

AGM
V CONGRESO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
HERMOSILLO, SON, 2005-08-30

EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Por: Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Lesser y Asociados, S. A. de C. V.
lesser@prodigy.net.mx
Ing. David González Posadas
gonzalezdavidgeo@prodigy.net.mx

RESUMEN

Para su cuantificación y explicación el acuífero ha sido dividido en los tres subsistemas siguientes: Subsistema acuífero Ciudad de México, Subsistema acuífero Texcoco y Subsistema acuífero Chalco.

El subsistema acuífero Ciudad de México es recargado por las infiltraciones de lluvia que se generan sobre las Sierras de las Cruces y Chichinautzin. El agua subterránea circula de las sierras hacia el centro de la Ciudad, donde es extraída a través de pozos. La entrada por flujo subterráneo es de 8.09 m³/seg. La extracción por bombeo de 12.68 m³/seg. El cambio de almacenamiento fue de -0.62 m³/seg y el drenado vertical de la arcilla hacia el acuífero asciende a 3.97 m³/seg.

El subsistema acuífero de Texcoco, es recargado a partir de las infiltraciones de la lluvia sobre las sierras del oriente y sur, a partir de donde el agua subterránea circula hacia el centro del valle de Texcoco. En una franja norte-sur que pasa por los poblados de Texcoco y Chicoloapan, el acuífero se encuentra fuertemente explotado por pozos de uso agrícola y de agua potable. Hacia el poniente de esta zona, se extiende la zona federal del exlago de Texcoco, donde prácticamente no existe explotación acuífera. Las entradas por flujo subterráneo ascienden a 5.89 m³/seg. Las salidas por bombeo son de 9.19 m³/seg. El cambio de almacenamiento es de -1.24 m³/seg y el drenado vertical de 2.06 m³/seg.

En el subsistema acuífero Chalco, la recarga se produce sobre las Sierras de Santa Catarina, El Pino y Chichinautzin. En estos sitios el agua subterránea se infiltra y circula hacia el centro del valle, donde es extraída a través de pozos. La entrada por flujo subterráneo es de 4.4 m³/seg. La extracción por bombeo de 6.06 m³/seg. El cambio de almacenamiento es de -0.47 m³/seg y el drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero asciende a 1.14 m³/seg.

Si se considera que la sobreexplotación del acuífero corresponde al cambio de almacenamiento y al drenado de las arcillas, este volumen dividido entre la recarga por flujo subterráneo, da el porcentaje de sobreexplotación a que se encuentra sujeto. De esta manera el acuífero de la Ciudad de México se encuentra sobreexplotado en un 56.6%, el de Texcoco en un 65.1%, mientras que el acuífero de Chalco en un 36.3%.

INTRODUCCIÓN

En la época Terciaria los escurrimientos superficiales del Valle de México drenaban hacia el sur. Estas corrientes superficiales fueron interrumpidas por la acumulación de productos volcánicos que dieron origen a la Sierra del Chichinautzin, convirtiendo el Valle de México en una cuenca cerrada, donde se formó un gran lago que cubrió desde Zumpango hasta Texcoco, México, Xochimilco y Tlahuac. La historia de México indica que los primeros habitantes iniciaron la edificación de la ciudad en un islote de la parte central del lago. Fueron ganando terreno mediante la construcción de chinampas, que son acumulaciones de material arcilloso arriba del nivel del agua, sitios donde realizaban sus cultivos. Conforme la ciudad fue creciendo se

fueron realizando otras obras hidráulicas, entre ellas la construcción de bordos para evitar la inundación de áreas que se iban incorporando al cultivo. En el siglo XX y debido al tamaño e importancia de la Ciudad de México, se iniciaron obras para su drenaje, principalmente la construcción del tajo de Nochistongo, a fin de proporcionarle al valle una salida de agua superficial, lo cual aceleró el secado de los lagos. El valle de México se caracteriza por estar constituido por materiales volcánicos (lavas y piroclásticos) intercalados con aluviones y cubiertos, en la parte central del valle por arcillas lacustres. Los volcánicos son de edad Terciario y Cuaternario, los aluviones son del Cuaternario y las arcillas lacustres son de edad Reciente. Las arcillas producidas como azolve de los lagos, geohidrológicamente juegan un papel importante en el comportamiento del agua subterránea. La mayor parte de las rocas y materiales que forman el subsuelo son permeables. Las de mayor permeabilidad corresponden a los basaltos y piroclásticos de la Sierra del Chichinautzin, zona que constituye la principal área de recarga al acuífero a partir de la infiltración por lluvia.

En el centro y poniente de la Ciudad de México, predominan arenas, tobas y cenizas que alojan un acuífero; en el sur y sureste, el acuífero se encuentra en basaltos y piroclásticos. Los materiales granulares (arenas, tobas y cenizas), presentan permeabilidad media. Los basaltos y piroclásticos son los materiales de más alta permeabilidad en la zona.

A principios del siglo XX el acuífero de la Ciudad de México se encontraba saturado debido a que podía recibir agua pero no existían drenes o salidas. Los excedentes del acuífero se vertían a través de manantiales de los cuales los más conocidos se encontraban en Xochimilco, en las fuentes brotantes de Tlalpan, en el Peñón de los Baños y Chapultepec. Para el año de 1940, el requerimiento de agua para la Ciudad de México fue satisfecho mediante la perforación de pozos, los cuales se fueron incrementando en número hacia las décadas de los 50's y 60's, provocando a su vez el abatimiento del nivel del agua subterránea y con ello la desaparición de los manantiales. La actual salida de agua del acuífero se lleva a cabo mediante la extracción a través de pozos, cuyo efecto empezó a ser notable a mediados de siglo XX. El nivel piezométrico original del acuífero se encontraba cercano a la superficie y en muchos sitios daba origen a manantiales. Conforme las extracciones por bombeo aumentaban el nivel del acuífero se fue abatimiento para, en el año de 1985, encontrarse a 20 metros de profundidad en el Aeropuerto Internacional y a 40 metros en Insurgentes y Viaducto. A partir de dicho año el nivel del agua subterránea, se ha venido monitoreando por el GDF.

Actualmente la profundidad al nivel estático va de 30 a 40 metros en la porción centro-norte de la ciudad y en el área de Xochimilco, a más de 100 metros hacia la zona del poniente de la ciudad. En la zona entre la Sierra de Guadalupe, el Aeropuerto Internacional, la Avenida Insurgentes Norte y el Viaducto Miguel Alemán, el agua se encuentra a profundidades que varían entre 30 y 45 metros. Se hace notar que actualmente en esta área la extracción de agua del subsuelo es reducida, debido a que los asentamientos del terreno provocados principalmente en la década de los 60's, obligaron a disminuir la extracción en esta porción. En la parte plana del Valle de México, el nivel estático se encuentra a profundidades que van de 40 a 60 metros. La topografía del terreno influye en la profundidad al nivel estático. Los niveles se profundizan conforme se eleva la superficie topográfica, ocasionando que los pozos ubicados hacia la Sierra de Las Cruces (poniente) y hacia la Sierra del Chichinautzin (sur), presenten valores de 60 a 70 metros al pie de la sierra, los que se incrementan para llegar a alcanzar más de 100 metros hacia los flancos de las sierras.

El agua subterránea fluye de las sierras que limitan el valle, hacia el centro de los mismos. Existen tres conos piezométricos; formados por la extracción de agua subterránea, hacia donde se dirige el flujo subterráneo. El primer cono se encuentra alrededor de Azcapotzalco el segundo en el área de Tlalpan-Xotepingo y el tercero en el Valle de Chalco. Los dos primeros tienden a unirse. El esquema del flujo subterráneo presenta curvas equipotenciales concéntrica. Los valores de elevación del nivel estático más altos (2260 msnm), se ubican hacia las sierras. Hacia la parte baja de la ciudad se forman los conos piezométricos mencionados. Uno de ellos en la porción norte, correspondiente a Azcapotzalco, (2180 y

2185 msnm). El segundo cono piezométrico abarca prácticamente toda la porción central y sur de la Ciudad de México (2180 y 2185 msnm) y el tercer cono se forma en el Valle de Chalco (2190 y 2195 msnm).

En el año de 1985, el nivel del agua en Texcoco se encontraban a 5 metros de profundidad, mientras que en el año 2000, se encuentra a casi 40 metros de profundidad. En el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, el nivel se encontraba a 20 metros de profundidad en 1985 y a 45 metros en el 2000. La evolución del nivel del agua subterránea para el período 1985-2000, muestra evoluciones negativas o abatimientos de hasta 20 metros en el área de Iztapalapa. La mayor parte de la Ciudad de México, entre el Centro Histórico y Coapa, los abatimientos han sido de entre 10 y 15 metros. El abatimiento para el período considerado disminuye hacia el área de Azcapotzalco a entre 3 y 8 metros, debido a que durante algunos años se manifestó un ascenso en los niveles.

El acuífero se encuentra cubierto por una capa de entre 20 y 60 metros de arcillas lacustres, las cuales funcionan como acuitardo. Este, cede su agua al acuífero lentamente, en forma de drenado vertical. Hacia la parte central del valle, el acuífero se encuentra semiconfinado, mientras que hacia la periferia, principalmente en el poniente del valle, se comporta como libre.

FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO

El área estudiada corresponde a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su prolongación hacia el Valle de Texcoco al noreste y al Valle de Chalco al sureste.

En el subsuelo de esta región, se encuentra una alternancia de aluviones y productos volcánicos, ambos permeables, los cuales permiten la infiltración y circulación de agua subterránea, dando origen a un acuífero (figura 1).

El valle se encuentra cubierto por una capa de arcillas lacustres, las cuales se encuentran saturadas y funcionan como acuitardo debido a su reducida permeabilidad. Cubren al acuífero y en parte lo confinan.

En la porción central del valle, el acuífero funciona como semiconfinado debido a que el nivel piezométrico se encuentra a la altura de las arcillas lacustres que confinan al acuífero. En la porción occidental y oriental del valle, el nivel piezométrico del acuífero se encuentra bajo las arcillas, ocasionando que el acuífero funcione como libre.

La principal recarga de agua al acuífero corresponde a la infiltración de la lluvia que se genera sobre los flancos de las elevaciones topográficas, principalmente en la Sierra del Chichinautzin al sur de la Ciudad de México, debido a la alta permeabilidad de las rocas basálticas que forman el subsuelo. Le sigue en importancia la Sierra Nevada al oriente y la Sierra de Las Cruces al poniente, con una permeabilidad media. El agua subterránea circula en forma radial, de las sierras hacia el centro del valle.

Dentro del valle existe un gran número de pozos que corresponde a la salida de agua del acuífero, en forma de extracción por bombeo.

A principios del siglo XX, antes de que se iniciará la explotación del acuífero de la Ciudad de México, los materiales se encontraban totalmente saturados y el nivel estático afloraba. Conforme se ha venido realizando e incrementando la extracción de agua del subsuelo, el nivel se ha ido abatiendo, como se ilustra en el recuadro de la porción inferior izquierda de la figura 4.2. En dicho recuadro se ilustra el acuitardo ubicado en la porción superior del terreno, el cual está formando por arcillas lacustres y, bajo él, la zona no saturada; posteriormente en la parte inferior se encuentra el acuífero. Debido a que el acuitardo se encuentra saturado y permite el paso del agua muy lentamente, esta corresponde a un aporte al acuífero que se denominó "drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero". La baja permeabilidad de las arcillas que constituyen el acuitardo, hace que el flujo del drenado vertical sea lento. Sin embargo, al

multiplicarlo por la gran superficie que estos materiales abarcan, el volumen drenado que se infiltra al acuífero alcanza cifras significativas.

MARCO GEHIDROLÓGICO

El subsuelo del área estudiada se encuentra constituido por una alternancia de aluviones y productos volcánicos, ambos permeables, que permiten la infiltración y circulación de agua subterránea, dando origen

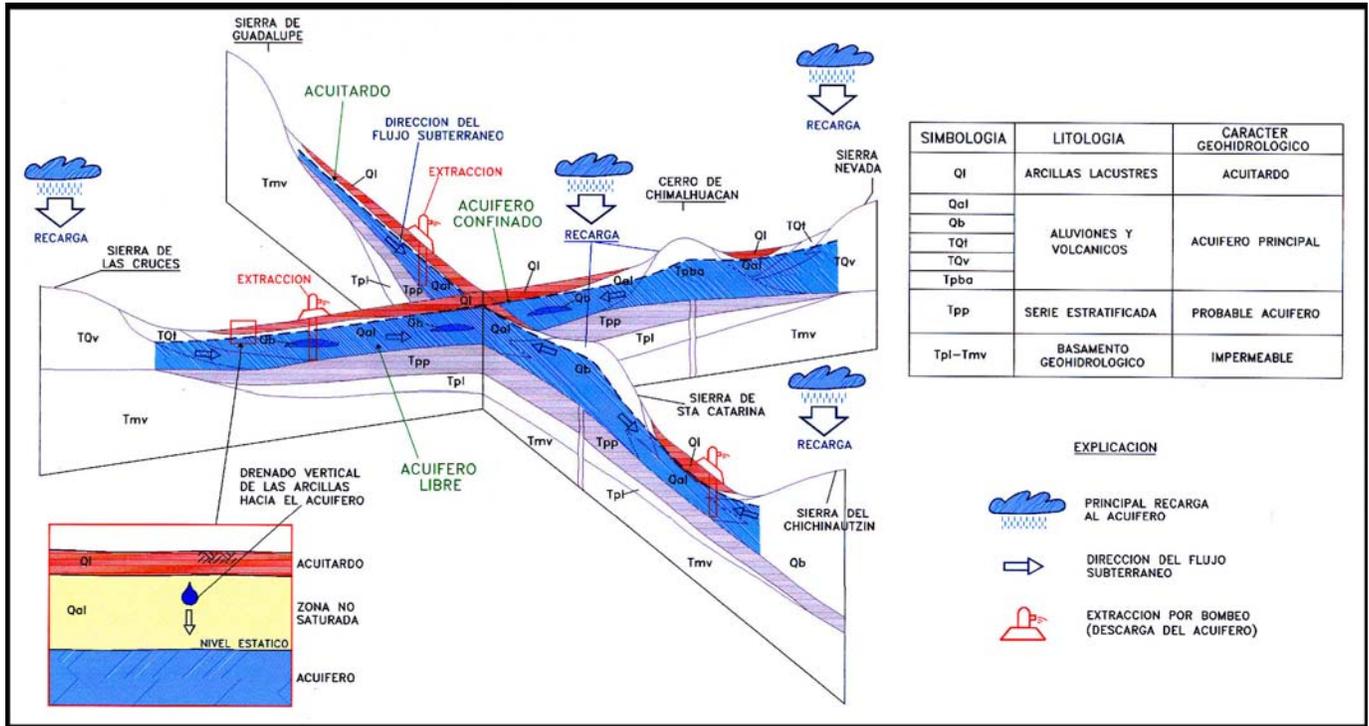


Figura 1. Funcionamiento del acuífero Valle de México

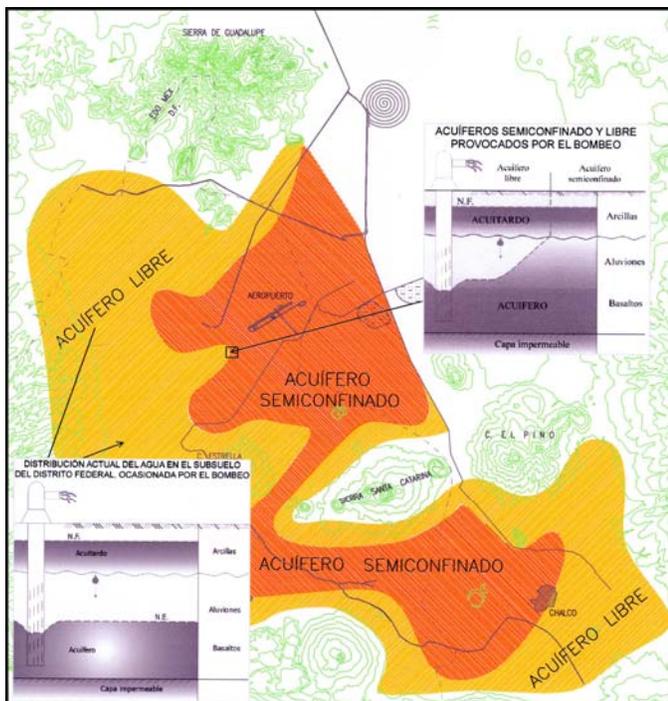


Figura 2. Delimitación de acuíferos, semiconfinado y libre

a un **acuífero**. La zona del valle se encuentra cubierta por una capa de arcillas lacustres que están saturadas y funcionan como **acuitardo** debido a su reducida permeabilidad (figura 1).

En la porción central del valle, el acuífero se encuentra **semiconfinado** por las arcillas lacustres, mientras que en la porción oriental y occidental del valle el nivel piezométrico del acuífero se encuentra bajo las arcillas, ocasionando que el acuífero funcione como **libre** (figura 2).

La principal **recarga** al acuífero es la infiltración por lluvia, la cual se genera sobre los flancos de las elevaciones topográficas, en especial en la porción sur, debido a la alta permeabilidad de las rocas que existen en esa zona (figura 1). Le siguen en importancia como zonas de recarga, la Sierra Nevada al oriente y la Sierra de Las Cruces al poniente, las cuales tiene una permeabilidad media. El agua subterránea circula en forma radial, de las sierras hacia el centro del valle.

Dentro del valle existe un gran número de pozos que corresponden a la **salida** de agua del acuífero, en forma de extracción por bombeo.

A principios del siglo XX, antes de que se iniciara la explotación del acuífero de la Ciudad de México, los materiales se encontraban totalmente saturados y el nivel estático afloraba. Conforme se ha venido realizando e incrementando la extracción de agua subterránea, el nivel se ha ido abatiendo. Debido a que el acuitardo se encuentra saturado y deja pasar agua muy lentamente, ésta constituye un aporte o **recarga** al acuífero, el cual se denominó “drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero”. La baja permeabilidad de las arcillas que constituyen el acuitardo, hace que el flujo del drenado vertical sea lento, sin embargo, debido a la gran superficie que estos materiales abarcan, el volumen drenado alcanza cifras significativas.

El área de estudio corresponde a la porción sur del Valle de México la cual es una cuenca hidrológica cerrada que actualmente es drenada de manera artificial hacia el norte a través del Gran Canal de Desagüe y del Emisor Central. La zona considerada dentro de este trabajo, corresponde principalmente a la Ciudad de México y su prolongación al noreste hasta Texcoco y al sureste hasta Chalco. Constituye un sistema acuífero cuyo esquema de flujo ha sido dividido, por facilidad para su explicación y cuantificación, en tres subsistemas denominados: Subsistema Acuífero Valle de México, Subsistema Acuífero Texcoco y Subsistema Acuífero Chalco. Esta subdivisión es de tipo convencional y fue basada en parteaguas subterráneos producidos por el bombeo, lo

cual fue aprovechado para trazar sus límites, como se marca en la figura 3 y se describe a continuación:

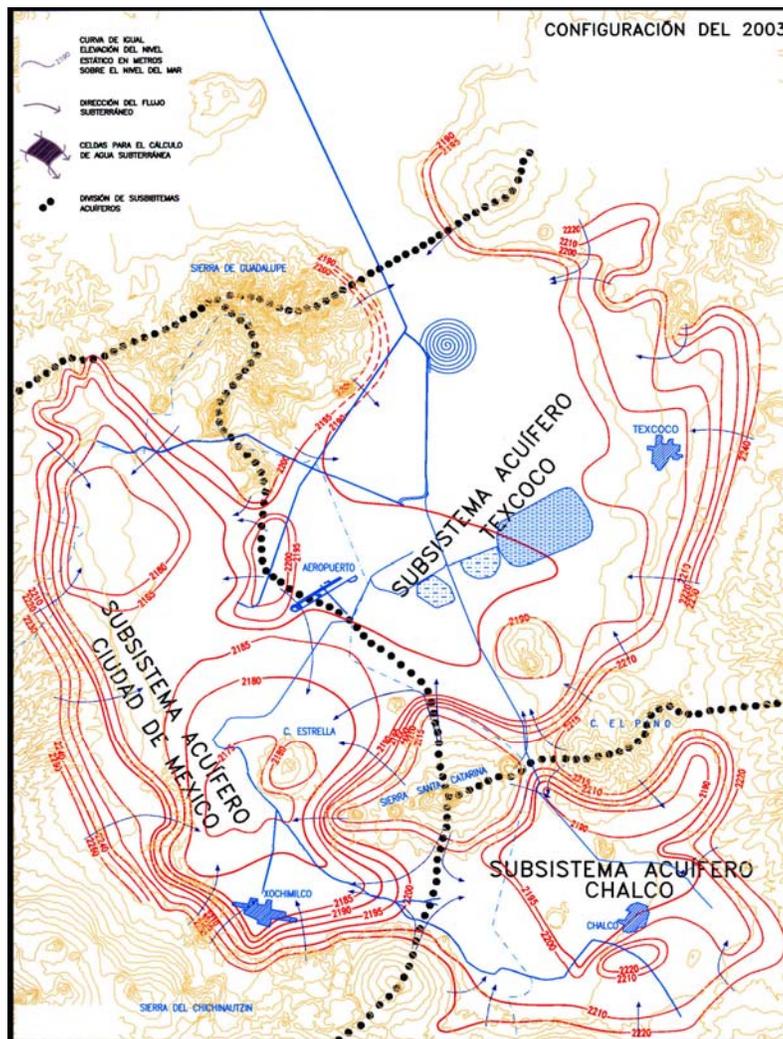


Figura 3. División del sistema acuífero basada en la configuración de la elevación del nivel estático

El antiguo vaso del exlago de Texcoco, se caracteriza por presentar un gradiente hidráulico muy suave, debido a que prácticamente no existe explotación en la porción que comprende la Zona Federal. En el Distrito Federal se encuentran un gran número de aprovechamientos, los cuales se extienden desde el límite con el exvaso de Texcoco, hasta los lomeríos del poniente. A la altura del Aeropuerto Internacional, la extracción ha provocado el abatimiento de los niveles estáticos y un flujo subterráneo que circula hacia dos conos piezométricos dentro del Distrito Federal. Aprovechando estos rasgos, un parteaguas subterráneo fue trazado partiendo de la prolongación sur de la Sierra de Guadalupe para posteriormente pasar sobre un alto piezométrico marcado con la curva 2200 msnm; posteriormente cruza el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y continúa hasta la Sierra de Santa Catarina. Este mismo parteaguas subterráneo continúa hacia el sur, atravesando la Sierra de Santa Catarina y hasta la Sierra del Chichinautzin, pasando sobre un parteaguas subterráneo formado entre los acuíferos de Xochimilco y Chalco.

ECUACIÓN DE BALANCE

Se estableció la ecuación general de balance de agua subterránea, en donde las entradas de agua al sistema son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento. Entradas = Salidas - Cambio de almacenamiento. Las entradas son: Entrada por flujo subterráneo (E_s) e infiltración por drenado vertical de las arcillas superiores (I_v). En el año del 2003 y de acuerdo a investigaciones mediante modelos matemáticos, se modificó la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento en una porción del acuífero, con lo cual se obtienen resultados que se consideran más exactos que los obtenidos en años anteriores.

Las **salidas** son: Extracción por bombeo ($Ext.$) y cambio de almacenamiento (Δs); el cual es la consecuencia del abatimiento producido por la sobreexplotación.

CÁLCULO DE LAS ENTRADAS DE AGUA POR FLUJO SUBTERRÁNEO

La **entradas** de agua al sistema corresponden al aporte por flujo subterráneo o entrada subterránea (**E_s**) proveniente de las infiltraciones que se generan en las estribaciones del acuífero. Hacia la parte plana de la zona metropolitana no existe infiltración vertical de agua de lluvia debido, por una parte, a la existencia de la mancha urbana y por otra, a la presencia de arcillas lacustres que corresponden al sedimento de los antiguos lagos de México. Sin embargo, dichas arcillas lacustres forman un acuitardo que se encuentra saturado y presenta un drenado vertical que alimenta al acuífero (I_v = Infiltración vertical).

El flujo subterráneo se calculó utilizando la Ley de Darcy, en donde se establece que el caudal " Q " que pasa a través de una sección de terreno es igual a la transmisibilidad " T " del material por la longitud " b " del área considerada, multiplicada a su vez por el gradiente hidráulico " i " ($Q = Tbi$).

Celdas. - Al pie de las sierras que limitan a los valles, se trazaron celdas para el cálculo de la entrada de agua subterránea. Cada celda corresponde al área delimitada entre dos curvas equipotenciales y dos líneas de corriente. De esta manera, se marcaron celdas para el subsistema acuífero del valle de México las cuales se identificaron con la letra A. Su localización se muestra en la figura 4. Para el Valle de Chalco las celdas se marcaron con la letra B y para el Valle de Texcoco se identificaron con la letra C.

Transmisibilidad. - La transmisibilidad " T " es la capacidad de un medio para permitir el flujo de agua bajo un gradiente unitario. Este dato se obtuvo de pruebas de bombeo y se caracteriza por presentar valores del orden

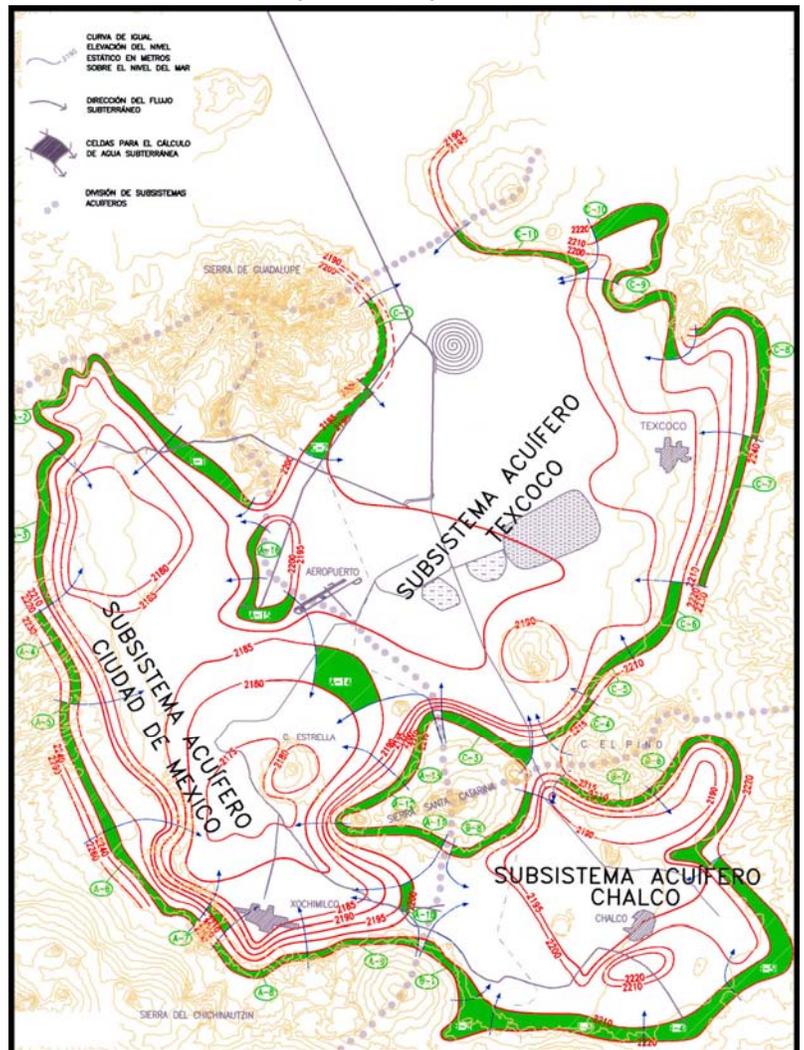


Figura 4. Celdas para el cálculo del agua subterránea

de $0.011 \text{ m}^2/\text{seg}$ para materiales piroclásticos y basálticos, como los observados en la Sierra del Chichinautzin. Para los materiales aluviales de los valles, las transmisibilidades obtenidas a través de pruebas de bombeo varían de 0.005 a $0.008 \text{ m}^2/\text{seg}$ (Lesser *et al*, 1998).

En trabajos anteriores se utilizaron para el balance de agua subterránea al pie de la Sierra de Santa Catarina, valores de $0.009 \text{ m}^2/\text{seg}$. Sin embargo, los resultados de la calibración del modelo matemático, así como el análisis de los gradientes y volúmenes de flujo a partir de la mencionada sierra, permitieron modificar el valor de transmisibilidad en esta zona a $0.004 \text{ m}^2/\text{seg}$, el cual se considera más real que el utilizado en trabajos anteriores (Lesser *et al*, 1998).

Ancho de las celdas.- El ancho “b” de cada una de las celdas utilizadas para el cálculo del flujo subterráneo se obtuvo directamente de la figura 4, de elevación del nivel estático, donde se delimitan las celdas.

Gradiente hidráulico.- El gradiente hidráulico “i” es igual a la diferencia entre las equipotenciales que limitan a cada celda dividida entre la longitud de la misma. Para el subsistema acuífero de la Ciudad de México variaron de 24×10^{-3} a 2.3×10^{-3} . Para el Valle de Chalco el gradiente calculado va de 20×10^{-3} a 4.6×10^{-3} y para Texcoco entre 25×10^{-3} y 6.3×10^{-3} (Lesser *et al*, 1998).

Caudal de entrada de agua subterránea.- El cálculo del agua que fluye en una celda se calcula por medio de la Ley de Darcy, que indica que el caudal de agua que pasa a través de ella es igual a la transmisibilidad por el largo de la celda y multiplicado por el gradiente hidráulico, $Q = Tbi$. La suma del flujo que pasa a través de las celdas marcadas con la letra A y que corresponden a la entrada por flujo subterráneo hacia la Ciudad de México, asciende a $255.31 \text{ Mm}^3/\text{año}$; para el Valle de Chalco el volumen de flujo calculado en las 8 celdas fue de $140.12 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y para Texcoco, ese valor fue de $185.89 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

RESULTADOS DEL BALANCE

La ecuación de balance volumétrico en el subsuelo indica que las entradas (E_s , I_v) son iguales a las salidas (extracción por bombeo, E_{xt}) menos el cambio de almacenamiento (Δs). Para la Ciudad de México, la entrada por flujo subterráneo fue de $255.31 \text{ Mm}^3/\text{año}$ que equivale a $8.09 \text{ m}^3/\text{seg}$. La extracción por bombeo fue de $400 \text{ Mm}^3/\text{año}$ o sean $12.68 \text{ m}^3/\text{seg}$. El cambio de almacenamiento calculado fue de $-19.53 \text{ Mm}^3/\text{año}$ que equivale a $-0.62 \text{ m}^3/\text{seg}$. De lo anterior se deduce un drenado vertical de la arcilla que asciende a $125.16 \text{ Mm}^3/\text{año}$ lo cual equivale a $3.97 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Para el subsistema acuífero del Valle de Texcoco, las entradas por flujo subterráneo ascendieron a $185.89 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($5.89 \text{ m}^3/\text{seg}$). Las salidas por bombeo fueron de $290 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($9.19 \text{ m}^3/\text{seg}$). El cambio de almacenamiento calculado fue de $-39.20 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($-1.24 \text{ m}^3/\text{seg}$). De lo anterior se dedujo un aporte del acuífero por drenado vertical de $64.91 \text{ Mm}^3/\text{año}$ lo cual equivale a $2.06 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Para el subsistema acuífero Chalco, la entrada por flujo subterráneo fue de $140.13 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($4.4 \text{ m}^3/\text{seg}$). La extracción o salida de agua por bombeo del acuífero fue de $191 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($6.06 \text{ m}^3/\text{seg}$). El cambio de almacenamiento que se obtuvo fue de $-14.92 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($-0.47 \text{ m}^3/\text{seg}$). Con lo anterior se obtuvo una entrada de agua al acuífero por drenado vertical de las arcillas que ascendió a $35.95 \text{ Mm}^3/\text{año}$ equivalente a $1.14 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Si se considera que la sobreexplotación del acuífero corresponde al cambio de almacenamiento y al drenado de las arcillas, este volumen dividido entre la recarga por flujo subterráneo da el porcentaje de sobreexplotación a que se encuentra sujeto. De esta manera, se obtuvo que el subsistema acuífero de la Ciudad de México se encuentra sobreexplotado en un 56.6%, el área de Texcoco se encuentra sobreexplotada en un 65.1%, mientras que el Valle de Chalco en un 36.3%.

CONCLUSIONES

El área estudiada corresponde a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su prolongación hacia el Valle de Chalco al sureste y hacia el Valle de Texcoco al noreste. En el subsuelo, se encuentra una alternancia de aluviones y productos volcánicos, ambos permeables, que permiten la infiltración y circulación de agua subterránea dando origen a un **acuífero**. El valle se encuentra cubierto por una capa de arcillas lacustres que se encuentran saturadas y funcionan como **acuitardo**, debido a su reducida permeabilidad.

En la porción central del valle el acuífero funciona como **semiconfinado** debido a que el nivel piezométrico se encuentra en las arcillas lacustres funcionan como capa semiconfinada. En la porción oriental y occidental del valle, el nivel piezométrico del acuífero se encuentra bajo las arcillas ocasionando que el acuífero funcione como **libre** (figura 2)

La principal recarga al acuífero corresponde a la infiltración por lluvia que se genera sobre los flancos de las elevaciones topográficas, en la porción sur (Sierra del Chichinautzin) en el poniente sobre la Sierra de Las Cruces y al oriente la Sierra Nevada. El agua subterránea circula en forma radial, de las sierras hacia el centro del valle.

Dentro del valle existen un gran número de pozos que corresponden a la salida de agua del acuífero en forma de extracción por bombeo.

A principios del siglo XX, antes de que se iniciará la explotación del acuífero de la Ciudad de México, los materiales se encontraban totalmente saturados y el nivel estático afloraba. Conforme se ha venido realizando e incrementando la extracción de agua, el nivel se ha ido abatiendo, como se ilustra en el recuadro de la porción superior izquierda de la figura 1. En dicho recuadro se muestra el acuitardo formado por arcillas lacustres y, bajo él, la zona no saturada y el acuífero. Debido a que el acuitardo se encuentra saturado y deja pasar agua muy lentamente, esta corresponde a un aporte al acuífero denominado drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero. La baja permeabilidad de las arcillas que constituyen el acuitardo, hace que el flujo del drenado vertical sea lento, sin embargo, multiplicado por la gran superficie que estos materiales abarcan, el volumen drenado alcanza cifras significativas.

Se realizó el balance de agua subterránea actualizado al 2003, para cada uno de los tres subsistemas acuíferos. Se determinaron las entradas por flujo subterráneo, la infiltración vertical, la extracción por bombeo, el cambio de almacenamiento y el grado de sobreexplotación del acuífero. Este balance, arroja cifras diferentes a los realizados en otros trabajos anteriores, en especial alrededor de la Sierra de Santa Catarina, donde la modelación matemática del acuífero ha permitido afinar los valores de transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento.

REFERENCIAS

Sistema de Aguas de la Ciudad de México, GDF, 2003. Estudio de medición de los pozos piloto de la cuenca del Valle de México. Biblioteca del SACM.

Toussaint M., F. Gómez de Orozco y J. Fernández, 1938. Planos de la Ciudad de México, siglos XVI y XVII. XVI° Congreso Internacional de Planificación y de la Habitación, 1990.

Departamento del Distrito Federal, Memorias de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, 12975. Talleres Gráficos de la Nación, 4 tomos.

Lesser, J. M., D. González y L. E. Lesser, 1998, Balance de agua subterránea del acuífero de la Ciudad de México. Revista Hidráulica Urbana, DGCOH, No. 4, julio 1998.