

Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco: implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal)

Dalia del Carmen Ortiz Zamora*
M. Adrián Ortega Guerrero*

Recibido: 4 de diciembre de 2006
Aceptado en versión final: 27 de marzo de 2007

Resumen. La operación de catorce pozos construidos en la década de 1980, denominada Sistema Mixquic-Santa Catarina (SMSC), en la planicie de Chalco, ubicada al sureste de la Ciudad de México, está causando una de las transformaciones ambientales del paisaje más importantes de la Cuenca de México en las últimas dos décadas. En la zona central de la planicie, donde existe el mayor espesor de sedimentos lacustres (300 m), se han generado hundimientos de hasta 40 cm/año como resultado de la consolidación del acuitardo por efecto del bombeo en el acuífero principal subyacente. En esta depresión topográfica se está desarrollando un nuevo lago, por la acumulación de agua superficial, cuya evolución y forma actual es controlada por la extensión y la geometría de una colada de basaltos, proveniente de la Sierra de Santa Catarina, ubicada a 50 m de profundidad dentro de la secuencia lacustre. La superficie del Nuevo Lago de Chalco se ubica 12 m por debajo del nivel original del terreno, cubriendo una extensión actual de 1 000 ha. De acuerdo con los controles y magnitud de la subsidencia regional observada, se estima un crecimiento de hasta 1 500 ha para el 2015, incrementando el riesgo por inundación a las zonas urbanas de Tláhuac y Valle de Chalco. Para reducir el peligro y riesgo de subsidencia e inundaciones, será necesario analizar la conveniencia de incrementar la cantidad y la eficiencia de la infraestructura hidráulica a futuro, contra la opción de reubicar varias colonias en un radio aproximado de 2.5 a 3 km con centro en el pozo P9 del SMSC. La creación de un Consejo Metropolitano permitirá definir las estrategias dinámicas e integrales para el ordenamiento del territorio, y en particular para la prevención de desastres y el adecuado equilibrio entre la planeación de las áreas propuestas de conservación y mejoramiento ambiental, con la reducción o mitigación del riesgo.

Palabras clave: Subsidencia, inundaciones a zonas urbanas, nuevo lago de Chalco, Valle de Chalco, Tláhuac, mapa de peligros.

*Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Km. 15 Carretera Querétaro-San Luis Potosí, Juriquilla, Querétaro. E-mail: ortiz.dalia@gmail.com; maog@geociencias.unam.mx.

Origin and evolution of a new lake in the Chalco plain: implications for land subsidence and flooding hazards to the urban areas of Valle de Chalco (State of Mexico) and Tláhuac (Federal District)

Abstract. Groundwater extraction from fourteen wells in the Chalco plain since the 1980's, the Mixquic-Santa Catarina System (MSCS), located at the southeast of Mexico City, is causing one of the more important environmental changes of the landscape within the Basin of Mexico in the last two decades. In the middle of the plain, where the thickness of the lacustrine sediments is the highest (300 m), land subsidence of 40 cm/year has occurred as a result of the transient aquitard response to pumping in the underlying main aquifer. A new lake is developing in this topographic depression due to the accumulation of surface water; the shape of the lake is being controlled by the distribution and geometry of a basalt layer that is present within the lacustrine sequence at 50 m depth, originated at the Sierra Santa Catarina. The New Chalco Lake surface is located 12 m below the original position of ground surface, covering a total extension of 1000 ha. Based on the controls and magnitude of the regional land subsidence, it is expected that the lake surface will grow about 1500 ha by the year 2015, increasing the risk of flooding to the urban areas of Valle de Chalco and Tlahuac. To reduce the danger and risk of land subsidence and flooding, there is necessary to analyze the convenience to increase the amount and efficiency of the hydraulic infrastructure in the future against the option relocate particular urban areas, within a radius of 2.5 to 3 km with center in the well P9 of the MSCS. The creation of a Metropolitan Council would permit to define dynamic and integral strategies for territory planning, and in particular for prevention of disasters, and the adequate equilibrium between the planning of proposed conservation areas and the environmental improvement with the reduction or mitigation of risk.

Key words: Subsidence, flooding of urban areas, new Chalco lake, Valle de Chalco, Tláhuac, Mexico, hazardous map.

INTRODUCCIÓN

La operación de catorce pozos construidos a principios de la década de 1980, denominada Sistema Mixquic-Santa Catarina, en la Planicie de Chalco ubicada al sureste de la Ciudad de México (Figuras 1 y 2a), está causando una de las transformaciones ambientales del paisaje más importantes de la Cuenca de México en las últimas dos décadas, con profundas implicaciones sociales y económicas asociadas al riesgo progresivo de subsidencia e inundaciones. Debajo de los sedimentos lacustres, definidos en términos hidrogeológicos como acuitardo, sobre los que se ubica la Ciudad de México, se extiende un importante acuífero regional granular del que se extrae agua, para abastecimiento principalmente de agua potable, del cual se extrae un total de 50 m³/seg (INEGI-INE, 2000), de los cuales Chalco aporta cerca del 3%.

La extracción de agua subterránea en este acuífero en los siglos XIX y XX ocasionó hundimientos totales cercanos a 10 m en el centro de la Ciudad de México. En la planicie de Chalco, la extracción extensiva de agua subterránea se inició a mitad de la década de los ochenta, igualando en menos de 20 años los hundimientos totales de la Ciudad de México. Los hundimientos son de hasta 40 cm/año en el centro de la planicie de Chalco, donde el espesor de los sedimentos lacustres es de 300 m, y se estima que para el 2015 serán de un total de 15 m; esto con base en modelos numéricos de predicción de la deformación vertical del terreno, en mediciones de parámetros hidráulicos y de mecánica de suelos, tanto del acuífero como de los sedimentos lacustres (Ortega *et al.*, 1993; Ortega *et al.*, 1999). Sin embargo, los estudios anteriores no evaluaron la evolución de crecimiento de los lagos someros, ni otros controles asociados

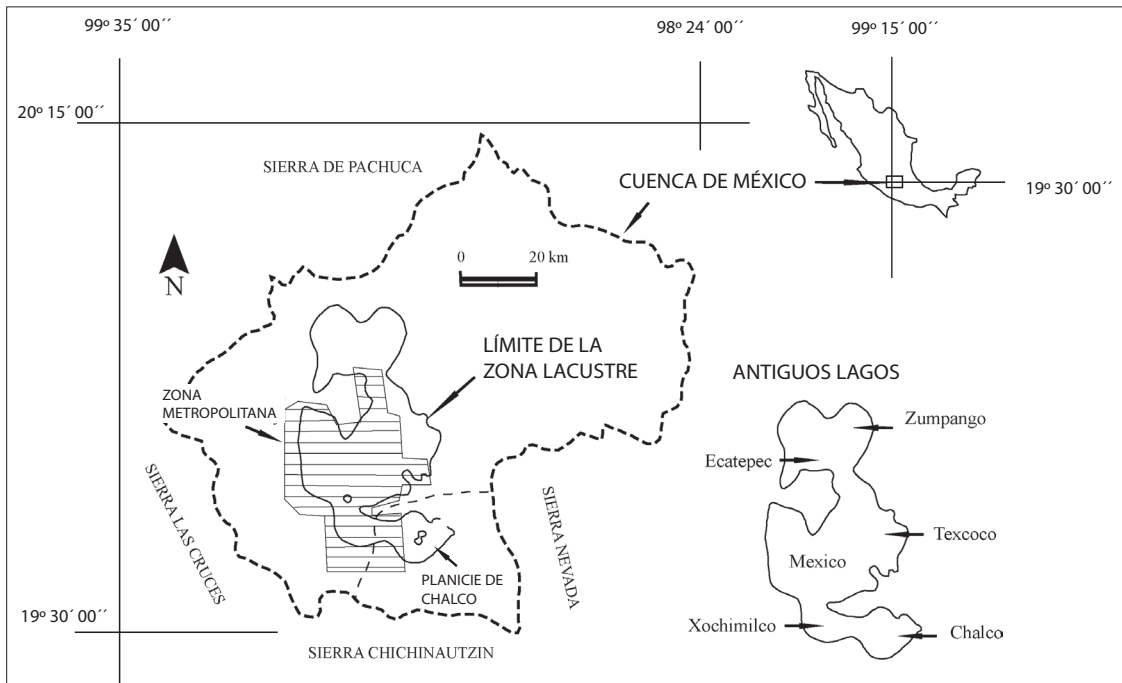


Figura 1. Localización de la planicie lacustre de Chalco en el interior de la Cuenca de México. El antiguo lago de Chalco es parte de una serie de lagos que ocupaban el interior de la Cuenca de México.

al hundimiento, fuera de la zona donde el espesor máximo de los sedimentos lacustres, o acuitardo, es de 300 m. Los impactos de los hundimientos regionales y la acumulación de agua superficial en los centros urbanos y sus riesgos, tampoco han sido evaluados con anterioridad.

El objetivo de este trabajo es determinar el origen y evolución de los lagos someros que se están formando en la Planicie de Chalco, con el fin de aportar elementos a la planeación del desarrollo, ordenamiento del territorio, y en particular, para controlar el crecimiento urbano y determinar los peligros y riesgos por subsidencia e inundación a las zonas urbanas de Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México).

EVOLUCIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA Y DE LA DEFORMACIÓN VERTICAL DEL TERRENO EN LA SUBCUENCA DE CHALCO

Historia de la extracción de agua subterránea

El bombeo del acuífero no confinado en la periferia del acuitardo lacustre en la subcuenca de Chalco se inició a principios de los años cuarenta para uso local agrícola y urbano. Información histórica indica que el extremo sur fue una zona de descarga de agua subterránea, proveniente de la Sierra de Chichinautzin, antes de la intensa extracción de agua subterránea por debajo

del acuitardo lacustre en los años cincuenta. Los primeros pozos que se construyeron para proveer de agua potable a la Ciudad de México se perforaron en el acuífero basáltico de las faldas de la Sierra de Chichinautzin y Santa Catarina a principios de los años sesenta. Los manantiales ubicados a los pies de la Sierra de Chichinautzin desaparecieron en consecuencia (Durazo y Farvolden, 1989).

A mitad de los años setenta la extracción total en la subcuenca de Chalco era de aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{seg}$ (DDF, 1979). Catorce pozos profundos, denominados Sistema Mixquic-Santa Catarina, se perforaron en la planicie lacustre de Chalco a profundidades de 400 m, a principios de los años ochenta (Figuras 2a y b), para satisfacer parte de la creciente demanda de agua a la Zona Metropolitana de la Ciudad

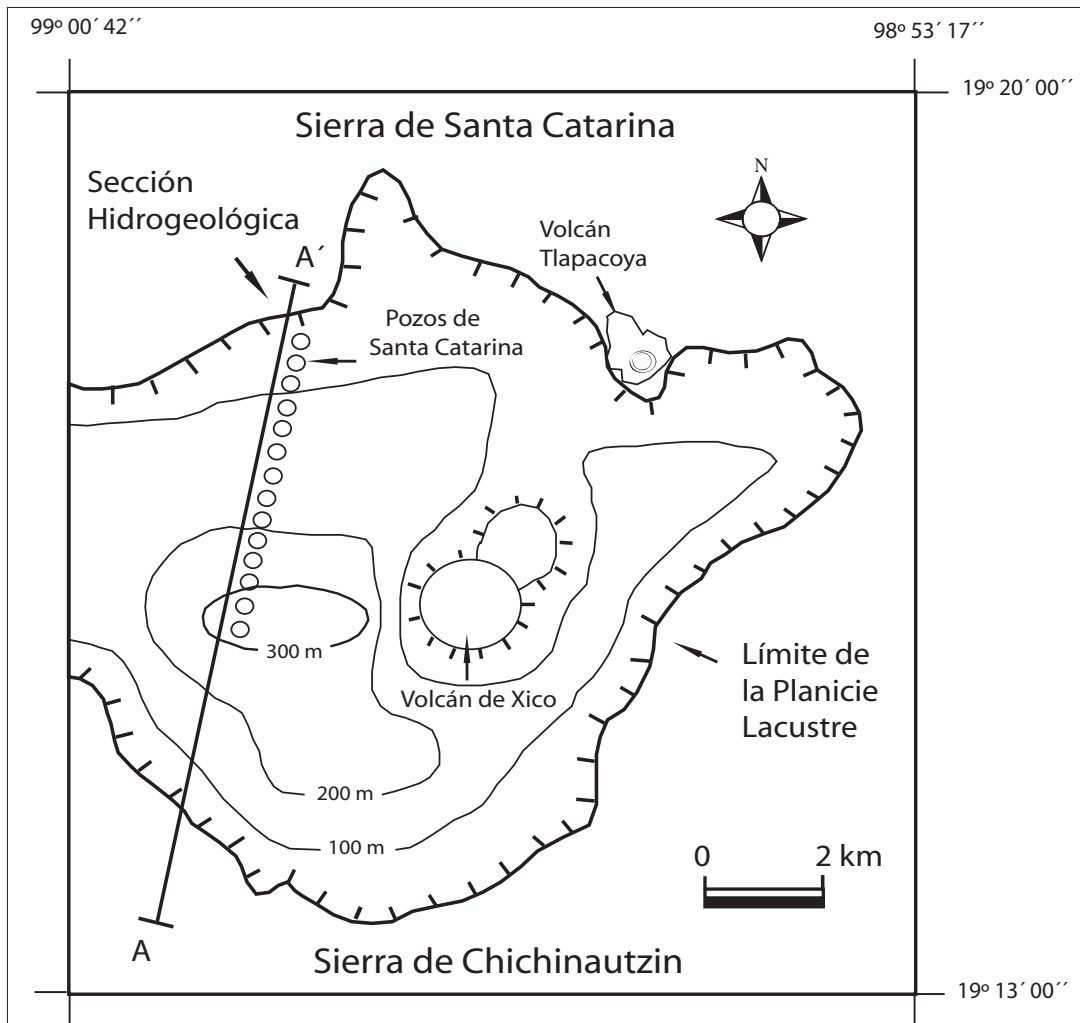


Figura 2a. Ubicación de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina en el interior de la planicie de Chalco. Se muestra la ubicación de la sección hidrogeológica. El espesor de los sedimentos lacustres es de hasta 300 m en el centro de la planicie (modificado de Ortega *et al.*, 1999).

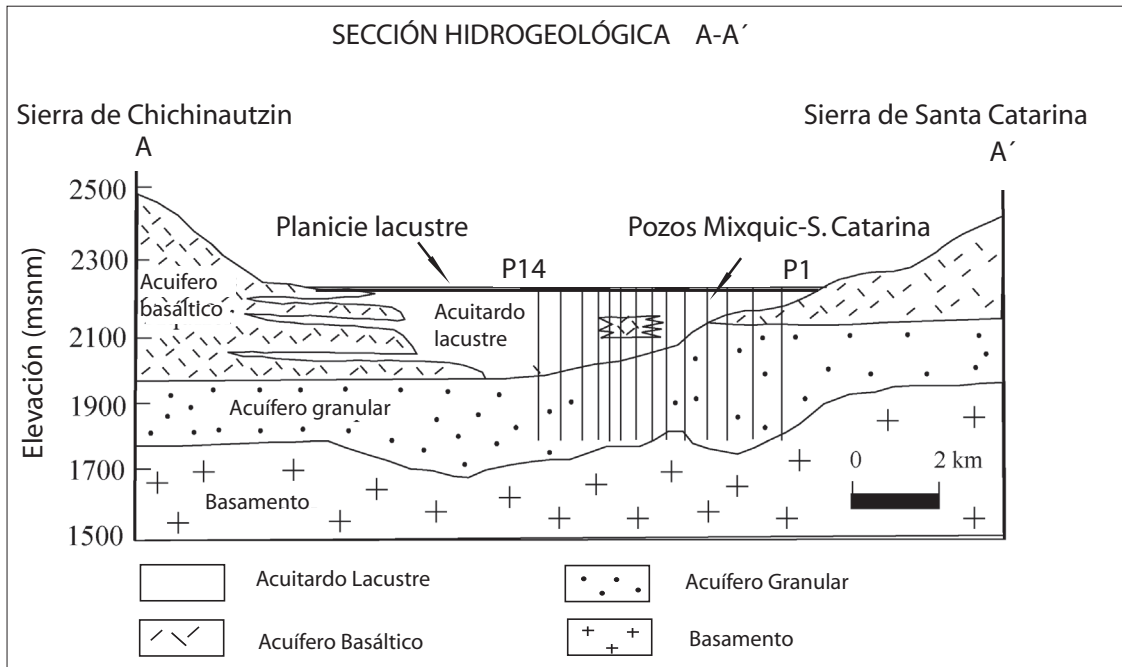


Figura 2b. Sección hidrogeológica a través de la planicie de Chalco. Se muestra la posición de los sedimentos lacustres (acuitardo) sobre el acuífero granular. La presencia de basaltos provenientes de la Sierra de Chichinautzin y Sierra de Santa Catarina es contemporánea a la sedimentación lacustre (modificado de Ortega *et al.*, 1999).

de México (ZMCM). A partir de 1984, estos pozos han aportado entre 1.4 m³/seg y 1.75 m³/seg a la ZMCM (Ortega *et al.*, 1993). La cantidad total de agua subterránea extraída en la subcuenca de Chalco se estimó en 7.75 m³/seg en 1988 (Huízar, 1989) y en 1991 fue estimada en casi 8 m³/seg (Ortega *et al.*, 1993), contra una recarga estimada de 6.5 m³/seg (Huízar, 1989).

Historia de los hundimientos

Como resultado de la extracción de agua subterránea en la subcuenca se consolidó el acuitardo. Los hundimientos registrados en la superficie del terreno, son consecuencia de la aportación de agua subterránea del acuitardo hacia el acuífero subyacente, lo que da lugar a un cambio volumétrico de los sedimentos altamente compresibles, en la

interfase acuitardo-acuífero (Carrillo, 1947; Rudolph *et al.*, 1991).

Los primeros datos de elevación del terreno en la Planicie de Chalco se remontan a principios de los años sesenta, donde la planicie lacustre era prácticamente plana, es decir, que no presentaba influencia significativa de subsidencia influenciada por el bombeo. La elevación del terreno en el centro de la planicie era de 2240.3 m sobre el nivel medio del mar (msnm; SARH-CAVM, 1981). A finales de los años setenta reportaron elevaciones entre 2237 y 2238 msnmm en la zona referida. Lo que indica un promedio en la subsidencia del terreno entre 0.10 y 0.15 m/año inducido por el bombeo regional y previo a la construcción de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina. Nivelaciones del terreno posteriores se llevaron a cabo desde los años ochenta

y noventa (SARH-CAVM, 1984; SARH-CAVM, 1991).

La evolución de la deformación vertical del terreno, para el periodo de 1984 a 1989, se presenta en la Figura 3, en ella se puede apreciar que se dieron hundimientos hasta de 2 m en la zona donde los espesores de sedimentos lacustres son los mayores (Figura 2a) y que de alguna manera han experimentado los cambios más fuertes en la presión de poro inducida por el bombeo. Después de iniciado el bombeo del Sistema de pozos de Mixquic-Santa Catarina, en 1984, la deformación vertical del terreno

fue claramente diferencial, siendo mayor en el centro de la planicie y progresivamente menor hacia sus límites laterales (Ortega *et al.*, 1993). Este acelerado hundimiento diferencial dio lugar a la formación de una depresión topográfica localizada aproximadamente en el centro de la planicie (Figura 3), donde se está formando un nuevo lago por la acumulación de agua de lluvia y agua superficial que ya no sale por gravedad a través del sistema de canales en la zona.

La naturaleza transitoria y no lineal del proceso de consolidación fue estudiada por

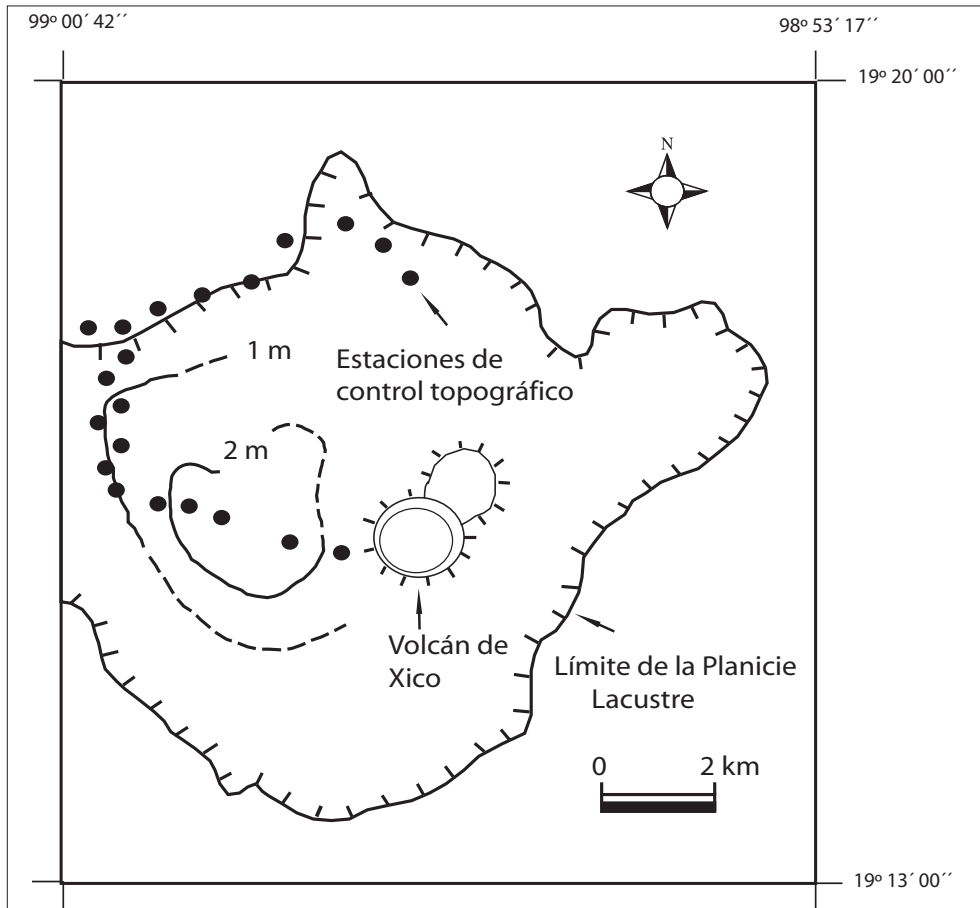


Figura 3. Deformación vertical del terreno en el periodo de 1984 a 1989, en respuesta al bombeo de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina (modificado de Ortega *et al.*, 1999). Los hundimientos máximos corresponden con los mayores espesores del paquete lacustre (Figura 2a).

Ortega *et al.* (1999), basados en la instrumentación y medición de parámetros geomecánicos e hidráulicos del acuitardo lacustre de Chalco y la aplicación de un modelo no lineal de consolidación (Rudolph y Frind, 1991) inducido por cambios en la carga hidráulica en el Sistema Mixquic-Santa Catarina. Las predicciones numéricas estiman que para el 2000 y 2010 los hundimientos totales serán de 11 y 15 m, respectivamente, para condiciones similares de extracción existentes en la década de los años ochenta y noventa.

La evolución y otros controles asociados al desarrollo y crecimiento de los lagos, así como sus tendencias de crecimiento y sus impactos a la planeación urbana o rural, no han sido considerados con anterioridad; tampoco lo han sido los peligros y riesgos asociados, que son motivo del trabajo que aquí se presenta.

MÉTODOS Y MATERIALES

La presencia de zonas de acumulación de agua superficial en el interior de la planicie de Chalco se definieron a partir de fotos aéreas y mediciones directas de campo realizadas a lo largo de 20 años de observaciones, paralelas a mediciones de diversos instrumentos instalados en la planicie de Chalco por Ortega (1993).

La elevación de la superficie del nuevo lago de Chalco se obtuvo a partir de un equipo de Sistema de Posicionamiento Global en dos puntos, uno de los cuales funcionó como base: un posicionador de doble frecuencia (L1, L2), marca Thales, modelo Zmax y otro posicionador de una frecuencia (L1) marca ASTEC, modelo Promark 2. Las coordenadas obtenidas fueron conectadas a la Red Geodésica Nacional activa del INEGI (Estaciones Base de Toluca 99°38'36.49337''; 19°17'35.64431''; 2651.725 m).

Se realizó una actualización de los abatimientos piezométricos en el acuífero granular, medido en los pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina y elevación de bancos de nivel de la

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGOH) del Distrito Federal.

En junio de 2000 se produjo la rotura del canal de la Compañía, ubicado al noreste de la planicie de Chalco, provocando la inundación de varias colonias, causando enfermedades por la exposición de las aguas residuales e importantes daños a casas habitación e infraestructura urbana. Por ello, es fundamental establecer un programa de desarrollo regional y ordenamiento territorial congruente con la evolución del nuevo sistema de lagos de la planicie de Chalco asociado a la evolución de la extracción de agua subterránea y la deformación vertical del terreno por efecto de consolidación.

El área de riesgos geológicos utiliza el conocimiento de los procesos de naturaleza geológica para la prevención de accidentes, y se caracteriza también por abarcar conceptos, métodos y técnicas de análisis y administración de riesgo relacionados con otras ramas profesionales (Coch, 1995; Ogura y Soares, 2000), industria, protección civil, compañías de seguros, planeación urbana, entre otras.

Con base en los controles sobre los hundimientos y sus tendencias, a partir del inicio de operaciones del Sistema de 14 pozos Mixquic-Santa Catarina, en 1984, se identificaron aquellas zonas susceptibles de ser inundadas, en particular las áreas urbanas donde la población puede sufrir daño a su seguridad, salud y a su propiedad, para lo cual se elaboró un mapa de peligros presentes y estimados para el 2015.

RESULTADOS

Evolución del Nuevo Lago de Chalco

Las Figuras 4a y b muestran la ubicación de los sitios de acumulación permanente de agua superficial para 1988 y 1991. En ambos casos la ubicación de estos sitios era en la periferia de los pozos P11, P12 y P13 del Sistema Mixquic-Santa Catarina. En 1988 se formaron cinco zonas de acumulación de agua hasta de una hectárea de influencia algunas de ellas, a

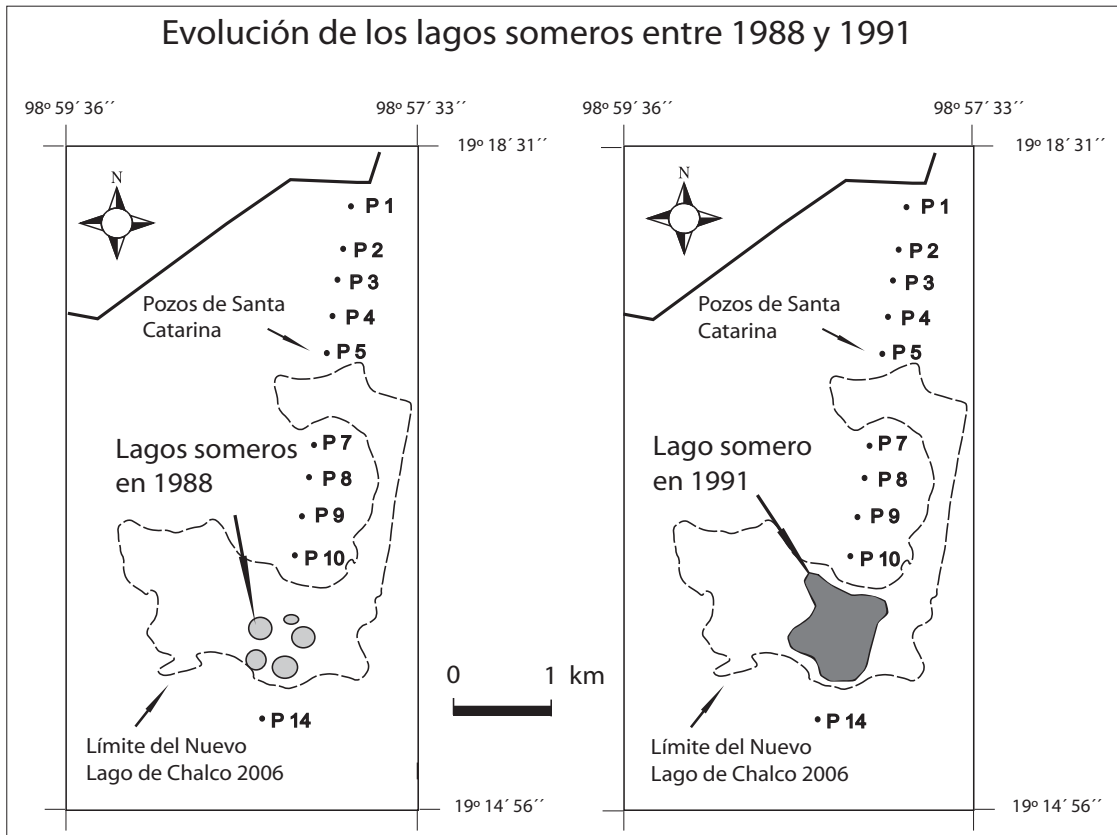


Figura 4a. Ubicación y dimensión de los lagos someros en 1988. Se muestra el contorno del nuevo lago de Chalco en 2006 como referencia.

Figura 4b. Ubicación y dimensión de los lagos someros en 1991. Se muestra el contorno del nuevo lago de Chalco en 2006 como referencia.

ambos lados del camino de acceso a los pozos y de la carretera Tláhuac-Chalco (Figura 4a). Posteriormente, en 1991, las cinco áreas mencionadas se integraron en un pequeño lago, que rodeaba las inmediaciones de los Pozos P11, P12 y P13, con una extensión de agua de aproximadamente 100 ha (Figura 4b). En ambas figuras se ilustra la extensión del nuevo lago de Chalco en 2006, como una referencia, y con la idea de mostrar su evolución desde estados iniciales hasta el actual.

En la Figura 5 se ilustra la posición actual del nuevo lago de Chalco en su contexto regional. El desarrollo de este lago difiere signi-

ficativamente del que mostró en sus primeras etapas de crecimiento. Lejos de continuar con un desarrollo condicionado al contorno de espesor de 200 o 300 m de la secuencia lacustre (Figura 2a), continuó hacia los límites con el Canal General inmediatos a los límites de la zona urbana de Valle de Chalco, ambos paralelos a la línea de pozos; y se conecta con una zona de acumulación de agua alrededor del pozo P6, que ya era visible desde la segunda parte de los años noventa. De esta manera adquiere su forma actual, que semeja la forma de la luna menguante o de una letra "C" invertida. El área total del nuevo lago es de un poco más de

1 000 ha. Cabe mencionar que el Canal General representa el límite político del Distrito Federal con el Estado de México (Figura 5).

La elevación actual de la superficie del nuevo lago de Chalco, indica que éste se encuentra 12 m más abajo que la superficie original del terreno, antes que se iniciara la extracción intensiva de agua subterránea en la subcuenca de Chalco, a principio de los años sesenta. Esta magnitud de la deformación vertical del terreno ya sobrepasó la resultante en el centro de la Ciudad de México, que se generó después de más de un siglo de extracción de agua subterránea. Con base en ello, podría señalarse que el centro de la planicie de Chalco corresponde a uno de los niveles topográficos más bajos en el interior de la Cuenca de México.

En la Figura 4c se presenta un gráfico donde se ilustra la evolución del área (en hectáreas) afectada por la acumulación de agua superficial con el tiempo. Puede observarse el incremento progresivo de áreas inundadas; en particular, el

incremento promedio, entre 1991 y 2006, fue de aproximadamente 60 ha/año. De continuarse con estas tendencias, se esperaría que el número de hectáreas ocupadas por el nuevo lago de Chalco sería de aproximadamente 1 200 para el 2010 y de 1 500 para el 2015, con importantes impactos en las zonas urbanas de Tláhuac y Valle de Chalco, como se verá más adelante.

Controles en la subsidencia del terreno

El control principal en la subsidencia del terreno es el proceso de consolidación, es decir, el cambio volumétrico de los sedimentos finos de la secuencia lacustre (acuitardo) debido a la pérdida de agua generada por la disminución de carga hidráulica en el acuífero sujeto al bombeo (Figura 2a y b). Los gradientes hidráulicos en el acuífero, impuestos por el bombeo, inducen una aportación de agua del acuitardo hacia el acuífero subyacente (Ortega *et al.*, 1999). El cambio volumétrico de los sedimentos

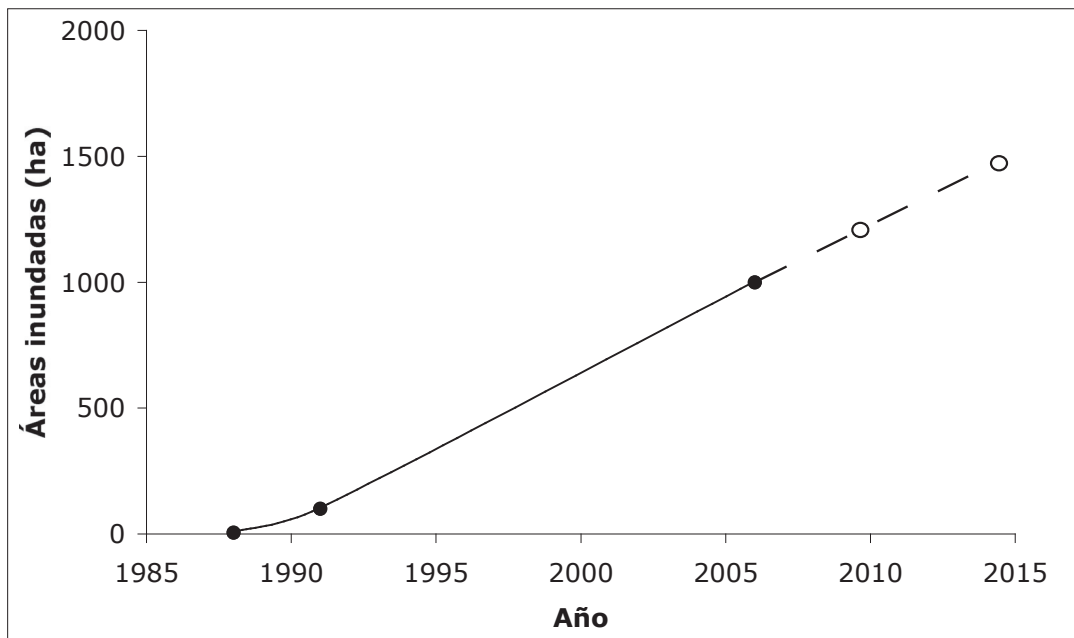


Figura 4c. Superficie inundada (en hectáreas) en el periodo de 1988 a 2006, y proyección a 2010 y 2015.

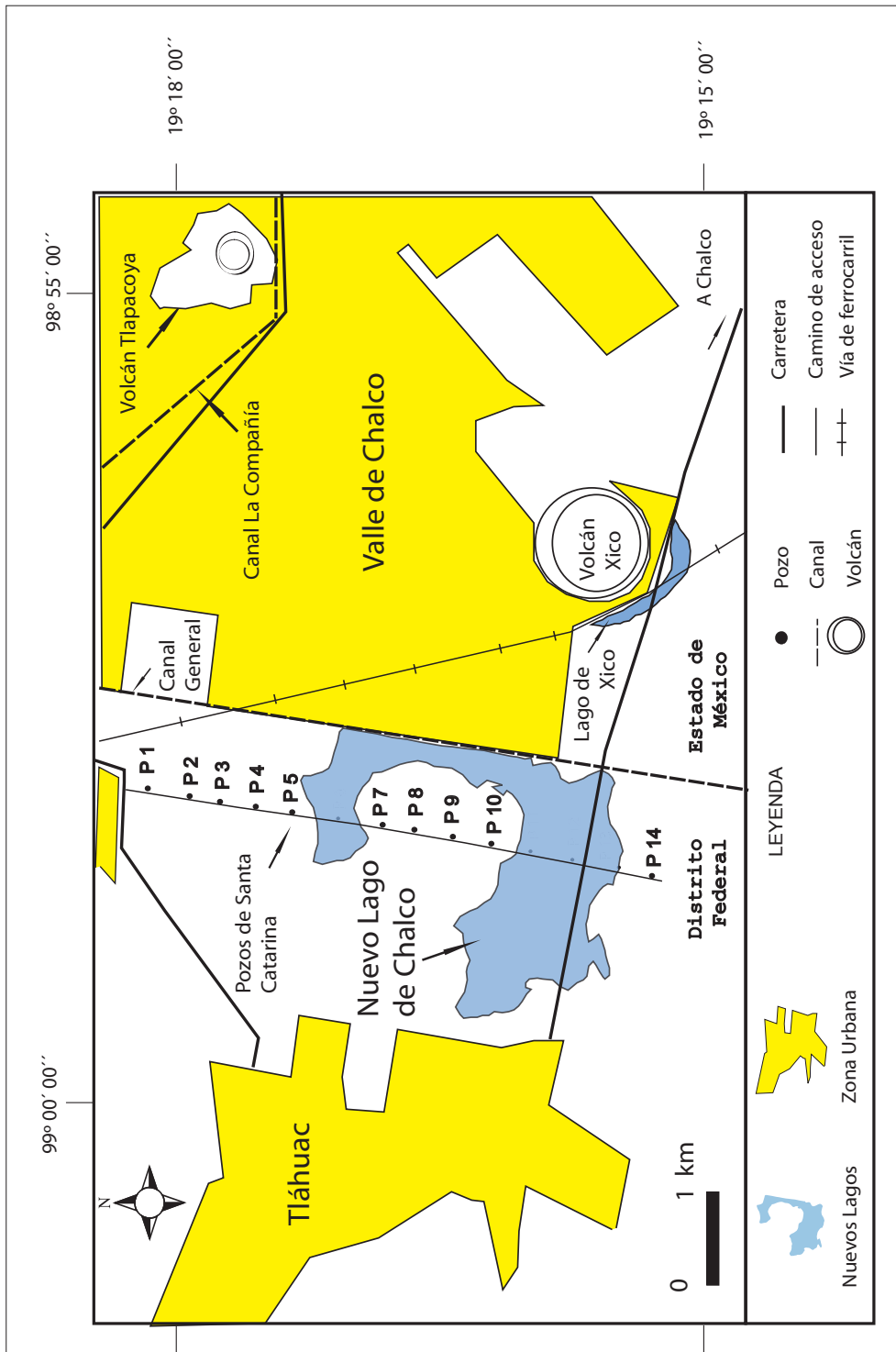


Figura 5. Ubicación del nuevo lago de Chalco entre las zonas urbanas de Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México). El lago tiene la forma de luna menguante y cubre un área de alrededor de 1 000 ha.

se manifiesta en una deformación vertical del terreno o hundimientos, como comúnmente se le conoce.

La velocidad de la deformación vertical en el centro de la planicie de Chalco, después del inicio de operación del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina, ha sido de aproximadamente 40 cm/año, donde el espesor del acuitardo es de 300 m, y de 5 cm/año cerca del límite de la planicie, donde el espesor es cercano a 50 m. Por tal motivo, el centro de la planicie se ha hundido más que en sus orillas. Sin embargo, esta deformación no ha sido homogénea en el centro de la planicie, ya que los hundimientos del terreno en las inmediaciones de los pozos P7, P8, P9 y P10 ha sido menor. ¿Cuál es entonces el factor que controla que la deformación en estos pozos sea menor que la esperada?

Con base en la sección hidrogeológica de la Figura 2b, se puede observar que la única diferencia estratigráfica entre los pozos P7 a P10, donde los hundimientos han sido menores, con respecto a los pozos P6 y P11 a P14, donde los hundimientos han sido mayores, es la presencia de un estrato de basalto de aproximadamente 30 m de espesor, ubicado a 50 m de profundidad. El basalto es prácticamente incompresible, por lo que su presencia en la secuencia lacustre reduce la magnitud de la consolidación y por tanto de los hundimientos.

Adicionalmente, el estrato de basalto se ubica prácticamente en la misma elevación de los basaltos provenientes de la Sierra Volcánica de Santa Catarina identificados en los pozos P1 a P3 (Figura 2b); sin embargo, el Volcán de Xico, ubicado al oriente de los pozos (Figura 5) es otra posible fuente de los basaltos observados en los pozos P7 a P10. La forma que está adquiriendo el nuevo lago de Chalco es quizá la respuesta para conocer el origen del basalto interestratificado en la secuencia lacustre, ya que su continuidad en el subsuelo se verá evidenciada por hundimientos menores, que contrasten con los sitios donde no se encuentra presente y que se hunde con mayor

rapidez. De acuerdo con la Figura 5, los basaltos identificados en los pozos P7 a P10 (Figura 2b), se extenderían hacia el noroeste donde se ubica la Sierra de Santa Catarina, y donde no existen zonas inundadas. La colada de basalto (observada entre los pozos P7 a P10) terminaría antes del Canal General, tal como se observa en la Figura 5; por lo que la forma del nuevo lago de Chalco está definido por la geometría y la extensión de esta colada de basalto en el subsuelo.

De esta manera, es de esperarse que el crecimiento del nuevo lago de Chalco siga los límites de la colada de basalto en el subsuelo hacia el noroeste, y se extienda preferentemente hacia el sur y oriente donde no está presente en el subsuelo, es decir, hacia la zona de Valle de Chalco, lo que la haría la zona urbana de mayor vulnerabilidad a las inundaciones, como se verá más adelante. De igual manera, los entornos de los pozos P6 y P11 a P13, continuarán inundados; mientras que el pozo P5 tenderá a inundarse a futuro. Tanto el camino de acceso a los pozos, como el de la carretera Tláhuac-Chalco, requerirán de reparaciones y elevación permanentes cada vez más costosas. Entre septiembre y noviembre de 2006, la carretera y el camino de acceso a los pozos estuvieron suspendidos por encontrarse inundados localmente.

Situación de peligro y riesgo

Existen dos tipos de peligros asociados en la zona: (1) Peligro por subsidencia y (2) Peligro por inundación. Ambos están íntimamente vinculados, ya que como resultado de la subsidencia, debida a la extracción del agua del subsuelo, se generan depresiones topográficas o hundimientos en los que se acumula el agua superficial, en parte por inhabilitación de obras de drenaje preexistentes.

El peligro se define como la amenaza potencial a personas y bienes, mientras que el riesgo es la posibilidad de que eventos peligrosos produzcan consecuencias indesea-

bles; es el peligro presentido, mejor evaluado, es decir, es una pérdida potencial evaluada (Coch, 1995; Ogura y Soares, 2000). Con base en los resultados presentados anteriormente existe, por un lado, la situación de peligro por inundaciones permanentes; y por otro lado, en algún momento, inundaciones que pueden dar lugar a un desastre potencial, donde la vida y la propiedad de los habitantes de sectores específicos de Valle de Chalco y Tláhuac se vean amenazados.

La Figura 6 muestra un Mapa de Peligros de aquellas áreas que son vulnerables a ser inundadas por la subsidencia progresiva a la que están sujetas. En esta figura se aprecia la posición del nuevo lago de Chalco, cuyo límite oriental está definido y controlado por el Canal General; este canal cumple con dos funciones principales: *a*) impedir que el agua del nuevo lago inunde la zona urbana de Valle de Chalco, que se encuentra a un nivel menor que la superficie del nuevo lago, y *b*) drenar el agua del nuevo lago hacia la planicie de Texcoco, por medio de bombas ubicadas en diferentes puntos, para evitar acumulaciones mayores.

La Figura 6 muestra la zona de mayor vulnerabilidad a las inundaciones, definida por un círculo de aproximadamente 2 km de radio, cuyo centro se ubica aproximadamente en el pozo P9 del Sistema Mixquic-Santa Catarina. El círculo considera zonas que se ubican prácticamente 12 m por debajo del nivel original del terreno. Parte de este círculo incluye la porción occidental de la zona urbana de Valle de Chalco, particularmente las colonias Américas I, Américas II, María Isabel, Niños Héroes, Alfredo Baranda, San Miguel Xico (secciones 1^a a 4^a). La avenida Acapol corre paralela al Canal General, y se ubica en una posición más baja (entre 0.50 y 1.0 m) que la superficie del nuevo lago de Chalco. A lo largo de esta avenida es evidente la constante actividad de reparación de las casas, algunas de ellas tienen las ventanas al nivel del piso, mostrando el nivel de hun-

dimiento a la que están expuestas; existe en ellas una constante aportación de humedad del subsuelo y el desarrollo de salitre, por la proximidad del nivel freático en los sedimentos lacustres sobre las que están construidas. De no existir la protección del Canal General, las colonias mencionadas, estarían cubiertas por el agua.

La velocidad de hundimiento de la zona ocupada por el nuevo lago de Chalco es del orden de 40 cm/año, por lo que para el 2011, el nivel del terreno estará dos metros más abajo del nivel actual, y en el 2015 estará casi 4 m del nivel medido en 2006; es decir, con hundimientos totales de 14 a 16 m. El área de mayor vulnerabilidad crecerá y estará definida por el segundo círculo que se extiende hasta 2.5 km de radio. Se estima que el incremento del área en peligro se extendería a 150 ha de la zona poblada.

A medida que continúe la deformación vertical del terreno, las obras hidráulicas perderán progresivamente su integridad física, pudiendo romperse en los puntos más débiles, como ocurrió con el canal de La Compañía en junio de 2000. Por ello será necesario considerar programas de mantenimiento y observación permanente en todos los canales. En algún momento tendrán que valorarse el costo de mantener actualizada la infraestructura hidráulica, los costos de obras de reducción o mitigación del riesgo, y costo de posible desastre, contra los costos de reubicación de algunas colonias de Valle de Chalco.

El círculo de peligro, para el 2015, también impactaría un sector de la parte oriente de la zona urbana de Tláhuac, directamente las Colonias La Habana y San José, próximas al nuevo lago de Chalco. Se estima que 25 ha del área urbana quedarían inundadas.

Existen riesgos adicionales al de subsidencia e inundaciones en las zonas de transición entre los sedimentos lacustres y las estructuras volcánicas y zonas de transición, entre ellos el de agrietamiento del terreno que daña la infraestructura urbana (Aguilar *et al.*, 2006).

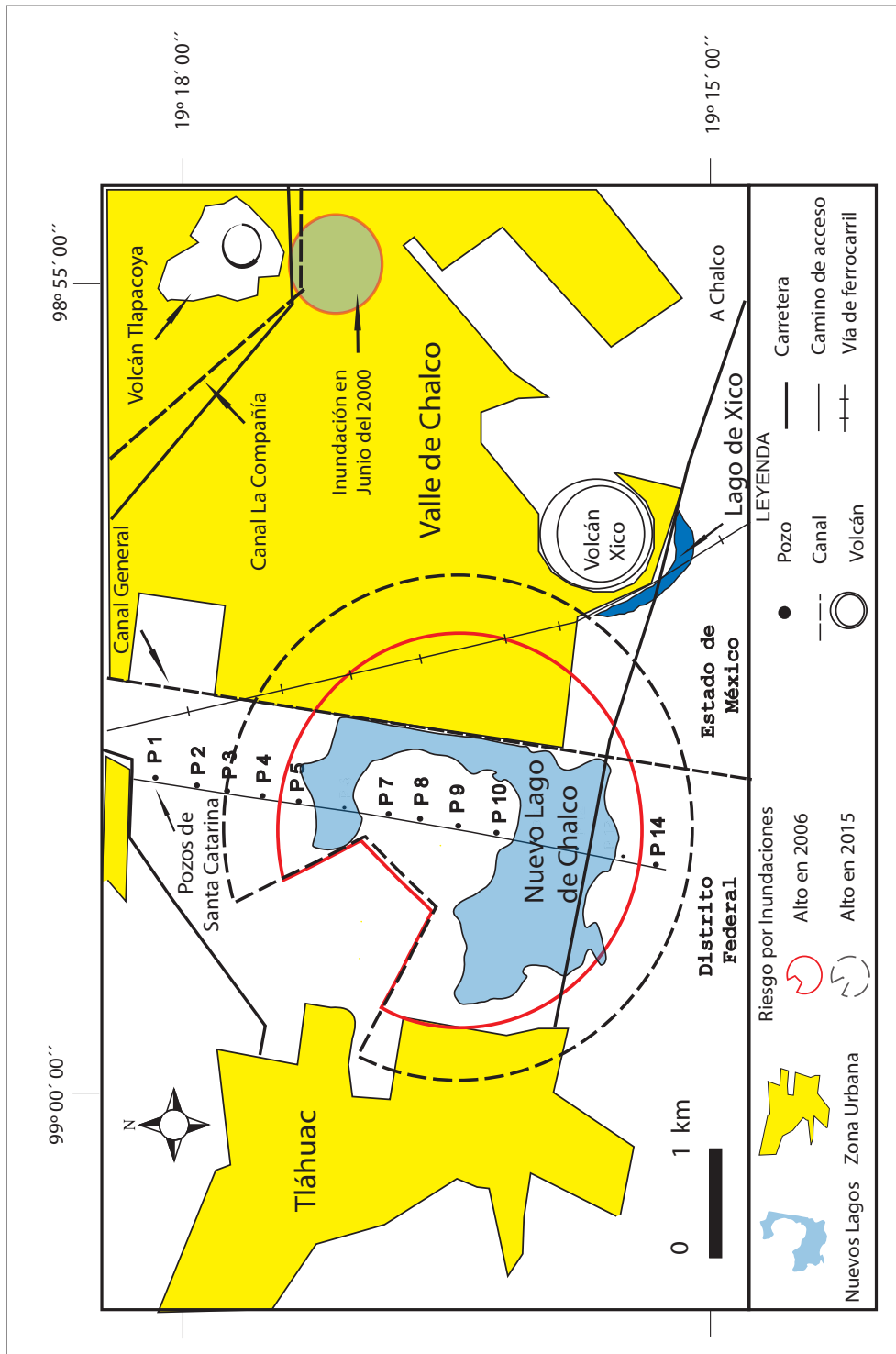


Figura 6. Mapa de Peligros. El círculo rojo presenta la zona que se ubica prácticamente a 12 m por debajo del nivel original del terreno. El Canal General protege la zona urbana de ser inundada. Existen varias colonias sujetas a riesgo. El círculo exterior achurado representa el límite estimado de peligro de inundación en el 2015. Se muestra la ubicación de la zona inundada en junio de 2000 por rotura del canal La Compañía

Se encuentra en proceso el análisis del origen y dinámica del agrietamiento en la zona y la influencia del proceso de deformación vertical del terreno.

Consideraciones para la Planeación del Desarrollo Regional y Ordenamiento del Territorio

La necesidad de seguir abasteciendo a los habitantes de la Ciudad de México de agua potable, requiere mantener la extracción de agua subterránea de este sistema de pozos, lo que seguirá manifestándose como hundimientos del terreno y crecimiento del nuevo lago de Chalco. Por tal motivo, es fundamental considerar la condición dinámica del crecimiento del nuevo lago de Chalco y sus implicaciones en el proceso orientado a la transformación y organización de los espacios y los territorios del Estado de México y Distrito Federal, que involucran la zona en estudio y sus alrededores. Esto implica cambios cualitativos en los planos social, económico, político, ambiental, tecnológico y territorial; incorporando principios de equidad y participación, y reconociendo las vertientes del desarrollo en un sentido integral. La organización productiva y el progreso técnico; las tareas de gobernabilidad y gestión; la preservación del ambiente y la organización territorial de la sociedad que habita al interior de las mismas es una necesidad inmediata en el área en estudio para reducir los impactos negativos, incluso desastres por inundación que podrían presentarse en un futuro próximo.

La región enfrenta varios desafíos, particularmente en lo que se refiere a la competitividad de las regiones del Estado de México con el Distrito Federal, su identidad cultural y sobrevivencia social a partir de sus diversas potencialidades. Por tanto, la planeación regional es un proceso mucho más complejo que requiere la concurrencia de diversos aspectos más allá de los estrictamente económicos. Será necesario identificar los indicadores más representativos para elaborar diagnósticos

regionales, para ubicar en el desarrollo las potencialidades de las regiones consideradas, basadas en los resultados que se presentan en términos de la situación dinámica de peligro y riesgo por inundaciones.

Entre los elementos ambientales y culturales que pueden ser considerados en el desarrollo regional se tiene la naturaleza lacustre de la zona que dominó el antiguo lago de Chalco por varios miles de años hasta principios del siglo XX, cuando fue drenado. El desarrollo del nuevo lago de Chalco, como consecuencia del bombeo en el acuífero subyacente, genera condiciones similares a las que existieron en el pasado, y que son reconocidas por los pobladores nativos y por las numerosas aves migratorias que regresan ya de manera periódica a la zona. El desarrollo de vida acuática y flora nativas reconoce las condiciones naturales, por lo que la adaptación de la vida silvestre no será problema a excepción de la calidad química y biológica del agua. El agua residual, no tratada, de numerosas poblaciones y de núcleos industriales converge a través de los canales hacia el nuevo lago de Chalco. En otros casos, la rotura de estos canales puede ocasionar problemas serios de salud, como el de junio de 2000, donde el canal de La Compañía causó serios problemas de salud en la población afectada.

La pérdida de terreno agrícola, hace también necesario recuperar la posibilidad de cultivar alimentos en la zona y de dar trabajo temporal o permanente a la población rural. Una opción a evaluar, es la de aprovechar el crecimiento del nuevo lago de Chalco con el desarrollo de áreas de cultivo tipo chinampa. Las chinampas representan una opción viable ante el incremento dinámico de áreas lacustres, y cuya eficacia ha sido comprobada desde tiempo de los aztecas. Su desarrollo debe ser parte del modelo integral de la región.

Recientemente el gobierno del Estado de México declaró como "Parque Estatal Santuario del Agua Lagunas de Xico", cerca de 1556 ha del Estado de México (Gobierno del

Estado de México, 2005). A pesar de que esta es una iniciativa importante, las lagunas de Xico son aisladas y pequeñas (Figura 6); el desarrollo del lago de Chalco se da preferentemente en la delegación Tláhuac, por lo que esta declaratoria deberá modificarse e incluir un programa conjunto de planeación y desarrollo con el Gobierno del Distrito Federal; particularmente porque todo el sistema del nuevo lago de Chalco y "Lagunas de Xico", formarán parte de un solo sistema acuático en el futuro.

Se propone la creación de un Consejo Metropolitano para definir las estrategias dinámicas e integrales para la prevención de desastres y establecer las políticas mencionadas en torno al Nuevo Lago de Chalco en sus diferentes etapas de crecimiento futuro. Particularmente, la educación de la población afectada y la capacidad de las autoridades para diagnosticar e intervenir en la reubicación de familias asentadas en zonas de alto riesgo y el adecuado equilibrio entre la planeación de las áreas de conservación y mejoramiento ambiental con la reducción o mitigación del riesgo, serán elementos fundamentales para un ordenamiento del territorio, también dinámico.

CONCLUSIONES

En la parte central de la planicie lacustre del antiguo lago de Chalco se están formando zonas de acumulación superficial de agua, evidentes desde 1988. El área de influencia de estos lagos someros se ha incrementado progresivamente desde 1988 a la fecha. De unas cuantas hectáreas inundadas en 1988, se incrementó a casi 100 ha en 1991; y en la actualidad se tienen alrededor de 1 000 ha cubiertas por lagos someros.

Las depresiones topográficas, en las que se almacena el agua superficial, están asociadas a hundimientos regionales del terreno, debido a la operación de catorce pozos del denominado Sistema Mixquic-Santa Catarina, que inició la extracción de agua subterránea, en

1984. Estos pozos han generado abatimientos anuales del nivel potenciométrico del orden de 1.5 m/año; lo que da lugar a una deformación vertical del terreno de hasta 40 cm/año en el centro de la planicie, por consolidación del acuitardo lacustre.

Estos hundimientos han modificado sustancialmente el sistema de drenaje natural y de canales en la planicie lacustre que operaba desde principios del siglo XX, causando la acumulación del agua superficial y la necesidad del bombeo escalonado a lo largo del Canal General para drenar el agua hacia la planicie de Texcoco. Los ríos de La Compañía y de Amecameca, entre otros, han tenido que ser elevados al mismo ritmo de los hundimientos y constantemente son reforzados para evitar su ruptura y provocar inundaciones locales como la que ocurrió en el canal de La Compañía en junio del 2000.

Las predicciones de modelos matemáticos realizadas en el pasado han sido muy precisas en la parte central de la planicie, donde el espesor del acuitardo lacustre es de 300 m, pero no así en otras zonas de menor espesor. Se encontró que la presencia de un estrato de 30 m de espesor de roca basáltica, interestratificado a 50 m de profundidad con la secuencia lacustre, entre los pozos P7 y P10, disminuye la magnitud de los asentamientos asociados al bombeo; formando una especie de península que se extiende hacia Tláhuac y posteriormente hacia el volcán Guadalupe, que dio origen a la colada de basalto, ubicado en la Sierra de Santa Catarina.

La necesidad de seguir abasteciendo a los habitantes de la Ciudad de México de agua potable, requiere mantener la extracción de agua subterránea de este sistema de pozos, lo que seguirá manifestándose como hundimientos del terreno y crecimiento del nuevo lago de Chalco. Este nuevo lago se desarrolla entre dos importantes asentamientos humanos: Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México). De acuerdo con las tendencias observadas de hundimientos del terreno, se estima

que para el 2015 la extensión de este lago podría afectar cerca de 25 ha de la zona urbana de Tláhuac y 150 ha de Valle de Chalco. En total, se estima un crecimiento del nuevo lago entre 1 200 y 1 500 ha para el 2015, incluyendo suelo agrícola (Figura 4c).

La concentración de aguas residuales de origen urbano e industrial hacia este nuevo lago de Chalco da lugar a problemas de calidad química y biológica que pueden impactar negativamente a la población en caso de inundación y a otros seres vivos que se desarrollan en su interior.

De acuerdo con los controles y magnitud de la subsidencia regional observada, es necesario evitar un crecimiento urbano mayor entre Tláhuac y Valle de Chalco. Para reducir el peligro y riesgo de inundaciones será necesario analizar la conveniencia de incrementar la cantidad y la eficiencia de la infraestructura hidráulica a futuro contra la opción de reubicar varias colonias de Valle de Chalco y Tláhuac, en un radio aproximado de 2.5 a 3 km con centro en el pozo P9 del Sistema Mixquic-Santa Catarina.

Propiciar el crecimiento controlado del nuevo lago de Chalco para permitir el retorno masivo de aves migratorias y de especies acuáticas nativas de la región, aunado a un desarrollo ecoturístico y al cultivo en sistemas de chinampas para mejorar las condiciones sociales y económicas.

La dinámica del crecimiento del nuevo lago de Chalco tiene implicaciones importantes en el proceso orientado a la transformación y organización de los espacios y los territorios del Estado de México y Distrito Federal. Este proceso debe involucrar cambios cualitativos en los planos social, económico, político, ambiental, tecnológico, de protección civil y ordenamiento territorial; incorporando principios de equidad y participación social, reconociendo las vertientes del desarrollo en un sentido integral y también dinámico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la beca doctoral otorgada a Dalia del Carmen Ortiz. Un agradecimiento especial al Dr. John Cherry de la Universidad de Waterloo, Canadá, por su apoyo en diversas investigaciones en el acuitardo lacustre de Chalco.

REFERENCIAS

- Aguilar-Pérez, L. A., M. A. Ortega-Guerrero, J. Lugo-Hubp y D. C. Ortiz-Zamora (2006), "Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea, en las proximidades de la Ciudad de México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(3), pp. 247-261.
- Carrillo, N. (1947), *Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City*, Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, Anuario 47, vol. Nabor Carrillo, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México, 1969, pp. 7-14.
- Coch, N. K. (1995), *Geohazards, Natural and Human*, Prentice Hall, USA, p 481.
- DDF (1979), *Memorias de los detalles constructivos y operativos del Ramal Tulyehualco*, Reporte interno, México.
- Durazo, J. and R. N. Farvolden (1989), "The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations", *Journal of Hydrology*, vol. 112, pp. 171-190.
- Gobierno del Estado de México (2005), "Declaratoria de Parque Estatal Santuario del Agua Lagunas de Xico", *Gaceta del Gobierno del Estado*, núm. 119, jueves 27 de enero de 2005.
- Huizar, A. R. (1989), *Contributions à l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant (Mexique)*, *Diplôme de docteur de l'université de Besançon, Franch.*
- INEGI-INE (2000), *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*, 5 de junio de 2000, México.

- Ogura, A. y E. Soares (2000), "Procesos y riesgos geológicos", Repeto, F. y C. Karez (eds.), *Notas del II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental*, UNESCO.
- Ortega-Guerrero, M. A., J. A. Cherry and D. L. Rudolph (1993), "Large-scale aquitard consolidation near Mexico City", *Ground Water*, 31(5), pp. 707-718.
- Ortega G., M. A. (1993), *Origin and migration of pore water and salinity in the consolidating Chalco aquitard, near Mexico City*, Ph. D. thesis, University of Waterloo, Ontario, Canadá.
- Ortega-Guerrero, M. A., D. L. Rudolph and J. A. Cherry (1999), "Analysis of long-term land subsidence near Mexico City. Field investigations and predictive modeling", *Water Resources Research* 25(11), pp. 3327-3341.
- Rudolph, D. L. J. A. Cherry and R. N. Farvolden (1991), "Groundwater flow and solute transport in fracture lacustrine clay near Mexico City", *Water Resources Research*, 27(9), pp. 2187-2201.
- Rudolph, D. L. and E. O. Frind (1991), "Hydraulic response of highly compressible aquitards during consolidation", *Water Resources Research*, 27(1), pp. 17-30.
- SARH-CAVM (1981), *Boletín de mecánica de suelos*, núm. 8, 1974-1977, México.
- SARH-CAVM (1984), *Niveles piezométricos de los pozos Mixquic-Santa Catarina, en el Valle de Chalco*, reporte interno, México.
- SARH-CAVM (1991), *Relación de bancos de nivel de la zona de Santa Catarina*, Tarjetas de control internas 1984-1989, México.