

Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México

L. Antonio Aguilar-Pérez^{1,*}, M. Adrián Ortega-Guerrero^{1,},
José Lugo-Hubp² y Dalia del C. Ortiz-Zamora¹**

¹ Facultad de Ingeniería, División en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, D. F., México.

¹ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, 67230 Querétaro, México.

² Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, D. F., México.

* laap58@cancun.fi-a.unam.mx; ** maog@geociencias.unam.mx

RESUMEN

Se presenta un análisis numérico acoplado de las ecuaciones de flujo de agua subterránea y geomecánica, para evaluar la deformación vertical del terreno asociada a la extracción de agua subterránea en escenarios de acuífero libre y acuífero confinado; en este último se analizan adicionalmente las condiciones de formación de fracturas hidrodinámicas. En la parte numérica, se obtuvo la solución analítica de una integral que permite obtener los esfuerzos y desplazamientos que se generarían por la extracción de agua subterránea. La zona de estudio se ubica al NE de la Ciudad de México, en la región comprendida por el cono volcánico del Pleistoceno, conocido como el Peñón del Marqués, y sus alrededores, donde se encuentra el acuitardo lacustre sobre el cual se ubica la Ciudad de México. Tanto en el acuífero volcánico como en el acuitardo, se identificaron la distribución y características de diferentes fracturas que empezaron a formarse aproximadamente 1.5 a 2 décadas después de iniciarse la operación de un sistema de nueve pozos (Sistema Peñón). Los datos históricos de elevación del terreno, volúmenes de extracción y propiedades hidráulicas y geomecánicas se incorporaron al modelo numérico para realizar un análisis de sensibilidad y obtener la distribución de los parámetros que mejor reproducen la deformación vertical del terreno. Los resultados muestran que la extracción del Sistema Peñón, con un promedio de 527 L/s, ha causado una disminución de la carga hidráulica hasta de 35 metros en casi 40 años, dando lugar a una variación en la elevación del terreno superior a los seis metros para el acuífero confinado y de ocho metros para el no confinado. Los parámetros más sensibles a la deformación vertical fueron, en orden de importancia, el coeficiente de consolidación (C_v), la transmisividad (T) y el módulo de rigidez al corte (G), mientras que la conductividad hidráulica del acuífero confinado (K) es el más sensible a los tiempos críticos de fracturamiento. Los caudales críticos de extracción en el acuífero, de 420 L/s a 470 L/s, se sobrepasaron desde el inicio de la operación del Sistema Peñón, causando la falla mecánica de los materiales del subsuelo para condiciones de confinamiento. Se determinó también que es imposible ajustar la deformación con un solo conjunto de valores hidráulicos y geomecánicos; necesariamente se tienen que considerar dos conjuntos de valores, uno para el periodo 1960–1984 y otro para 1985–1998. Las simulaciones sugieren que, de continuarse con los actuales caudales de bombeo, la deformación total vertical del terreno será cercana a los diez metros para el año 2025.

Palabras clave: deformación vertical, subsidencia, análisis numérico, fracturamiento, Ciudad de México.

ABSTRACT

An integrated numerical analysis of the groundwater flow and geomechanical equations for land subsidence due to groundwater extraction is presented for unconfined and confined pyroclastic aquifer scenarios; in the last case, a hydrodynamic fracturing analysis is additionally conducted. An analytical solution for one of the integrals was developed and incorporated into the numerical model to analyze the stress distribution and displacements due to groundwater extraction. A study area with problems of land subsidence and fracturing was selected for the analysis; this area is located in the northeastern part of Mexico City, and comprises a Pleistocene volcanic cone, known as the Peñón El Marqués, and surrounding former lacustrine plains, where Mexico City is built. In this area, the distribution and physical characteristics of fractures were identified in both, the unconfined and confined aquifer. Most of these fractures formed about 1.5 to 2 decades after a well field of nine wells started operation (Peñón well field). Historical evolution of land elevation, volumes of groundwater extraction, and hydraulic and geomechanical parameters were incorporated into the numerical model for a sensitivity analysis to get the best fit between observed and modeled results. Results show that an average of 527 L/s groundwater extraction in the well system, for about 40 years, have led to a drawdown of 35 m in the hydraulic head of the pyroclastic aquifer, causing a land subsidence of six meters in the confined aquifer area and of eight meters in the unconfined aquifer area. The more sensitive parameters to land subsidence, in order of importance, were the consolidation coefficient (C_v), the transmissivity (T) and the shear modulus (G), whereas the hydraulic conductivity (K) of the confined aquifer was the more sensitive parameter for the critical time estimation for fracturing. Obtained results indicate that the critical pumping rate in the volcanic aquifer, between 420 L/s and 470 L/s, was exceeded since the beginning of the well field operation, which caused the mechanical failure of the underground materials for confining conditions. We also found that the vertical ground deformation with time cannot be reproduced in the numerical simulations with one set of parameters; two sets of parameters were needed to obtain a best fit, one for the 1960–1984 period, and another one for the 1985–1998. Numerical simulations predict a total land subsidence of ten meters by the year 2025, two additional meters for the confined aquifer and four additional meters for the unconfined aquifer.

Key words: vertical deformation, integrated análisis, land subsidence, fracturing, Mexico City.

INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) depende principalmente del agua subterránea para el abastecimiento de casi 25 millones de habitantes y cerca del 30% de la industria del país (INEGI-INE, 2000). El agua subterránea se extrae de un acuífero granular regional aluvio-piroclástico del Terciario y de un acuífero en materiales de origen volcánico del Pleistoceno (Ortega-Guerrero y Farvolden, 1989). Aproximadamente 52 m³/s, de un total de 65 m³/s que se extraen para la ZMCM, se extraen de estos acuíferos (NRC-AIC-ANI 1995).

La extracción del agua subterránea en el acuífero granular regional se inició a mediados del siglo XIX y se intensificó en las décadas de 1940 y 1950 causando hundimientos anuales hasta de 0.50 m/año en el centro de la ciudad de México, lo que ha provocado severos daños a edificios coloniales e infraestructura urbana (Carrillo, 1947; Marsal y Masari, 1959). Con el fin de reducir la velocidad de los hundimientos en el centro de la ciudad, se descentralizó la explotación a la periferia de la ciudad. Como consecuencia de esta descentralización, el problema de hundimientos y fracturamiento del terreno se concentró en las nuevas áreas de explotación de agua subterránea.

Diferentes autores han estudiado el problema de la

consolidación y el fracturamiento en la ciudad de México y sus alrededores. Entre los trabajos clásicos de consolidación se tienen los de Carrillo (1947), Marsal y Mazari, (1959), Rudolph y Frind (1991), y Ortega-Guerrero *et al.* (1999); entre los relacionados a la ocurrencia de fracturas están los de Auvinet (1981), de Cserna *et al.* (1987), Arias (1989), y Lugo-Hubp *et al.* (1991, 1995), entre otros; mientras que entre los modelos teóricos de formación de fracturas destacan los de Juárez-Badillo (1961, 1975), Juárez-Badillo y Figueroa-Vega (1984), Figueroa-Vega (1987, 1989), Alberro y Hernández (1990), Juárez-Luna *et al.* (2002), entre otros.

A pesar de los diferentes estudios existentes y de los problemas que generan la deformación del terreno y la formación de fracturas, no existen en México, hasta donde sabemos, investigaciones que analicen conjuntamente la evolución del comportamiento hidráulico y de las propiedades geomecánicas del acuífero. Por tal motivo, en una primera etapa, se integraron las ecuaciones de flujo de agua subterránea y geomecánicas para realizar un análisis de la deformación del terreno y de las condiciones de esfuerzo bajo las cuales se pueden formar fracturas asociadas a la extracción del agua subterránea para el caso de acuífero libre y acuífero confinado; en etapas posteriores se considerará el caso de acuífero semiconfinado y la instrumentación

detallada del subsuelo para medir las variaciones de las propiedades mencionadas con la profundidad y la respuesta transitoria de los acuíferos y acuitardos. Para esta primera etapa, se seleccionó una área de explotación intensiva de agua subterránea donde los fenómenos de hundimientos y fracturamiento fuesen críticos. Este sitio fue el Peñón del Marqués, localizado al sureste de la ciudad de México (Figura 1), donde se identificaron y describieron diversas familias de fracturas, las cuales fueron integradas en un sistema de información geográfica. Adicionalmente se realizaron simulaciones numéricas para predecir la deformación vertical del terreno hasta el año 2025.

HIDROGEOLOGÍA EL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en los límites orientales del Distrito Federal con el Estado de México, en la Delegación Iztapalapa (Figura 1). Esta área comprende al cono volcánico cuaternario denominado Peñón del Marqués y sus alrededores. La Figura 2a presenta la distribución superficial de unidades hidrogeológicas en el área. El Peñón del Marqués constituye un acuífero en rocas volcánicas fracturadas y materiales piroclásticos del Pleistoceno, similar al Cerro de la Estrella y a la Sierra de Santa Catarina. En sus alrededores existe un acuitardo en materiales lacustres originados por el depósito de material fino, principalmente, en las antiguas zonas de lagos. La sección geológica (Figura 2b) muestra la distribución de estos sedimentos lacustres, los cuales tienen, de acuerdo a la información de cortes litológicos (DDF-DGCOH, 1993, 1996a), un espesor del orden de 40 m. En el área de los pozos P-110 a P-112, el acuitardo lacustre

sobreyace a un estrato de arenas y gravas, el cual cubre a un segundo acuitardo formado por sedimentos arcillosos. Toda esta secuencia se encuentra subyacida por el acuífero regional, compuesto en forma local por materiales piroclásticos y rocas basálticas fracturadas. En esta sección también se observa que el acuífero libre aflora donde están ausentes los sedimentos arcillosos, como es el caso de la zona al pie del Peñón del Marqués y del Cerro de la Estrella.

La sección hidrogeológica (Figura 2c) muestra la distribución de las unidades hidrogeológicas en el subsuelo a partir de la interpretación de cortes litológicos disponibles (Figura 2b); se aprecia que el acuitardo lacustre confina localmente al acuífero en rocas volcánicas y materiales piroclásticos. Entre los pozos P110 y P111 se ubica un acuífero de gravas y arenas con espesor de 20 metros entre dos acuitardos, el superior de 40 m de espesor y el inferior de 25 m; los 116 m inferiores corresponden al acuífero volcánico.

Entre 1957 y 1959 se perforaron un total de nueve pozos (P107 a P115), a profundidades entre 200 y 250 metros, en el acuífero volcánico del Pleistoceno denominado como Sistema Peñón (Figura 2d). A principios de 1960 se inició la operación de los nueve pozos y después de 1.5 a 20 años inició la aparición de fracturas de diferentes dimensiones sobre el terreno, asociadas a la intensa deformación vertical del terreno, tanto en el acuífero volcánico como en el acuitardo lacustre que le subyace en la antigua zona de lago. La deformación vertical del terreno en la zona de estudio ha sido medida periódicamente desde 1985 por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Distrito Federal, en trece bancos de nivel (BN1 a BN13) con la ubicación que se muestra en la Figura 2d.

En la zona del Peñón del Marqués se han realizado diversos estudios de mecánica de suelos y de actualización de estudios regionales de aguas subterráneas (DDF-DGCOH, 1988, 1993, 1994, 1996a, 1996b, 1999, 2000; CNA-GAVM, 1991; DDF-DI, 1995). Estos estudios aportan información sobre diferentes aspectos de evolución de los hundimientos regionales y de las cargas hidráulicas en el acuífero confinado, así como de algunas propiedades mecánicas e hidráulicas de los materiales del subsuelo. Ninguno de los estudios disponibles integra un modelo conceptual del proceso de deformación vertical del terreno y del fracturamiento utilizando un análisis numérico que integre las ecuaciones de flujo y geomecánicas para estudiar los procesos asociados.

MÉTODOS

Se realizaron recorridos detallados de la zona de estudio para identificar y describir las características y medir los desplazamientos verticales y horizontales de las diferentes fracturas existentes. Las mediciones se realizaron a escala 1:2,000, con apoyo de un sistema de posicionamiento global marca Garmin.

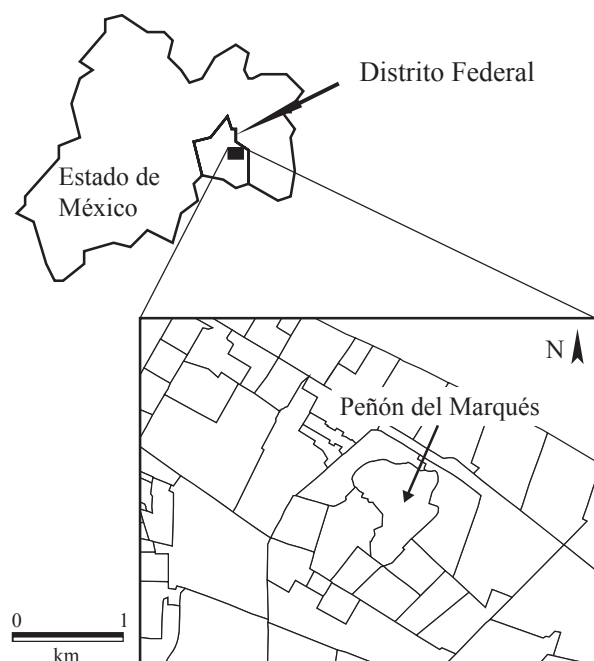


Figura 1. Localización del área de estudio.

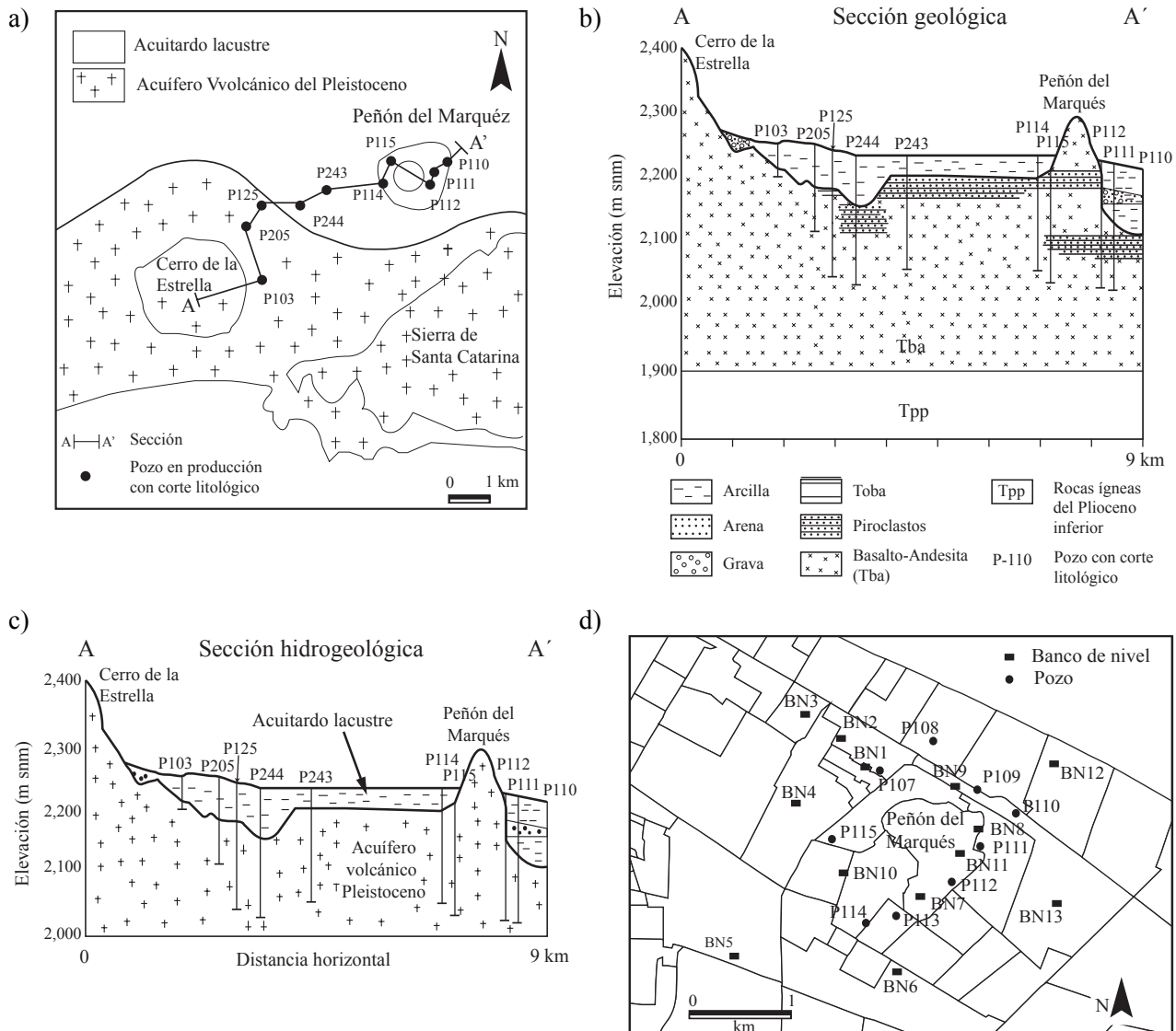


Figura 2. a) Distribución de unidades hidrogeológicas; b) sección geológica; c) sección hidrogeológica; d) localización de pozos (P) y bancos de nivel (BN). Los cortes litológicos de los pozos fueron tomados de DDF-GDCOH (1993, 1996a).

La información de campo y la distribución de las fracturas se integró a un Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView[®]. En este mismo sistema se incluyó la base urbana y la localización de pozos y bancos de referencia topográfica disponibles en la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Distrito Federal (Figura 2d).

Para establecer la evolución histórica de la extracción del agua subterránea y de la deformación del terreno se usó información de la DGCOH relacionada con la operación de los nueve pozos, la cual incluye la evolución de los niveles piezométricos y el registro de la elevación del terreno con el tiempo, entre otros (DDF-DGCOH, 1994, 1999). De igual manera se consultaron reportes técnicos y publicaciones relacionadas (DDF-DGCOH, 1988–2000).

Para el análisis numérico de la extracción de agua subterránea y de la deformación del terreno se desarrolló un modelo numérico en programación FORTRAN77 en el que consideran las ecuaciones de flujo de agua subterránea, para acuífero libre y acuífero confinado, con ecuaciones geomecánicas (Bear y Corapcioglu, 1981a, 1981b; Corapcioglu y Bear, 1983). El caso de acuífero semiconfinado se encuentra en desarrollo. La teoría de formación de fracturas debida a fuerzas de filtración en un acuífero en un radio específico sujeto a bombeo para acuífero confinado de Juárez-Badillo y Figueroa-Vega (1984) fue integrada a este modelo numérico, donde una de las integrales para obtener la distribución de esfuerzos y deformación horizontal fue resuelta por medio de una solución analítica que se presenta en los fundamentos teóricos, ya

que los autores mencionados sólo presentaron soluciones gráficas. El proceso numérico utilizó información histórica de la deformación del terreno registrada en bancos de nivel y el registro de la evolución de los niveles piezométricos en los pozos. Los parámetros geomecánicos e hidráulicos se obtuvieron de los estudios disponibles y de la literatura científica. Se realizó un análisis de sensibilidad de algunos parámetros hidráulicos y geomecánicos. Una vez que el modelo reprodujo satisfactoriamente los hundimientos del terreno, para el periodo de 1960 a 1998, éste fue utilizado para realizar predicciones de la deformación del terreno al año 2025.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Acuífero libre

Las ecuaciones que relacionan los procesos acoplados de abatimiento del nivel piezométrico con la deformación vertical del terreno para un acuífero libre o no confinado, en función de caudales variables de extracción están definidas por Corapcioglu y Bear (1983). El abatimiento del nivel freático (S_w) está definido por la ecuación

$$S_w = \frac{Q_w}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

donde S_w es el abatimiento del nivel freático [L], Q_w es el caudal de extracción del pozo [LT^{-1}]; T es la transmisividad [L^2T^{-1}]; y $W(u)$ es una función de pozo definida por la expresión

$$W(u) = \int_u^{\infty} e^{-u} \frac{du}{u} \quad (2)$$

donde u es:

$$u = \frac{r^2}{4r \left[\frac{S_y}{T} + \frac{1}{C_v^*} \right]^{-1}} \quad (3)$$

con r igual a la distancia horizontal del el pozo de bombeo al punto de interés [L]; S_y igual a la capacidad específica del acuífero libre (adimensional); y C_v^* igual al coeficiente de consolidación, definido por la siguiente expresión (Corapcioglu y Bear, 1983):

$$C_v^* = C_v \left(1 + \frac{2}{S_y} \right) \quad (4)$$

donde C_v es el coeficiente de consolidación del acuífero libre [L^2T^{-1}] de acuerdo con Freeze y Cherry (1979). También se le denomina difusividad hidráulica y es el cociente de la transmisividad (T) sobre el coeficiente de almacenamiento (S).

Los términos utilizados para calcular el desplazamiento vertical del terreno en un acuífero libre de acuerdo con Corapcioglu y Bear (1983) son:

$$D_v = \frac{Q_w}{8\pi C_v} \left[\frac{S_y C_v^*}{2 C_v} + \frac{\gamma_w S_y C_v}{2GK} \right] W(u) \quad (5)$$

donde D_v es la subsidencia del terreno o deformación vertical [L]; Q_w es el caudal de extracción. K es la conductividad hidráulica [LT^{-1}]; y γ_w es el peso específico del agua [N/m^3], ($\gamma_w=9,806 N/m^3$). G es el módulo de rigidez al corte [FL^{-2}], el cual se define como el cociente del esfuerzo cortante entre la deformación por cizalla y es diferente de la resistencia al esfuerzo cortante, que es el máximo esfuerzo por corte que un material puede soportar (Goodman, 1989).

Adicionalmente, el desplazamiento horizontal es definido por:

$$D_H = \frac{Q_w r}{16\pi C_v B} \left[W(u) + \frac{1-e^{-u}}{u} \right] \left[\left(1 + \frac{S_y}{2} \right) - \frac{S_y \gamma_w C_v}{2GK} \right] \quad (6)$$

donde D_H es el desplazamiento horizontal [L] y B es el espesor del acuífero libre [L].

Acuífero confinado

Para el caso de un acuífero confinado, las ecuaciones que relacionan los procesos acoplados de abatimiento del nivel piezométrico con la deformación vertical del terreno, en función de caudales variables de extracción, están definidas por Corapcioglu y Bear (1983). Donde el abatimiento del nivel piezométrico queda también definido por las ecuaciones 1 y 2, con u para el acuífero confinado definido como:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (7)$$

en donde S es el coeficiente de almacenamiento del acuífero, y t es el tiempo.

El desplazamiento vertical del terreno se obtiene con la siguiente ecuación:

$$D_v = \frac{Q_w}{4\pi C_v} W \left(\frac{r^2}{4C_v t} \right) \quad (8)$$

El desplazamiento horizontal en un acuífero confinado es definido por la expresión:

$$D_H = \frac{-Q_w r}{16\pi C_v B} \left[W(u) + \frac{1-e^{-u}}{2u} \right] \quad (9)$$

Aplicación de criterios de falla en el acuífero por efecto del bombeo

El criterio de formación de fracturas de tensión en acuíferos confinados es propuesto por Juárez-Badillo y

Figueroa-Vega (1984). Con base en esta teoría se calcula el tiempo y los caudales críticos de extracción que permitirían la aparición de fracturas en la zona bajo estudio, una vez iniciada la extracción del agua subterránea en el Sistema de Pozos del Peñón.

Juárez-Badillo y Figueroa-Vega (1984) desarrollaron las soluciones de esfuerzos (σ) y desplazamientos (D_H) causados por abatimientos piezométricos ocasionados durante el bombeo del acuífero confinado. Las condiciones de frontera que se aplican en este artículo son las propuestas por estos autores, y las ecuaciones utilizadas son:

$$\sigma_x = (1 - K_o) \left(\frac{1}{u_c} \right) \cdot \int_0^{u_c} \beta D(\beta) d\beta - u D(u) - (1 - K_o) \left(\frac{q'_c}{q'} \right) \left(u - \frac{1}{2} u_c \right) \quad (10)$$

y

$$D_H = - \left[\int_0^u \beta D(\beta) d\beta - \frac{u}{u_c} \int_0^{u_c} \beta D(\beta) d\beta - \frac{1}{2} \left(\frac{q'_c}{q'} \right) u (u_c - u) \right] \quad (11)$$

donde K_o es el coeficiente de empuje en reposo del acuífero (adimensional) definido por Juárez-Badillo y Figueroa-Vega (1984); q' es el caudal de extracción; q'_c es el caudal de extracción crítico que se produce cuando los esfuerzos cortantes alcanzan el valor de la resistencia del suelo a dicho esfuerzo y por consiguiente se produce la fractura (Juárez-Badillo y Figueroa-Vega, 1984). El abatimiento crítico es el abatimiento del nivel piezométrico que produce la fractura, y está en función del esfuerzo definido por la ecuación (10). El tiempo crítico para producir fractura es denominado t_c , y está en función del valor del abatimiento crítico y caudal de extracción.

En las ecuaciones anteriores, la integral de la función $D(u)$, en el caso de flujo transitorio se define por la ecuación siguiente (Juárez-Badillo y Figueroa-Vega, 1984):

$$I = \int_0^u \beta D(\beta) d\beta \quad (12)$$

donde:

$$\beta = x \sqrt{\frac{S}{4Tt}} \quad (13)$$

y la función $D(u)$ en términos de β se define como:

$$D(\beta) = \beta^{-1} \pi^{-1/2} \exp(-\beta^2) - 1 + erf(\beta) \quad (14)$$

Los autores mencionados sólo presentan soluciones gráficas de esta integral y no presentan la solución numérica. Por tal motivo, y para fines del presente artículo, la integral anterior fue resuelta y programada para obtener los esfuerzos y desplazamientos que se generarían por la extracción de agua subterránea y determinar las condiciones formación de fracturas.

Solución de la integral ($I = \int_0^u \beta D(\beta) d\beta$)

La función error se integró mediante series, aplicando la siguiente ecuación (Lamarsh, 1966):

$$erf(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{u^{2n-1}}{(2n-1)(n-1)!} \quad (15)$$

La derivada del producto de las dos funciones que forman el integrando de I en términos de la variable es igual a

$$\frac{d}{d\beta} [\beta D(\beta)] = -D'(\beta) \quad (16)$$

donde:

$$D'(\beta) = 1 - 2\pi^{-1/2} \int_0^{\beta} \exp(-\alpha^2) d\alpha = 1 - erf(\beta) = erfc(\beta) \quad (17)$$

por lo que:

$$d[\beta D(\beta)] = -D'(\beta) d\beta \quad (18)$$

Integrando con respecto a β :

$$\beta D(\beta) = - \int D'(\beta) d\beta \quad (19)$$

la integral definida constituye la solución requerida:

$$\int_0^u \beta D(\beta) d\beta = - \int_0^u \int D'(\beta) d\beta d\beta \quad (20)$$

Sustituyendo el valor de $D'(\beta)$ en la anterior expresión:

$$\int_0^u \beta D(\beta) d\beta = - \int_0^u \int [1 - erf(\beta)] d\beta d\beta \quad (21)$$

y realizando la primera y segunda integración se obtiene:

$$\int_0^u \beta D(\beta) d\beta = - \left[\int_0^u \beta d\beta + \int C_3 d\beta - \int_0^u \beta erf(\beta) d\beta + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-\beta) d\beta \right] \quad (22)$$

Realizando las integrales individuales y sustituyendo los límites para u y 0 obtenemos la solución final, definida por la siguiente ecuación:

$$\int_0^u \beta D(\beta) d\beta = - \left[\frac{u^2}{2} - \left(\frac{u^2}{2} erf(u) + \frac{u}{2\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) - \frac{1}{4} erf(u) \right) - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{\exp(u)} + 1 \right) \right] \quad (23)$$

Al sustituir la ecuación 23 en las ecuaciones 10 y 11 es posible obtener los esfuerzos y desplazamientos que se generarían por la extracción de agua subterránea y las condiciones bajo las cuales es factible la formación de fracturas, además de poder realizar análisis de sensibilidad de parámetros.

RESULTADOS

Distribución de las fracturas

La Figura 3 muestra la distribución de fracturas en el área del Peñón del Marqués y sus alrededores. A partir de su ubicación y descripción física, se identificaron tres tipos principales de fracturas, tanto en la zona del acuífero volcánico, como del acuitardo lacustre:

1) Fracturas en materiales volcánicos, paralelas a las curvas topográficas del Peñón del Marqués. Estas fracturas se encuentran espaciadas entre 20 y 50 metros, con longitudes que varían de 200 a 500 metros. Los desplazamientos verticales medidos son hasta de 0.7 m y los horizontales hasta de 0.10 m.

2) Fracturas en el acuitardo lacustre con orientación preferencial NW 30°–45° SE en la porción sureste del Peñón, las cuales ocasionalmente coinciden con fracturas que se desarrollan sobre las calles y que están asociadas a tuberías o infraestructura urbana. La longitud de estas fracturas varía entre 20 y 350 m, con espaciamientos variables. Los desplazamientos verticales medidos son hasta de 0.05 m y horizontales de 0.10 m.

3) Fracturas en el acuitardo lacustre. Estas fracturas son poco frecuentes y presentan una orientación preferencial NE–SW. La longitud de estas fracturas es de 20 a 50 m, con desplazamientos verticales hasta de 0.05 m y horizontales de 0.06 m.

Extracción de agua subterránea

Los nueve pozos que constituyen el Sistema Peñón (Figura 2c) iniciaron su operación a principios de 1960. Cada pozo extrae un caudal promedio que varía entre 20 y 100 litros por segundo. La extracción promedio en litros por segundo promediada por mes en cada uno de los pozos para el periodo 1985–1995 se presenta en la Figura 4a. La extracción promedio anual del Sistema Peñón, para el mismo periodo de tiempo, se ilustra en la Figura 4b, donde la extracción total varía entre 490 y 600 litros por segundo, con un promedio de 527 L/s.

Evolución de la carga hidráulica

La Figura 5 muestra la evolución de la carga hidráulica para dos de los nueve pozos del Sistema Peñón durante el periodo disponible de 1960 a 1998. En esta figura se observa en el pozo P115 una carga hidráulica de 2,230 metros en 1960 y de 2,195 metros en 1998, lo cual refleja el descenso progresivo de la carga hidráulica con el tiempo. En el caso del pozo P110, la pérdida de carga hidráulica es prácticamente similar para el periodo de observaciones disponible (1985–1995). La variación de la carga hidráulica para el pozo P115 es de 35 metros en un periodo de casi 38 años,

lo que representa un promedio de 0.92 metros por año para ese periodo. Sin embargo, los abatimientos principales se generaron en el periodo de 1986 a 1998, cuando se registra un decremento de 15 metros en la carga hidráulica, esto es, un promedio de 1.25 metros/año.

Evolución de la elevación del terreno

La Delegación Iztapalapa cuenta con cerca de 100 puntos de referencia de elevación del terreno; trece de estos sitios (BN1 a BN13) se ubican en el área de estudio (Figura 2c, Tabla 1). Los datos de elevación del terreno en los bancos de nivel son registrados por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) cada dos años para el periodo de 1980 a 1997. La evolución de la deformación vertical del terreno se ilustra en la Figura 6 para dos de los sitios, uno de los cuales se encuentra sobre el acuífero en condiciones confinadas (BN13) y otro en condiciones no confinadas (BN7), de acuerdo con la localización de la Figura 2c. El sitio BN13 sufrió una deformación vertical total de casi seis metros hasta 1998, mientras que el sitio BN7, en la zona lacustre, se hundió más de ocho metros, a esa misma fecha. A partir de la década de 1980, las tendencias de los hundimientos del terreno muestran que el sitio BN13 sigue un decremento progresivo, mientras que tienden a estabilizarse en el sitio ubicado en la zona lacustre (BN7). Para el sitio BN7 pueden diferenciarse dos periodos de deformación, uno anterior y otro posterior a 1985, aspecto que se detalla en la sección de resultados del análisis numérico.

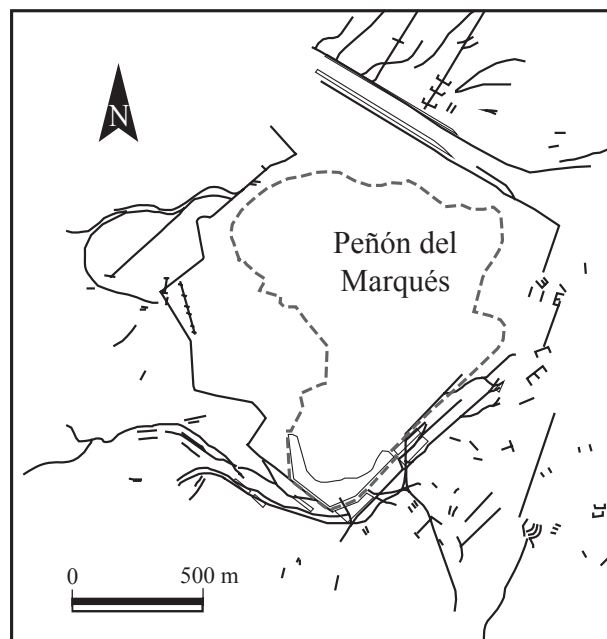


Figura 3. Ubicación y distribución de las diferentes familias de fracturas en el Peñón del Marqués y sus alrededores.

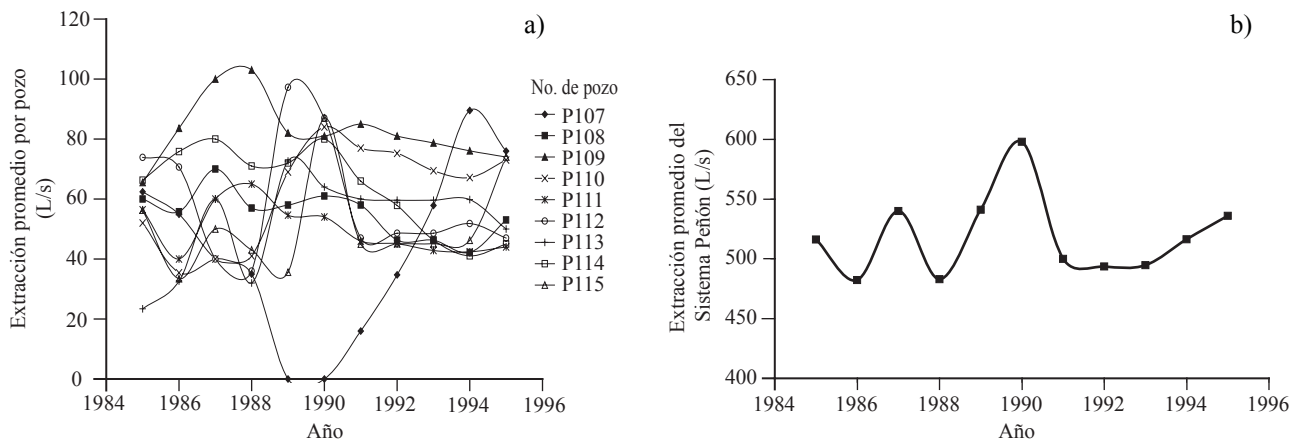


Figura 4. a) Evolución de la extracción de agua subterránea en los nueve pozos del Sistema Peñón; b) Evolución promedio de la extracción de agua subterránea en el Sistema Peñón.

Análisis numérico

Estrategia de simulación

Se seleccionaron dos sitios hidrogeológicamente diferentes para el análisis numérico: Uno donde el acuífero es libre, y otro donde el acuífero se encuentra confinado por el acuitardo lacustre. La evolución de la deformación vertical del terreno está definida en el primer caso por el sitio BN7, y en el segundo caso por el sitio BN 13. Los parámetros hidráulicos y geomecánicos utilizados corresponden a los valores reportados en los estudios disponibles realizados en la zona. En el caso de datos no disponibles como los valores de G , E y C_v , se recurrió a rangos de valores, provenientes de la literatura científica (Freeze y Cherry, 1979; Corapcioglu and Bear, 1983; Goodman, 1989), para materiales similares. El modelo fue alimentado con los diferentes rangos de valores para los parámetros hidráulicos y geomecánicos, incorporando los abatimientos piezométricos medidos en los pozos cercanos. Esto permitió evaluar el efecto de la variación de los diferentes parámetros en la reproducción de la deformación vertical del terreno para cada uno de los sitios, y encontrar, a través de ensayo y error, las aproximaciones más cercanas a los registros de hundimiento. Las simulaciones se realizaron a partir del inicio de la operación de los pozos del Sistema Peñón, considerando la extracción registrada en los mismos. El cálculo para el tiempo de aparición de fracturas y los caudales críticos se apoyó en dichos resultados, y se aplicó para el caso de acuífero confinado, donde el criterio de esfuerzos debidos a fuerzas horizontales de filtración de Juárez-Badillo y Figueroa-Vega (1984) fue utilizado.

El modelo físico para cada uno de los sitios fue el siguiente: (1) En el caso del acuífero libre, se consideró un espesor de 250 metros donde se extiende el acuífero en materiales volcánicos, que incluyen principalmente depósitos piroclásticos y, en menor proporción, lavas muy fracturadas; para fines prácticos se consideró un medio

equivalente granular; y (2) para el segundo caso, de acuífero confinado, se consideró un espesor total de 205 metros, con cuatro unidades hidrogeológicas, la primera constituida por un acuitardo lacustre de 40 m de espesor, la segunda por un acuífero granular de gravas y arenas con un espesor de 20 metros, la tercera por otro acuitardo lacustre de 29 metros de espesor, y la cuarta por un acuífero en materiales volcánicos, principalmente de tipo piroclástico, con un espesor de 116 metros (Figuras 2b y 2c).

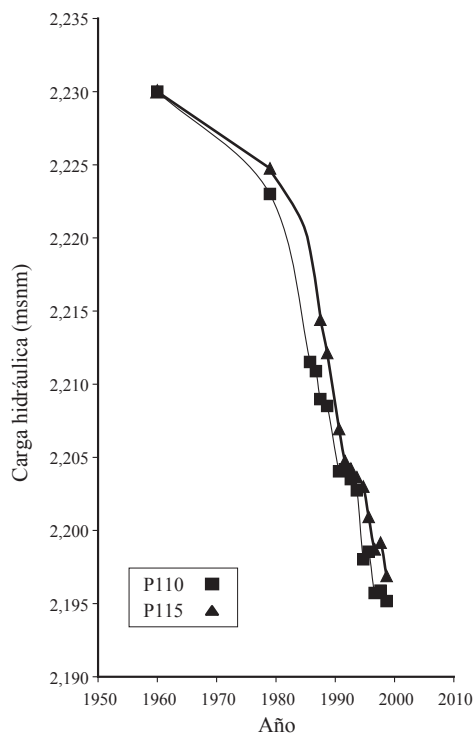


Figura 5. Evolución de la carga hidráulica en el acuífero volcánico para los pozos P110 y P115 del Sistema Peñón.

Tabla 1. Equivalencia de la numeración de bancos de nivel usada por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Distrito Federal (DDF-DGCOH) y la utilizada en este documento.

Banco de nivel	
DDF-DGCOH	Este estudio
M(S04E07)02	BN1
P(S04E07)01	BN2
M(S04E07)01	BN3
P(S05E08)03	BN4
P(S05E07)07	BN5
P(S05E07)03	BN6
M(S04E07)04	BN7
P(S05E08)02	BN8
P(S04E08)02	BN9
P(S05E07)01	BN10
P(S05E08)02	BN11
P(S04E08)01	BN12
M(S05E08)02	BN13

Acuífero no confinado

Para la simulación de los hundimientos del terreno y los abatimientos del nivel freático en el sitio BN7 se realizó un análisis de sensibilidad de parámetros hidrogeológicos y geomecánicos. De acuerdo con el análisis numérico fue imposible reproducir los hundimientos del terreno posteriores al inicio de la operación de los nueve pozos del Sistema Peñón usando una sola combinación de parámetros. Para ello fue necesario considerar un periodo de deformación previo a 1985 y otro posterior a 1985. El único evento de importancia ocurrido en 1985, y que pudo modificar la deformación del terreno y la magnitud de algunos parámetros hidráulicos y geomecánicos, fue el sismo de Septiembre 19 que causó severos daños a la infraestructura urbana, casa habitación y edificios.

La Figura 7a muestra la evolución de la deformación vertical del terreno en función del módulo de resistencia al corte (G). El valor de G se hizo variar en el rango entre 400 N/cm^2 , asociado a arcillas (Marsal y Mazari, 1959), y $141,467 \text{ N/cm}^2$, asociado a tobas volcánicas (Goodman, 1989); además, se utilizaron valores intermedios de $1,176 \text{ N/cm}^2$, asociado a arcillas lacustres afectadas por bombeo (Marsal y Mazari, 1959), y de $4,400 \text{ N/cm}^2$, asociado a gravas y arenas (Corapcioglu y Bear, 1983). Se presentan los resultados de dos conjuntos de valores contrastantes de T y C_v para el acuífero no confinado, los cuales se mantienen constantes a lo largo de las simulaciones, entre 1960 y 1998 (Figura 7a). Al usar valores de $T = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v = 0.039 \text{ m}^2/\text{s}$, se obtiene una aproximación a los hundimientos del terreno observados entre 1970 y 1984; pero los hundimientos para el año 1998 están sobreestimados hasta en 4 y 6 metros (Figura 7a). Por otro lado, valores de $T = 0.055 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v = 0.35 \text{ m}^2/\text{s}$ subestiman hasta en 3 m los hundimientos observados mostrados en la misma figura. Para ambos conjuntos de simulaciones, la variación de G hasta en casi tres órdenes de magnitud no tiene influencia notable en los

hundimientos observados.

El análisis de sensibilidad para el coeficiente de consolidación se presenta en la Figura 7c. Este coeficiente se hizo variar entre $C_v = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v = 10 \text{ m}^2/\text{s}$, correspondiente al rango desde arcillas a arenas (Marsal y Mazari, 1959; Freeze y Cherry, 1979; Bear y Corapcioglu, 1981a y 1981b). Los valores de transmisividad y del módulo de rigidez al corte fueron $T = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ y $G = 4,400 \text{ N/cm}^2$. En la figura se aprecia que variaciones del coeficiente de consolidación entre $C_v = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ influyen sensiblemente en la magnitud de los hundimientos, mientras que las variaciones entre $C_v = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ tienen poca influencia.

La influencia de la variación de la transmisividad del acuífero en la deformación vertical del terreno se presenta en la Figura 7c, donde este parámetro se hace variar a lo largo de las simulaciones entre $T = 0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$ y $T = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$. En forma similar al análisis del módulo de rigidez al corte, descrito previamente, se presentan dos conjuntos de simulaciones. En la Figura 7c, se consideran valores constantes para $G = 4,400 \text{ N/cm}^2$ y $C_v = 0.039 \text{ m}^2/\text{s}$; los valores de $T = 0.015 \text{ m}^2/\text{s}$ y $T = 0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$ se aproximan a los hundimientos del terreno observados entre 1970 y 1988, pero con una sobreestimación de los hundimientos de hasta 2 y 3 metros para el año de 1998; mientras que con un valor de $T = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$ se sobreestima en mucho los hundimientos. Por otro lado, un segundo conjunto de valores considera valores de $G = 4,400 \text{ N/cm}^2$ y $C_v = 0.35 \text{ m}^2/\text{s}$, los cuales subestiman

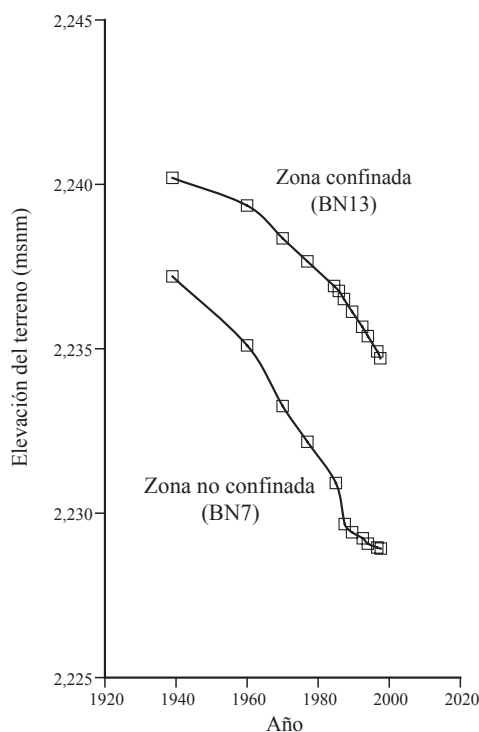


Figura 6. Evolución de la deformación vertical del terreno en los bancos de nivel BN7 (acuífero libre) y BN13 (acuífero confinado).

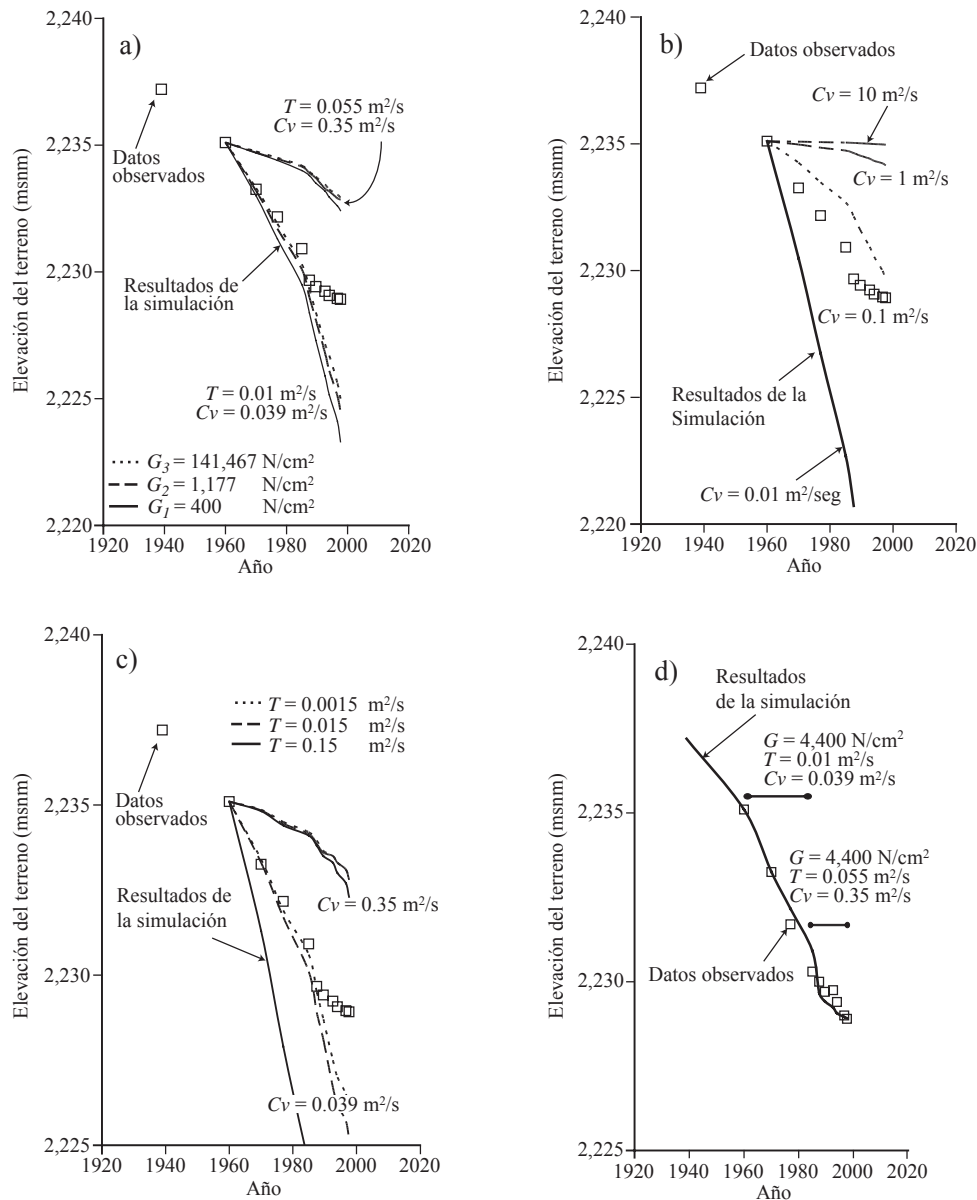


Figura 7. Resultados de las simulaciones numéricas para el caso de acuífero libre: a) Análisis de sensibilidad del módulo de rigidez al corte G (N/cm^2) contra la deformación vertical del terreno para dos conjuntos de valores de transmisividad (T) y coeficiente de consolidación (C_v); b) Análisis de sensibilidad del coeficiente de consolidación C_v (m^2/s) contra la deformación vertical del terreno para valores de $T=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ y $G=4,400 \text{ N}/\text{cm}^2$; c) Análisis de sensibilidad de la transmisividad T (m^2/s) contra la deformación vertical del terreno, para valores de $G=4,400 \text{ N}/\text{cm}^2$ y dos conjuntos de valores de $C_v=0.039 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v=0.35 \text{ m}^2/\text{s}$; d) Reproducción de la deformación vertical del terreno para dos conjuntos de valores de T y C_v , donde el módulo de rigidez al corte se mantiene constante $G=4,400 \text{ N}/\text{cm}^2$.

hasta en 4 m los hundimientos observados (Figura 7c). Para ambos conjuntos de simulaciones, la variación de T es muy sensible para valores de $C_v = 0.039 \text{ m}^2/\text{s}$, pero poco sensible para valores de $C_v = 0.35 \text{ m}^2/\text{s}$ cuya influencia en los hundimientos observados no es notable.

Se realizó un conjunto de simulaciones que representan la mejor reproducción numérica de los datos medidos de deformación del terreno: uno para el periodo de 1960 a 1984 y otro para 1985 a 1998. La reproducción numérica de los hundimientos observados en campo (Figura 7d) se obtiene

para un valor constante de $G = 4,400 \text{ N}/\text{cm}^2$, y valores de $T = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v = 0.039 \text{ m}^2/\text{s}$, en el periodo de 1960 a 1984; y de $T = 0.055 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C_v = 0.35 \text{ m}^2/\text{s}$, para el periodo de 1985 a 1998. Donde los valores de T se encuentran en el rango reportado en la zona de estudio (DGCOH, 1988, 1994 y 1996).

Acuífero confinado

Las simulaciones numéricas de evolución de la deformación del terreno y las variaciones de la carga hidráulica

en el sitio BN13 permitieron realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros mecánicos e hidrogeológicos. En este sitio, el acuitardo lacustre se encuentra cubriendo al acuífero granular regional.

Las Figuras 8a y 8b muestran los resultados de las simulaciones numéricas para analizar la sensibilidad de la compresibilidad de la tercer capa (α_3) del acuitardo lacustre, ubicado sobre el acuífero volcánico (Figuras 2b y 2c), en la evolución de la deformación vertical del terreno. La compresibilidad se hizo variar hasta cuatro órdenes de magnitud entre valores de $\alpha_3 = 1\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{N}$ y $\alpha_3 = 1\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{N}$, representativos de arcillas hasta arena (Bear y Corapcioglu, 1981a y 1981b). El otro parámetro considerado en esta parte del análisis fue la conductividad hidráulica de la cuarta capa (K_4) del acuífero volcánico, la cuál fue considerada constante a lo largo de las simulaciones a $K_4 = 1.5\text{E-}04 \text{ m/s}$. Las curvas generadas en la Figura 8a muestran la gran sensibilidad de $\alpha_3 = 1\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{N}$ y $\alpha_3 = 1\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{N}$, valores con los cuales se sobreestiman notablemente los hundimientos; mientras que $\alpha_3 = 1\text{E-}08 \text{ m}^2/\text{N}$ y $\alpha_3 = 1\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{N}$ generan resultados prácticamente similares, pero que subestiman los hundimientos en casi un metro; el rango de $\alpha_3 = 1\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{N}$ fue el que mejor se aproximó a los datos observados en el BN13.

La Figura 8b ilustra los resultados del análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica en el acuífero volcánico (K_4) y del acuífero granular (K_2). El valor de K_4 se hizo variar entre $K_4 = 1.0\text{E-}05 \text{ m/s}$ y $K_4 = 1.0\text{E-}02 \text{ m/s}$. La respuesta de su variación se observa en la Figura 8b, donde

$K_4 = 1.0\text{E-}05 \text{ m/s}$ sobreestima la deformación vertical del terreno, y los valores entre $K_4 = 1.0\text{E-}04 \text{ m/s}$ y $K_4 = 1.0\text{E-}03 \text{ m/s}$ subestiman los hundimientos. La reproducción de los datos de campo requirió considerar tres periodos de deformación: uno entre 1960 y 1970, un segundo entre 1971 a 1985 y un tercero de 1986 a 1998. La combinación de parámetros que mejor reproduce las mediciones de la deformación vertical del terreno (Figura 8c) son $\alpha_3 = 2.7\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{N}$ y $K_4 = 1.2\text{E-}04 \text{ m/s}$, para el periodo de 1960 a 1970; de $\alpha_3 = 2.5\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{N}$ y $K_4 = 1.5\text{E-}04 \text{ m/s}$, para el periodo de 1971 a 1985; y de $\alpha_3 = 2.2\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{N}$ y $K_4 = 3.3\text{E-}04 \text{ m/s}$, para el periodo de 1986 a 1998.

Predicciones numéricas de la deformación vertical del terreno

Con la distribución de parámetros hidráulicos y geomecánicos que mejor reprodujeron la deformación vertical registrada en la zona, se realizaron simulaciones hasta el año 2025 a manera de predicción de la deformación vertical del terreno en los sitios analizados. La predicción considera un abatimiento progresivo de la carga hidráulica en el acuífero, tal como la mostrada en la última década del siglo XX.

En el caso del sitio BN7, donde el acuífero es libre, la elevación del terreno alcanzaría un poco más de 2,227 msnm para el año 2025 (Figura 9); es decir más de dos metros adicionales a los observados en 1998, y un total acumulado de casi 10 m, considerado desde principios del siglo XX.

En el sitio BN13, en condiciones de confinamiento, el

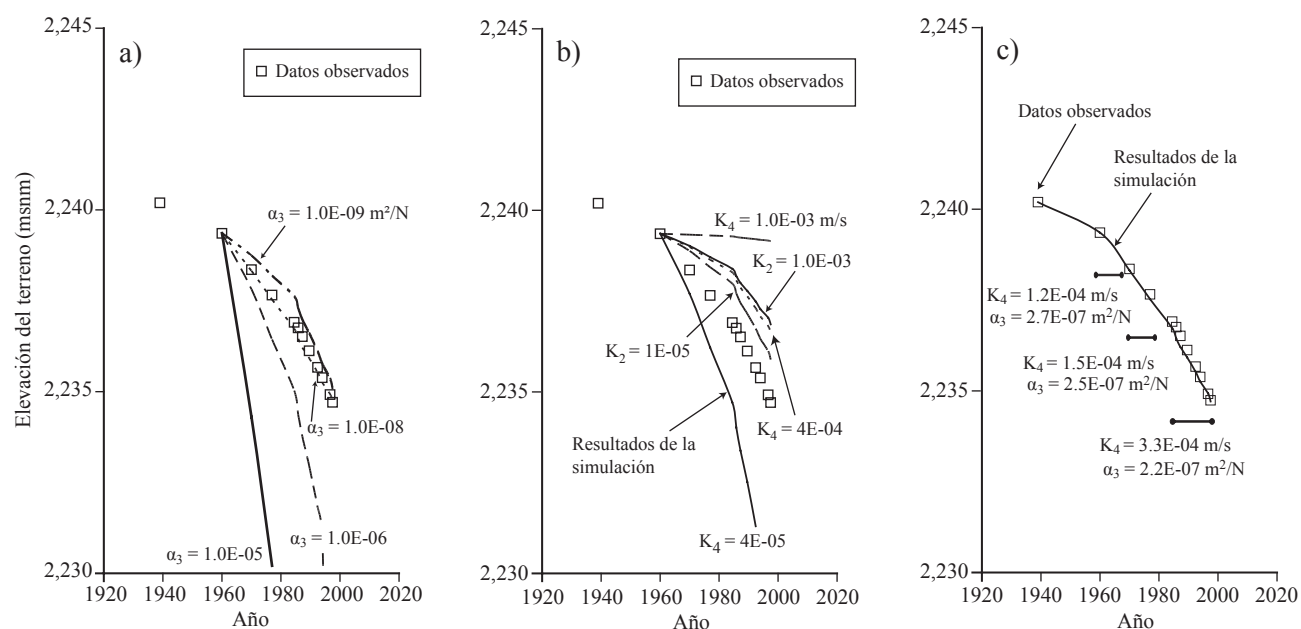


Figura 8. Resultados de las simulaciones numéricas para el caso de acuífero confinado: a) Análisis de la compresibilidad de la tercer capa α_3 (m^2/N) contra la deformación vertical del terreno para un valor de conductividad hidráulica $K_4 = 1.5\text{E-}04 \text{ m/s}$; b) Análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica de K_2 y K_4 , para dos conjuntos de valores cada uno de ellos; c) Reproducción de la deformación vertical del terreno para tres periodos de tiempo y tres conjuntos de valores para α_3 y K_4 .

terreno tendría una deformación vertical que lo ubicaría, en el año 2025, a una elevación ligeramente mayor a los 2,230 msnm (Figura 9); esto es casi 4 m de deformación vertical adicional a la de 1998 y un total acumulado de también casi 10 m en total contados desde la década de 1930.

Análisis de la generación de fracturas hidrodinámicas

La distribución de esfuerzos y desplazamientos del acuífero confinado, causados por los abatimientos piezométricos debidos al bombeo, se calcularon en esta parte del análisis, donde se determina el tiempo crítico o tiempo en el que se genera la fractura (t_c) y el caudal crítico (q_c) de extracción. Los parámetros hidráulicos y geomecánicos utilizados para aplicar el criterio de fracturas debidas a fuerzas horizontales de filtración (Juárez-Badillo y Figueroa-Vega, 1984), fueron los siguientes: coeficiente para calcular la resistencia al esfuerzo cortante en suelos coesivos y granulares entre $a=0.2$ y $a=0.6$; módulo de Poisson, $\mu=0.3$; espesor del acuífero confinado, $B=120$ m; módulo de elasticidad, $E=143,640,000$ N/m²; abatimiento del nivel piezométrico, entre $S_w=7$ m y $S_w=40$ m; conductividad hidráulica entre $K=8.0E-04$ m/s y $K=1.3E-04$ m/s; caudal de extracción del sistema de pozos, $Q=527$ L/s; coeficiente de almacenamiento, $S=0.004$; coeficiente de compresibilidad, entre $\alpha=2.125E-10$ m²/N y $\alpha=1.0E-09$ m²/N; peso específico del agua, $\gamma_w=9806$ N/m³.

Los resultados del modelo indican que el esfuerzo vertical (σ_z) es de compresión en todos los casos analizados, mientras que los esfuerzos normales a la dirección de flujo (σ_x) y perpendiculares a esta (σ_y) son de tensión en todos los casos, siendo siempre (σ_x) > (σ_y). La Figura 10a muestra la relación entre el abatimiento del nivel piezométrico y el tiempo crítico para la falla mecánica del material que conforma el acuífero, de acuerdo con los criterios de (Juárez-Badillo y Figueroa-Vega, 1984), considerando cuatro diferentes valores de conductividad hidráulica del acuífero volcánico comprendidos ente 1.0E-04 m/s y 1.0E-05 m/s, donde el caudal crítico (q_c) es de 474 L/s. Esta gráfica muestra una gran sensibilidad del valor de K_f al tiempo para la formación de la fractura, situación que no ocurre con la compresibilidad del acuífero α_4 , que produce resultados prácticamente similares a pesar de existir variaciones de cuatro órdenes de magnitud, entre $\alpha_4=1.0E-11$ m²/N y $\alpha_4=1.0E-07$ m²/N (Figura 10b).

De acuerdo con la información proporcionada por habitantes de la Delegación Iztapalapa, donde la formación de fracturas inicia entre 15 y 20 años después de iniciado el bombeo de los nueve pozos del Sistema Peñón, los resultados de la Figura 10a indicarían que para una conductividad hidráulica de 1.0E-04 m/s, los tiempos críticos entre 15 y 20 años ocurrirían con abatimientos de 6 y 10 metros en el acuífero, lo cuál sería consistente con los abatimientos registrados en los pozos del Sistema Peñón para los años entre 1975 y 1980 (Figura 6). Una conductividad hidráulica mayor representaría tiempos críticos más cortos para la generación de la fractura en la interfase acuífero-

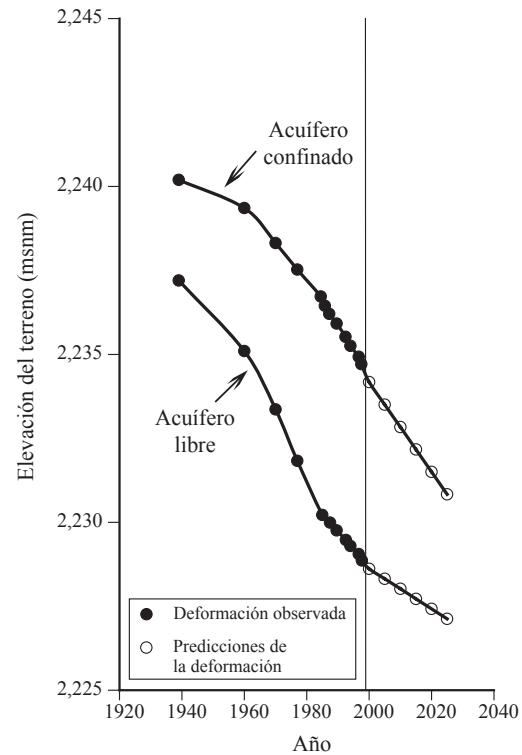


Figura 9. Predicciones numéricas de la deformación vertical del terreno al año 2025.

acuitado. En la Figura 8c, la conductividad hidráulica que mejor reprodujo la deformación vertical del terreno para el periodo 1975–1980 fue de $K_f=1.5E-04$ m/s, que teóricamente reduciría significativamente el tiempo de falla del acuitado ubicado entre 60 y 89 metros de profundidad, más el tiempo que tardaría esta fractura en extenderse, desde esa profundidad a la superficie del terreno. Por lo anterior, los resultados numéricos son consistentes con los abatimientos del nivel piezométrico y con los tiempos en que se reportó la aparición de fracturas.

Adicionalmente, dado que el caudal crítico calculado de 474 L/s, es inferior al valor promedio de extracción del Sistema Peñón de 527 L/s, es evidente que desde el principio de operación de los nueve pozos (Figura 4b) se tuvieron las condiciones para generar la falla de los materiales del subsuelo y generar sistemas de fracturas cada vez mayores.

Los resultados presentados anteriormente muestran que este tipo de análisis hidráulico y geomecánico puede ser utilizado en el diseño de sistemas de pozos, cuya operación reduzca la posibilidad de generar la formación de fracturas, y los riesgos e inconvenientes que estas representan.

CONCLUSIONES

La operación de un sistema de nueve pozos para abastecimiento de agua potable, del cual se ha extraído desde principios de 1960 un promedio de 570 L/s, ha causado

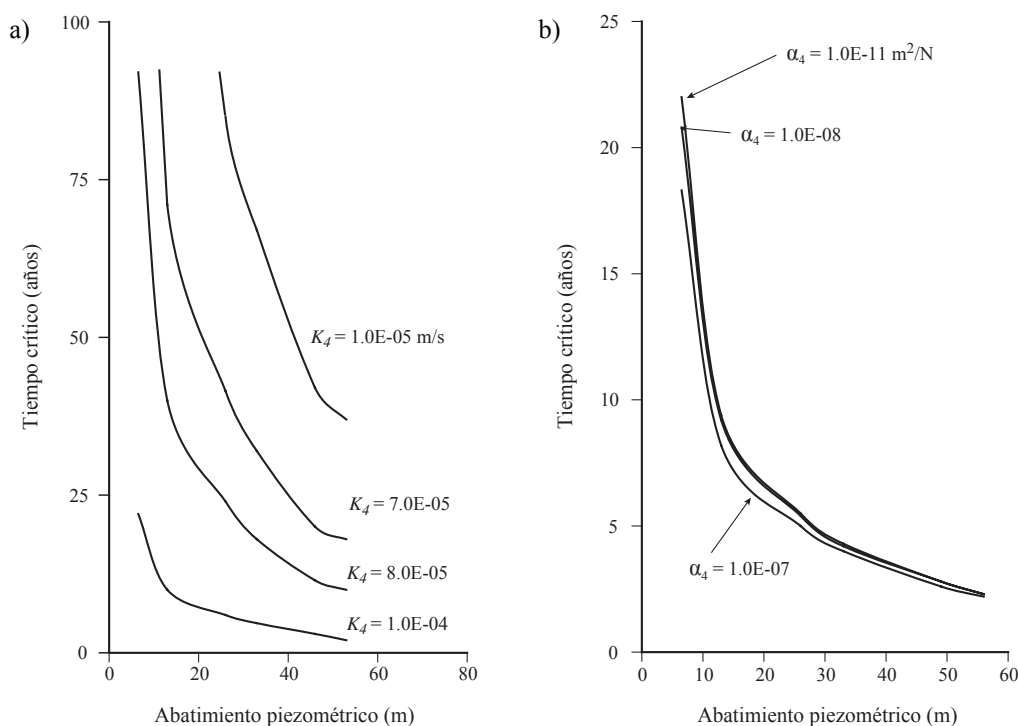


Figura 10. Generación de fracturas hidrodinámicas. a) Efecto de la conductividad hidráulica K_4 (m/s) sobre el tiempo crítico t_c (años); b) efecto de la Compresibilidad α_4 (m²/N) sobre el tiempo crítico t_c (años).

una disminución de la carga hidráulica en el acuífero de 35 metros y deformación vertical del terreno entre 6 y 8 metros, para los acuíferos confinado y libre respectivamente, en un periodo de casi 40 años. Aproximadamente entre 15 y 20 años después de iniciado el bombeo, se inició la formación de diferentes familias de fracturas, tanto en la zona donde dominan los materiales volcánicos del Peñón del Marqués, como en la zona lacustre. La deformación vertical del terreno presenta dos tendencias principales, una en el periodo de 1960 a 1984 y otra de 1985 a 1998. El único evento geológico importante que pudo haber afectado la tendencia previa fue la del sismo ocurrido en 1985 que impactó severamente a la infraestructura urbana de la Ciudad de México.

Se identificaron tres tipos principales de fracturas, tanto en la zona del acuífero volcánico, como del acuitardo lacustre: 1) Fracturas en materiales volcánicos, paralelas a las curvas topográficas del Peñón del Marqués, espaciadas cada 20–50 metros, con longitudes de 200 a 500 metros y desplazamientos verticales de hasta 0.7 m y horizontales de 0.10 m; 2) fracturas en el acuitardo lacustre con orientación preferencial NW 30°–45° SE en la porción sureste del Peñón, con longitudes entre 20 y 350 m y espaciamientos variables, desplazamiento verticales hasta de 0.05 m y horizontales de 0.10 m; y 3) fracturas en el acuitardo lacustre, poco frecuentes y con orientación NE-SW, con longitudes de 20 a 50 m, desplazamientos verticales hasta de 0.05 m y horizontales de 0.06 m.

Los resultados del análisis numérico de la deforma-

ción vertical del terreno asociados a la extracción del agua subterránea muestran que, para el acuífero volcánico, los parámetros más sensibles, en orden de importancia, son el coeficiente de consolidación (C_v), la transmisividad (T) y el módulo de rigidez al corte (G). Se encontró también que es imposible ajustar la deformación con un solo conjunto de valores hidráulicos y geomecánicos.

Para el caso del acuífero libre, necesariamente se tienen que considerar dos conjuntos de valores, uno para el periodo 1960–1984 y otro para el de 1985–1998. La combinación de parámetros que mejor reproduce la deformación del terreno para el periodo 1960–1984 son: $C_v=0.039$ m²/s, $T=0.01$ m²/s y $G=4,400$ N/cm², y para el periodo 1985–1998 son: $C_v=0.35$ m²/s, $T=0.055$ m²/s y $G=4,400$ N/cm². Esto indica un incremento de C_v y T de casi un orden de magnitud para el segundo periodo de deformación.

Para el acuífero que subyace a los depósitos lacustres, los parámetros más sensibles son la conductividad hidráulica (K_4) y la compresibilidad del acuitardo (α_3). Para este caso, la combinación de parámetros fue de $\alpha_3 = 2.7E-07$ m²/N y $K_4 = 1.2E-04$ m/s para el periodo de 1960 a 1970, $\alpha_3=2.5E-07$ m²/N, $K_4=1.5E-04$ m/s, para el periodo de 1971 a 1985, y de $\alpha_3=2.2E-07$ m²/N, $K_4=3.3E-04$ m/s, para el periodo 1986-1998.

Considerando los parámetros que mejor reprodujeron los abatimientos y deformación del terreno, se realizó una predicción hasta el año 2025. Los resultados muestran una deformación adicional de 2 metros, para el acuífero volcá-

nico y de 4 metros en la zona lacustre, considerando una reducción progresiva de la carga hidráulica de 1.25 metros anuales, como la mostrada en el periodo de 1985 a 1998. La deformación total para el año 2025 será de 10 metros en ambos casos. Los parámetros críticos para la formación de fracturas en la interfase acuífero-acuitardo fueron caudales críticos entre $q_c = 420$ L/s y $q_c = 474$ L/s, y un abatimiento crítico de $s_c = 6$ a $s_c = 10$ metros, lo que da un tiempo crítico para la falla del acuitardo menor a 10 años.

En términos de riesgo, la dinámica de estas fracturas ha generado la afectación de casas habitación, edificios públicos e infraestructura urbana, causando pérdidas y daños que suman millones de pesos y que generan una necesidad permanente de inversión en reparaciones. El estado de muchos edificios es cada vez más precario, por lo que requieren de reforzamiento continuo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Departamento del Distrito Federal y a la Delegación Iztapalapa el acceso a los informes y documentos disponibles en sus archivos. Se hace extensivo el agradecimiento a José Luis Sánchez Palacios, por su apoyo en la cartografía de fracturas, y a Francisco Urrutia por el manejo del SIG. En particular se agradece al CONACYT y al Centro de Geociencias de la UNAM las becas doctorales para Luis A. Aguilar Pérez y Dalia Ortiz Zamora.

REFERENCIAS

- Alberro, J., Hernández, R., 1990, Génesis de las grietas de tensión en el valle de México, en Simposio El subsuelo de la Ciudad de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones: México, D.F., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 95-108.
- Arias, R.A., 1989, Agrietamiento del subsuelo en el valle de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Tesis de Maestría, 153 p.
- Auvinet, G.G., 1981, Agrietamiento de las arcillas del valle de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Estudio para la Comisión del Lago de Texcoco, Reporte interno, 122 p.
- Bear, J., Corapcioglu, M.Y., 1981a, Mathematical model for regional land subsidence due to pumping; 1. Integrated aquifer subsidence equations based on vertical displacements only: Water Resources Research, 17(4), 937-946.
- Bear, J., Corapcioglu, M.Y., 1981b, Mathematical model for regional land subsidence due to pumping; 2. Integrated aquifer subsidence equations for vertical and horizontal displacements: Water Resources Research, 17(4), 947-958.
- Carrillo, N., 1947, Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City, en Volumen Nabor Carrillo; El hundimiento de la Ciudad de México y Proyecto Texcoco: México, D.F., Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, Anuario 1969, 47, 7-14.
- Comisión Nacional del Agua-Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (CNA-GAVM), 1991, Boletín de Mecánica de Suelos: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, 10, 112 p.
- Corapcioglu, M.Y., Bear, J., 1983, A mathematical model for regional land subsidence due to pumping; 3. Integrated equations for a phreatic aquifer: Water Resources Research, 19(4), 895-908.
- de Cserna, Z., de la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M., Mota-Palomino, R., 1987, Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 104, 71 p.
- Departamento del Distrito Federal-Delegación Iztapalapa (DDF-DI), 1995, Estudio de mecánica de suelos en la zona del Peñón del Marqués: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Delegación Iztapalapa, Estudio realizado por Estudios e Ingeniería GR, Reporte interno, 83 p.
- Departamento del Distrito Federal-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH), 1988, Piezometría y balance geohidrológico del valle de México. Año 1988: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, estudio realizado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V., contrato 8-33-1-0319, Reporte interno, 187 p.
- Departamento del Distrito Federal-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH), 1993, Estudio de reinterpretación de pruebas de bombeo realizadas en el D.F.: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, estudio realizado por EXYCO S.A., Reporte interno, Tomo I, 143 p., Tomo II, 262 p.
- Departamento del Distrito Federal-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH), 1994, Fichas de la nivelación de bancos de nivel implantados por la DGCOH en la ciudad de México y área metropolitana: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Fichas anuales.
- Departamento del Distrito Federal-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH), 1996a, Proyecto de localización, diseño, diagnóstico, programas de rehabilitación de pozos y dictámenes geohidrológicos: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, estudio realizado por Consultores en Geología, S.A. de C.V., Contrato 033-1-11463, Reporte interno, Tomo I, 369p, y Tomo II, 309 p.
- Departamento del Distrito Federal-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH), 1996b, Mediciones en la red de pozos piloto de la DGCOH en la zona metropolitana de la ciudad de México; Piezometría 1996: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, estudio realizado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V., Contrato 6-004-1-0442, Reporte interno, 30p., 4 planos y anexos.
- Departamento del Distrito Federal-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH), 1999, Fichas de la nivelación de bancos de nivel implantados por la DGCOH en la ciudad de México y área metropolitana: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Fichas anuales.
- Departamento del Distrito Federal-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH), 2000, Piezometría del valle de México. Estudio de mediciones en la red de pozos piloto para la parte sur de la cuenca del valle de México y actualización de balance hidrogeológico: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, estudio realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V., contrato 0-07-CO-04-1-0328, Informe interno, Tomo I, 232p., Tomo II, 427p.
- Figueroa-Vega, G.E., 1987, Structural stability problems of wells and aquifers, en Workshop on Leaky Aquifer Mechanics, Conference Proceedings: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 53-61.
- Figueroa-Vega, G.E., 1989, Mecanismos de producción de grietas inducidos por la explotación del agua subterránea: México, D.F., Academia Mexicana de Ingeniería, Alternativas Tecnológicas,

- 29, 33-48.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*: Englewood Cliffs, Nueva Jersey. EEUU, Prentice Hall, 604 p.
- Goodman, R.E., 1989, *Introduction to rock mechanics*, Nueva York, EEUU, John Wiley & Sons, 2a ed., 478 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática e Instituto Nacional de Ecología (INEGI-INE), 2000, *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*: Aguascalientes, México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 204 p.
- Juárez-Badillo, E., 1961, *Mecanismo de las grietas de tensión en el valle de México*: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de doctorado, 220 p.
- Juárez-Badillo, E., 1975, *Constitutive relationships for soils*, en *Symposium on recent developments in the analysis of soil behaviour and their application to geotechnical structures*: Kensington, Australia, University of New South Wales, 231-257.
- Juárez-Badillo, E., Figueroa-Vega, G.E., 1984, *Stresses and displacements in an aquifer due to seepage forces (one-dimensional case)*: *Journal of Hydrology*, 73, 259-288.
- Juárez-Luna, G., Rangel, N.J.L., Ayala, M.A.G., Romo, O.M.P., 2002, *Modelo del fracturamiento en las arcillas del Valle de México*, en *XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Memorias: Querétaro, Qro., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 183-192.
- Lamarsh, J.R., 1966, *Introduction to Nuclear Reactors Theory*: Reading, Massachussets, Addison Wesley, 276 p.
- Lugo-Hubp, J., Pérez-Vega, A., Rojas-Salas, M., 1991, *Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la cuenca de México*: *Geofísica Internacional*, 30(2), 87-95.
- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J.J., Ortega-Guerrero, M.A., Echavarría, L.A., Zermeño, O.V., Salas, G.O., Mondragón, Y.D.E., González, E.Y., 1995, *Informe sobre la geomorfología del cerro del Peñón del Marqués, en relación con los riesgos, y el agrietamiento en la periferia del mismo*, Delegación Iztapalapa, D.F.: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Informe Técnico, 384 p.
- Marsal, R.J., Mazari, M., 1959, *El Subsuelo de la Ciudad de México*: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, vol. I y II, 505p.
- National Research Council, Academia de la Investigación Científica y Academia Nacional de Ingeniería (NRC-AIC-ANI), 1995, *Mexico City's Water Supply; Improving the Outlook for Sustainability*: Washington DC, National Academic Press, 105 p.
- Ortega-Guerrero, M.A., Farvolden R.N., 1989, *Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico*: *Journal of Hidrology*, 110, 271-294.
- Ortega-Guerrero, M.A., Rudolph, D.L., Cherry, J.A., 1999, *Analysis of long-term land subsidence near Mexico City; Field investigations and predictive modeling*: *Water Resources Research* 25(11), 3327-3341.
- Rudolph, D.L., Frind, E.O., 1991, *Hydraulic response of highly compressible aquitards during consolidation*: *Water Resources Research*, 27(1), 17-30.

Manuscrito recibido: Febrero 7, 2005

Manuscrito corregido aceptado: Agosto 29, 2005

Manuscrito aceptado: Agosto 31, 2005