

Las Series del Instituto de Ingeniería describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

SERIE DOCENCIA

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

SERIE MANUALES

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las Series del Instituto de Ingeniería pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

SID 700 MAYO, 2016

Subsidencia de la Ciudad de México: un proceso centenario insostenible



SERIE
investigación
y desarrollo

PUBLICACIÓN ARBITRADA

Subsidencia de la Ciudad de México: un proceso centenario insostenible

ISBN: 978-607-02-7818-1

DANIEL RESÉNDIZ
GABRIEL AUVINET
ÉDGAR MÉNDEZ

SID 700
MAYO, 2016

Serie INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO



Publicación arbitrada

Las Series del Instituto de Ingeniería describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

SERIE DOCENCIA

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

SERIE MANUALES

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las Series del Instituto de Ingeniería pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto (II UNAM), <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

Subsidencia de la Ciudad de México: un proceso centenario insostenible

ISBN: 978-607-02-7818-1

DANIEL RESÉNDIZ

GABRIEL AUVINET

ÉDGAR MÉNDEZ

SID 700
MAYO, 2016

D.R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2016
Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CP 04360, Ciudad de México
Primera edición, mayo 2016
ISBN 978-607-02-7818-1

SUBSIDENCIA DE LA CIUDAD DE MÉXICO:
PROCESO CENTENARIO QUE SE VUELVE INSOSTENIBLE

Daniel Reséndiz, Investigador emérito
Gabriel Auvinet, Investigador titular
Édgar Méndez, Técnico académico

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM)

Índice

RESUMEN.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PROCESO DE SUBSIDENCIA Y SUS EFECTOS	3
3. BALANCE ENTRADA-SALIDA DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y PROSPECTIVA DEL PROBLEMA.....	7
4. EXISTE UNA SOLUCIÓN SOSTENIBLE	9
5. INSOSTENIBILIDAD DE LAS CONDICIONES ACTUALES	11
6. COSTOS DE LA SUBSIDENCIA E INVERSIONES REQUERIDAS PARA DETENERLA.....	13
7. MÉTODO PARA IMPLANTAR LA SOLUCIÓN PROPUESTA	15
8. CONCLUSIONES	17
RECONOCIMIENTOS	19
REFERENCIAS	21
ANEXOS (FIGURAS).....	24

RESUMEN

El diseño y la construcción de obras en la Ciudad de México enfrentan severos problemas derivados, por una parte, de la gran compresibilidad de sus suelos, y por otra del hundimiento o subsidencia por consolidación regional a causa de la sobreexplotación del agua subterránea. La subsidencia se ha vuelto un problema crítico porque produce continuos asentamientos diferenciales que dañan las edificaciones y la infraestructura, además de generar agrietamiento vertical súbito del terreno en ciertas zonas del Valle, con graves daños a todas las construcciones. La información acumulada al respecto durante casi un siglo hace evidente la necesidad de reducir drásticamente la sobreexplotación de los acuíferos; sin embargo, aún no existe un plan con tal propósito. ¿Cómo explicar esta inacción? Aparentemente el hecho de que la Ciudad haya padecido tal subsidencia durante tantos años ha inducido la creencia de que el proceso puede continuar indefinidamente o de que su corrección es imposible. Sin embargo, ya es muy claro que las condiciones actuales son insostenibles y, si persisten, los daños que están causando alcanzarán proporciones desmesuradas. Con base en el estudio sistemático y continuo de las causas, los efectos y la evolución de la subsidencia tanto en la Ciudad como en sus alrededores, en el presente trabajo se explica por qué y cómo la consolidación regional puede ser reducida sustancialmente a fin de dar sostenibilidad a la megalópolis que se ha desarrollado en el amplio Valle de México. A la vez, se dan evidencias de que la solución que se propone es factible y económicamente eficiente.

Palabras clave: subsidencia; historia de caso; sobreexplotación de acuíferos; suelos lacustres; asentamientos diferenciales; agrietamiento del terreno; fractura de construcciones; sostenibilidad ambiental; método observacional.

1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México (antigua Tenochtitlan) fue fundada en las primeras décadas del siglo XIV en el centro del Valle de México, en el ambiente lacustre de una cuenca cerrada de la altiplanicie mexicana situada entre 2,200 y 2,240 metros de altitud sobre el nivel del mar. Durante el Cuaternario Superior, la cuenca fue cerrada por las erupciones volcánicas masivas generadoras de la Sierra Chichinautzin, una cadena de enormes montañas basálticas que a partir de entonces obstruyeron el desagüe del Valle hacia el sur. Este evento geológico dio lugar a que las lluvias en la cuenca cerrada formaran lagos que luego se azolvieron progresivamente con grandes depósitos eólicos de cenizas producidas por la intensa actividad volcánica en la región, que luego se convirtieron en sedimentos arcillosos, limosos y arenosos. Durante las temporadas de lluvia, los torrentes que bajaban de las montañas arrastraron año tras año materiales sueltos que crearon al pie de ellas abanicos aluviales inter-estratificados con los sedimentos lacustres (Santoyo, 2005).

La estratigrafía en el centro y el Oriente del Valle de México incluye dos potentes depósitos de sedimentos lacustres arcillosos y limosos separados por una capa de arena compacta cuyo espesor varía de pocos decímetros hasta dos metros. El espesor del depósito lacustre superior es de 30 a 50 m y el del inferior es de 5 a 30 m. La capa dura intermedia tiende a desaparecer hacia el Este, donde los dos estratos compresibles se unen en una sola formación de aproximadamente 80 m de espesor total. La Fig. 1 (Marsal y Mazari, 1959) presenta un corte estratigráfico Este-Oeste del Valle de México a través del centro de la Ciudad. Entre los dos estratos compresibles indicados y la roca basal existen varios centenares de metros de aluvión del que se extrae agua para usos domésticos, industriales y agrícolas.

La antigua Tenochtitlan, capital del imperio azteca, fue edificada sobre rellenos artificiales colocados en el fondo del lago somero de Texcoco. En 1521, antes de la conquista por los españoles, dicha capital era una magnífica ciudad lacustre con aproximadamente 200,000 habitantes. Cruzada por una red de caminos y canales para el transporte de bienes y personas, esa ciudad estaba protegida contra las inundaciones por un extenso sistema de bordos y otras obras hidráulicas (Díaz del Castillo, 2013; manuscrito fechado en 1568). Todo indica que en aquellos tiempos este complejo sistema lacustre, constituido por la ciudad y su entorno agrícola, se encontraba en un estado de equilibrio estable tanto desde el punto de vista ecológico como económico. Tras la conquista la urbe y sus barrios periféricos recibieron el nombre de Ciudad de México y se convirtieron en la capital de Nueva España, la mayor posesión española en el continente americano. Pese a la violenta guerra de conquista, la antigua y gran ciudad sobrevivió, aunque a partir de entonces sometida a inundaciones recurrentes, debidas a la destrucción del sistema de obras hidráulicas que antes la protegían. Una de tales inundaciones fue tan severa que la ciudad tuvo que ser abandonada por largo tiempo.

Hasta hoy, sólo durante breves periodos de cada año se alcanza cierto equilibrio hidráulico y ambiental precario, alternado con lapsos críticos de sequía o inundaciones.

Durante varios siglos la ciudad creció lentamente, con edificaciones de uno o dos niveles cimentadas en el subsuelo lacustre blando y compresible, con nivel freático a pocos decímetros de profundidad. Esta condición prevaleció hasta la segunda década del siglo XX, cuando la rápida expansión del área urbana hizo crecer la explotación del acuífero local, lo que indujo consolidación progresiva del subsuelo y la consiguiente subsidencia. Aunque al principio de este proceso la velocidad de hundimiento era muy pequeña, la subsidencia fue detectada en 1925 por Roberto Gayol (agosto 1925), un ingeniero civil que buscaba explicarse la misteriosa pérdida de gradiente hidráulico de un canal que, para evitar inundaciones, conducía el agua pluvial de la Ciudad hacia una cuenca vecina al Norte del Valle de México. Gayol atribuyó correctamente el fenómeno a una "pérdida de agua" del subsuelo; sin embargo, la especulación sobre las posibles causas del problema continuó durante más de 20 años hasta que Nabor Carrillo (1948), con base en la teoría de consolidación de Terzaghi, pudo establecer fuera de toda duda la correlación cuantitativa entre la consolidación del subsuelo y la magnitud de la subsidencia en varios puntos de la urbe.

2. PROCESO DE SUBSIDENCIA Y SUS EFECTOS

Los peculiares suelos lacustres de la ciudad de México han hecho de ésta un caso bien conocido internacionalmente por sus complejidades geotécnicas. Su contenido de agua es superior a 200% y exhiben, además de baja resistencia al esfuerzo cortante, muy alta compresibilidad; esta última característica, combinada con la explotación intensiva del agua subterránea, explica el hecho casi increíble de que una gran parte de la ciudad se haya hundido más de 10 m durante los últimos 100 años, como se muestra en la Fig. 2 (SIMOH, 2015). Muchos de los problemas debidos a la debilidad del suelo han podido ser resueltos recurriendo a reglas empíricas derivadas de siglos de experiencia local. Por otro lado, los desarrollos científicos de la mecánica de suelos moderna iniciados por Terzaghi (1925) han producido numerosas aportaciones teóricas y prácticas para enfrentar los desafíos que plantean tanto la debilidad de los suelos como la subsidencia. Sin embargo, la persistente consolidación del subsuelo sigue siendo el problema no resuelto más importante del Valle de México; su velocidad actual varía desde unos pocos centímetros al año hasta diez veces más en ciertas otras zonas con grandes espesores de suelos lacustres (SIMOH, 2015). Debido a este fenómeno, las cimentaciones en la ciudad de México tienen comportamientos exageradamente disímiles: aquellas con sobrecarga ligera o moderada sufren grandes asentamientos, mientras las cimentaciones sobre-compensadas o apoyadas en pilotes generalmente tienden a emerger con respecto al terreno circundante, como se muestra en la Fig. 3.

El volumen de agua que cada año se extrae del subsuelo está causando serios problemas en todo el Valle de México. La naturaleza y la magnitud de los daños que esto produce varían de una zona a otra. En la extensa zona plana del Valle, el efecto más problemático es una subsidencia continua cuya magnitud depende del espesor y la compresibilidad de los depósitos de suelo en cada sitio. Debido a que tanto el espesor como la compresibilidad varían gradualmente de un punto a otro dentro de tal zona, los asentamientos diferenciales resultan ahí pequeños, a pesar que la subsidencia es grande. Por otro lado, en las zonas donde el espesor y/o la compresibilidad varían abruptamente, los asentamientos diferenciales son mucho mayores. En años recientes la acumulación de asentamientos diferenciales ha dado lugar a un nuevo fenómeno: la aparición repentina de grietas verticales profundas, con o sin desplazamiento relativo entre ambos lados de la grieta (Fig. 4a). Este fenómeno ha causado severas fracturas en las edificaciones y la infraestructura de ciertas zonas de la ciudad; en tales grietas han llegado a caer automóviles, objetos diversos y aun personas casualmente ubicadas en su cercanía. Las grietas ocurren principalmente cerca de la frontera entre depósitos compresibles y afloramientos de roca en la periferia del Valle o alrededor de los promontorios rocosos dentro de la zona lacustre. La Fig. 4b muestra las franjas de terreno en las que este fenómeno se presenta con mayor frecuencia. La continua subsidencia hace que en estas zonas el gradiente de asentamiento diferencial y los esfuerzos de tensión en la superficie del terreno crezcan progresivamente hasta alcanzar un valor crítico que causa la fractura (Auvinet et al., 2013). Tanto el mecanismo

generador de las grietas como la ubicación de las zonas más susceptibles a agrietarse han sido confirmados independientemente (Hernández-Espriú, septiembre 2014; Siles et al., 2015). No se ha determinado la profundidad que tales fracturas alcanzan en el momento de su aparición; lo más probable es que cada una de ellas se extienda espontáneamente hacia abajo hasta llegar a depósitos de suelos no cohesivos, pues estos colapsan por peso propio y así cierran cualquier grieta. Por otra parte, en suelos cohesivos las grietas se llenan de inmediato con agua de lluvia o de cualquier otra fuente, lo que produce un efecto de cuña hidráulica que extiende la fractura hacia abajo hasta encontrar materiales granulares sin cohesión que la sellan. Tales grietas constituyen una amenaza inminente de contaminación para los acuíferos que abastecen de agua potable a la población de todo el Valle (Mazari and Mackey, 1993; Ezcurra and Mazari, 1996). Más allá de estas zonas con grietas de tracción hay también riesgos inminentes de contaminación de acuíferos con aguas de desecho; es el caso de las laderas de basalto muy fracturado de la Sierra Chichinautzin, al Sur del Valle de México, que están siendo urbanizadas sin el debido cuidado ambiental.

Así pues, la consolidación regional del Valle de México tiene tres consecuencias muy dañinas, que están interrelacionadas: 1) enormes hundimientos del terreno en zonas planas con subsuelo compresible de gran espesor; 2) acumulación continua de asentamientos diferenciales en las dos zonas anteriores y 3) agrietamiento vertical súbito del terreno donde hay grandes variaciones en la compresibilidad del subsuelo. La mecánica del proceso en general es la siguiente: cuando se explota el agua subterránea, una porción del agua extraída no proviene de los propios acuíferos, sino de estratos compresibles arriba de ellos, llamados acuitardos en geohidrología. Debido a que los suelos compresibles del Valle son de granulometría fina y se encuentran saturados, la extracción de agua de ellos genera en la superficie del terreno una depresión de volumen igual al del agua extraída; este efecto es prácticamente irreversible porque los suelos no recuperan su volumen original al quedar descargados (véase la trayectoria de esfuerzos 1-2-3 en la Fig. 5). La extracción de agua subterránea causa un abatimiento piezométrico en cada punto del subsuelo e impone ahí mismo un incremento de esfuerzo compresivo de magnitud igual a dicho abatimiento. La Fig. 6 muestra diagramas de presión de poro en el subsuelo del Valle correspondientes a tres condiciones: (a) distribución de presión de poro hidrostática inicial, antes de cualquier abatimiento por extracción de agua; (b) distribución de presión de poro asociada al flujo transitorio causante de la subsidencia, y (c) condición de flujo establecido descendente a través del estrato compresible una vez que éste ha sido totalmente consolidado bajo esfuerzo efectivo vertical resultante, que es igual al peso total del suelo que yace sobre ese nivel. En la condición (b) el abatimiento en cada elevación depende de muchas variables, entre ellas la distancia a los pozos de extracción de agua, el gasto que de ellos se extrae, la distribución 3D de la permeabilidad y la compresibilidad del suelo, etc. Amplias zonas del Valle de México presentan grandes abatimientos piezométricos a ciertas elevaciones, con los consecuentes incrementos de esfuerzo vertical efectivo. Dada la creciente extracción de agua subterránea, los asentamientos totales y diferenciales del terreno crecen año tras año. Este proceso acumulativo produce subsidencia creciente del Valle en zonas cada vez más amplias, con los consecuentes daños en edificaciones y obras de infraestructura.

En las circunstancias descritas, tanto el diseño como la construcción y el mantenimiento de las obras de ingeniería exigen predecir, en la ubicación de cada una de ellas, la evolución futura de los abatimientos piezométricos y del hundimiento del terreno. Hacer esta predicción para todos los sitios en que se construyen obras en el Valle de México es posible, aunque muy laborioso (ver por ejemplo Calderhead et al., 2012); se requiere para tal fin un modelo computarizado que simule el proceso de consolidación regional. Tal modelo debe basarse en datos confiables de todas y cada una de las variables relevantes, entre ellas la ubicación de los pozos de extracción de agua, la evolución en el tiempo de los gastos de bombeo en cada pozo, la compresibilidad del suelo y su evolución en cada punto, etc. Aunque se han hecho esfuerzos loables para desarrollar una herramienta predictiva de este tipo (Cruickshank et al., 1979), su calibración y operación constituyen una tarea formidable, pues el gran número de variables que intervienen, más la complejidad de sus interacciones, terminan por introducir un grado de incertidumbre muy alto tanto en los datos de entrada como en los resultados arrojados por el modelo. La única manera de eludir esta gran incertidumbre sería detener primero el hundimiento mediante una reducción significativa en la sobreexplotación del agua subterránea, haciendo así innecesaria la predicción de las deformaciones futuras del terreno; es decir, actuar ya para evitar mayores problemas futuros.

Los beneficios de todo tipo que resultarían de parar el hundimiento son tan grandes que es indispensable explorar tal posibilidad. Para detener el hundimiento no es necesario que las presiones de poro en el subsuelo vuelvan a la condición hidrostática inicial; bastaría con que, en el futuro, los esfuerzos efectivos no excedan la carga de pre-consolidación en cualquier punto del subsuelo. Si esto se lograra se evitarían grandes deformaciones irreversibles del subsuelo y sólo podrían ocurrir deformaciones reversible muy pequeñas. Tal es la clave para detener la subsidencia, y su factibilidad será analizada en el apartado subsecuente.

En cualquier caso el modelo computacional que simule el proceso de consolidación regional del Valle de México seguirá siendo necesario, pues es el medio idóneo para evaluar en su momento, al menos aproximadamente, la efectividad de estrategias específicas para reducir de modo progresivo la subsidencia hasta finalmente detenerla.

3. BALANCE ENTRADA-SALIDA DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y PROSPECTIVA DEL PROBLEMA

La Tabla 1 muestra las variables principales que intervienen en el balance entrada-salida del agua subterránea en el Valle de México (Capella, marzo 17 de 2015). A pesar de las incertidumbres existentes sobre el valor preciso de cada variable, la tabla revela claramente tanto la naturaleza del problema como su gravedad, pues la extracción ($56 \text{ m}^3/\text{s}$) rebasa ampliamente la recarga total ($32 \text{ m}^3/\text{s}$). Debido a tal sobreexplotación, el hundimiento de la Ciudad de México se ha extendido de la Ciudad a la mayor parte del Valle de México. Tres factores adicionales que contribuyen a este crecimiento del área afectada por la subsidencia son la duración de más de un siglo del proceso de consolidación regional, la tasa creciente de extracción tanto en la ciudad como en los suburbios circundantes, y la estratificación horizontal de los suelos lacustres, que produce un flujo de agua en dirección horizontal diez veces mayor que en dirección vertical, por lo que la extracción de agua en cualquier parte del Valle causa rápidamente asentamientos en sitios distantes.

La persistencia de la consolidación regional durante un lapso tan largo incrementa los asentamientos diferenciales en forma continua, ocasionando daños a todo lo que se construye en el Valle. La subsidencia tiene además otros efectos graves, como los ilustrados en la Fig. 3. Los casos (a) y (b) son evidencias impresionantes de la subsidencia. El caso (c) ilustra las grandes expansiones que ocurren en los pasos inferiores que se requieren, por ejemplo, en la estructura de numerosas intersecciones viales de la ciudad. Se trata de cimentaciones en las que el peso del suelo excavado excede el de la estructura construida encima, razón por la cual se les llama cimentaciones "sobre-compensadas", cuyo comportamiento ha sido detalladamente documentado y estudiado (Reséndiz, 1996). La mayoría de los observadores, incluyendo algunos ingenieros, solían atribuir este comportamiento a la simple expansión del suelo causada por la descarga del suelo debajo de la cimentación. El hecho es que tal descarga contribuye apenas marginalmente a la expansión observada, mientras la mayor parte de ésta se puede explicar considerando simultáneamente las Figs. 3c y 5: la expansión del suelo debajo de la cimentación debida al decremento de esfuerzo vertical está representada por la trayectoria de esfuerzos 2-3 en el diagrama de compresibilidad de la Fig. 5; por su parte, la continua extracción de agua subterránea causa decrementos progresivos de la presión de poro en el subsuelo, que implican grandes incrementos del esfuerzo efectivo vertical (trayectoria de esfuerzos 4-5). Una vez que el esfuerzo efectivo alcanza la rama virgen de la curva de compresibilidad (a partir del punto 4 y más a la derecha), incrementos adicionales, aunque sean pequeños, son suficientes para causar grandes asentamientos de la superficie del terreno, debido a que la pendiente de dicha curva (tramo 4-5) es mucho mayor que la pendiente de la rama de recarga (tramo 3-4). Los grandes asentamientos resultantes de la trayectoria de esfuerzos 4-5 se presentan en todo el entorno de la cimentación, pero no debajo de ella, donde predomina el decremento de esfuerzos debido a la descarga por excavación. Por tanto la estructura

parece emerger continuamente sobre el nivel del terreno circundante (desplazamiento ascendente del punto A respecto al punto B en la Fig. 3), cuando en realidad es el subsuelo de ese terreno circundante el que se hunde debido a la extracción de agua. La emersión de la estructura continúa hasta que la extracción de agua se detiene, o bien hasta que ya no ocurren abatimientos piezométricos adicionales; a esta condición se llega cuando todos los estratos compresibles del subsuelo han sido consolidados completamente bajo un esfuerzo vertical efectivo igual al peso total de la columna de suelo superyacente. Dada la alta compresibilidad de los suelos del Valle de México, la aparente emersión debida a la consolidación del subsuelo bajo el terreno que circunda la estructura alcanza valores que causan daños considerables a las construcciones cercanas.

Si no se emprende alguna acción que detenga o reduzca drásticamente la tasa de extracción de agua del subsuelo, el proceso en marcha se agravará año tras año. De hecho, ya se está cayendo en círculos viciosos como el siguiente: los asentamientos diferenciales fracturan la red de ductos de agua, incrementando sus pérdidas y generando la necesidad de extraer más agua subterránea para compensarlas, lo que a su vez incrementa los asentamientos, las roturas y las fugas a lo largo de los millares de kilómetros de ductos que distribuyen el agua potable en la ciudad.

4. EXISTE UNA SOLUCIÓN SOSTENIBLE

No se han hecho mediciones confiables de las pérdidas de agua debidas a fugas en las tuberías del Valle de México. Sin embargo, la mayoría de los expertos estima que el total de éstas es de al menos 20 m³/s. En toda red de distribución la pérdida de agua crece tanto con la presión de operación como con el número de conexiones del servicio. Existen reglas empíricas aceptadas internacionalmente para estimar las pérdidas por esta causa, que pueden reducirse mejorando la calidad de la red de tuberías (Liemberger, 2005). Asumiendo que la red opera a presión media de 20 m de agua y que tiene 5 millones de conexiones, con tales reglas se estima que la pérdida podría ser reducida de 20 a 3 m³/s, si se invierte en elevar la calidad de la red hasta el más alto estándar internacional, ahorrando así 17 m³/s. Alguien podría considerar que este estándar es demasiado alto y sugerir uno más bajo y de menor costo. Por ejemplo, bajar el estándar tres categorías para llevarlo a la condición correspondiente a países en desarrollo abatiría las pérdidas de 20 a 12 m³/s, ahorrando todavía 8 m³/s de agua. Por tanto parece razonable reducir las pérdidas a un valor intermedio entre las estimaciones superior e inferior antes indicadas (3 y 12 m³/s respectivamente), por ejemplo, bajarlas a 8 m³/s, con ahorro de 12 m³/s. Sin embargo, el hecho es que cualquier inversión que se haga para mejorar el estándar de calidad de la red de distribución de agua resultará inútil si antes no se detiene o reduce drásticamente la subsidencia, ya que el continuo incremento de los asentamientos diferenciales del subsuelo pronto rompería nuevamente las tuberías. Reducir en grado significativo la subsidencia atenuaría de inmediato en la misma medida los daños a la infraestructura y a las edificaciones en la Ciudad y el Valle de México, así como sus costos de mantenimiento; otro tanto se abatirían los costos de construcción y conservación de obras futuras y los daños a todos los sitios y monumentos históricos heredados de nuestro pasado milenario.

De acuerdo con la Tabla 1, es necesario ahorrar un total de 24 m³/s para evitar la sobreexplotación del agua subterránea. Para lograrlo se requiere ahorrar, además de los 12 m³/s salvados con la eliminación de fugas, 12 m³/s adicionales; una parte de este ahorro se puede lograr mediante mejoras modestas en la eficiencia de uso del líquido para fines domésticos e industriales, y otra parte sustituyendo el agua potable que hoy se usa para fines agrícolas por agua tratada. Sustituir el agua de alta calidad que hoy se usa en la agricultura por agua debidamente tratada es por cierto una opción que debe fomentarse no sólo en el Valle de México, sino en todo el país, pues la fracción de las aguas usadas de origen doméstico que en México se tratan para uso agrícola es casi nula, mientras en Israel alcanza 86% y en España 17% (I. Kershner, mayo de 2015). Existe un plan bien definido y en marcha para el tratamiento de las aguas de desecho del Valle de México, que debidamente tratadas se usarán para elevar la calidad y el valor de la agricultura irrigada en el valle del río Tula.

Hay incertidumbre en cada una de las variables que inciden en la magnitud de la sobreexplotación de los acuíferos del Valle, por lo que es posible que algunas de las

cantidades dadas en los párrafos precedentes deban afinarse conforme se reúna información de campo al respecto. Sin embargo, las cifras indicadas constituyen al menos un fuerte indicio de que es factible y económicamente viable reducir en grado sustancial la subsidencia, y por tanto eliminar la mayoría de sus graves efectos y costos. Así pues, las acciones propuestas constituyen, grosso modo, un conjunto de condiciones necesarias y suficientes para llevar el sistema de abastecimiento de agua en el Valle de México a una condición sostenible.

Como primer paso hacia la implantación de la solución propuesta, es deseable lograr que la sociedad civil entienda, por encima de visiones sesgadas e intereses parciales, que el origen del problema es la sobreexplotación del agua subterránea. También debe haber conciencia de que, además de su complejidad técnica intrínseca, el problema implica cuestiones éticas, pues para que las generaciones actuales y las futuras puedan satisfacer en su momento sus respectivas necesidades de agua, el uso responsable de este líquido vital es un imperativo continuo. El presente artículo busca contribuir al análisis objetivo y a la discusión racional del problema para una oportuna toma de decisiones, antes de que la falta de acción desemboque en una emergencia que obligue a imponer medidas perentorias y costosas de manera improvisada.

5. INSOSTENIBILIDAD DE LAS CONDICIONES ACTUALES

El concepto de sustentabilidad ambiental fue enunciado por primera vez de manera explícita en el llamado Informe Brundtland (World Commission on Environment and Development, United Nations Organization, 1987), donde el desarrollo sustentable se define como un proceso en que la sociedad aplica su voluntad colectiva y su sabiduría a usar los recursos naturales de modo que se satisfagan sus necesidades sin comprometer la posibilidad de que las subsecuentes generaciones, en su momento, satisfagan las suyas en condiciones equiparables. Esta forma de proceder reconoce la obligación ética de hacer hoy lo necesario para no cancelar opciones a futuro.

Ahora bien, el uso práctico del concepto de sostenibilidad arriba enunciado no es tan sencillo ni tan directo como a primera vista parece, pues el impreciso significado de términos como “desarrollo” y “crecimiento” puede conducir a contradicciones internas o a errores de lógica. Esto comenzó a ser señalado casi tan pronto como el referido informe se publicó, y desde entonces se han propuesto maneras de reducir tales riesgos (Brooks, 1992; Reséndiz, 1992). Hoy la definición de desarrollo sustentable introducida por el Informe Brundtland es ampliamente usada y digna de consideración, pues contribuye a moderar el consumo de recursos naturales y estimula la creatividad para buscar opciones sustentables.

La propia definición de sostenibilidad lleva de inmediato a confirmar que las condiciones actuales de suministro y uso de agua en el Valle de México no son sostenibles, ya que la sobreexplotación del agua subterránea acabará agotando la fuente local y consumiendo el agua de otras cuencas, a la vez que los asentamientos diferenciales causados por el hundimiento seguirán dañando edificios e infraestructura en el Valle hasta grados inaceptables y con costos que, por crecer cada día, tenderán a ser mucho mayores que la inversión necesaria para detener la subsidencia, como se verá en el apartado subsecuente. Pese a esto, hoy todavía parece no existir un sentimiento de urgencia ante dicha insostenibilidad. El hecho de que la Ciudad haya sufrido tan grandes hundimientos durante casi un siglo hace que sus habitantes creen que el proceso puede seguir indefinidamente. Así, aunque hay conciencia de que la extracción excesiva de agua subterránea es la causa de la subsidencia, no parece haber interés en buscar activamente alternativas para detener la sobreexplotación, sino al contrario. Por ejemplo, la prensa ha informado recientemente de exploraciones geológicas para evaluar acuíferos potencialmente ricos a profundidades dos mil metros debajo de los hoy explotados (González, Marzo 13, 2015), pese a que, como se explicó al describir el mecanismo de subsidencia, cualquier abatimiento adicional de la presión del agua en el subsuelo compresible del Valle causará hundimientos. En efecto, si los acuíferos profundos que se buscan pertenecen a la cuenca del Valle de México y su potencial resulta alto, el efecto principal de su explotación será intensificar la subsidencia e incrementar el área donde ésta ocurre, agravando así sus efectos dañinos; si al contrario, tales acuíferos están alimentados por fuentes ubicadas fuera del Valle de

México, el hundimiento se extenderá a esas otras cuencas. Por tanto, aún si se confirman las mejores expectativas acerca de la existencia y potencial de los nuevos acuíferos debajo del Valle, su explotación tampoco contribuirá a una solución sostenible.

6. COSTOS DE LA SUBSIDENCIA E INVERSIONES REQUERIDAS PARA DETENERLA

Cualquier alternativa orientada a alcanzar la sustentabilidad del sistema de suministro de agua del Valle de México debe ser evaluada y sus costos comparados con los beneficios derivados de la eliminación o reducción de la subsidencia. Dado que el asunto es de interés público, en seguida se enumeran y comparan los principales componentes de tales costos y beneficios a fin de contribuir a su discusión racional.

Los componentes principales de los costos causados por la subsidencia son los siguientes, todos crecientes con el tiempo:

- a. Costo de todas las obras de infraestructura cuyo propósito es lidiar con la subsidencia o subsanar sus efectos destructivos. Ejemplos de tales obras son el Emisor Central (terminado hace cerca de 40 años) y el Túnel Emisor Oriente (en construcción), ambos construidos para evitar la inundación de zonas habitadas del Valle que han sufrido grandes hundimientos. Otras obras con esos objetivos son las numerosas estaciones de bombeo que se usan para elevar y conducir el agua de la red de colectores del drenaje hacia fuera del Valle hasta el río Tula, con su correspondiente consumo continuo de energía eléctrica. También han de incluirse en este rubro los costos de reparación de daños causados por el hundimiento, deformación y fractura de las redes de drenaje y agua potable, así como los daños en toda la infraestructura de la urbe, incluso las vialidades superficiales y subterráneas. Si no hubiera subsidencia todos esos gastos serían innecesarios. Deben incluirse además los costos que en México tiene que pagar directamente la población para suplir las deficiencias del servicio público de agua potable (3 litros/persona/día de agua comprada a granel o envasada, a 10 pesos/litro, por una población de 20 millones durante 365 días/año, representa un costo anual del orden de 10 mil millones de pesos, o 600 millones de dólares USA), más el costo que para cada familia implica tener y mantener en su domicilio tinacos, cisternas y bombas para almacenar y presurizar el agua en la tubería de cada casa.
- b. Costo de los daños inducidos por la subsidencia en edificaciones, monumentos y sitios que constituyen el patrimonio material acumulado en el Valle de México durante su historia milenaria
- c. Incrementos en el costo de construcción y conservación de nuevos edificios e infraestructura, con respecto al que se tendría si no hubiera subsidencia
- d. Costo de daños causados por el súbito agrietamiento de sitios, edificaciones e infraestructura en zonas donde el terreno está siendo sometido a

esfuerzos de tensión causados por altos gradientes de asentamientos diferenciales

e. Costo implícito en la mayor vulnerabilidad sísmica de los edificios dañados por asentamientos diferenciales.

En contraparte, detener o reducir la subsidencia exige inversiones inmediatas principalmente en los siguientes rubros:

A. Elevar los estándares de calidad de la red de tuberías de transmisión y distribución de agua, a fin de reducir de 20 a 8 m³/s las pérdidas del agua que se inyecta al sistema, ahorrando así 12 m³/s

B. Implantar en todo el Valle de México un programa para el uso más eficiente del agua potable y otro para sustituir el agua limpia que hoy se destina a fines agrícolas por agua de reúso debidamente tratada, a fin de lograr con ambas acciones una reducción de 12 m³/s adicionales en la extracción de agua subterránea

Al comparar las dos listas anteriores, el buen juicio indica que la inversión en los conceptos A y B, necesaria para detener o reducir drásticamente el proceso de consolidación del subsuelo, es muy inferior a los costos a-e causados por la subsidencia. Lo que hace más atractivo parar la subsidencia es que, al hacerlo, se evitan automáticamente los daños que ella produce tanto en la infraestructura existente como en la que se habrá de construir en el futuro. Además, lo que se invierte en reducir la subsidencia no se pierde ni se deprecia o desvanece con el tiempo; al contrario, una vez realizada, tal inversión se vuelve cada día más valiosa, pues constituye un beneficio que se transfiere a generaciones futuras para que a su vez puedan satisfacer sus necesidades sosteniblemente, de modo equiparable a como nosotros satisfaremos las nuestras al adoptar una solución como la que aquí se propone. Por tanto tales inversiones no son costos. También hay que considerar que, si en muy corto plazo no se implanta una opción sostenible, los costos asociados a la subsidencia, que ya son muy altos, seguirán creciendo a ritmo acelerado.

7. MÉTODO PARA IMPLANTAR LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En nuestros días es cada vez mayor el número de sitios donde las fuentes de agua potable se agotan o se vuelven insuficientes. Para lidiar con el problema, muchos países están adoptando medidas audaces de reciclaje del agua. Por ejemplo, el programa llamado Advanced Water Purification Facility que opera en San Diego, California, busca demostrar que el agua del drenaje doméstico debidamente purificada es no sólo más limpia que el agua potable disponible, sino que puede producirse a costo menor que la obtenida por desalación de agua marina (Hefferman, julio de 2014). Se sabe que pasarán algunos años antes de que tanto los reguladores como el público se convenzan de que tal decisión está suficientemente validada, pero el debate actual ya no es si el agua debe reciclarse o no, sino más bien si dicha agua, una vez purificada, ha de ser reutilizada directamente o deberá ser enviada a un reservorio para su almacenamiento durante cierto tiempo antes de ser entregada a los consumidores, proceso conocido como reúso indirecto. Para el caso del Valle de México, la solución que en el presente artículo se propone es mucho más sencilla, menos arriesgada y más económica, pues el agua subterránea local, que en general es de buena calidad, podrá y deberá seguir usándose, y a la vez habrá que cumplir el imperativo de reducir la extracción total de esta fuente, para lo cual deben reducirse las pérdidas en tuberías y hacer uso más eficiente del líquido en casas e industria, como se indicó antes.

Una vez validada en detalle la solución propuesta, será necesario establecer un plan cuidadoso para la transición hacia la sustentabilidad deseada. Este plan debe ser flexible para hacer sobre la marcha los ajustes necesarios. Dado el gran número de variables involucradas, cada una de ellas sujeta a incertidumbres, la implementación deberá hacerse con la guía de expertos en geotecnia y con apoyo en modelos de simulación computarizados.

Para implantar la solución propuesta el territorio del Valle deberá subdividirse en cierto número de parcelas (colonias, municipios o sectores) en cada una de las cuales han de monitorearse los niveles piezométricos para evitar que la extracción de agua en ellas genere en cualquier punto esfuerzos efectivos que excedan la carga de pre-consolidación del terreno compresible, evitando así deformaciones irreversibles del subsuelo; en cada parcela donde ese límite tienda a excederse se suspenderá de inmediato la extracción de agua, que pasará a hacerse en otras parcelas. El cumplimiento de este requisito se deberá controlar mediante el método observacional (Peck, 1976; The Institution of Civil Engineers, 1996).

En la Fig. 5 puede verse que incrementos de esfuerzo de misma magnitud producen deformaciones del suelo crecientes con la pendiente de la curva de compresibilidad, y que las deformaciones asociadas a las trayectorias de esfuerzos 2-3 y 3-4 (deformaciones reversibles) son varias veces menores que las deformaciones irreversibles que se presentan a lo largo de la rama virgen de la curva (trayectorias de

esfuerzo como la 4-5). Permitir solamente deformaciones reversibles como se indica arriba evitará la acumulación de daños a edificaciones y subestructura. Esto a su vez dará lugar a que rinda frutos la inversión que se haga para reducir las fugas de agua en la red, pues evitará la continua deformación del terreno que hoy vuelve a dañar los ductos una y otra vez.

Como es indispensable que las redes de suministro de agua potable sigan dando servicio sin interrupción, la implantación de las medidas propuestas deberá avanzar simultáneamente en las dos tareas previstas: sustituir tuberías de agua para reducir fugas y cancelar pozos de extracción de agua subterránea a fin de detener el hundimiento. Al sustituir tuberías, en algunos casos se requerirá incluir válvulas que permitan aislar porciones de la red para corregir fugas y controlar el flujo, asegurando así el debido abastecimiento de todos los sectores. Para posibilitar todo esto, durante el proceso de implantación puede ser necesario un respaldo temporal con agua de fuentes externas al Valle.

8. CONCLUSIONES

1. Cualquiera que sea el criterio con que se evalúe el abastecimiento de agua en el Valle de México, su condición actual resulta insostenible.
2. Para llevar el sistema hacia la sustentabilidad, en el presente artículo se proponen las siguientes acciones: a) ahorrar 12 m³/s de agua subterránea mediante reducción de las pérdidas de agua en la red de distribución desde su nivel actual de 20 m³/s hasta aproximadamente 8 m³/s; b) para usos agrícolas usar agua tratada en vez de agua de los acuíferos subterráneos, además de mejorar al menos moderadamente la eficiencia en el uso doméstico e industrial del líquido, a fin de ahorrar 12 m³/s adicionales de agua subterránea. Estas dos acciones llevarían a un ahorro de 24 m³/s, equivalentes a la sobreexplotación actual de los acuíferos profundos del Valle, lo que haría posible detener la subsidencia.
3. Las evidencias presentadas muestran que la solución propuesta es factible y que los costos inducidos por la subsidencia son mucho más altos que las inversiones necesarias para detenerla.
4. La información aquí reportada, resultante del estudio y registro durante casi un siglo de causas y efectos de la subsidencia del Valle de México, puede ser útil tanto para ingenieros civiles y ambientales como para diseñadores de políticas públicas, e incluso para los habitantes de numerosas áreas urbanas del mundo que sufren procesos de sobreexplotación del agua subterránea similares al del Valle de México.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a Rafael Carmona Paredes, Antonio Capella Vizcaíno y Guillermo Guerrero Villalobos por los valiosos comentarios, observaciones y sugerencias que aportaron tras leer el primer borrador de este artículo.

REFERENCIAS

Auvinet, G., Méndez, E. and Juárez, M. (2013). "Soil fracturing induced by land subsidence in Mexico City", Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, París

Brooks, H. (1992). "The concept of sustainable development and environmentally sound technology", Environmentally Sound Technology for Sustainable Development, ATAS Bulletin, issue 7, pp. 19-24, United Nations, New York

Calderhead AI, Martel R, Garfias J, Rivera A, Therrien N (2012). "Sustainable Management for minimizing land subsidence of an over-pumping volcanic aquifer system: tools for policy design". Water Resource Management 26: 1847-1864. doi: 10.1007/s11269-012-9990-7

Capella, A. (17 de marzo de 2015). Comunicación personal

Carrillo, N. (1948). "Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City", Proceedings, Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. VI, pp. 156-159, Rotterdam

Cruickshank, C., Herrera, I., Yates, R., Hennart, J.P., Balarezo, D., and Magaña, R. (1979). Informe de avance del Modelo de Predicción del Hundimiento del Valle de Mexico, iniciado en 1979, Instituto de Ingeniería, UNAM, México

Díaz del Castillo, B. (2013). Historia Verdadera de la Conquista de la Nueva España, Caps. LXXXVI a XCII, Editorial Porrúa, 702 pp, México

Ezcurra E, Mazari M (1996). "Are megacities viable? A cautionary tale from Mexico City". Environment 38(1): 6-35. doi: 10.1080/00139157.1996.9930972

Gayol, R. (Agosto1925). "Estudio de las perturbaciones que en el fondo del Valle de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo...", Primera parte, Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, Vol. III, No. 3, pp. 96-132, México, marzo 1925; Segunda parte, Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, vol. III, núm. 8, pp. 507-559, México

González, S. (marzo 13, 2015). "Se perforarán pozos a 2000 metros de profundidad para traer agua", La Jornada, México

Heffernan, O. (July 2014). "Bottoms Up", Scientific American, Vol. 311, No. 1, pp. 54-61, New York

Hernández-Espriú, A. et al. (septiembre 2014), "The Drastic–sg model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence with application to Mexico City", *Hydrogeology Journal*, Vol. 22, Issue 6, pp. 1469-1485

Kershner, I. (mayo 29, 2015). "Aided by the sea, Israel overcomes an old foe: drought", *The New York Times*, <http://nyt.ms/1eDfo2k>, 5 pp. Nueva York

Liemberger, R. and McKenzie, R. (2005). "Accuracy Limitations of the ILI: Is It an Appropriate Indicator for Developing Countries?" *Conference Proceedings, IWA Leakage Conference, Halifax, Nueva Escocia Escocia, Canadá*

Marsal, R. J. y Mazari, M. (1959). *El Subsuelo de la Ciudad de México*, vol. I, Fig. I-5. UNAM, México

Mazari M, Mackay DM (1993). "Potential for groundwater contamination in Mexico City". *Environ Sci Technol*, 27(5): 794-802. doi: 10.1021/es00042a002

Peck, R. B. (1969). "Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics", *Geotechnique*, Vol. 19, No. 2, pp. 171-187, Londres

Reséndiz, D. (1992) "Sustainability and the nature of development", *Environmentally Sound Technology for Sustainable Development, ATAS Bulletin, Issue 7*, pp. 13-18, United Nations, New York

Reséndiz, D. (1996). "Los métodos de la geotecnia", 13a Conferencia Nabor Carrillo, 2.1 Caso histórico 1: Pasos a desnivel sobre-compensados en la Ciudad de México, pp. 62-65, *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, pp. 102, México

Santoyo, E., Ovando, E. S., Mooser, F., y León, E. P. (2005). *Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México*, pp. 16-23, *TGC Geotecnia*, pp. 172, México

Siles G, Alcérreca-Huerta JC, López-Quiroz P, Hernández J (2015). "On the potential of time series InSAR for subsidence and ground rupture evaluation: application to Texcoco and Cuautitlan-Pachuca sub-basins, northern Valley of Mexico". *Natural Hazards*, 79: 1091-1110. doi: 10.1007/s11069-015-1894-4

SIMOH (Sistema para el Monitoreo de la Piezometría y de los Hundimientos del Valle de México (2015). *Instituto de Ingeniería, UNAM, México*

Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, Deuticke, pp. 399, Viena

The Institution of Civil Engineers (1996). *The Observational Method in Geotechnical Engineering*, Thomas Telford, Londres

World Commission on Environment and Development, United Nations Organization (1987), *Our Common Future*, 401 pp., Oxford University Press, Oxford

ANEXOS (FIGURAS)

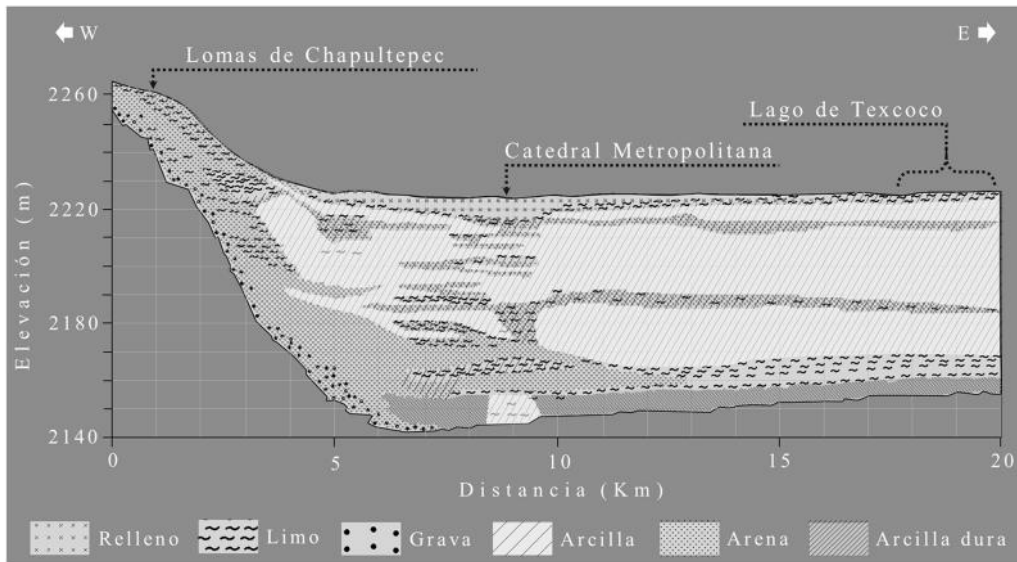


Fig 1 Corte estratigráfico E-W del subsuelo de la Ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959)

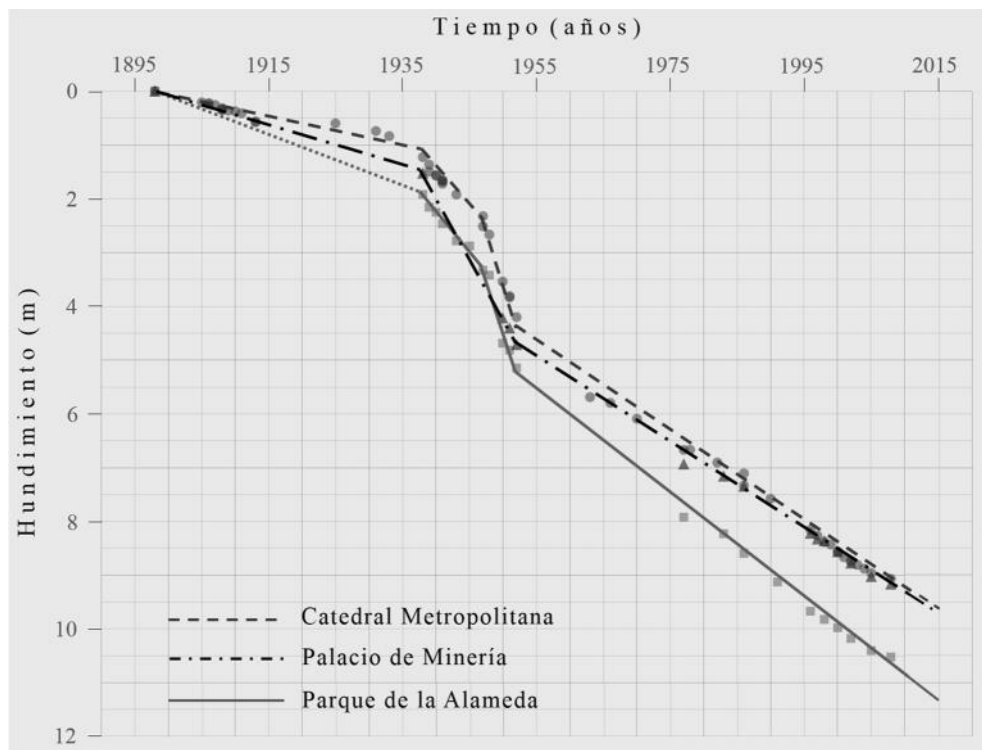
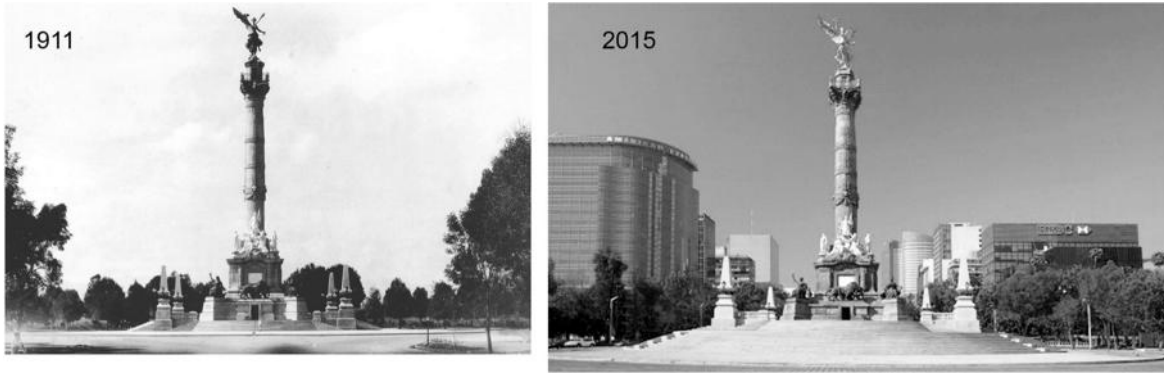
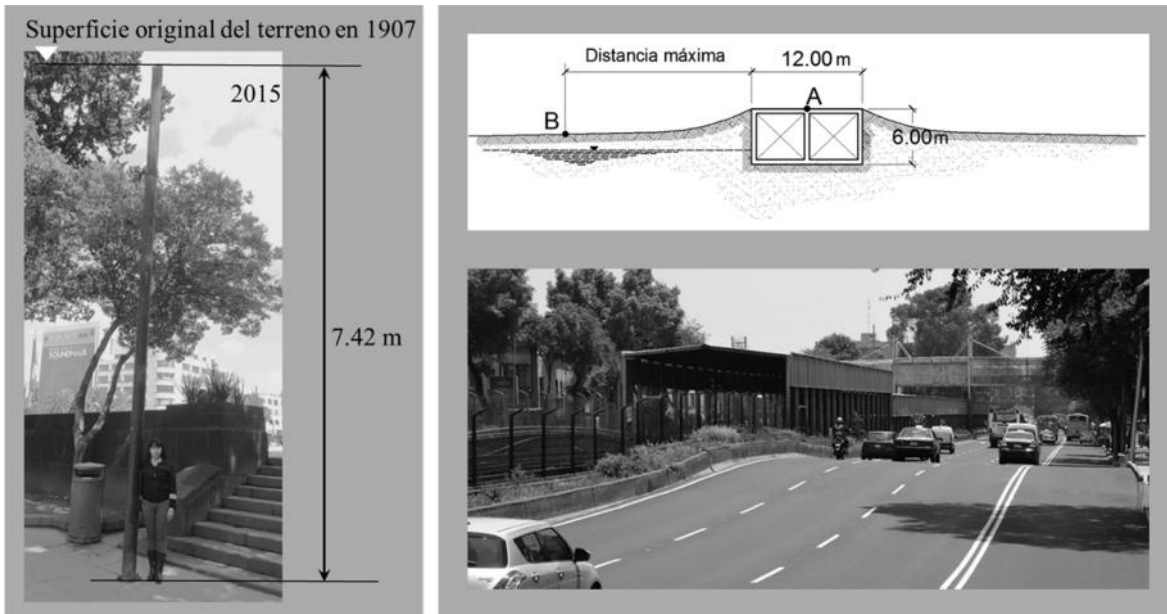


Fig 2 Evolución del hundimiento de la ciudad de México 1898-2015 (SIMOH, 2015)



(a)



(b)

(c)

Fig 3 Comportamiento de estructuras apoyadas sobre o insertas en subsuelo en proceso de consolidación: (a) cimentación sobre pilotes; (b) ademe de pozo antiguo; (c) cimentaciones sobre-compensadas



(a)



(b)

Fig 4 Agrietamiento vertical debido a elevados gradientes de asentamiento diferencial: (a) grieta típica con desplazamiento vertical; (b) principales zonas del Valle de México propensas al agrietamiento superficial (frangas blancas)

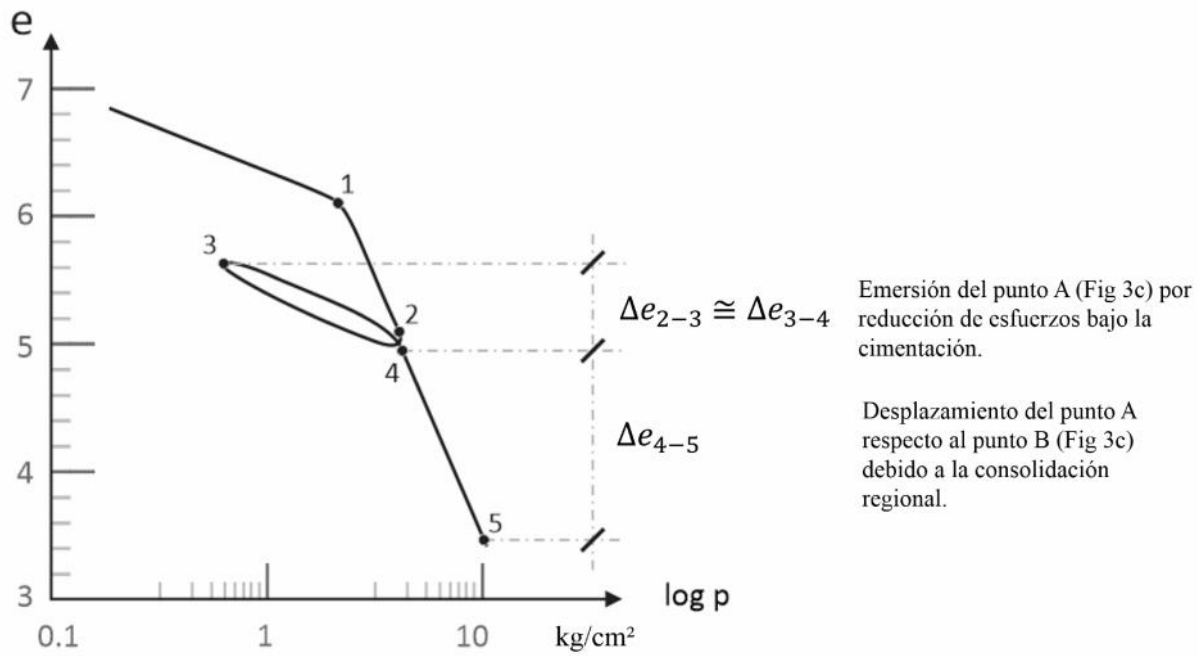


Fig 5 Curva de compresibilidad típica de la arcilla del Valle de México

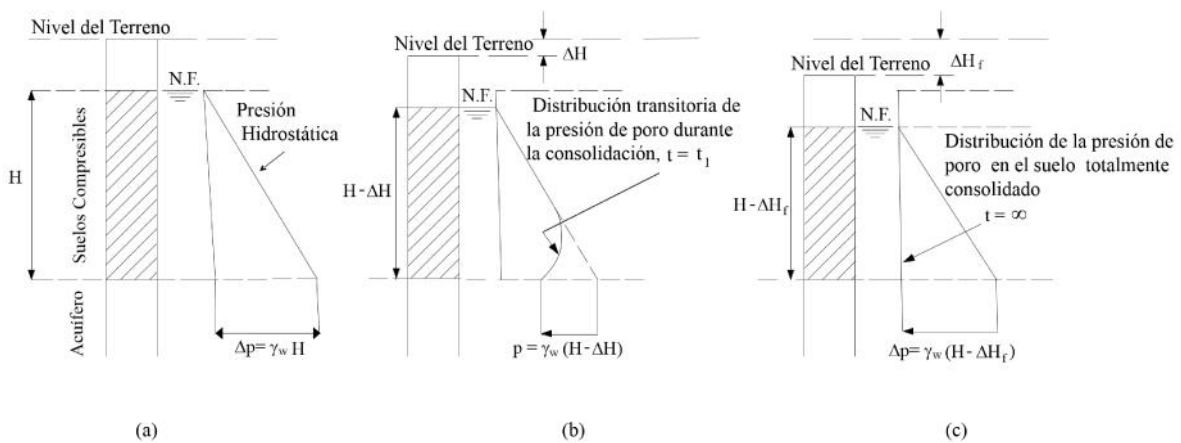


Fig 6 Distribución de presión de poro en el subsuelo: (a) condición hidrostática; (b) condición transitoria durante la consolidación; (c) suelo totalmente consolidado

Tabla 1 Balance entrada-salida del agua subterránea

Variable	Promedio anual aproximado (m ³ /s)
Extracción de agua subterránea	56
Recarga natural	23
Recarga procedente de la agricultura	9
Sobreexplotación del acuífero	$56 - 23 - 9 = 24$

La obra *Subsidencia de la ciudad de México: Proceso centenario que se vuelve insostenible* fue editada por el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM), en Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México. El cuidado de la edición estuvo a cargo de Israel Chávez Reséndiz, de la Unidad de Promoción y Comunicación del II UNAM. Esta obra está gratuitamente disponible para consulta e impresión, en archivo pdf de 1.4 MB, en la sección de Publicaciones del portal electrónico del IIUNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, desde que se terminó de editar en mayo de 2016.