



Project
MUSE[®]
Scholarly journals online

Posibles Controles Hidrogeológicos de Impacto Ambiental por la Extracción de Agua Subterránea en Xochimilco, México

Gabriela Angeles-Serrano

*Centro de Investigaciones sobre América del Norte
Universidad Nacional Autónoma de México*

María Perevochtchikova

*Centro de Estudios Urbanos, Demográficos y Ambientales
El Colegio de México*

J. Joel Carrillo-Rivera

*Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México*

Resumen

Desde mediados del siglo pasado el manejo ineficaz del agua en varios sitios del país ha producido diferentes impactos ambientales resultantes de una administración que no incorpora el funcionamiento del agua subterránea. En el Área Natural Protegida de Xochimilco (ANP-X), ubicada al sureste de la Cuenca de México, se observan impactos al ambiente como la consolidación del subsuelo, y cambio en la calidad y cantidad del agua extraída por pozos que parcialmente abastecen a la Ciudad de México. Este estudio aborda desde una perspectiva interdisciplinaria el papel del agua subterránea de la Cuenca de México con base en el análisis de los sistemas de flujo de agua subterránea para definir las causas principales, efectos, y posibles controles al impacto ambiental resultante de la extracción intensiva.

Palabras clave: *Sistemas de flujo, impacto ambiental, subsidencia, contaminación del agua, México, Xochimilco*

Abstract

Since the middle of the last century through an inefficient water handling in several sites of the country different environmental impacts related to groundwater extraction have appeared. Thus, the National Protected Area of Xochimilco (ANP-X), located in the southeast area of the Basin of Mexico, has been affected by differential soil consolidation, and changes in the quality and amount of the groundwater extracted by boreholes. These boreholes partially supply Mexico City. In the present study an interdisciplinary approach to the water resources of Basin of Mexico was applied to achieve an understanding of the natural functioning of the flow systems through a flow system analysis. The main causes, effects and possible controls of environmental impacts due to intensive groundwater abstraction are discussed.

Keywords: *Flow systems, environmental impact, subsidence, water contamination, Xochimilco, Mexico.*

Introducción

En muchas partes del mundo, la causa principal de los impactos ambientales

relacionados con el agua es una inadecuada actuación de las comisiones de gobierno responsables de su manejo (Shelutko 2002). En el caso de México, el enorme crecimiento demográfico de la Ciudad de México y su zona metropolitana, históricamente superó la capacidad para una planeación y administración adecuada del agua. En este territorio que forma parte de la Cuenca de México, los efectos negativos a la infraestructura de la ciudad ocasionados por la subsidencia, las inundaciones debidas al cambio topográfico, así como otros impactos como el desecamiento de manantiales y deterioro de fuentes de agua, impulsaron los primeros trabajos para entender estos impactos. Sin embargo, a pesar que el aprovechamiento del agua subterránea comenzó desde mediados del siglo XIX y se intensificó desde principios de siglo pasado con la aparición de algunos estudios exploratorios, de diagnóstico y prospectivos (Peñañiel 1884), sólo hasta la década de 1980 se comenzó a investigar en la definición de mecanismos clave que controlan el flujo de agua subterránea (Durazo y Farvolden 1989; Ortega y Farvolden 1989; Rudolph et al. 1989); y su interrelación con impactos ambientales que se generan por su extracción sin una adecuada estrategia de control (González-Morán *et al.* 1999; Huizar-Álvarez *et al.* 2004).

En particular, el estudio del fenómeno de subsidencia (hundimiento del suelo) relacionado con el aprovechamiento de agua subterránea comenzó a registrarse de manera regular hasta la década de 1930, aunque los primeros indicios de presencia del fenómeno datan de fines del siglo XIX (Marsal *et al.* 1952; Marsal y Mazari 1959). Desde entonces, se ha profundizado en conocer la naturaleza del fenómeno, a pesar de esto la subsidencia continúa representando un problema para la Ciudad de México (Lugo *et al.* 2001). La prohibición de la extracción en algunos puntos de la ciudad ha sido la medida que parece explicar la desaceleración del hundimiento en algunos puntos como el Centro Histórico (Santoyo et al. 2005). Sin embargo el aprovechamiento del agua subterránea de flujos locales continúa siendo la principal fuente de abasto para la Ciudad de México y su zona metropolitana, por lo que para la autoridad reguladora, resulta difícil plantear escenarios de restricción factibles de ser aplicados en el corto o mediano plazo. Otra estrategia propuesta para estabilizar el hundimiento del suelo ha sido la inyección artificial de agua al subsuelo para estabilizar el material compresible. Estas soluciones no han sido exitosas por la fuerte inversión que requieren y la baja capacidad técnica e institucional que persiste (CNA 2004).

Lo anterior se complica si se considera que las mejoras propuestas en la administración inter- e intra-organizacional, y en el financiamiento, no garantizan la mitigación de alguno de los impactos antes mencionados, debido entre otros factores, a que el recurso agua es administrado sin la aplicación de un enfoque sistémico manejado a través de un programa interdisciplinario, cuyo objetivo clave sea integrar elementos de funcionamiento local y regional. Entonces un manejo del recurso basado en el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, y no sólo con base en su potencial en cantidad y calidad, es estratégico para el mantenimiento de funciones ambientales claves para la ciudad en el largo plazo.

La definición del funcionamiento del agua subterránea bajo el enfoque teórico de los sistemas de flujo va más allá de la cuantificación, mediante un balance hídrico anual, de la cantidad de agua “disponible” y, desde una aproximación más comprensiva, incorpora manifestaciones del comportamiento del flujo de agua subterránea, como son por ejemplo, la presencia de un tipo particular de suelo, vegetación, presencia de manantiales con distinta calidad y temperatura, así como considera los cambios espaciales y temporales de controles particulares del flujo subterráneo como son el marco geológico, la topografía y el clima (Tóth 2000).

Debido al número de interrelaciones ambientales que involucran al agua subter-

ránea, es preciso definir cómo los diferentes tipos de control hidrogeológico se ligan con los impactos ambientales identificados. En este sentido, diferentes manifestaciones de la descarga de flujo de agua subterránea se observan aún en zonas dentro de la Ciudad de México, como en el suelo de conservación de Xochimilco, ubicado al sureste de la Cuenca de México. Estas manifestaciones al ser analizadas desde la perspectiva de los sistemas de flujo, permiten identificar su funcionamiento hidrológico y su interacción con procesos que suceden a escala regional.

El suelo de conservación de Xochimilco y San Gregorio al sureste de la Ciudad de México, es actualmente un Área Natural Protegida (ANP-X) y Patrimonio de la Humanidad por el interés cultural y ecológico que representa y que se remonta a sus orígenes prehispánicos (Larregui 2004). Asimismo, ejemplifica una zona ambientalmente valiosa como zona de descarga natural donde el flujo de agua subterránea emerge como manantiales en la superficie del terreno y en el lecho de los cuerpos de agua (Durazo y Farvolden 1989), lo que da origen a una variedad de procesos ambientales relacionados con el flujo del agua subterránea.

Desde principios del siglo XX, en la Cuenca de México, se realizan registros del hundimiento del terreno, con los que se estudia su relación con la extracción de agua subterránea (Marsal *et al.* 1952; Marsal y Mazari 1959; NRC 1995). Asimismo, se llevaron a cabo trabajos de investigación sobre las propiedades de mecánica de suelos del material de relleno que aflora en la parte topográficamente más baja de la cuenca, en especial en el acuitardo –unidad hidrogeológica de material lacustre de tipo arcilloso con muy baja conductividad hidráulica– así como estudios hidrogeológicos que abordan la dinámica del flujo subterráneo y cambios en su composición química por actividad humana que inciden en la respuesta local del agua subterránea extraída por medio de pozos (Edmunds *et al.* 2002, Huizar-Álvarez *et al.* 2004). Sin embargo, los crecientes impactos ambientales identificados a escala local:

- i) manantiales desecados, cuya desaparición coincide con el auge en la construcción de pozos, por ejemplo en Xochimilco y otros lugares de la cuenca a fines de los años 1950s
- ii) consolidación del suelo, la cual no muestra relación directa con la creciente cantidad de agua subterránea extraída, y
- iii) un creciente deterioro de la calidad del agua subterránea que se extrae y que es potencialmente dañina a la salud de la población, sugieren que el enfoque disciplinar y fragmentado de los estudios realizados, no es el adecuado.

Impactos ambientales como la consolidación diferencial del suelo y sus consecuencias, han sido estudiados en otros sitios de la Cuenca de México con un enfoque predominantemente hidrogeológico (Durazo y Farvolden, 1989; Rudolph *et al.* 1991; Edmunds *et al.* 2002; Huizar-Álvarez *et al.* 2004) y se retoman aquí para analizar los procesos de deterioro de la ANP-X relacionados con la extracción de agua subterránea, con objeto de discutir sobre sus manifestaciones y dinámica a fin de definir causas y efectos de los impactos ambientales relacionados con la extracción de agua subterránea, así como los posibles impactos de esa extracción a partir de:

- a) Explorar indicadores del funcionamiento del agua subterránea que permitan distinguir su interacción con el agua superficial,
- b) identificar factores hidrogeológicos que pueden controlar el hundimiento del suelo,
- c) identificar factores que controlan la calidad del agua subterránea a escala local

Ubicación del área de estudio

La Cuenca de México es naturalmente endorreica, con una superficie aproximada de 9,600 km² y se encuentra delimitada por los siguiente relieves: Sierras de Pachuca y de Tepozotlán al norte; sierras de Calpulalpan, Río Frío y Nevada al oriente; Sierra Chichinautzin al sur; y sierras de Las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y Tolcayuca al poniente. Dentro de este límite existen elevaciones con diferente altitud que forman valles fluviales; sin embargo, todos los avenamientos convergen hacia la planicie lacustre de la cuenca.

El ANP-X se encuentra al sur de la Cuenca de México, en la parte sureste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Figura 1) en una planicie situada a una elevación aproximada de 2,240 msnm.

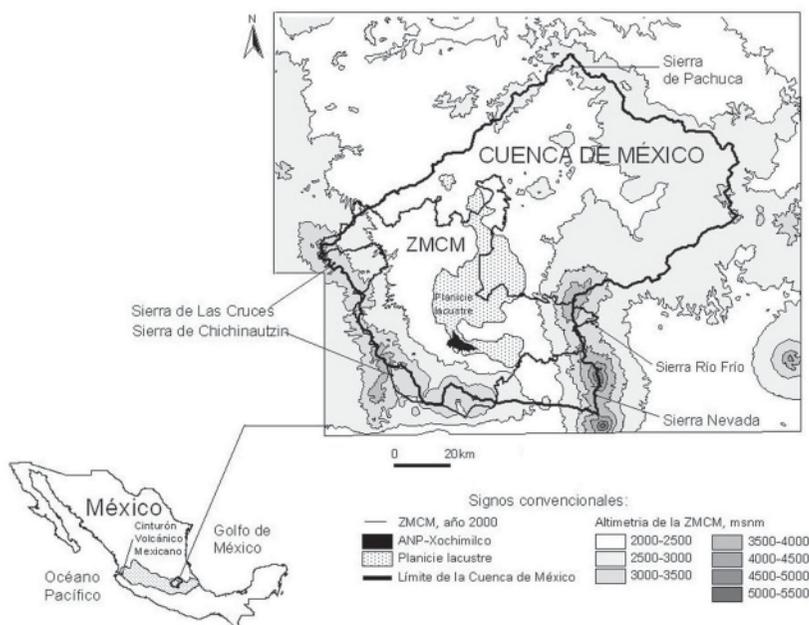


Figura 1.

Esta área tiene la categoría de Patrimonio Cultural de la Humanidad otorgada por la UNESCO debido a que conserva una tecnología prehispánica de cultivo agrícola intensivo denominado *Chinampa*, ejemplo de un sistema agrícola muy productivo y sustentable que, sin embargo, está en riesgo de perder el apoyo de la UNESCO, debido a los impactos ambientales existentes por la presión de urbanización que presenta. A pesar del deterioro, este territorio continúa proporcionando una variedad de beneficios hidrogeológicos, ambientales y de patrimonio cultural (Carrillo-Rivera *et al.* 2002; Angeles-Serrano *et al.* 2006).

Descripción hidrográfica de la Cuenca de México

El relieve de cuenca endorreica y una dinámica hidrológica superficial de lluvias torrenciales en verano (precipitación media de 600 mm. anuales) y la descarga de agua subterránea de sistemas locales (de baja salinidad y temperatura media) y regionales (con

mayor salinidad y agua termal) permitió la formación de un sistema de lagos: Texcoco, Tenochtitlan, Xochimilco-Chalco, Xaltocan y Zumpango los cuales en períodos de mayor precipitación se fusionaron resultando en una amplia planicie lacustre (Figura 1). El lago de Texcoco contenía agua salobre mientras que los de Tenochtitlan y Xochimilco eran de agua dulce. Para evitar la mezcla de estas aguas y controlar inundaciones, estos cuerpos fueron separados mediante un bordo conocido como Albarradón de Netzahualcoyotl que data de la época prehispánica (Rojas-Rabiela 2004).

Estas condiciones hídricas prevalecieron hasta fines del siglo XVIII, época en que los lagos de Tenochtitlan y de Texcoco fueron prácticamente desaguados de manera artificial, iniciándose el desecado de los lagos de la Cuenca de México, con el Túnel de Tequisquiác y posteriormente con el Tajo de Nochistongo, ambos construidos a través del parteaiguac norte. Dentro de los principales drenes secundarios construidos a cielo abierto en la ciudad destacan los de Chalco y Nacional, y dentro de los cauces naturales el más importante es el Río Churubusco que fue entubado a lo largo de su cauce y ahora constituye un importante drenaje de agua residual y pluvial (NRC 1995).

La lluvia acacia en la cuenca produce una escorrentía que desciende por valles entre serranías y lomeríos, la cual en su conjunto se estima equivale a un caudal continuo de $180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y su aprovechamiento se limita al transporte del agua residual generada en la ciudad. La densidad de avenamiento en las partes elevadas asociadas al ANP-X es baja, dado que están constituidas por coladas de lava basáltica del Cuaternario altamente permeable que disminuyen la generación de escorrentía superficial, sobre todo en la sierra de Chichinautzin.

Aspectos hidrogeológicos

La Cuenca de México se localiza al centro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) que es una extensa franja E-W que atraviesa el centro de México con una longitud y anchura de 950 km. y 110 km., respectivamente. El Cinturón es resultado de una actividad volcánica de tipo andesítico-basáltica del Terciario con derrames esporádicos de rocas riolíticas durante el Terciario Medio y andesitas-basálticas del Plioceno Tardío-Holoceno. La mayor parte de la actividad volcánica está alineada sobre fallas regionales con una orientación E-W, a la que se incorporan otros sistemas de falla principales como el NW-SE en la parte oeste y el NE-SW en la parte este. Diversos episodios tectónicos produjeron una serie de fosas y pilares que son característicos en esta región y que han formado una sucesión de cuencas, a lo largo del CVT, cuyo relleno presenta una secuencia variable de sedimentos que alcanza un espesor superior a 500 m (Carrillo-Rivera *et al.* 1998). Asimismo, se encuentra material volcánico más antiguo resultado de diferentes efusiones representadas por lava y ceniza con un espesor del orden de 2,000 a 3,000 m. Esta secuencia de material volcánico descansa sobre roca caliza del Cretácico con un espesor estimado en más de 1,500 m (Edmunds *et al.* 2002). La roca basamento (impermeable) que contiene a toda esta columna estratigráfica que potencialmente contiene agua subterránea no ha sido definida.

Unidades hidrogeológicas

En el subsuelo de la Ciudad de México se encuentra un sistema hidrogeológico de extensión regional constituido por material de tipo granular y fracturado (Edmunds *et al.* 2002). El primero de origen volcánico (cenizas) y sedimentario con un espesor de más de 500 m. está parcialmente cubierto por una capa de material de grano muy fino denominada acuitardo porque almacena una gran cantidad de agua subterránea pero la cede en forma limitada y escasamente aprovechable. Esta capa en algunos lugares del

ANP-X presenta un espesor hasta de 80 m, y alcanza más de 300 m. en la zona oriente de la cuenca (CONSERVA 2000). El espesor total de material granular sobreyace el material fracturado que consiste de unidades de roca del Terciario de origen volcánico, las cuales afloran junto con material volcánico del Cuaternario y se intercalan con el material granular. La prominente topografía y esta heterogeneidad geológica vertical sugiere patrones complejos del flujo de agua subterránea que se extienden regionalmente hasta más allá de la vecindad de las ciudades de México, Toluca, Puebla y Pachuca, y presenta un espesor conjunto de más de 2,000 m. (Edmunds *et al.* 2002). La conductividad hidráulica (K) de unidades acuíferas existentes en la Cuenca de México presenta valores de entre 10^{-2} a 10^{-6} ms^{-1} , así como una porosidad (n) de 0.1 a 0.3; valores que significan una velocidad de flujo del orden de pocos centímetros a decenas de metros por año y un potencial alto de aprovechamiento por pozos que puede variar de 10 a 200 ls^{-1} (Vázquez-Sánchez, 1995; Huizar-Álvarez *et al.* 2004).

El paquete de material fino que constituye el acuitardo presenta una conductividad hidráulica (K) en el plano horizontal con valores de $4.9 \cdot 10^{-6}$ a $1.7 \cdot 10^{-4}$ ms^{-1} , y en el plano vertical con valores del orden de 10^{-9} ms^{-1} (Vargas-Cabrera 1995), ambos valores corresponden también con resultados de pruebas de recuperación con piezómetros hincados hasta profundidades del orden de 25 m. (Rudolph *et al.* 1991). El contenido de agua de estos sedimentos llega a ser del orden del 600% ó más (NRC 1995). El agua subterránea contenida en el acuitardo lacustre presenta valores de sólidos totales disueltos de 100 a 800 mg l^{-1} , pero esta composición tiene amplia variabilidad en el plano vertical y horizontal (DGCOH 1994). En una secuencia litológica inferida a partir de pozos de extracción que limitan el ANP-X, se observa tanto la presencia aflorante de un acuitardo de espesor es variable, como de diferentes unidades acuíferas (Figura 2).

Funcionamiento del agua subterránea

En la Ciudad de México, la extracción del agua subterránea por medio de pozos se inició en 1847, a partir de esa fecha el crecimiento de pozos fue vertiginoso (Aboites 1998), para 1864 existían ya 200 pozos de carácter artesiano, 483 para 1877 y 1,100 en 1888 (NRC 1995:132). A principios de siglo XX, con lo asequible de la bomba eléctrica se intensificó la extracción de agua subterránea por pozos cada vez más profundos, así, entre 1936 y 1944 se perforaron 93 pozos profundos. Estas obras se sumaron al proyecto de captación de los manantiales de Xochimilco llevado a cabo en 1913, sin embargo, no resultaron suficientes para resolver los problemas de abasto de la ciudad, por lo que en 1942 se propone la captación y conducción de agua de los manantiales de Lerma a la Ciudad de México (Marroquín y Rivera 1914 citado en Aboites 1998:174). A pesar de la creciente dependencia que se ha tenido de fuentes de agua subterránea, en el ámbito de los tomadores de decisión, su interés por estudiar el agua subterránea y conocer su funcionamiento ha sido limitado comparado con la importancia que tiene en el desarrollo del país. Aunado a su importancia socioeconómica, el agua subterránea mantiene funciones de ecosistema claves, pero poco conocidas.

Como alternativa a la visión fragmentada de la condición del recurso y de los impactos ambientales causados por una extracción ineficiente, se aplica un enfoque metodológico, que incorpora una visión dinámica y holística del flujo subterráneo a través de una serie de indicadores directos e indirectos que se desprenden del "análisis de los sistemas de flujo" (Tóth 2000). Estos indicadores permiten definir al agua en términos de cantidad y calidad, y explicar su funcionamiento a partir de esclarecer procesos y respuestas ambientales que son resultado de un manejo específico. Dentro de los indicadores se tienen elementos de tipo hidrológico, hidrogeoquímico, geológico, topográfico, edafológico, y de vegetación.

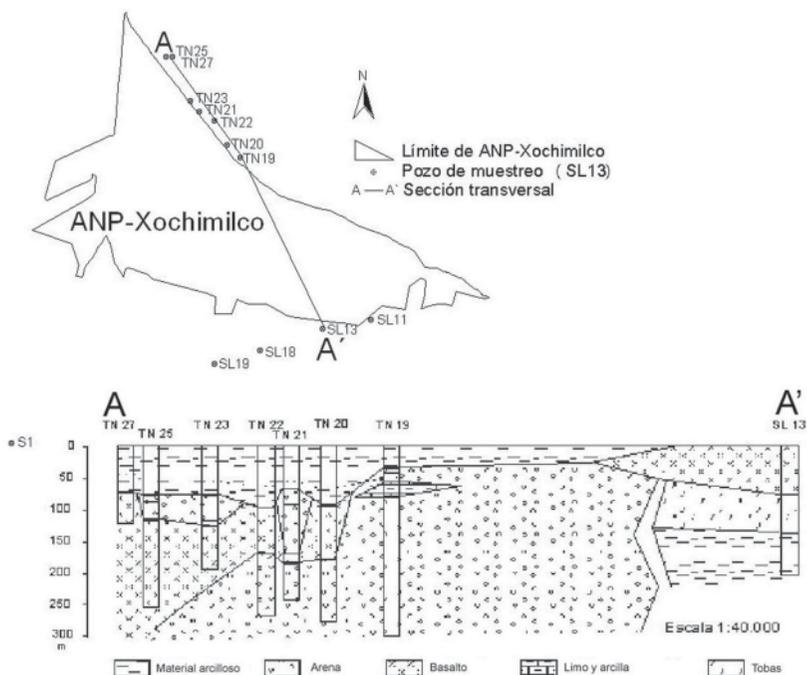


Figura 2.

El análisis de los sistemas de flujo permite jerarquizar el movimiento del agua subterránea y establecer el funcionamiento del ANP–X en relación con el resto de la Cuenca de México y cuencas adyacentes y permite definir indirectamente las condiciones del agua subterránea en partes altas de la cuenca, donde la información es insuficiente.

Consolidación del suelo

Existen dos principales causas del hundimiento del suelo: (i) por condiciones naturales (influencia tectónica, respuesta sísmica, relación agua meteórica – material saturado) y (ii) por influencia antrópica (construcción de obras de ingeniería civil, y efectos relacionados con la extracción de petróleo, minerales o agua subterránea).

La extracción de agua subterránea puede provocar o activar varios impactos ambientales como son: extensión de fallas geológicas, agrietamiento y/o consolidación del suelo. La consolidación del suelo es la compactación de una unidad de material geológico por pérdida del agua de saturación. En términos de mecánica de suelos es un cambio en la presión de poro (Pporo) que en cualquier punto de la zona saturada se refleja como una disminución de la presión hidráulica (Phidráulica), ya que la presión total (Ptotal) en cualquier punto se mantiene constante, de acuerdo con la relación:

$$P_{total} = P_{poro} + P_{hidráulica} \quad (1)$$

Dado que la presión total se mantiene constante, al disminuir la presión hidráulica, aumentará la presión de poro, lo cual se manifiesta como una compactación o consolidación del volumen del material afectado, y esto se traduce a su vez como subsidencia o hundimiento del terreno. Existen cuatro fenómenos físicos principales ligados al proceso

antes descrito, que contribuyen al aumento de la presión de poro, pero cuyo efecto es frecuentemente subestimado, de acuerdo con Bouwer (1978), estos son: a) reemplazo de agua fría por agua caliente (la presión hidráulica es función de la temperatura) b) transferencia de agua a otro estrato geológico c) cambio de dirección del flujo ascendente (de descarga) a flujo descendente o “no flujo” d) construcción de infraestructura pesada sobre el suelo.

Los dos primeros fenómenos tienen relación con el manejo local del agua subterránea. En el primer caso, la extracción en cuencas de gran espesor como la de México, puede inducir localmente el ascenso de agua termal de menor densidad desde unidades geológicas más profundas (Carrillo-Rivera *et al.* 1998), la cual produce un nuevo equilibrio de carga hidráulica, y en consecuencia un aumento en la presión de poro. El segundo, es una consecuencia indirecta de la extracción que produce un flujo de agua desde el acuitardo arcilloso hacia el material acuífero subyacente, cuando existe comunicación hidráulica entre ambos (condiciones semiconfinadas), ya que al extraer agua del material acuífero se induce un “goteo” (en inglés *leakage*) desde este material. Al tener el acuitardo un alto grado de saturación hasta de un 600% (Marsal *et al.* 1952) y una K de 10^{-9} a 10^{-12} ms^{-1} (Vázquez-Sánchez 1995), el agua subterránea se desplaza en éste a una velocidad muy baja, sin embargo, como se desplaza a través del área de contacto entre el acuitardo y el acuífero, el caudal que migra a este último produce una respuesta de consolidación. De la misma forma, la pérdida de presión en el material que compone el acuífero subyacente, puede ocasionar un incremento adicional en la consolidación del sistema acuitardo-acuífero. Esta pérdida de presión, de acuerdo con estimaciones realizadas, puede causar un hundimiento adicional del orden de 0.01 a 0.02 m por año (Bouwer, 1978).

El tercer fenómeno, se relaciona con la extracción a escala regional, pues se manifiesta por un abatimiento regional del nivel freático, como resultado de la varios impactos ambientales como el cambio de uso de suelo (y sus efectos en las condiciones de recarga), así como la extracción de agua subterránea de sistemas de flujo regional cuya recarga se genera fuera de la cuenca. Este cambio de naturaleza regional en la dirección original del flujo, disminuye el caudal de descarga en el punto y esto se manifiesta como subsidencia del suelo. Dado que la Ciudad está construida en su mayor parte sobre el material lacustre, a la pérdida de presión hidráulica hay que añadir una fuerza adicional por el peso de los edificios en aquellas zonas altamente urbanizadas. En el caso del ANP-X, este efecto tendrá gran relevancia en la medida que continúe la invasión de las chinampas y el cambio de uso de suelo.

Velocidad de movimiento del agua subterránea

La velocidad de movimiento es la rapidez con la que una molécula de agua se traslada de un lugar a otro a través de poros o fracturas contenidos en un material geológico. El control de la velocidad del agua (V , m/s) es función de la carga hidráulica (gradiente hidráulico, J , m/m), y la conductividad hidráulica (K , m/s) que es una medida de la facilidad con la que el agua se trasmite en un material geológico y es inversa al espacio efectivo donde tiene lugar el movimiento del agua y que está determinado por la porosidad (n , m^3/m^3):

$$V = (JK)n^{-1} \quad (2)$$

En condiciones naturales el flujo del agua en el área era semiconfinado con una componente vertical ascendente, pero debido a la extracción se produce un movimiento de agua descendente (del acuitardo al acuífero), lo que presenta un cambio de dirección del gradiente hidráulico. Debido a que con la extracción por pozos el nivel piezométrico

desciende por debajo del techo del acuífero. Esto reduce la K en el área del acuífero en contacto con el acuitardo en dos o tres órdenes de magnitud a la que tiene en condiciones saturadas (Stephens 1996). Esto significa que cuanto menor sea el valor de K menor será el caudal de agua, Q , que en un medio determinado se transmite, en este caso desde el material acuífero (granular) que está en contacto con el acuitardo. El caudal que migra del acuitardo al material acuífero depende de la relación:

$$Q = KJA \quad (3)$$

Donde, A es la superficie de la base del acuitardo (m^2).

De acuerdo con la Ec. 3, una disminución del goteo (Q) del acuitardo al acuífero puede ser un factor de control local del ritmo de consolidación del suelo, independientemente de la extracción regional.

Procesos de cambio de las condiciones del ambiente

Cambio en el régimen hidrológico, aspectos generales del impacto ambiental

Una evidencia del tipo de descarga natural de agua subterránea que se encuentra en el área de estudio, puede observarse por el tipo de vegetación que se encuentra asociada a ésta (Carrillo-Rivera *et al.* 1997; Angeles-Serrano *et al.* 2006). En el caso de Xochimilco, se infiere por el tipo de vegetación asociada, que estos presentaban una temperatura media y una baja concentración de Cl^- (menor a 10 mg l^{-1}), pues esta calidad de agua se asocia con la presencia de vegetación riparia tal como pastos acuáticos, carrizales, sauces y tepozanes, principalmente de los géneros *Juncus*, *Berula*, *Sagittaria*, *Ludwigia* y *Salix* (Espinosa, 1996). A su vez una baja salinidad en el lago de Xochimilco sugiere un aporte de flujo de tipo local e intermedio (Durazo y Farvolden 1989). En contraste, un aporte de flujo regional implica un mayor recorrido (distancia y profundidad) que los anteriores, por lo que generan manantiales de tipo termal con alto valor de temperatura y salinidad, como la reportada en el Lago de Texcoco y el manantial en Peñón de los Baños con temperatura de 38 a 42° C y salinidad de $2,500 \text{ mg l}^{-1}$ (Edmunds *et al.* 2002, Huizar-Álvarez *et al.* 2004), condiciones que se asocian con vegetación halófila dominada por gramíneas como *Distichlis spicata* o *Eragrostis obtusiflora* (Espinosa, 1996).

En Xochimilco la extracción de agua subterránea comenzó a intensificarse en la década de 1940 para cubrir las necesidades derivadas del crecimiento de la ciudad de México y evitar el hundimiento registrado en el centro histórico cuya velocidad era para entonces superior a 0.40 m a^{-1} (Santoyo *et al.* 2005). La desaparición de manantiales que alimentaban los canales de Xochimilco fue una de las primeras evidencias de alteración de las condiciones de descarga natural, posteriormente también se notó la disminución del nivel de agua en los canales. Ambos efectos se atribuyeron a la construcción de campos de pozos que captaban el flujo de agua subterránea que alimentaba la descarga natural. Ante la presión al gobierno por parte de los dueños de chinampas por afectaciones a la navegación y cultivos, fue necesario compensar la pérdida del agua de descarga natural con agua tratada proveniente de la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella, cuya construcción se encontraba al 75% para 1958 (Perló 1989).

Cambios en el proceso de consolidación

Desde mediados del siglo XIX, el efecto más notorio de la extracción de agua en la planicie lacustre de la Cuenca de México ha sido la consolidación local del suelo, donde la extracción de agua subterránea ocurrió inicialmente con la construcción de pozos

de poca profundidad (menos de 15m), que resultaron artesianos (Durazo y Farvolden 1989). El caudal que se extraía de los primeros pozos construidos dependía de las características encontradas en dos estratos rocosos intercalados en el material que constituye el acuitardo, a una profundidad entre 10 y 40 m, denominado “capa dura” (NRC 1995). La intensificación de la extracción de agua de estos estratos contribuyó a aumentar la pérdida de presión en el acuitardo y hacer notorio el hundimiento. En los años 1930s con el acceso a técnicas de perforación desarrolladas para la industria petrolera se inicia la construcción de campos de pozos de 100 a 200 m de profundidad, entonces el agua subterránea comenzó a obtenerse directamente del material acuífero que subyace al acuitardo y no únicamente de los materiales más productivos que se interdigitaban en el mismo, esto aceleró tanto la velocidad de consolidación del acuitardo como del acuífero subyacente. De acuerdo con registros publicados, la velocidad de consolidación presentó un pico de 0.45 m/año^{-1} en los primeros años de la década de 1950's y luego se ha reducido drásticamente a unos 0.05 m/año . En este mismo periodo, la extracción de agua subterránea aumentó de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (principios de los 1950s) a más de $55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a fines de los 1990s. Los datos en la Figura 3 sugieren que la tasa de hundimiento del suelo se ha reducido en el periodo en el que la extracción de agua subterránea se incrementó a escala regional en toda la Cuenca.

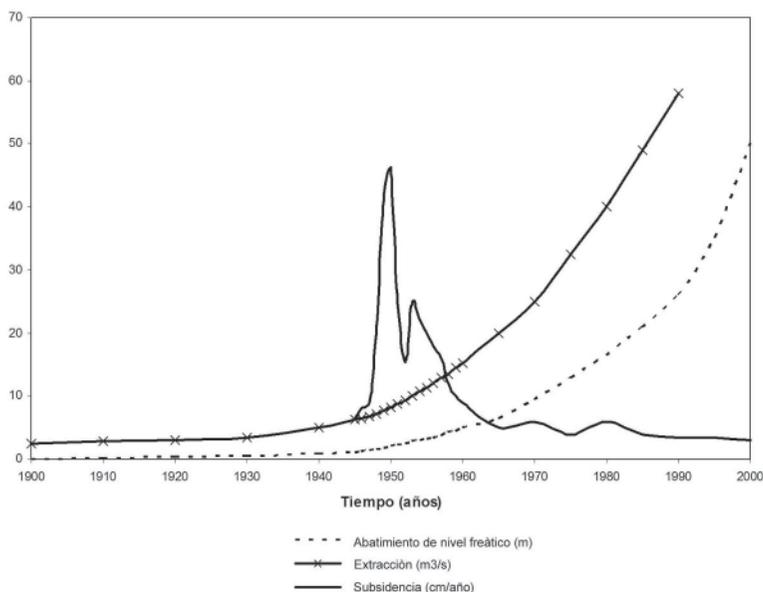


Figura 3.

Lo anterior por lo común se explica como un resultado del desplazamiento de los campos de pozos hacia la periferia de la ciudad (Santoyo *et al.* 2005), por ejemplo se incrementó la extracción en Xochimilco y Chalco. En este último las primeras observaciones de subsistencia se realizaron desde la década de los 1980 y actualmente es una de las zonas donde más se ha estudiado este fenómeno en la Cuenca de México (Rudolph *et al.* 1991; González-Morán *et al.* 2001; Ortega 2004).

La planicie lacustre del lago de Xochimilco constituye una gruesa y heterogénea

secuencia de material sedimentario de origen lacustre y aluvial que fue transportado por corrientes fluviales que descendían de las sierras circundantes como Xochitepec y Nevada. Esta secuencia de material heterogéneo es un importante control del flujo subterráneo cuyas propiedades mecánicas parecen responder de la misma forma que la aldedaña planicie lacustre de Chalco durante el periodo de extracción intensiva. Sin embargo, debido a que la ANP-X es un área protegida donde es improbable que se presenten daños a la infraestructura, no hay un sistema de medición de los efectos que produce la extracción que se ubica en los alrededores, tampoco existe información sobre la composición del subsuelo del ANP-X, sino únicamente de las zonas aldedañas donde se encuentran los pozos de extracción (Figura 2). Debido a esto no es posible precisar la velocidad de consolidación en el sitio o el periodo en el que ha tenido lugar, sin embargo es posible plantear hipótesis sobre sus efectos sobre el sistema de canales y chinampas que aún se encuentra. Observaciones de campo efectuadas en el ANP-X llevadas a cabo durante la realización de este trabajo, indican que existió un efecto de consolidación que resultó en un hundimiento del suelo en zonas no urbanizadas, estos hundimientos diferenciales incrementaron la susceptibilidad del terreno a formar lagunas dada la baja capacidad de infiltración del material del suelo lacustre. Estos hundimientos diferenciales asociados con un deficiente sistema de drenaje, han sido factores que históricamente han contribuido a la inundación de las Chinampas. Un proceso relacionado con el hundimiento y la desecación por disminución del aporte continuo de agua subterránea hacia las mismas es la salinización que ocurre desde inicios de la extracción intensiva en los 1950s. En forma adicional al hundimiento del suelo se han producido agrietamientos desde la década de 1970 (Lugo *et al.* 2001).

Aunque los efectos de la consolidación, como la formación de hondonadas inundables, son observables en el ANP-X aún en fechas recientes. Este proceso de consolidación puede llevar otra tendencia, como sugieren los resultados de nivelaciones detalladas realizadas en los alrededores del ANP-Xochimilco por la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal. Estos registros señalan que en la década de los 1980s el hundimiento del suelo era del orden de -0.49 a -0.25 maño^{-1} , y para la década de 1990s la velocidad de hundimiento era menor, de -0.28 a -0.22 maño^{-1} . Esta tendencia continúa, y para el año 2000 los valores reportados son de -0.18 maño^{-1} , reportándose valores positivos de 0.02 maño^{-1} (Carrillo-Rivera *et al.* 2002). Estos datos sugieren fuertemente que la relación entre un aumento local de la extracción y una disminución en la velocidad de consolidación son consecuencia de la reducción del flujo vertical descendente del acuitardo al material acuífero subyacente debido al cambio a las condiciones del acuífero de semi-confinado a libre. En otras palabras, parece que conforme se disminuye la comunicación hidráulica entre el acuitardo y el material acuífero, la respuesta de hundimiento dependerá en mayor medida del comportamiento local de los materiales al flujo subterráneo, y menos del incremento en la extracción.

Factores hidrogeológicos clave en el control de la consolidación

La respuesta observada de disminución de la velocidad de consolidación, evidencia un control hidrogeológico que depende de la forma en como se realiza la extracción y no del caudal total. Como se explicó en párrafos anteriores, un abatimiento del nivel potenciométrico de la unidad acuífera subyacente por efecto de la extracción (más de 46 m. por debajo del piso del acuitardo), induciría la formación de una fase intermedia no-saturada en el contacto entre el acuitardo y el material acuífero donde la conductividad hidráulica en el material acuífero no saturado disminuiría al grado tal de limitar el paso del goteo producido por la pérdida de potencial en el material acuífero y por consiguiente el volumen de agua que podría migrar del acuitardo. Lo anterior causa una menor pérdida

de presión hidráulica y por tanto podría producir una estabilización del hundimiento. Por tanto, la formación de esta fase no saturada puede ser un factor de importancia en la disminución del ritmo de consolidación en ciertos puntos del acuitardo a pesar del incremento en la extracción de agua subterránea con el tiempo. Así, la independencia entre la velocidad de consolidación y el caudal de extracción que parece mostrar la Figura 3 a través del tiempo, permite plantear la hipótesis que a escala local, la consolidación del suelo en las zonas que comprenden la antigua planicie lacustre, es un proceso que presenta otros controles hidrogeológicos debidos al comportamiento del flujo en un material geológico heterogéneo, y la disminución del grado de saturación del material acuífero subyacente al acuitardo.

Cambios en la calidad del agua subterránea y factores clave de control

La excelente calidad de agua de las descargas naturales en el sistema de lagos Xochimilco-Chalco se conservó hasta mediados del siglo pasado (Durazo y Farvolden 1989). Sin embargo, las dificultades para desalojar el agua residual y presiones derivadas de la creciente urbanización sin un adecuado saneamiento, incrementaron desde mediados del siglo pasado la descarga directa a canales y cuerpos de agua remanentes, de agua residual de origen doméstico e industrial, a lo que se le sumó el agua residual tratada. En el caso de la ANP-X, un caudal de 800–1,000 ls^{-1} de agua tratada proveniente de la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella reemplazó los aportes naturales, buscando con ello evitar el desecamiento de lagos y canales. A este reemplazo con agua de mala calidad, se suman las descargas clandestinas de agua doméstica que aumentan con la invasión urbana de las chinampas remanentes (Larregui, 2004). Tanto la mayor probabilidad de que aparezcan descargas urbanas clandestinas, como las descargas de agua tratada para sustituir los flujos de descarga subterránea, causan el deterioro progresivo de la calidad del agua de canales y sedimentos lacustres y afectan la viabilidad de la flora y fauna más adaptada a una específica mineralización del agua. Por otro lado, en aquellos terrenos aún aptos para cultivo, la disminución en la productividad de parcelas obliga a chinamperos a utilizar agroquímicos en sustitución de las técnicas tradicionales, lo cual aumenta el potencial de contaminación por plaguicidas y fertilizantes.

En relación con el agua subterránea, se deben tomar en cuenta procesos como i) el progresivo deterioro de la calidad del agua superficial de canales y cuerpos de agua, ii) la acumulación de contaminantes tales como metales pesados en los sedimentos lacustres, iii) el desecamiento y agrietamiento de los sedimentos y, iv) la extracción intensiva de agua que invierte la presión hidrostática, y consecuentemente el flujo de descarga de ascendente a descendente, ya que pueden a su vez favorecer la infiltración de agua de mala calidad desde canales y cuerpos de agua así como de material sedimentario fisurado y contribuir al deterioro de la calidad del agua en el material acuífero subyacente.

Para aportar evidencias de cómo esta serie de interacciones podrían afectar el agua en el material acuífero que subyace el ANP-X se determinó la composición química del agua de algunos pozos aledaños a la zona y de algunos canales así como de la mayor zona inundada (que fue producida por diversas etapas de hundimiento del suelo). En la Figura 4(a) se presenta una relación entre la concentración de arsénico (normalmente ausente de las descargas naturales) y astroncio (característico de flujos profundos), del agua de las muestras colectadas. La dispersión de las muestras y el origen de cada una de ellas sugiere que hay una tendencia del agua de los pozos a evolucionar hacia la calidad del agua en los canales y en algunos casos incluso, el agua de los canales se presenta como característica del agua que se obtiene en algunos pozos.

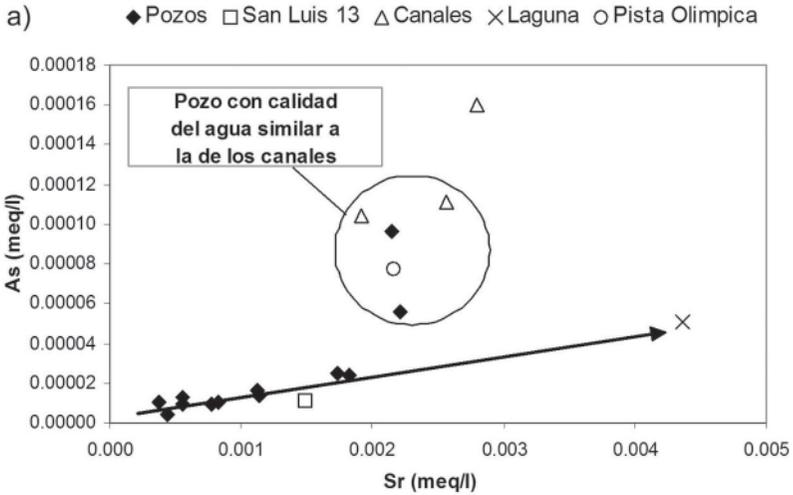


Figura 4 (a).

Por otra parte, el comportamiento de la relación As-Sr de la Figura 4(a) puede sugerir contaminación antrópica, dado que el Sr es indicador de flujo de agua subterránea más profunda (Edmunds *et al.* 2002) pero en este caso su contenido máximo al igual que el As en el agua de canales y laguna proponen que ambos elementos no son de origen natural y por lo tanto se encuentra en mayor proporción en el agua superficial. Por otro lado, la relación Cl-Na (Figura 4b),

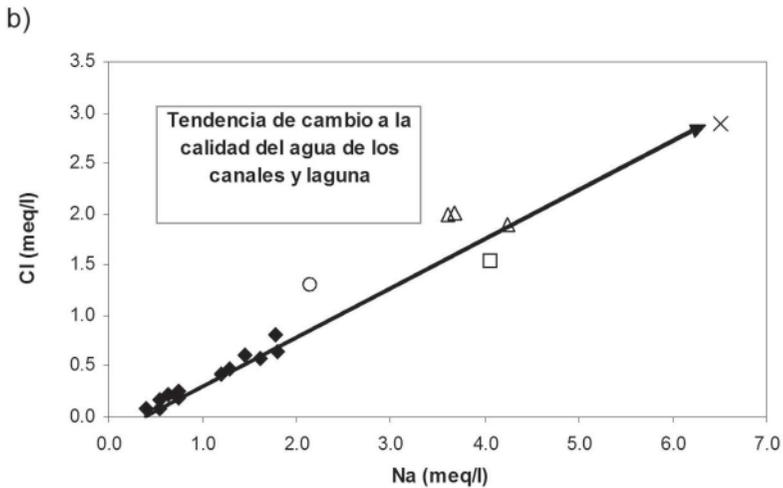


Figura 4 (b).

sugiere también que la calidad del agua de los pozos está evolucionando a la calidad del

agua de canales y laguna. En el caso del ANP-X, el pozo SL-13 (Figura 2) se encontró inactivo debido a que desde el inicio de su operación su calidad no fue apta para uso urbano. Estos datos y observaciones son congruentes con el comportamiento sugerido por las nuevas condiciones de flujo inverso producidas por el presente régimen de extracción. Sin embargo, la entrada de contaminantes debido únicamente a la inversión del flujo de descarga por extracción, contrasta con la discusión anterior acerca de una posible “desconexión” entre el acuitardo y material acuífero debido a una disminución en el potencial de transmisión de flujo. No obstante, en vez de interpretarse como una evidencia contraria, podría sugerir que tiene lugar un mecanismo de dispersión de contaminantes más complejo puesto que en otros pozos de la misma zona continua la extracción de agua de buena calidad en caudales aceptables (Angeles-Serrano *et al.* 2006).

Estudios hidrogeoquímicos realizados en la delegación Iztapalapa colindante con la delegación Xochimilco señalan que una inadecuada extracción de agua subterránea ocasionó la captación de flujos con mayor salinidad y temperatura (Huizar-Álvarez *et al.* 2004). También se reportó el incremento en la concentración de sustancias como Mn (0.08 a 0.40 mg l^{-1}) que es neurotóxico, el Fe (0.05 a 0.24 mg l^{-1}) que da un color oscuro al agua y Na (84 a 113 mg l^{-1}) entre los años de 1983 a 1996 en el pozo Panteón Civil No.3. Asimismo, el pozo Iztapalapa 1 registró en el mismo periodo una concentración máxima de Mn de 1.37 mg l^{-1} y de Fe de 1.21 mg l^{-1} (CONSERVA 2000). Estas diferencias en la concentración de metales en el agua extraída indican que existen aportes de agua subterránea de diferente calidad y también que diferencias en la construcción y operación del pozo pueden producir condiciones variables en el potencial de óxido-reducción, el pH y la temperatura, que pueden influir en la solubilidad (permanencia en solución) de algunos elemento como el Mn y el Fe e incrementar la mineralización del agua. Estos aspectos de movilidad del Mn y Fe pueden estar ligados al cambio de óxido-reducción y pH producidos por las condiciones de flujo creadas por la extracción.

Los efectos negativos producidos por un inadecuado manejo de los pozos de extracción no han sido de preocupación por las autoridades, ya que sólo se tiene preocupación por el caudal obtenido y no por la calidad del agua, este comportamiento sugiere que la calidad del agua que se extrae puede controlarse entendiendo el funcionamiento del sistema como se ha sugerido para la zona adyacente de Iztapalapa (CONSERVA 2000) y en terrenos volcánicos del centro del país (Carrillo-Rivera *et al.* 2002b). En efecto, la presencia de patrones complejos de flujo relacionados con condiciones morfoestructurales y geológicas heterogéneas, así como el transporte de contaminantes desde las zonas de infiltración a las zonas de extracción o de descarga natural es complejo y requiere trazar el origen del agua subterránea extraída, el comportamiento del contaminante potencial y sus posibles fuentes de aporte para proponer estrategias de mitigación (Edmunds *et al.* 2002; Huizar-Álvarez *et al.* 2004).

Una interacción entre el agua subterránea y el agua superficial, que complica un aprovechamiento seguro a mediano plazo, es aquél que resulta de una evolución de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua que captan los pozos de producción y su conexión con posibles efectos en la salud de la población debido a la ingesta de agua de mala calidad. Este aspecto va más allá de los objetivos planteados, pero de acuerdo con estudios recientes bajo un enfoque ecológico y de salud humana (Mazari *et al.* 2000), en la medida que algunos microorganismos tienen el potencial de persistir por periodos largos en el agua subterránea extraída por pozos del sur y poniente del Distrito Federal, también será importante conocer su comportamiento desde la perspectiva del funcionamiento del agua subterránea.

Conclusiones

Los resultados del estudio sugieren que los principales impactos ambientales identificados en el ANP-X se relacionan con una falta de regulación eficaz de la extracción de agua subterránea debido a un desconocimiento del funcionamiento de los flujos subterráneos y sus manifestaciones superficiales. La ANP-X se localiza en una zona de descarga de flujos local e intermedio donde el hundimiento del suelo es resultado de una disminución de la carga ascendente relacionada directamente con un incremento en la extracción por pozos. Sin embargo, en este estudio se muestra por primera vez que el abatimiento en la superficie potenciométrica por extracción y la velocidad de consolidación pueden ser fenómenos independientes a medida que la extracción se acumula con el tiempo. Un posible control hidrogeológico a impactos ambientales por una extracción intensiva, pueden encontrarse en mediciones hechas en otros puntos de la ciudad, así como en registros realizados en zonas de extracción aledañas al ANP-X, que indican una disminución de la velocidad de consolidación de -0.49 a -0.25 m/año en los 1980s y llegan a valores de -0.18 m/año e incluso de 0.02 m/año en el 2000.

Tanto estas mediciones de campo como el análisis teórico presentado, muestran la necesidad de una reinterpretación de la subsidencia en varios sectores de la Ciudad de México, en la que se incluyan factores normalmente despreciados tales como el efecto de la consolidación del material acuífero como respuesta a la pérdida de presión hidráulica durante la extracción, la construcción de infraestructura pesada en la zona lacustre o de transición y la entrada de agua termal. La evidencia mostrada indica una disminución de la velocidad de consolidación aún en zonas donde la extracción de agua subterránea se ha incrementado, como el caso de los alrededores del ANP-X y cuestiona que la extracción intensiva sea una restricción en zonas urbanizadas sobre la base que produce hundimiento. En consecuencia sugiere que un esquema para mitigar la consolidación, como la recarga artificial (Mazari *et al.* 2000), sin considerar el funcionamiento del sistema, en vez de ser la solución adecuada, podría limitar las alternativas para tener acceso a fuentes de agua en cantidad aceptable.

Sobre la calidad del agua subterránea, este estudio señala que los cambios en la calidad del agua extraída por pozos en el ANP-X se explican por modificaciones en las condiciones hidrogeológicas naturales en las que predominaba un flujo vertical ascendente, hacia un comportamiento inverso y contrastante (flujo vertical de arriba hacia abajo) y donde la extracción intensiva induce la captación de agua con contaminantes por mecanismos de interacción entre la superficie y el flujo de agua subterránea.

Algunos mecanismos que contribuyen al deterioro de la calidad del agua pueden manifestarse en la zona de captación del pozo como resultado de factores como: i) inducción de flujo regional profundo con agua más mineralizada (Huizar-Álvarez *et al.* 2004), ii) inducción de flujo vertical descendente proveniente de infiltraciones superficiales o de unidades hidrogeológicas superiores como el acuitardo (Rudolph *et al.* 1991; DGCOH 1994), o iii) resultado de un cambio en las condiciones de óxido-reducción que influye en la movilización de elementos químicos dañinos a la salud humana que se encuentran en la matriz geológica o por otros procesos de transporte de contaminantes como la absorción y dispersión (Angeles-Serrano 2001). Este último punto adquiere una importancia clave para explicar la tendencia al deterioro del agua de los pozos mostrada (Figura 4), dado que este trabajo plantea que se ha reducido la comunicación hidráulica entre el acuitardo y el acuífero. Adicionalmente, este comportamiento sugiere que un cambio en las condiciones de óxido-reducción puede incrementar la movilidad de partículas contaminantes.

Así, aunque en principio la consolidación del suelo y el cambio negativo en la calidad del agua subterránea puedan interpretarse como resultado directo de una extracción intensiva; condiciones hidrogeológicas específicas, pero muy poco conocidas, pueden

ser mecanismos de control natural. La presente interpretación de los datos históricos asequeables del comportamiento del hundimiento muestra un análisis plausible de las diversas componentes del comportamiento hidráulico y químico subterráneo que a pesar de requerir una completa demostración de los procesos expuestos, extiende el espectro de alternativas para reducir el riesgo asociado con diversas acciones antrópicas resultantes del uso del agua subterránea en el sur de la cuenca de México, y en particular en el ANP-X al establecer una liga clara entre la falta de regulación del uso del suelo y los impactos ambientales producidos por la extracción de agua subterránea. Esta liga señala que el entendimiento del papel de ciertos controles hidrogeológicos que se manifiestan a partir de la actividad intensiva de extracción, es clave para establecer estrategias exitosas de restauración de ecosistemas en una de las cuencas más pobladas del planeta.

Agradecimientos

A Thomas Hergt y Mauricio Tautiva por el apoyo técnico para la elaboración de las versiones anteriores de las gráficas y figuras. Este estudio fue parcialmente financiado con la gestión de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal y la UNESCO, a través del Programa Rector de Restauración Ecológica del Área Natural Protegida y Zona Sujeta a Conservación Ecológica Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco. Se agradece al personal de la biblioteca "Rosa Cusminsky Mogilner" del CISAN de la UNAM por el apoyo en la búsqueda de material bibliográfico. A los revisores anónimos por su puntual revisión a la versión previa.

Referencias

Aboites, A. L. 1998. *El agua de la nación. Una historia política de México (1888–1946)* Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. México.

Angeles-Serrano, G. 2001. El funcionamiento de los sistemas de flujo y su manejo a través de pozos para controlar la calidad del agua subterránea obtenida: Iztapalapa, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Angeles-Serrano, G., Perevotchkova M., y Carrillo-Rivera, J. J., 2006. Funcionamiento hídrico e impacto ambiental relativo a la extracción de agua subterránea en Xochimilco. En: *Entre tierra y agua*. Sorani V y Chemla G. (eds.) Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, Aceptado.

Bouwer, H. 1978. *Groundwater Hydrology*. London: McGraw-Hill.

Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, B., Edmunds, W. M. y Mooser, F. 1998. Induced vertical Upward groundwater flow in Mexico City. *Proceedings of the International Groundwater Conference Groundwater: Sustainable Solutions*, Melbourne, Australia, 8-13 de febrero 1998.

Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A. y Margain, R. 1997. Groundwater flow and environmental Impact in Mexico. *Geografía y Desarrollo* Vol.15: 17-27.

Carrillo-Rivera, J. J., Angeles-Serrano, G., Hernández, G. G., Hergt, T. 2003. Estudio de Hidrología subterránea sobre el área de Xochimilco, Distrito Federal. En: Moreno Casasola et al. *Programa Rector de Restauración Ecológica del Área Natural Protegida Zona Sujeta a Conservación Ecológica. Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco*. Informe Final Programa

de Manejo. Gobierno del Distrito Federal Secretaría del Medio Ambiente Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural Programa de Conservación Ecológica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Xalapa, Veracruz

Carrillo-Rivera, J. J., A Cardona y W. M Edmunds, 2002. Use of abstraction regime and Knowledge of hydrogeological conditions to control high fluoride concentration in abstracted groundwater: basin of San Luis Potosí, Mexico. *Journal of Hydrology*, Vol. 261: 24-47.

CNA. 2004. *Estadística del Agua en México*. México: CNA, SEMARNAT.

CONSERVA. 2000. *Impacto ambiental a la calidad del agua subterránea en la zona comprendida entre Santa Fé e Iztapalapa, DF*. México: Informe Técnico, IGT-UNAM.

DCGOH. 1994. *Diagnóstico del estado presente de las aguas subterráneas de la ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras*. México: Reporte Técnico, Instituto de Geofísica de la UNAM.

Durazo, J. y Farvolden, R. N. 1989. The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *Journal of Hydrology* 112: 1-190.

Edmunds, W. M., Carrillo Rivera, J. J. y Cardona, A. 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Journal of Hydrology* 258: 1-24.

Espinosa P. G. 1996. *El embrujo del lago. El sistema lacustre de la Cuenca de México en la cosmovisión mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Históricas, Instituto de Investigaciones Antropológicas. México DF.

González-Morán, T., Rodríguez, R., Cortes, S. A. 1999. The Basin of Mexico and its Metropolitan area, water abstraction and related environmental problems, *Journal of South American Earth Sciences* 12: 607-613.

Huizar-Álvarez, R., Carrillo-Rivera, J. J., Angeles-Serrano, G., Hergt, T. y Cardona, A. 2004. Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City, *Hydrogeology Journal* 12: 436-450.

Larregui-Nagel, E. 2004. Convocatoria a la integración de una mesa para el diálogo por el rescate de Xochimilco y de una comisión especial que participe en su integración y trabajos. *Gaceta del Senado*, N74, www.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/index2.php?sesion=2004/11/09

Lugo, J., Zamorano, J. J., García-Romero, A. 2001. Direct and indirect anthropogenic modifications in the basin of México. En: *Geoenvironmental mapping: method, theory and practice*. Bobrowsky P. T. (ed.), pp. 411-427 Rotterdam: Balkema.

Marsal, R. J., Hiriart F. y Sandoval L. R. 1952. *Hundimiento de la Ciudad de México. Observaciones y Estudios Analíticos*. México: Ediciones ICA, Serie B: Ingeniería Experimental.

Marsal, R. J. y Mazari, M. 1959. *El subsuelo de la ciudad de México*. 2 vols. México, D. F.:

Reporte Interno del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Mazari, M., Bojórquez, L. Loyola, A., Díaz, S. 2000. Recarga, calidad y re-uso del agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En: *Dualidad población agua, Inicios del Tercer Milenio* (M. Mazari coord.), pp. 137-165. México: El Colegio Nacional.

NRC. 1995. *El agua y la Ciudad de México*. México: National Research Council, Academia de la Investigación Científica, AC y Academia Nacional de Ingeniería, National Academy Press.

Ortega, G. M. A. y Farvolen, R. N. 1989. Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico. *Journal of Hydrology* 10: 271-294.

Ortega, G. M. A. 2004. Groundwater flow system and subsidence mechanism control: Mexico City. En: XXXIII Congress IAH & 7^o Congress ALHSUD, Groundwater flow understanding from local to regional scales. Zacatecas, México.

Perló, M C. 1989. Problemas sociopolíticos para la utilización de las aguas residuales. En *Aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Impactos y Perspectivas*. Quadri de la Torre (Comp.), pp. 89-102. DDF: Fundación Friedrich Ebert.

Peñañiel, A. 1884. *Memorias sobre las aguas potables de la capital de México*. México: Secretaría de Fomento:

Rojas-Rabiela, T. 2004. Las cuencas lacustres del Antiplano Central, *Arqueología Mexicana* Vol.XII (68): 20-27.

Rudolph, D.L., Cherry, J. A. y Falvolden, R. N. 1991. Field investigations and solute transport in lacustrine aquitard near Mexico City. *Water Resource* 27(9): 2187-2201.

Santoyo, V. E., Ovando S. E., Mooser, F., León P., E. 2005. *Síntesis geotécnica de la Cuenca de México*, TGC, Geotecnia: México.

Shelutko, V. A. 2002. *Problemas geocológicos de las ciudades grandes y zonas industriales. Preguntas de ecología aplicada*. Moscow: SPb: Colección de trabajos científicos, RGGMU.

Stephens, D. B. 1996. *Vadose zone hydrology*. London: Lewis Publishers.

Tóth, J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero* 111(4): 9-26.

Vargas-Cabrera, C. 1995. Distribución de la conductividad hidráulica en el acuitardo lacustre de la subcuenca de Chalco, DF y Estado de México. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Vázquez-Sánchez, E. 1995. Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas Del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México. Tesis de Maestría, Posgrado en Geofísica, UACPyP, UNAM.