

EL HUNDIMIENTO DEL TERRENO, UNA CONSECUENCIA DE LA SOBRE-EXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS

Juan Manuel Lesser Illades
Lesser y Asociados, S. A. de C.V.

Miguel Angel Cortes Pérez
Dirección General de Construcción
y Operación Hidráulica-GDF

RESUMEN

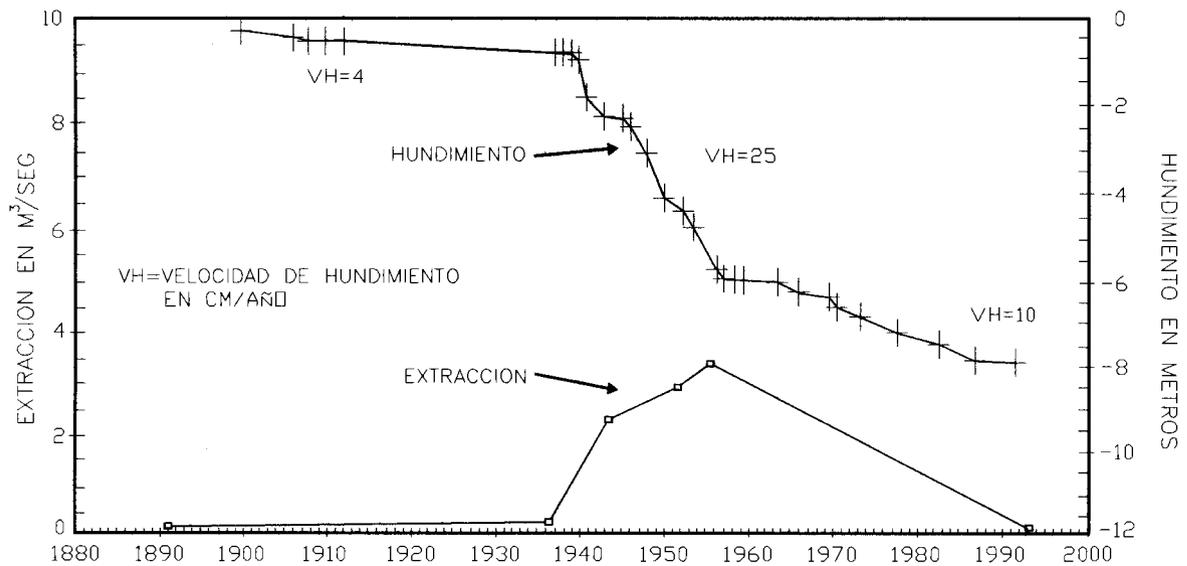
El asentamiento o subsidencia del terreno como consecuencia de la sobre-explotación de los acuíferos, es un efecto común que se manifiesta en acuíferos granulares como es el caso de las ciudades de México, Querétaro, Celaya, Salamanca, Aguascalientes y otras más del altiplano mexicano. En el presente trabajo se comenta el caso de la Ciudad de México, debido a que constituye un ejemplo por el largo historial de mediciones con que cuenta, lo que hace posible la reconstrucción de los efectos del hundimiento y la aplicación de modelos para su pronóstico a futuro. Los efectos del hundimiento impactan, entre otras cosas, al drenaje de la ciudad, provocando la constante necesidad de realizar obras para prevenir inundaciones. La Ciudad de México históricamente ha sido una de las áreas más densamente pobladas en el mundo. Actualmente, más de 20 millones de habitantes residen en el área metropolitana, donde se utilizan 60 m³/seg de agua potable, de los cuales 40 m³/seg provienen del acuífero que se encuentra bajo la ciudad. La extracción de agua subterránea causa el abatimiento de la superficie piezométrica y produce una subsidencia del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales. Actualmente, la subsidencia del terreno en la mayor parte de la Ciudad de México varía de 5 a 10 centímetros anuales y existen zonas locales con hasta 35 cm/año en el área de Xochimilco. La subsidencia acumulada de 1891 a 1995 alcanza máximos en la parte central de la Ciudad de México que van de 8 a 10 metros; la mayor parte del asentamiento fue generado en el período de 1940 a 1960. La explotación de agua subterránea se disminuyó en el centro de la ciudad a partir del año 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 de la ciudad, causando subsidencia del terreno en esta última región. Gran parte del sistema de drenaje de la ciudad es fuertemente impactado por el hundimiento, debido a que modifica el gradiente ocasionando, en algunos casos, la inversión del gradiente del sistema drenaje

INTRODUCCION

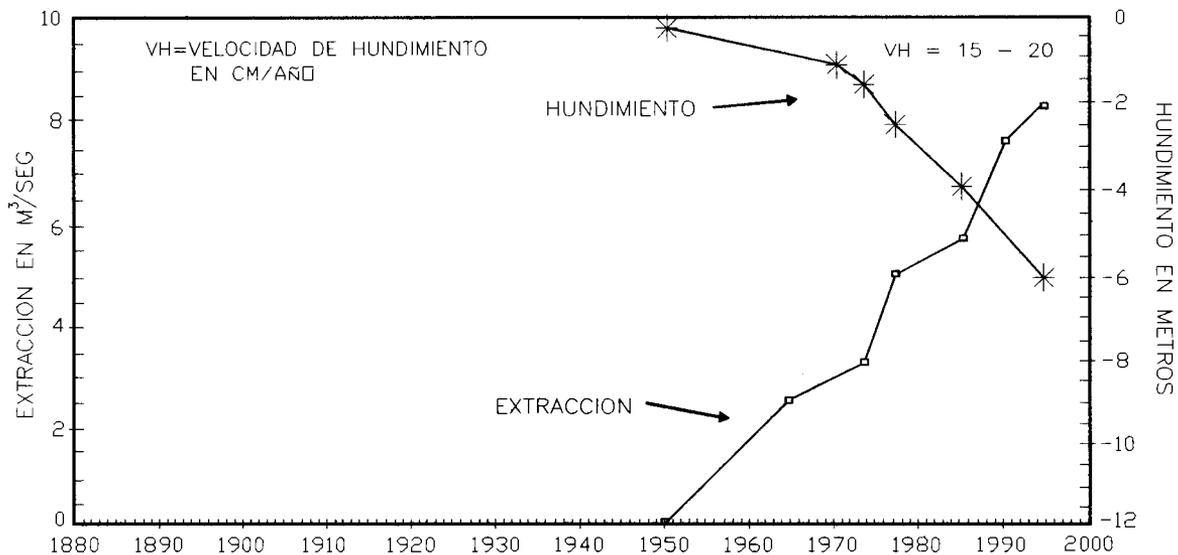
En el subsuelo de la Ciudad de México se encuentran una serie de materiales aluviales constituidos esencialmente por gravas y arenas que se encuentran intercalados con productos volcánicos, principalmente lavas y escorias. Estos materiales forman el acuífero de la ciudad el cual es explotado para el abastecimiento de sus habitantes. Cubriendo al acuífero, se encuentra una capa de materiales arcillosos que funcionan como acuitardo. Se encuentran saturados y presentan una permeabilidad muy baja, del orden de 10^{-7} a 10^{-9} m/seg. Permiten un muy lento flujo del agua a través de ella. La mayor parte del área metropolitana de la Ciudad de México presenta hundimientos del terreno los cuales varían de una zona a otra de acuerdo a 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 Ciudad de México y de los sistemas y áreas tributarias a las salidas del valle. Dentro de esta zona, se marcaron los principales drenes de la ciudad.

SOBRE-EXPLOTACIÓN Y SUS CONSECUENCIAS

La Ciudad de México originalmente se abastecía de agua a partir de los muchos manantiales existentes. 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 1000 para el año de 1886 (DDF, 1982). Posiblemente el hundimiento de la ciudad se inició en esas fechas. En nivelaciones de 1891 a 1895 ya registran hundimientos de 5 centímetros por año. En el período de 1936-1944, se perforaron los primeros 93 pozos profundos que provocaron hundimientos en el centro de la ciudad de hasta 18 centímetros por año. Entre 1938 y 1948, continúa la perforación en forma intermitente y extendiéndose su localización a los alrededores del Centro Histórico de la Ciudad de México. 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 ciudad y a su vez, el inicio de la explotación acuífera en el sur (Xochimilco-Chalco). En la figura 1 se muestra el hundimiento del terreno y la extracción de agua subterránea en el centro de la Ciudad de México, observándose que la extracción tuvo su mayor nivel en las décadas de 1940-1950, período en el que el hundimiento del terreno se aceleró. A partir de los 60s, la extracción en el centro de la ciudad ha disminuido notablemente; 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 60s, fecha 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 60s (figura 2). Otra observación importante es que la magnitud del hundimiento total del terreno, esta en relación con el espesor de las arcillas.



1.- EXTRACCION DE AGUA Y HUNDIMIENTOS EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE MEXICO



2.- EXTRACCION DE AGUA Y HUNDIMIENTOS EN LA ZONA SUR DEL D.F. (XOCHIMILCO-CHALCO)

CARACTERÍSTICAS DE LAS ARCILLAS

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

Las arcillas están saturadas, presentando un nivel freático a entre 2 y 3 metros 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 Ciudad de México (ZMCM), 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 x 10⁻⁷ y 1 x 10⁻⁹ m/seg.

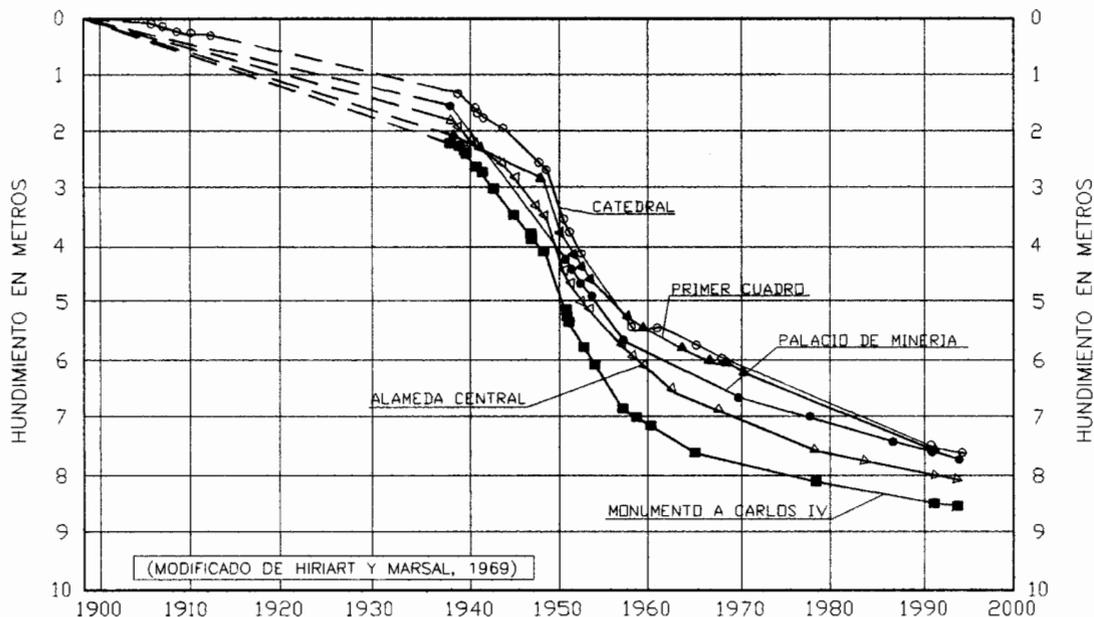
EL HUNDIMIENTO DESDE SUS INICIOS

Existen varias citas históricas sobre nivelaciones en la Ciudad de México (Hiriart F. y R. Marsal, 1969). Es particularmente interesante el levantamiento topográfico de R. 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 Ciudad de México. 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 de el Ingeniero Roberto 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 lucubrase sobre el secado del lago como factor determinante del asentamiento de la ciudad. 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 figura 3 se observa el hundimiento histórico de varios monumentos de la Ciudad de México de 1900 a 1996, en donde hacen notar que hasta el año de 1968 el hundimiento pasó por 3 etapas. En la primera, de 1898 a 1937, el hundimiento es prácticamente lineal de 4 centímetros 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 centímetros por año. De 1947 a 1996, se marcó ya una tercera etapa en la que se registran velocidades de hundimiento de 40 centímetros 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 centímetros por año.

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

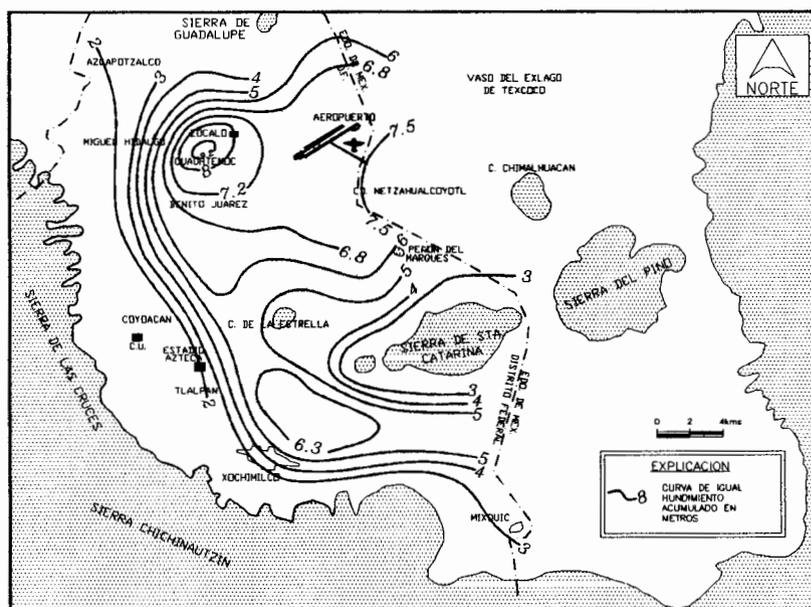


3.- HUNDIMIENTOS EN VARIOS PUNTOS DE LA CIUDAD

HUNDIMIENTO 1891-1994

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

Se obtuvo el hundimiento medio anual, observándose valores máximos de 30 centímetros en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcoyotl; entre 20 y 25 centímetros anuales de hundimiento en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; alrededor de 10 centímetros en el centro de la ciudad; entre 2 y 5 centímetros en el área de Azcapotzalco; alrededor de 15 centímetros en los área de Xochimilco y el Canal de Chalco en el tramo donde se ubica la batería de pozos Tlahuac-Neza.



4.- HUNDIMIENTO DEL TERRENO PERIODO 1891-1994

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. Las características de las arcillas y los efectos a que se encuentra sujeta, 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 las arcillas.

Las arcillas están saturadas presentando un nivel freático a entre 2 y 3 metros 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 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 metros en el centro de la ciudad y hundimientos ligeramente mayores de 6 metros en la zona sur del Distrito Federal.

Se obtuvo el hundimiento medio anual, obteniéndose valores máximos de 30 cm/año en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcoyotl; entre 20 y 25 cm/año en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; 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 de Desagüe, se observa que prácticamente no existe pendiente entre el cadenamamiento km-0 y el km-18 y, que los hundimientos para el año 2000 serán de hasta 100 centímetros. Alrededor del kilómetro 18 prácticamente permanecerá estable. A partir del cadenamamiento 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.

REFERENCIAS

Carrillo, Nabor. 1969. *El Hundimiento de la Ciudad de México Proyecto Texcoco*. Secretaria de Hacienda y Crédito público. NAFINSA.

Cruickshank, C., I. Herrera, R. Yates, J.P. Hennart, D.R. Balarezo 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 Ciudad de México*. En: *El Hundimiento de la Ciudad de México Proyecto Texcoco*. SHCP, NAFINSA.