

El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje

Juan Manuel Lesser Illades

Lesser y Asociados

Miguel Ángel Cortés Pérez

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica-DDF

La ciudad de México, (CM), históricamente ha sido una de las áreas más densamente pobladas en el mundo. Actualmente, más de veinte millones de habitantes residen en su área metropolitana, donde se utilizan 60 m³/s de agua potable, de los cuales 40 m³/s provienen del acuífero que se encuentra bajo la propia ciudad. La extracción de agua subterránea causa el abatimiento de la superficie piezométrica y produce subsidencia del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales. Actualmente, la subsidencia del terreno en la mayor parte de la CM varía de 5 a 10 cm anuales y existen zonas locales con hasta 35 cm/año en el área de Xochimilco. El Departamento del Distrito Federal, a través de su Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH-DDF), desarrolló un plan maestro de drenaje de la ciudad. Una parte importante de dicho programa fue el análisis histórico de la subsidencia del terreno y la simulación de su comportamiento para los próximos años (DGCOH-DDF, 1994). La subsidencia acumulada de 1891 a 1995 alcanza máximos en la parte central de la CM que van de 8 a 10 m; la mayor parte del asentamiento fue generado en el periodo de 1940 a 1960. La explotación de agua subterránea disminuyó en el centro de la CM a partir de 1960 y el ritmo de subsidencia se redujo. Al mismo tiempo que la explotación de agua subterránea se reducía en el centro, se incrementaba en el sur, causando subsidencia del terreno en esta última región. Gran parte del sistema de drenaje de la ciudad es fuertemente impactado por la subsidencia, debido a que modifica el gradiente ocasionando, en algunos casos, su inversión. Se elaboró un análisis histórico y una simulación de la subsidencia, atendiendo especialmente a los 17 principales drenes de la ciudad, contándose entre ellos al Gran Canal, al Río Churubusco y otros. Con los resultados del trabajo, se programan actividades de rehabilitación del sistema de drenaje en los sitios más afectados, a fin de evitar inundaciones que, por el hundimiento del terreno, podrían ser más severas cada año.

Palabras clave: acuitardo, acuífero, abatimiento, nivel freático, superficie piezométrica, compresibilidad, subsidencia.

Introducción

En el subsuelo de la ciudad de México se encuentran una serie de materiales aluviales, constituidos esencialmente por gravas y arenas, intercalados con productos volcánicos, principalmente lavas y escorias. Estos materiales forman el acuífero explotado para el abastecimiento de sus habitantes.

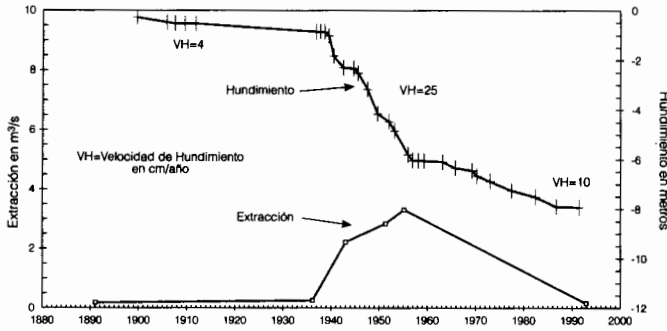
Cubriendo al acuífero, se encuentra una capa de materiales arcillosos que funcionan como acuitardo, están saturados y presentan una permeabilidad muy

baja, del orden de 10^{-7} a 10^{-9} m/s, por lo que permiten un flujo muy lento del agua a través de ella.

La mayor parte del área metropolitana de la CM presenta hundimientos del terreno que varían de una zona a otra de acuerdo con la constitución del suelo. Los hundimientos, al ser diferenciales, provocan diversos problemas, entre ellos la operación por gravedad de la red de drenaje subsuperficial.

La zona estudiada comprendió el área metropolitana de la CM y de los sistemas y áreas tributarias a las salidas del valle. Dentro de esta zona, se marcaron los

1. Extracción de agua y hundimiento en el centro de la ciudad de México



principales drenes de la ciudad, correspondientes a: Gran Canal del Desagüe; Dren General del Valle; Río de la Compañía; Río Churubusco, incluyendo brazo derecho y brazo izquierdo; Colector Churubusco; Colector 15; Colector Iztapalapa; Canal Nacional-Canal Chalco; Río San Buenaventura; Río de los Remedios; Colector Miramontes; Canal de Garay; Río Consulado y Colector Central.

Extracción de agua subterránea y hundimientos del terreno

La CM originalmente se abastecía de agua de un gran número de manantiales. Al incrementarse las demandas, se recurrió a la extracción de agua del subsuelo, primeramente con varios cientos de pozos someros (norias) de los que en la literatura se mencionan más de mil para el año de 1886 (DDF, 1982). Posiblemente el hundimiento de la CM se inició en esas fechas. Nivelaciones realizadas de 1891 a 1895 ya registran hundimientos de 5 cm por año. En el periodo de 1936-1944, se perforaron los primeros 93 pozos profundos que provocaron hundimientos en el centro de la CM de hasta 18 centímetros por año. Entre 1938 y 1948, continúa la perforación que va extendiéndose intermitentemente hacia los alrededores del Centro Histórico. El año de 1960 se puede marcar como la frontera en que se inició la disminución de la extracción de agua en el centro de la CM y, a su vez, el inicio de la explotación acuífera en el sur (Xochimilco-Chalco).

En la ilustración 1 se muestra el hundimiento del terreno y la extracción de agua subterránea en el centro de la CM, observándose que esta tuvo su mayor nivel en los años cuarenta y cincuenta, periodo en el que el hundimiento del terreno se aceleró. A partir de los años sesenta, la extracción en el centro de la CM ha disminuido notablemente; sin embargo, el hundimiento ha continuado aunque en menor grado.

En contraste, hacia el sur del Distrito Federal, en el área de Xochimilco-Chalco, la extracción prácticamente se inició en la década de los años sesenta, época a partir de la cual se ha ido incrementado hasta nuestros días. Por lo que respecta al hundimiento, éste se registra en forma notable a partir de la explotación acuífera de los años sesenta (ilustración 2).

Otra observación importante es que la magnitud del hundimiento total del terreno está en relación con el espesor de las arcillas. Se formaron secciones geológicas a lo largo de los drenes estudiados, donde se confirmó la relación entre el hundimiento del terreno y el espesor de las arcillas lacustres.

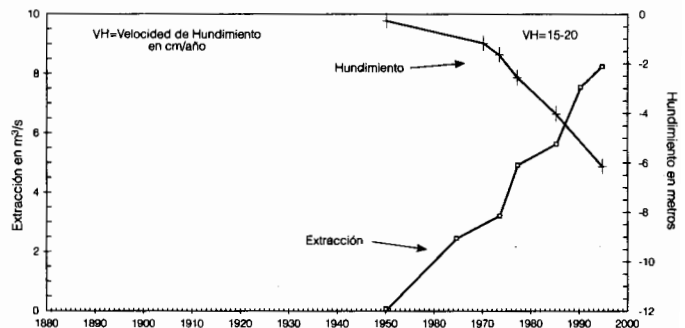
Características de las arcillas

Las arcillas se encuentran cubriendo la parte plana del valle de México y corresponden a sedimentos de los antiguos lagos. Tienen un espesor que fluctúa entre 40 y 60 m en la mayor parte del valle, el cual se acuña hacia las elevaciones topográficas o se incrementa en áreas aisladas.

Las arcillas están saturadas y presentan un nivel freático a los 2 y 3 m de profundidad. Bajo ellas, se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como confinado imprimiendo una presión ascendente a la base de las arcillas. Actualmente, en la mayor parte de la zona metropolitana de la CM la explotación del acuífero ha provocado el abatimiento del nivel piezométrico, modificando el tipo de acuífero de confinado a libre y eliminando la presión hidráulica ascendente que el acuífero ejercía hacia la base de las arcillas.

Diversas pruebas efectuadas a las arcillas más superficiales han permitido calcular un coeficiente de compresibilidad que va de 0.11 a 6 cm²/kg (Cruickshank *et al.*, 1979); una relación de vacíos que varía de 2 a 15 (Cruickshank *et al.*, 1979) y una permeabilidad entre 1×10^{-7} y 1×10^{-9} metros por segundo.

2. Extracción de agua y hundimientos en la zona sur del D.F. (Xochimilco-Chalco)



Hundimiento histórico

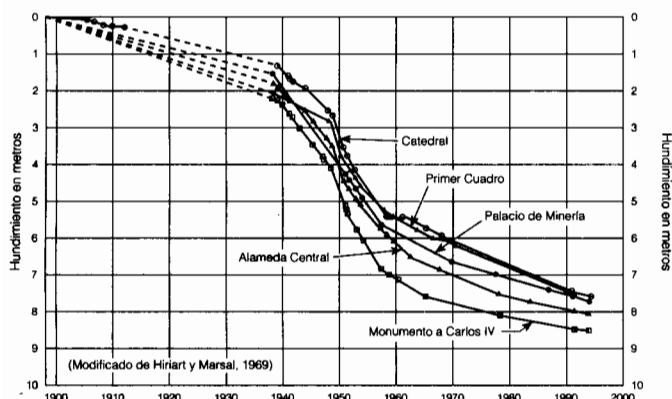
Existen varias citas históricas sobre nivelaciones en la CM (Hiriart y Marsal, 1969). Es particularmente interesante el levantamiento topográfico de Roberto Gayol (Hiriart *et al.*, 1969), realizado a fines del siglo pasado, a partir del cual se ha hecho una reconstrucción de la historia del hundimiento de la CM. El primer dato encontrado en la recopilación efectuada en este trabajo corresponde a A. Humbolt, 1803. Existen también citas del monumento a Enrico Martínez en 1862, del ingeniero Velázquez y Aldasoro en 1876 y del ingeniero Gayol en 1891.

En relación con los hundimientos medidos, hacia el año de 1925 algunos ingenieros sostenían la teoría de que el lago de Texcoco se estaba azolvando. Posteriormente empezó a lucubrarse sobre el secado del lago como factor determinante del asentamiento de la CM. Fue Nabor Carrillo quien llamó la atención en 1947 sobre la verdadera causa del proceso, al analizar la influencia de los pozos de bombeo en el hundimiento (Hiriart *et al.*, 1969).

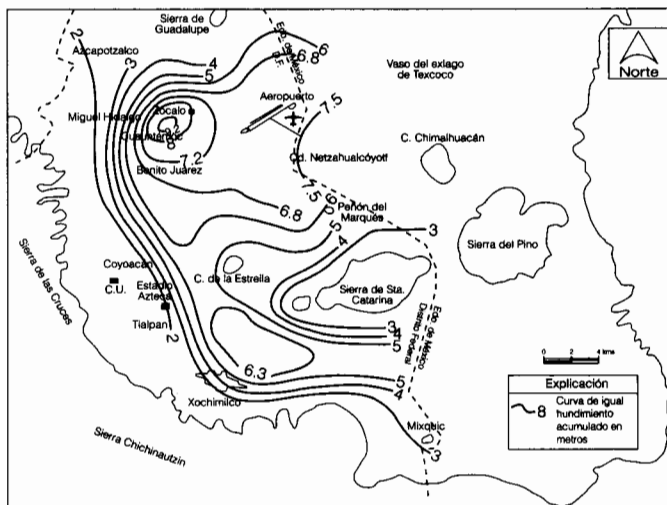
En la ilustración 3 se observa el hundimiento histórico de varios monumentos de la CM de 1900 a 1996, en donde hacen notar que hasta el año de 1968 el hundimiento pasó por tres etapas. En la primera, de 1898 a 1937, el hundimiento es prácticamente lineal de 4 cm por año. La segunda fase del proceso se marca de 1937 a 1947, donde también es de tipo lineal con un hundimiento medio de 14 cm por año. De 1947 a 1996, se marcó ya una tercera etapa en la que se registran velocidades de hundimiento de 40 cm por año o mayores al inicio de la etapa y que tienden a disminuir en forma progresiva hasta llegar al final de la etapa a valores de 10 cm por año.

Datos más recientes del hundimiento fueron registrados a través de un gran número de piezómetros por

3. Hundimientos en varios puntos de la ciudad



4. Hundimiento del terreno, periodo 1891-1994



la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México en las últimas tres décadas. Una nueva época de mediciones se inició por parte del Departamento del Distrito Federal y consiste en nivelaciones cada dos años de 1978 a 1994.

Hundimiento 1891-1994

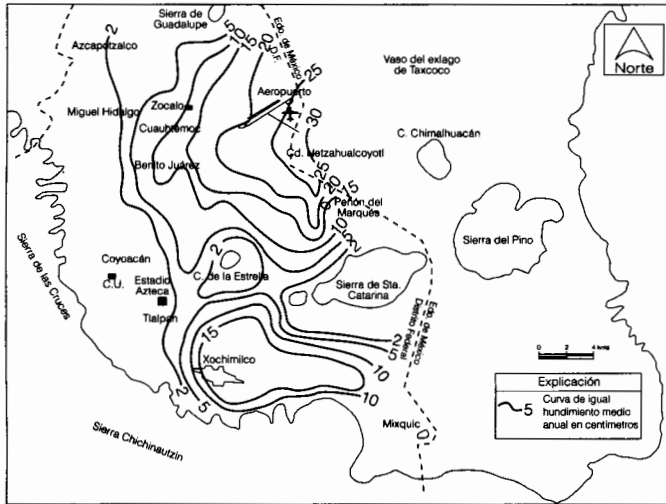
La ilustración 4 muestra el hundimiento acumulado del terreno de 1891 a 1994, observándose máximos de poco más de 10 m en el centro de la CM; hundimientos entre 6 y 7 m del centro hacia el Aeropuerto Internacional de la ciudad de México; hundimientos ligeramente mayores a 6 m en el canal Nacional y en el canal de Chalco, en el tramo donde se encuentra la batería de pozos Tlahuac-Neza; y hundimientos ligeramente mayores a 5 m en el área de Tláhuac.

Los hundimientos tienden a desaparecer hacia las elevaciones topográficas correspondientes a la sierra de las Cruces al poniente, la sierra del Chichinautzin al sur, y el cerro de la Estrella y la sierra de Santa Catarina en el centro-este de la ciudad de México.

Hundimiento 1983-1992

Por ser el periodo con mayor consistencia en nivelaciones diferenciales, la DGCOH-DDF construyó la configuración del hundimiento del terreno para el periodo 1983-1992, la cual se muestra en la ilustración 5, donde se observa que los mayores hundimientos se registraron en la zona oriental, alrededor del aeropuerto internacional, con un promedio de entre 150 y 250 cm; hacia el centro de la ciudad el hundimiento registrado

5. Hundimiento medio anual 1983-1992



en el periodo aquí tratado es de alrededor de 100 cm. En el sur, entre Xochimilco y Tláhuac, los hundimientos han sido de entre 100 y poco más de 150 cm. Se hace notar que esta configuración se construyó con más de 1,500 bancos de nivel que se han venido midiendo cada dos años.

Hundimiento medio anual

Tomando en cuenta que la configuración mencionada en el inciso anterior presenta buen control y amplia distribución para un periodo de nueve años, se consideró que podría tomarse como representativa para la obtención de un hundimiento medio anual.

De esta manera, se dividieron los datos de la configuración entre 9 y se obtuvo el hundimiento medio anual, observándose valores máximos de 30 cm en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcóyotl; entre 20 y 25 cm anuales de hundimiento en el Aeropuerto Internacional; alrededor de 10 cm en el centro de la CM; entre 2 y 5 cm en el área de Azcapotzalco, y alrededor de 15 cm en las áreas de Xochimilco y el canal de Chalco, en el tramo donde se ubica la batería de pozos Tláhuac-Neza.

Predicción del hundimiento

Para la predicción de los hundimientos que se registrarán en los próximos años en la zona metropolitana de la CM, se aplicaron varios métodos de cálculo. Éstos correspondieron a un método estadístico lineal; al cálculo de la predicción mediante regresión logarítmica y a la aplicación de un modelo matemático desarrollado por Cruickshank *et al.*, 1979 (DGCOH-DDF, 1992).

Predicción de hundimientos sobre los principales drenes

De las 25 secciones elaboradas, en el presente trabajo se presenta una de ellas a manera de ejemplo que incluye el hundimiento histórico y predicción al año 2000 a lo largo del Gran Canal del Desagüe, desde su inicio en el kilómetro 0 hasta el túnel del Tequisquiác, en el kilómetro 47 (ilustración 6). En los primeros kilómetros del trazo, el hundimiento ha sido considerable y disminuye en dirección al norte. Entre los kilómetros 0 y 18, el hundimiento medio registrado para el periodo 1963-1993 fue de 2 m; del kilómetro 18 al 20 el hundimiento fue menor, con una media de 1 m para el periodo mencionado. En contraste, en la porción norte del canal, entre el kilómetro 20 y el 46, el hundimiento medio fue de 40 centímetros.

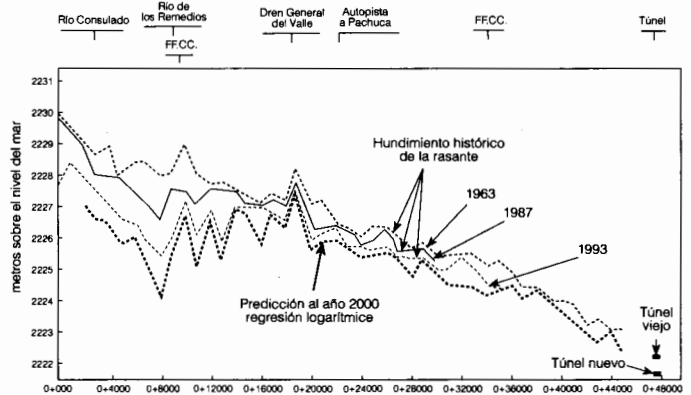
Se obtuvo la predicción del hundimiento a lo largo de los principales drenes. Los resultados más sobresalientes, se marcan en la ilustración 7, observándose que existirán asentamientos diferenciales que deberán remediarse a fin de evitar inundaciones.

Conclusiones

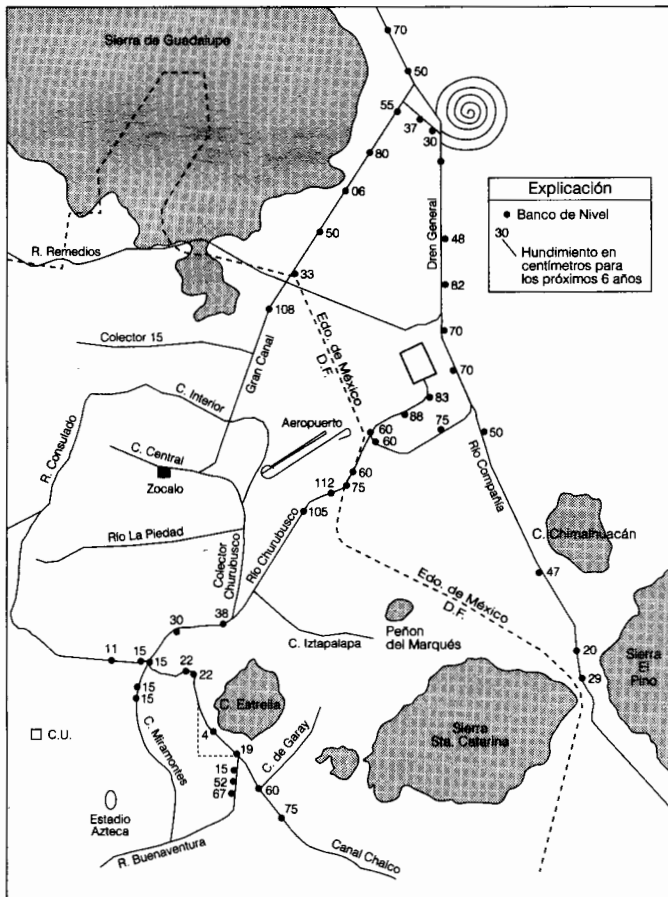
La presencia de antiguos lagos en el Valle de México, originó la acumulación de un sedimento arcilloso que actualmente cubre la parte plana de la zona metropolitana de la CM. Las características de las arcillas y los efectos a que se encuentran sujetas, han sido la causa del hundimiento del terreno.

En secciones geológicas elaboradas a lo largo de los ejes de los principales drenes, se diferenció la capa de arcillas que sobreyace al acuífero, observándose que los hundimientos son proporcionales al espesor de éstas.

6. Hundimiento histórico y predicción sobre el fondo del Gran Canal del Desagüe



7. Predicción del hundimiento 1994-2000 en centímetros



Las arcillas están saturadas, presentando un nivel freático a 2 y 3 metros en promedio de profundidad. Bajo ellas se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como semiconfinado, imprimiendo una presión ascendente en la base de las arcillas. Actualmente, en la mayor parte de la zona metropolitana de la CM, la explotación del acuífero ha provocado el abatimiento del nivel piezométrico y eliminado la presión hidráulica que el acuífero ejercía hacia la base de las arcillas, modificando el tipo de acuífero, de confinado a libre.

El hundimiento total acumulado de 1891 a 1994 alcanza máximos de poco más de 10 m en el centro de

la ciudad y hundimientos ligeramente mayores de 6 m en la zona sur del Distrito Federal.

Se calculó el hundimiento medio anual, obteniéndose valores máximos de 30 cm/año en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcóyotl; entre 20 y 25 cm/año en el Aeropuerto Internacional; alrededor de 10 cm/año en el centro de la ciudad; entre 2 y 5 centímetros en el área de Azcapotzalco y; alrededor de 15 cm/año en el área de Xochimilco y Canal Chalco.

A lo largo de los 47 kilómetros de longitud del Gran Canal del Desagüe, se observa que prácticamente no existe pendiente entre el cadenamiento km-0 y el km-18, y que los hundimientos para el año 2000 serán de hasta 100 cm. Alrededor del kilómetro 18 prácticamente permanecerá estable. A partir del cadenamiento km-18, y hasta su salida hacia el túnel de Tequisquiác, se presenta una pendiente de 1.5×10^{-4} . El hundimiento al año 2000 (al norte del kilómetro 18), será de 40 a 80 centímetros.

Recibido: septiembre, 1997
Aprobado: marzo, 1998

Referencias

Carrillo, Nabor. 1969. *El Hundimiento de la CM*, Proyecto Texcoco. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. NAFIN-SA.

Cruickshank, C., I. Herrera, R. Yates, J.P. Hennart, D.R. Balazero y R. Magaña, 1979. *Modelo de Predicción del Hundimiento del Valle de México*. Estudio elaborado para el D.D.F.

Departamento del Distrito Federal (DDF). 1982. *El Sistema Hidráulico del Distrito Federal*. Publicación de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.

DGCOH-DDF. 1992. *Políticas de Extracción de Agua del Subsuelo Mediante el Modelo Matemático de Abatimientos-Hundimientos*. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V.

DGCOH-DDF. 1994. *Evaluación de los Hundimientos*. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V., como parte del Plan Maestro de Drenaje de la ZMCM.

Hiriart, F. y R. Marsal. 1969. *El Hundimiento de la CM*. En: *El Hundimiento de la CM Proyecto Texcoco*. SHCP, NAFIN-SA.

Abstract

Lesser J.M. & M.A. Cortés "Land settling in México City and its implications in the drainage system". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)* Vol. XIII. Num. 3, pages 13-18 September-December, 1998.

Mexico City has been known through history as one of the most densely populated areas in the world. Currently more than 20 million people reside in the metropolitan area and use 60 m³/s of drinking water, of which 40 m³/s are obtained from the aquifer that lies under the city. Groundwater extraction has caused a fall in the piezometric level and settling of the land due to contraction of the surface clays. Land subsidence in Mexico City varies from 5 to 10 cm annually, with isolated regions in Xochimilco where it may reach up to 35 cm a year. The Mexico City government, through the Construction and Hydraulic Operations Department (DDF-DGCOH) developed a master plan for drainage. An important part of this program entailed a historic analysis of land subsidence and a simulation of future behavior (DGCOH-DDF, 1994). The accumulated subsidence from 1891 to 1995 is greatest in downtown Mexico City 8 to 10 meters. Most of this subsidence occurred between 1940 and 1960. The extraction of groundwater in the central metropolitan area was stopped in 1960, and the descent was decreased locally, while extraction increased in the south of the city with increased subsidence in that region. Much of the city's drainage system has been severely affected by subsidence and has had to be regraded on occasions when the slope has been inverted. The historical analysis and subsidence simulation focussed on the 17 largest drains, including the Gran Canal and the Churubusco River. The results have been used to program rehabilitation activities for the most severely affected sections where subsidence has resulted in a greater flooding

Keywords: Aquitard, aquifer, drawdown, water table, piezometric level, compressibility, land subsidence. Lesser J.M. & M.A. Cortes.

Dirección Institucional de autores:

Juan Manuel Lesser Illades, Miguel Ángel Cortés Pérez

Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
Seminario No. 119
Col. Carretas Querétaro 76050, Qro.
Teléfono: (42) 23 33 61