero profundo aporta el 97 %; tiene una recarga casi nula y, en contraste, tiene una extracción de 148.5 Mm<sup>3</sup>/año (Noyola *et al.* 2009, López 2012, López *et al.* 2013a,b).

En lo que respecta al agua superficial, la población del VSLP depende del volumen de agua almacenada

en las presas El Peaje, El Potosino y San José que en su conjunto aportan 11.97 Mm<sup>3</sup>/año (COTAS-CONAGUA\_SEMARNAT 2005, DOF 2010).

Este componente está relacionado con la disponibilidad física del agua que se tiene en el área de estudio y que es utilizada en diferentes actividades humanas. Considera dos subcomponentes, el agua superficial y el agua subterránea. El peso asignado a cada subcomponente está relacionado con el porcentaje de uso, como se ve en la siguiente expresión matemática:

$$R = 0.08A_{\text{sup}} + 0.92A_{\text{sub}} \quad (4)$$

$$A_{\text{sup}}(\text{Mm}^3) = \frac{\text{Vol. almacenado}}{\text{Vol. precipitación Anual}} \quad (4.1)$$

$$A_{\text{sub}}(\text{Mm}^3) = \frac{\text{Recarga} - \text{Extracción}}{2\text{Extracción}} \quad (4.2)$$

El componente R fue evaluado considerando un sistema acuífero formado por los dos acuíferos descritos anteriormente y ponderados de acuerdo a su porcentaje de uso.

### Acceso (A)

La zona metropolitana la conforman los dos primeros municipios y concentra el 93 % de la población del valle, con una población total de 1 016 461 habitantes (INEGI 2005a).

Los habitantes del VSLP tiene acceso a agua potable y a sistemas de saneamiento en un 86 % y 77 %, respectivamente (INEGI 2005a). Mientras que el VSLP tiene 42 755 ha de tierras cultivables de las cuales 11 853 ha son de riego (INEGI 2007).

Este componente toma en cuenta el porcentaje de la población que tiene acceso a agua segura ( $A_{ap}$ ) para sus necesidades básicas; porcentaje de agua que recibe saneamiento ( $A_s$ ) y finalmente la relación de tierras cultivables entre las tierras con acceso al riego ( $A_r$ ). La expresión que define a este componente es:

$$A = 0.6A_{ap} + 0.3A_s + 0.1A_r \quad (5)$$

La asignación de pesos para los subcomponentes fue obtenida mediante un análisis de pesos (Ramos 2002), que muestran que el subcomponente  $A_{ap}$  es el más importante, en tanto que el de menor peso es el  $A_r$ .

### Capacidad (C)

Este componente se basa en el Índice de Desarrollo Humano (IDH), evalúa las variables socio-

económicas que pueden afectar el acceso al agua o ser un reflejo de acceso y calidad del agua. Introduce el coeficiente de Gini en un intento de ajustar la capacidad de disfrutar de acceso a agua limpia por una medida de la distribución desigual del ingreso (Lawrence *et al.* 2002).

El IDH en México se ha calculado para el ámbito municipal realizando ajustes debido a las restricciones de disponibilidad de información, sin alterar su naturaleza. Uno de los ajustes realizados es lo que respecta a los ingresos (PNUD/México 2000-2005).

El producto interno bruto per cápita (PIB) no está disponible a nivel municipal, por lo tanto, se utiliza el ingreso neto total per cápita por hogar. Este ingreso considera ingresos corrientes monetarios y no monetarios (CONEVAL 2007). Estos datos son obtenidos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares del 2005.

Los subcomponentes son el índice de ingresos ( $I_i$ ); tasa de mortalidad de niños menores de 5 años ( $M_i$ ); índice de educación ( $I_e$ ) y coeficiente de Gini ( $C_G$ ).

La capacidad es evaluada a través de la expresión:

$$C = 0.3I_i + 0.05M_i + 0.5I_e + 0.15C_G \quad (6)$$

La asignación de pesos para los subcomponentes fue obtenida mediante un análisis de pesos (Ramos 2002), que muestran que el subcomponente  $I_e$ , es el más importante,  $I_i$ , es de mediana importancia y  $M_i$  es el menos importante.

### Uso (U)

En la primera mitad del siglo XIX, la población del VSLP se abastecía de agua por medio de norias y el uso del agua era principalmente doméstico y de irrigación de pequeños huertos (Sheridan-Prieto 2001 citado en Noyola *et al.* 2009). Para 1960, 59 % del agua para uso doméstico era superficial y 41 % provenía del acuífero. Hoy en día, 92 % del agua proviene del acuífero y el 8 % es agua superficial (SEMARNAT 2008). De acuerdo con Peña (2006) el acuífero de San Luis Potosí se ha clasificado como un acuífero urbano, partiendo del hecho de que la mayor parte del él se encuentra bajo la zona urbana, incrementando el riesgo de contaminación y de subsidencia. En el trabajo de Peña se reportaba que el 67.2 % era para uso doméstico, industrial 7.7 % y 19.8 % agrícola. En la actualidad la demanda de agua subterránea para consumo humano es de 78 %, industrial 14 % y para la agricultura 4.8 % (López 2012).

En el VSLP la dotación de agua potable a la población va de los 199.8 a los 250 litros/habitante/día (CNA 2002, INTERAPAS 2010).



Para determinar el agua para uso industrial se estableció la relación entre la proporción del PIB derivado de la industria y la cantidad de agua utilizada por ésta. Esto da una medida aproximada de la eficiencia del uso del agua (Lawrence *et al.* 2002). Este mismo procedimiento se aplica para el agua de uso agrícola.

En la zona de estudio la industria y la agricultura aportan el 26 y 4.66 % del PIB estatal, respectivamente (INEGI 2005b).

Este componente considera tres subcomponentes: agua para uso doméstico ( $U_d$ ), agua para uso industrial ( $U_i$ ) y agua para uso agrícola ( $U_a$ ) y se determina con base en la siguiente ecuación:

$$U = 0.78U_d + 0.11U_i + 0.07U_a \quad (7)$$

El peso asignado para los subcomponentes está basado en el porcentaje de uso del agua en el VSLP.

### Ambiente (E)

Hoy en día alrededor de un diez por ciento de la superficie terrestre del mundo cuenta con algún tipo de protección. Una área protegida es un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado por medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados (Dudley 2008). En México, en 2007, existían 158 áreas protegidas, las que conforman el 11 % de la superficie de la República Mexicana. Actualmente la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas administra 174 áreas naturales de carácter federal que representan más de 25 334 353 hectáreas, es decir 12.9 % del territorio nacional (CONANP 2012). Sin embargo, se ha estimado que el 90 % de la superficie del bosque tropical de la República Mexicana ha desaparecido y que el 99.4 % del bosque antiguo de pino-encino de la Sierra Madre Occidental ha desaparecido y se encuentra alterado como hábitat de plantas y animales.

El VSLP ha tenido alteraciones desde la fundación de la ciudad en 1592, de tal manera que la zona boscosa en la SSM fue deforestada a consecuencia de las actividades económicas a partir del siglo XVI. Actualmente la SSM tiene una Área Natural Protegida (ANP) con una superficie de 44 170 hectáreas, repartidas en 13 ejidos, en los Municipios de San Luis Potosí, Mexquitic de Carmona, Villa de Reyes y Villa de Arriaga en el Estado de San Luis Potosí (DOF 2009).

A pesar de contar con una ANP en la cuenca a la cual pertenece el VSLP, se ha modificado en un 60 %

la vegetación natural en la zona montañosa desde que se fundó la ciudad y ha sido reemplazada por usos de suelo antrópico (**Fig. 1**), lo cual ha representado una importante alteración en el sistema hidrogeológico, por ejemplo baja infiltración, erosión y en los últimos años inundaciones en las partes bajas de la ciudad. De 1983 a 2005 se perdió un 45 % del bosque de pino encino localizado mayormente en la SSM, mientras que para el mismo periodo se perdió un 61 por ciento del área de pastizal natural (INEGI, 1983).

### Calidad (Q)

Los seres humanos se han apropiado del agua para abastecer casas, producir alimentos y utilizarla en la industria; estos usos han impactado la cantidad y calidad del agua; esta degradación tiene implicaciones en la salud, en la sociedad, en la cultura, en la política y en la economía.

El aprovechamiento inadecuado de los recursos hídricos, tanto en los países desarrollados como en las naciones en vías de desarrollo, es una de las principales razones para su deterioro. En 1998, la Comisión Mundial del Agua para el Siglo XXI, informó que más de la mitad de los grandes ríos del mundo estaban contaminados o en peligro de desecarse. Esto provocó que durante ese año tuvieran que emigrar 25 millones de personas (OMM-UNESCO 1998). También indica que una evaluación de la cantidad y calidad del agua disponible es un prerequisite para el desarrollo y administración del recurso hídrico, ya sea para el propósito de suministrar agua a la población, la agricultura, la industria o la producción de energía.

Un agravante de la disponibilidad de agua en México es la contaminación del recurso. Esto provoca que la disponibilidad de agua en gran parte del país sea insuficiente para satisfacer la demanda (Palacios 2000). Una de las posibles causas se debe al incremento del uso del agua destinada a la industria y a su falta de saneamiento, así como al manejo inadecuado del riego agrícola, el cual ocupa entre el 78 % y el 82 % del agua disponible y produce entre un 7 % y un 5 % del PIB (Oswald 2003).

En el VSLP un ejemplo de contaminación del agua subterránea a causa de los cambios de uso de suelo son los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). En 1989 la distribución de nitratos era principalmente en la zona agrícola; para 1995 permanecen en la zona agrícola pero su distribución se extiende hacia la creciente mancha urbana. Para 2009 continua en la zona agrícola y se encuentra de manera importante en la zona urbana, como producto de los desechos humanos (**Fig. 2**).

En el IPA el componente que hace referencia a la calidad del agua fue evaluado mediante el Índice de

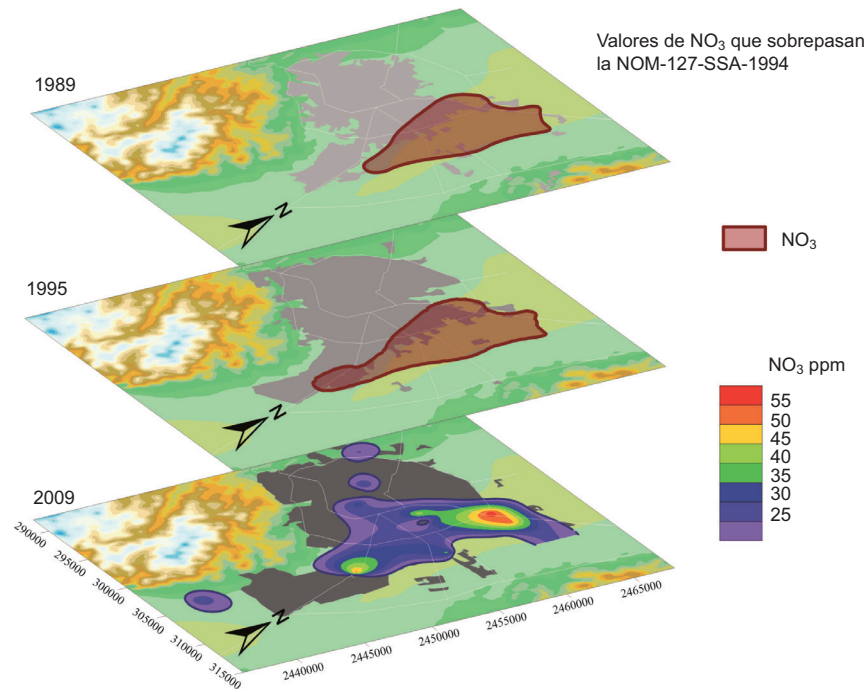


Fig. 2. Distribución de  $\text{NO}_3$  en 1985, 1995 y 2009 (Modificado de López *et al.* 2012)

Calidad del Agua (ICA) desarrollado por Brown y colaboradores (1973). Este índice es una evaluación numérica de las concentraciones de los parámetros químicos analizados, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de peso específico obteniéndose a partir de una media geométrica (ecuación 8).

$$ICA = k \frac{\sum C_i P_i}{\sum P_i} \quad (8)$$

donde  $C_i$ , es el valor porcentual asignado a los parámetros debido a su concentración;  $P_i$ , el peso asignado a cada parámetro;  $k$ , la constante que toma el valor de 1, para aguas claras sin aparente contaminación; 0.75, aguas claras con ligero color, espuma, ligera turbidez aparente no natural; 0.50, aguas con apariencia de estar contaminada; 0.25, aguas negras que presentan fermentaciones y olores.

En este trabajo se desarrollo la siguiente expresión para obtener el componente de calidad del agua basado en el ICA para el agua superficial y el agua subterránea (ecuación 9).

$$Q = 0.08Q_{Asup} + 0.92(0.03Q_{AsubS} + 0.97Q_{AsubP}) \quad (9)$$

donde  $Q_{Asup}$ ,  $Q_{AsubS}$  y  $Q_{AsubP}$  es el ICA para el agua superficial, agua subterránea del acuífero somero y

agua subterránea del acuífero profundo, respectivamente. Los factores de peso (0.08, 0.92, 0.03 y 0.97) utilizados en este componente fueron asignados de acuerdo con el porcentaje de uso de estas fuentes en el VSLP.

En una escala de 0 a 100, representa una excelente calidad y valores menores a 50 representan problemas graves de contaminación.

La puntuación del ICA para las aguas superficiales es de 70 y para el acuífero somero de 45 (Morán 2010, López *et al.* 2013a,b) y para el acuífero profundo de 75 (Ramos 2007). Estos valores fueron utilizados en la ecuación (9), con lo cual se obtuvo la puntuación de 73.8 para el componente Q.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Componentes del IPA

#### Recurso

El agua superficial no es abundante debido a la baja precipitación anual de 350 mm y a una evapotranspiración anual de aproximadamente 2000 mm (Ramos 2007). Únicamente origina corrientes superficiales intermitentes que son captadas en tres presas activas.

Por otro lado la principal fuente de abastecimiento para la población la constituye el acuífero profundo,

que tiene problemas de recarga y el agua que se extrae actualmente tiene edades de hasta 6300 años (Cardona *et al.* 2006, Noyola *et al.* 2009).

Para evaluar el parámetro R normalizado, el valor de 1 representa una abundancia del recurso hídrico. Un valor de 0.5 representa en el caso de los acuíferos un recurso en equilibrio, en tanto que valores menores a 0.5 representan un agotamiento del acuífero. En el caso del VSLP, se obtuvo un valor de 0.26 para este componente, lo cual es congruente con la condición actual de minado del acuífero profundo reportada por Noyola *et al.* (2009).

### Calidad

La calidad del agua es tan importante como la cantidad que se tenga de ésta. En México la variabilidad fisiográfica y climática limita la disponibilidad del agua (cantidad y calidad). Actualmente sólo el 66 % del agua superficial es excelente o aceptable, el resto requiere tratamiento o se encuentra severamente contaminada. De la calidad del agua subterránea poco se sabe, a pesar de que constituye la fuente de abastecimiento para 75 millones de mexicanos (Jiménez *et al.* 2005).

En el VSLP la calidad del agua para consumo humano se encuentra deteriorada. La unidad acuífera profunda presenta contaminación de tipo natural debido a la presencia de altas concentraciones de flúor asociadas al medio geológico por el cual circula el agua (Cardona 1990, Carrillo 1996, 2002, Cardona 2007), incluso rebasando el límite permitido de 10 ppm establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

En el caso del acuífero somero, se presenta una excesiva contaminación de tipo antrópica debido a que este acuífero se encuentra bajo la zona urbana a una profundidad que va de 3 a 10 m. Los contaminantes que pueden encontrarse como producto de las actividades urbanas, agrícolas e industriales actuales son coliformes fecales y totales, grasas y aceites,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , sólidos totales disueltos y metales (Morán 2010). Estos últimos también tienen su origen en los residuos mineros depositados hace 500 años (López 2012).

Considerando las condiciones naturales y antrópicas, el valor normalizado que se obtuvo para Q fue de 0.74. Este valor se alcanza debido a que la principal fuente de abastecimiento de agua es el acuífero profundo.

### Uso

Los cambios de uso de suelo en el VSLP han modificado los usos del agua. Como se mencionó

anteriormente, a principios del siglo XIX el agua subterránea era principalmente para uso doméstico e irrigación de pequeños huertos. Sin embargo, en los últimos 50 años se han dado cambios muy drásticos en los usos de agua para la industria y la agricultura, particularmente entre 2005 y 2007. De tal forma que el primer uso tuvo un incremento aproximado del 25 %, mientras que el uso agrícola registra un decremento promedio anual de 7 % (López 2012).

En lo que respecta al agua para fines agrícolas, la eficiencia de su uso depende del sistema de riego que se utilice (Fernández 2005). En el caso del VSLP, el principal sistema de riego es por gravedad cuya eficiencia máxima se estima en un 50 %.

Para 2005 el volumen de aguas residuales tratadas en el VSLP, fue de 15.5  $\text{Mm}^3$ , de los cuales el 0.03 % es de origen industrial (INTERAPAS 2010). Este porcentaje representa sólo el 4 % del volumen total de agua para uso industrial que recibe tratamiento.

Integrando esta información en la ecuación (2), se obtuvo un valor normalizado para U en el VSLP de 0.29.

### Acceso

La concentración de la población urbana en sólo dos municipios (SLP y SGS) con dependencia del sistema acuífero del VSLP, hace que los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento sean principalmente para estas poblaciones. El resto de los municipios cuenta con menos población y poco concentrada, lo cual dificulta el acceso a estos servicios.

Según Lawrence y colaboradores (2002), la dotación mínima aceptable para cubrir las necesidades básicas de una población es de 50 litros habitante por día y una dotación mayor a 150 litros habitante por día, se puede considerar un exceso. Para el VSLP, de acuerdo con los datos oficiales el uso es de 200 litros por habitante por día. Sin embargo, al interior de la zona metropolitana la distribución del abasto de agua es heterogénea en sus 596 colonias, de las cuales 499 tienen abasto permanente con presión normal, el resto tiene un abastecimiento irregular (SEMARNAT 2008).

Para el área de estudio se obtuvo un valor normalizado de 0.75 el cual se explica debido al crecimiento tan acelerado de la zona urbana del VSLP, así como al desarrollo de la industria en los últimos diez años (López 2012). El crecimiento de la mancha urbana fue de 32 % entre 2000 y 2005 sobrepasando a la registrada entre 1990 y 2000 que fue de 29 %, mientras que en el año 2000, el número total de habitantes de



la zona urbana era equivalente al 38 % del total de la población del estado (Noyola *et al.* 2009).

### Capacidad

México es un país con una gran diversidad climática, cultural y social. Según el Banco Mundial, en 2005, México tuvo el ingreso nacional bruto per cápita más alto de Latinoamérica, consolidándose como un país de ingreso medio alto (BM 2005).

Una de las razones principales de las diferencias en las puntuaciones es la escala a la que se realizó la evaluación. Es decir, las condiciones geográficas, climatológicas y socioeconómicas son diferentes si se miden a nivel nacional o regional. Los índices nacionales comúnmente no reflejan las condiciones regionales.

Otra causa del valor obtenido para este componente está relacionada con el organismo operador de agua potable y saneamiento de carácter intermunicipal, cuya operación es deficiente como lo muestran sus datos oficiales. Según datos de 2005, del total del volumen producido, sólo el 59 % es facturado, y de este porcentaje únicamente el 29 % tiene un pago regular (INTERAPAS 2010).

En la zona urbana del VSLP se encuentra la principal actividad económica de la región que es la industria. Lo cual no se ha visto reflejado en mejores condiciones de desarrollo humano para los habitantes de la región. La causa de lo anterior está en la concentración de la población y de los servicios públicos en la zona metropolitana del VSLP. Estas condiciones se ven reflejadas en la puntuación normalizada obtenida para este componente que es de 0.63.

### Ambiente

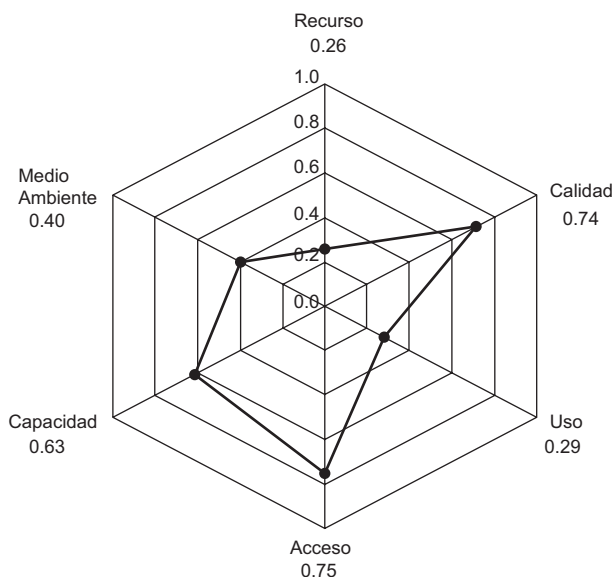
Para evaluar el componente del ambiente se consideró el área que ha sido afectada por las actividades antrópicas en el VSLP.

La evaluación se estableció dentro de una escala de afectación de 0 a 100 %, de tal forma que de 0 a 20 se considera una alteración muy baja, de 20 a 40 es baja, de 40 a 60 es media, de 60 a 80 es alta y de 80 a 100 % es muy alta. De esta forma si se obtiene una evaluación de 0 a 20 %, este sería el valor más favorable para el IPA pues representaría una alteración pequeña de la vegetación natural. El caso contrario sería si se obtiene una evaluación de 80 a 100 %, pues esto representaría la pérdida casi total de la vegetación natural dentro la cuenca.

El valor normalizado obtenido para este componente en el VSLP fue de 0.40 puntos, el cual está directamente relacionado con la pérdida de vegetación natural dentro de la cuenca.

### Índice de Pobreza del Agua para el Valle de San Luis Potosí

Los resultados para cada componente de esta metodología son graficados en un polígono, en donde las aristas representan el 100% de cada componente. Al ser normalizados los valores el máximo es 1 y el centro del polígono es 0 (**Fig. 3**). El polígono ideal sería aquel en el que todos los componentes del IPA alcancen valores de 1 y formen un hexágono; a medida que se presentan valores menores a 1, se alejan del hexágono y forman un polígono irregular.



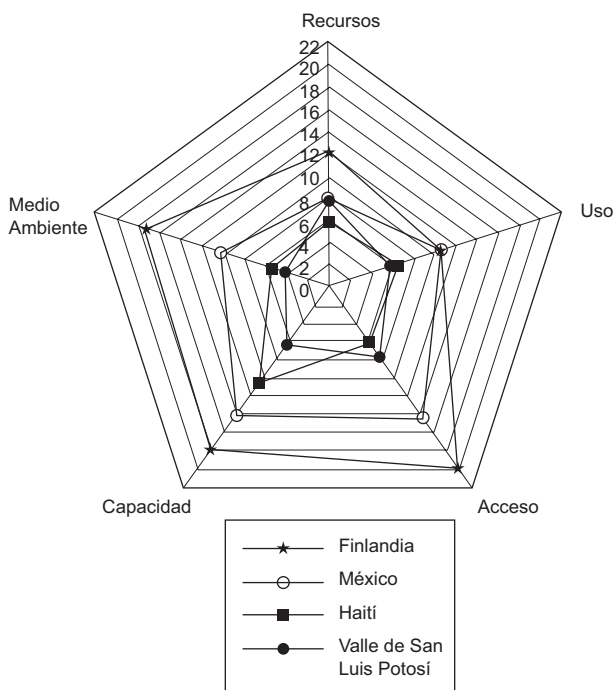
**Fig. 3.** Hexágono del IPA normalizado para el Valle de San Luis Potosí

Por lo tanto, el polígono resultante para el VSLP refleja los graves problemas en el recurso, en las prácticas de uso del agua y en el componente para el ambiente. Los componentes con menor problemática son calidad, acceso y capacidad.

El polígono de la **figura 3** es un reflejo de las condiciones del VSLP, que desde la fundación de la ciudad ha tenido etapas críticas de disponibilidad de agua dando soluciones temporales que son rebasadas en poco tiempo, sin dar un resultado eficaz en el manejo del recurso. Si bien éste es limitado debido a las características naturales, el resto de los componentes puede mejorarse a través de una eficaz gestión, manejo y administración.

En el **cuadro II** se presenta la puntuación obtenida para cada componente y su peso; así como el resultado global del Índice de Pobreza del Agua para el Valle de San Luis Potosí, cuyo valor fue de

46 puntos. Si comparamos este valor, con los no normalizados obtenidos por Lawrence y colaboradores (2002), se observa que está alejado del de los países desarrollados, por ejemplo Finlandia, con un IPA de 78. El del VSLP se encuentra al nivel de los países subdesarrollados considerados con pobreza hídrica como Haití con un IPA de 35.1, incluso resulta menor que el IPA de México que es de 57.5. En la **figura 4**, se muestra la comparación de los valores de los componentes del IPA de Finlandia, México, Haití y el VSLP, sin estar afectados por los pesos.



**Fig. 4.** Pentágono comparativo del IPA sin normalizar del Valle de San Luis Potosí con otros países

Considerando que el valor máximo sin normalizar o ideal es de 100, el valor obtenido para el VSLP, resulta inquietante. Esto indica que deben analizarse no sólo la forma de manejo, gestión y uso del recurso, sino también buscar el vínculo con el bienestar socioeconómico para la población del VSLP.

## CONCLUSIONES

El componente recurso (R), para el caso del VSLP es el que mayor influencia tiene para la determinación del IPA; su valor es de 25.8 y se considera como bajo, lo que puede deberse a dos procesos, uno natural y otro antrópico. El primero se debe a la escasa recarga

del acuífero profundo, que se encuentra en condiciones de minado. El segundo es causado por una alta concentración de aprovechamientos y extracción intensiva del recurso en la zona urbana.

El componente de uso (U), está estrechamente ligado con los volúmenes de extracción para los diferentes usos. En este caso el principal uso es el público urbano, seguido del agrícola y finalmente el industrial. En todos ellos el agua se aprovecha de forma deficiente, lo cual se refleja en una puntuación de 28.8.

Las fuentes de abastecimiento del agua en el VSLP son los acuíferos somero y profundo. En ambos casos se presentan problemas de calidad. En el primero se asocian a un origen antrópico, debido a actividades agrícolas, urbanas e industriales. El profundo presenta altas concentraciones de flúor de origen natural. Estas condiciones se ven reflejadas en el valor de 73.8 para el componente calidad (Q).

A pesar de que el acceso al agua potable en la zona metropolitana del VSLP es alto (86 %), el agua residual generada, no es totalmente tratada (70 %). Por otro lado, en las zonas agrícolas el acceso al agua para esta actividad es de 28 %, que es considerado bajo. La integración de estos subcomponentes dan una puntuación de 75.2 del componente acceso (A).

La zona metropolitana del VSLP concentra el 40 % de la población y el 78 % del PIB estatal, en donde la industria es la principal actividad económica; sin embargo, no se ha visto reflejado en el bienestar de la población, como lo muestra el valor obtenido de 62.6 para el componente de capacidad (C).

La zona de estudio cuenta con una extensa área natural protegida, que representa el 22 % de la cuenca. Sin embargo, ha sido alterada en un 60 % en su vegetación original, lo cual da como resultado un valor de 40 para el componente ambiental (A).

Finalmente, la metodología del IPA es de fácil implementación siempre y cuando exista la información confiable y disponible. Muestra de forma sintetizada las condiciones socioambientales de la región en la que se aplica.

## AGRADECIMIENTOS

Damos las gracias al proyecto 151666, "Problemática socioambiental asociada al uso y manejo del agua en la cuenca del Valle de San Luis Potosí", el cual ha recibido financiamiento del Fondo de Ciencia Básica SEP-CONACyT, en su edición 2010. Así mismo, se agradece al CONACyT por la beca de Estancia Posdoctoral en su convocatoria 2012(3).

## REFERENCIAS

- BM (2005). Global competitiveness index rankings and 2005 comparisons. Banco Mundial Disponible en: [https://members.weforum.org/pdf/Global\\_Competitiveness\\_Reports/Reports/gcr\\_2006/gcr2006\\_rankings.pdf](https://members.weforum.org/pdf/Global_Competitiveness_Reports/Reports/gcr_2006/gcr2006_rankings.pdf) 22/02/ 2012.
- Brown R. y McClelland N. (1973). Water Quality Index. Application in the Kansas River Basin. US-EPA Report. Conf., Water Poll. Fed. Cleveland, Ohio. EPA Region VII. 76 p.
- Cardona A. (2007). Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación. Tesis de doctorado. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, 252 pp.
- Cardona A., Martínez J.E., Alcalde R. y Castro J. (2006). La edad del agua subterránea que abastece la región de San Luis Potosí: Revista Universitarios Potosinos, 2, 20-25.
- Cardona A., (1990). Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Tesis de Maestría, 97 pp.
- Carrillo J. J., Cardona A. y Edmunds W. M. (2002). Use of abstraction regime and knowledge to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. J. Hydrol. 261, 24-47.
- Carrillo J. J., Cardona A. y Moss D. (1996). Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México. J. Hydrol. 185, 23-44.
- CNA (2002). Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero San Luis Potosí estado de San Luis Potosí. Comisión Nacional del Agua. 27 pp.
- CONAGUA (2011). Estadísticas del agua en México 2011. Comisión Nacional del Agua SEMARNAT, 185 pp.
- (CONANP). (2012). Áreas Protegidas Decretadas. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Disponible en: [http://www.conanp.gob.mx/que\\_hacemos/](http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/) 25/01/12
- CONEVAL (2007). Nota Técnica sobre la Aplicación de la Metodología para la Medición de la Pobreza por Ingresos y Pruebas de Hipótesis, 2006. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. 12 pp.
- COTAS (2005). Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 "San Luis Potosí" en el Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí. Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). reporte, 74 pp.
- DOF (2007). Acuerdo por el cual se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí. 7 de Julio de 2010.
- DOF (2009). Aviso se informa al público en general, que está a su disposición el Estudio Técnico Justificativo para la creación de un Área Natural Protegida denominada "Sierra de San Miguelito" localizado en los Municipios de San Luis Potosí, Mexquitic de Carmona, Villa de Reyes y Villa de Arriaga del Estado de San Luis Potosí.
- Dudley N. (2008). Directrices para la aplicación de las categorías de gestión de áreas protegidas. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Gland, Suiza. 96 pp.
- Fernández R. (2005). El impacto de la tarifa eléctrica subsidiada sobre la adopción de tecnología de riego. Tesis de licenciatura, escuela de Ciencias sociales, Universidad de las Américas Puebla. 94 pp.
- García E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5a ed., Instituto de Geografía, Serie Libros, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 90 pp.
- INEGI (1983). Carta Estatal de vegetación y Uso de Suelo actual, escala 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI (2005a). II Censo de Población y Vivienda 2005. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI (2005b). Sistema de cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa 2005. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI (2007). Censo Agropecuario, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal, 2007. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- Jiménez B. y Marín L. (2005). El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. Edición digital 2005, 404 pp.
- Lawrence P., Meigh J. y Sullivan C.A., (2002). The water poverty index: international comparisons. Keele Economics Research Papers. 19 pp.
- López-Álvarez B., Ramos-Leal J., Santacruz-De León G., Morán-Ramírez J., Carranco-Lozada S. y Noyola-Medrano C. (2013a). Effects of change of use of land on an aquifer in a tectonically active region. En: Special Issue on Earth and Environment Sciences. Natural Science 5, 291-295.
- López-Álvarez B., Ramos-Leal J. A., Morán-Ramírez J., Cardona-Benavides C. y Hernández-García G. (2013b). Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 65, 9-26.
- López B. (2012). Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí,

- aplicando modelación numérica. Tesis doctoral, Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 89 pp.
- Marín L.E. (2002). Perspectives on Mexican Ground Water Resources. *Ground Water* 40, 570-571.
- Moran J. (2010). Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí. Tesis de licenciatura, Área de Ciencias de Químico Biológicas, Universidad del Noreste, 68 pp.
- Moreno D., Campos F. y Cisneros F. (2004). Estadística climatológica del observatorio meteorológico de San Luis Potosí. Facultad de ingeniería de la UASLP. Comisión Institucional de Apoyo a la Docencia. 79 pp.
- Napolitano P. y Fabbri A. G. (1996). Single Parameter Sensibility Analysis for Aquifer Vulnerability Assessment Using DRASTIC and SINTACS in Kova K. and Nachtnebel H. P. (eds) *Proc. HydrolGis Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publ. 235, 559-566.
- Noyola M. C., Ramos J. A., Domínguez E., Pineda L. F., López H. y Carbajal N. (2009). Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 395-410.
- Oswald U. (2003). El recurso agua en el alto balsas. Universidad Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, 654 pp.
- Organismo intermunicipal metropolitano de agua potable, alcantarillado saneamiento y servicios conexos de los municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez (INTERAPAS). (2010). Estudio de Diagnostico y planeación integral. Disponible en: [www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica//varios/Taller%20Mig/DIP%20INTERAPAS%20\(abril-2011\)\\_Parte2.pdf](http://www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica//varios/Taller%20Mig/DIP%20INTERAPAS%20(abril-2011)_Parte2.pdf) 23/01/2012.
- Peña F. (2006). Abasto de agua a la ciudad de San Luis Potosí, en Barkin, D. (ed.), *La Gestión del Agua Urbana en México*: México, Universidad de Guadalajara, 249-264.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo/ México (PNUD/México). (2000-2005). Índice de Desarrollo Humano Municipal en México 2000-2005, Nota técnica 4, 3 pp.
- Ramos J.A., López-Loera H., Martínez-Ruiz V.J., Aranda-Gómez J.J. (2007). Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, México) inferida a partir de datos geoelectricos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 24, 31-46.
- Ramos J.A. (2002). Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 106 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2008). Boletín del Archivo Histórico del Agua. Año 13, No. 40, Septiembre- diciembre 2008, 89 pp.
- Sullivan C.A., Meigh J.R., Giacomello A.M., Fediw T., Lawrence P., Samad M., Mlote S., Hutton C. Allan J.A., Schulze R.E., Dlamini D.J.M., Cosgrove W., Delli Priscoli J. Gleick P., Smout I. Cobbing J., Calow R., Hunt C., Hussain A., Acreman M.C., King J. Malomo S., Tate E.L., O'Regan D., Milner S. y Steyl I. (2003). The water poverty index: development and application at the community scale. *Natural Resources Forum*, 189-199.
- Sullivan C.A., Meigh J.R. y Fediw T.S. (2002). Derivation and Testing of the Water Poverty Index Phase 1. Final Report, Vol. 1. Center for Ecology and Hydrology, 43 pp.
- Sullivan C. A. (2002). Calculating a water poverty index. *World Development* Vol. 30, No. 7, 1195-1210.
- Sullivan C. A. (2001). The Potential for Calculating a Meaningful Water Poverty Index. *International Water Resources Association. Water international* Vol. 26, No. 4, 471-480.
- Verbst K., Santibañez F., Gabriels D. y Soto G. (2010). Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Documento Técnico del PHI-LAC, No. 25. 48 pp.