

44
2ij



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**Construcción del Lago
Dr. Nabor Carrillo Flores**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a :

Gerardo Torres Guerrero

Escuela Nacional de Estudios Profesionales
ARAGON

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

San Juan de Aragón

Nezahualcoyotl, Edo. de Méx. 1992





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO.

Resumen.
Agradecimientos.
Introducción.

Capítulo 1. Antecedentes.

1.1 Formación y Desecación de la Cuenca de México.....
1.2 Objetivos.....
1.3 Alcances.....

Capítulo 2. Localización y Topografía.

2.1 Situación Geográfica del Valle de México.....
2.2 Localización del Área de Estudio.....
2.3 Situación Política.....
2.4 Hidrología.....
2.5 Topografía.....
2.6 Vegetación.....
2.7 Vías de Comunicación.....
2.8 Servicios Públicos.....

Capítulo 3. Climatología.

3.1 Generalidades.....
3.2 Clasificación Climática.....
3.3 Precipitación.....
3.4 Temperatura.....
3.5 Evaporación.....
3.6 Vientos.....
3.7 Heladas.....

Capítulo 4. Geología del Valle de México.

4.1 Extensión y Límites de la Cuenca de México.....
4.2 Cretácico.....
4.3 Mioceno.....
4.4 Plioceno.....
4.5 Cuaternario.....

Capítulo 5. Estratigrafía y Propiedades del Subsuelo.

5.1 Generalidades.....
5.2 Depósitos Lacustres.....
5.3 Características y Propiedades.....
5.4 Propiedades Índica.....
5.5 Propiedades Mecánicas.....
5.6 Propiedades Dinámicas.....

Capítulo 6. Construcción del Lago Dr. Nabor Carrillo.

- 6.1 Generalidades.....
- 6.2 Definición y Calibración del Modelo Matemático.....
- 6.3 Método Constructivo del Lago.....
- 6.4 Fallas e Irregularidades.....
- 6.5 Asentamientos y Grietas.....

Capítulo 7. Evolución y Comportamiento del Lago.

- 7.1 Comentarios.....
- 7.2 Instrumentación.....
- 7.3 Evolución Piezométrica.....
- 7.4 Hundimientos Superficiales.....
- 7.5 Enjutasamiento de las Formaciones Arcillosas.....
- 7.6 Desplazamientos Horizontales.....
- 7.7 Asentamientos Observados.....

Capítulo 8. Bordo Dr. Nabor Carrillo.

- 8.1 Diseño.....
- 8.2 Características del Subsuelo.....
- 8.3 Análisis de Asentamientos.....
- 8.4 Análisis de Estabilidad.....
- 8.5 Construcción.....
- 8.6 Red de Flujo.....

Capítulo 9. Comportamiento del Bordo.

- 9.1 Instalación de Secciones Instrumentadas.....
- 9.2 Asentamientos Registrados.....
- 9.3 Conclusiones.....

Capítulo 10. Balance Ecológico.

- 10.1 Comentarios.....
- 10.2 Recuperación del Ecosistema Regional.....

Capítulo 11. Conclusiones

Referencias

INTRODUCCION

En la época de la conquista de México (1521), las aguas del Lago de Texcoco se extendían por casi todo el Valle de la siguiente forma; por el Norte hasta Totolcingo y faldas australes del Cerro de Chiconautla; por el Poniente hasta cerca de San Cristóbal Ecatepec y faldas de la Sierra de Guadalupe, siguiendo sus bordes por Tultepec, Cerro Gordo, Sta. Clara Coatitla y San Pedro Malostoc, rodeaban el Carrizo del Tepeyac por su lado sur, siguiendo al pie de las alturas hasta cerca de Tlanepantla y llegaban mas al poniente aun, dejando a corta distancia a Atzacapotzalco y Tacuba, estando en sus bordes, Popotla y Chapultepec; seguían al pie de las Lomas de Tecubaya, Mixcoac y Pedregal de San Angel y se extendían luego a Coyacán y Lago de Xochimilco; por el Sur rodeaban completamente al Peñón Viejo y Cerro de la Estrella y ocupaban además todos los terrenos bajos y pantanosos de Atipac, Iztapalapa, Nexquipáyac, Atlenco y Tocuila; y por el Oriente los lomeríos de Texcoco y faldas del Cerro de Chimalhuacán.

Sin embargo, esta extensión empezó a decrecer años más tarde, y se pudo apreciar mejor la reducción paulatina del Lago de Texcoco en base a los siguientes datos: para 1861, según la Comisión de Aguas del Valle de México, la extensión superficial del Lago en su creciente ordinaria era de 272 170 000 metros cuadrados; para 1878, de acuerdo con levantamientos realizados por los ingenieros Velázquez y Aidasoro, se presentaba una extensión de 258 390 000 metros cuadrados; en tanto que para 1906, levantamientos llevados a cabo por la Comisión Hidrográfica revelaron, que solamente ocupaba un área de 75 440 000 metros cuadrados. En cuanto a la profundidad de las aguas, también se ha detectado una pérdida considerable: en el año de 1800 presentaba una profundidad de 5.0 m. posteriormente en 1850, existía una profundidad un poco mayor de 2.0 m y para 1950 solamente de 30 a 50 cm en la parte central del lago; esto únicamente en temporada de lluvias, pues durante los meses de noviembre a junio o julio, el fondo del lago estaba completamente seco y se podía atravesar por su centro a pie o a caballo. Esta delgada lámina de agua era presa fácil de la evaporación ejercida por la acción solar. Además, el lago seco resultaba una fuerte extensión de polvo. Para los vientos dominantes del noroeste y sur-sureste.

Al ocurrir la desecación del Lago de Texcoco, se inició el desequilibrio ecológico en el Valle de México, quedaron al descubierto grandes extensiones de suelo con altos contenidos de sales y sodio, situación que impedía el establecimiento natural de especies vegetales que cubrieran y protegieran los suelos contra la erosión eólica.

Esto propiciaba que durante el estiaje se generaran grandes tolvaneras, se depositaban en la ciudad de México y afectaban zonas aledañas, dañando seriamente la salud de sus habitantes. Los padecimientos más frecuentes eran: conjuntivitis, enfermedades gastrointestinales, laringitis, además de enfermedades Parasitarias ocasionadas por ingestión de alimentos contaminados con polvo cargado de quistes o esporas de parásitos, etc.. Por otro lado, ocasionaban pérdidas económicas al país por ausentismo en el trabajo por enfermedad, erogaciones públicas por concepto de servicios médicos, medicinas y limpieza de la ciudad, entre otros.

Debido a la importancia económica, social, política y cultural del Valle de México, ha existido un crecimiento desordenado del mismo por el gran número de inmigrantes que vienen del interior de la República, atraídos por la esperanza de obtener una vida mejor. Con ello se han fomentado grandes asentamientos irregulares en zonas que antiguamente formaban parte del Lago de Texcoco y otros lagos, con lo cual se agudizaron los problemas de inundaciones, por la carencia de drenaje en las áreas pobladas.

Con base en la problemática descrita, en 1971 se constituyó la Comisión de Estudios del Lago de Texcoco, con el objetivo fundamental de coadyuvar a la solución de tales conflictos.

Esta tesis ofrece una idea general de los logros alcanzados a partir de la aceptación del Proyecto Texcoco y de los cambios generados en la zona federal del lago, amén de la construcción del Lago Nabor Carrillo.

En el capítulo uno, se presenta a grosso modo, un perfil histórico de la desecación del Valle de México y la forma en que se ha llegado a la necesidad de traer agua del exterior del valle para consumo de sus habitantes, a pesar de contar con un gran lago, capaz de abastecer toda la zona oriente de la ciudad.

En los capítulos dos y tres, se describen respectivamente la localización y el clima del área de interés. Se especifica la situación geográfica de la zona del lago para su fácil ubicación dentro de los contextos nacional y mundial. Se concretiza además, en los meses de más frío y más calor, así como en los más lluviosos y más secos con el fin de que se tenga una idea clara de las características climatológicas de esta zona.

Considerando la importancia que tiene el desarrollo geológico del Valle de México, éste se presenta en forma general en el capítulo cuatro, desde el Cretácico en que se inicia la actividad tectónica, hasta el Cuaternario, cuando las efusiones volcánicas de esta era dar lugar a la formación de la Sierra del Chichinautzin.

Con lo anterior, el Valle de México se transforma en una cuenca cerrada y se ocasiona el relleno que caracteriza al subsuelo de la Ciudad de México actualmente.

En lo que se refiere a la importancia que tienen las propiedades índice y mecánicas del subsuelo en la zona de estudio, en el capítulo cinco se da una completa exposición de las mismas, con el objeto de tomar datos y utilizarlos para los fines que interesan en este trabajo. Se indica también un perfil estratigráfico donde se dan algunos datos de gran valor como la resistencia al corte, grado de humedad, límites líquido y plástico, etc.

En lo que respecta a los capítulos seis, siete, ocho y nueve, respectivamente, se reporta la historia de la formación del lago más importante del Proyecto Texcoco, el Lago Dr. Nabor Carrillo, así como del bordo perimetral que lo circunda. Se incluyen datos que muestran claramente, el alcance de esta magnífica obra y despiertan la curiosidad y el interés de los que se preocupan por hacer de México un lugar digno para vivir.

En el capítulo diez, se realiza un balance ecológico con el fin de que quede lo más claro posible el cúmulo de beneficios que el Proyecto Texcoco ha legado. Se pretende además, que otras instituciones o compañías, se interesen en proyectos similares tomando en cuenta el respeto que la naturaleza merece.

Por último, en el capítulo once se hacen algunos comentarios a manera de conclusión, esperando sirvan para que se valore en su totalidad el gran trabajo que ha desarrollado el Proyecto Lago de Texcoco.

Al final de esta tesis, se presenta una extensa bibliografía así como referencias para quienes deseen profundizar en algún tema que sea de su particular interés.

1. ANTECEDENTES

1.1 Formación y Desecación de la Cuenca de México

De acuerdo con investigaciones realizadas por Federico Mooser (1956), la Cuenca del Valle de México se formó después de una época de vulcanismo constante que se inició en el Terciario Medio posterior al Oligoceno.

A fines del Mioceno Superior se formaron las Sierras de Pachuca, Tepotzotlán, de Guadalupe, del Patlachique y del Tepozán, constituyendo el grupo de las Sierras Menores y delimitando el norte de la cuenca. Posteriormente, en el Plioceno Inferior, se crearon al este y al oeste de la misma, la Sierra de las Cruces y la Sierra Nevada, determinadas ambas como Sierras Mayores. Se puede notar que el sur del Valle quedaba libre de formaciones volcánicas, lo que facilitó el desague de los escurrimientos de las serranías hacia ese rumbo, a través de dos profundas canchales formadas en el Plioceno-Cuaternario; una pasaba por el lugar hoy ocupado por la ciudad de México y llegaba a Cuernavaca al oeste de la sierra del Tepozteco, la otra recorría el pie de la Sierra Nevada, atravesaba Chalco y Amecameca para alcanzar la cuenca del alto Anacuzac en Cuautla (fig. 1).

Sin embargo, en el Cuaternario Superior, la actividad tectónica abrió paso a las grandes masas de basaltos que construyeron la gran Sierra del Chichinautzin, cerraron el drenaje natural del Valle de México y lo convirtieron en una cuenca cerrada, la cual se transformó más tarde en un vaso natural aplozado, debido a que los ríos que descendían de las sierras se depositaban en el fondo de la cuenca (fig. 2).

A medida que se rellenaba la cuenca fueron apareciendo lagos, principalmente en las partes centrales bajas y en el sur. Finalmente en las épocas glaciales de los últimos 100 000 años, y por causas de las lluvias abundantes, pudieron formarse cuerpos de agua importantes que en algunas ocasiones se unían en un solo gran lago.

Los lagos preistocénicos y recientes se pueden dividir en dos grupos: a) El grupo de lagos formados en las partes bajas, que constituyeron vasos de evaporación, por ello fueron salobres, tal es el caso de los lagos Xaltocan y Texcoco; b) El grupo de lagos que se formaron al pie de la sierra del Chichinautzin, que fueron nutridos continuamente por manantiales y que se caracterizaron por ser de agua dulce.

Al paso del tiempo, dependiendo de las condiciones climáticas, húmedas o secas, glaciales o interglaciales, los lagos iban creciendo o reduciéndose, provocando con ello la desecación de ciertas áreas y permitiendo al mismo tiempo que la cuenca fuera poblada por el ser humano.

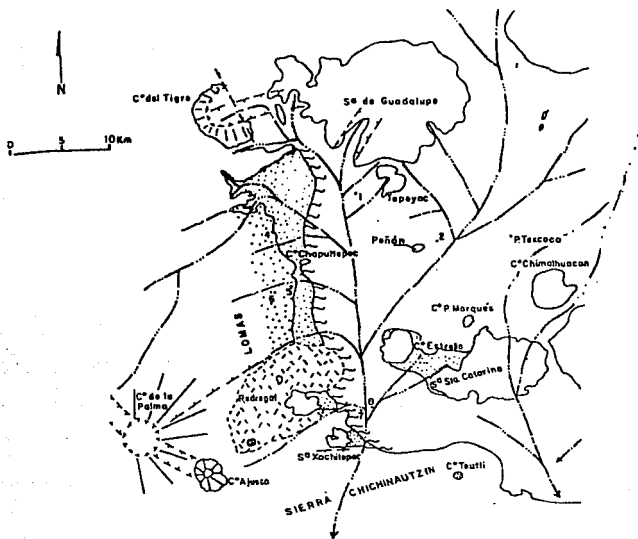


FIG. 1 DRENAJE PRE-CHICHINAUTZIN (Moser, 1976)

En la época prehispánica (siglo XV), la población del Valle de México sufre las consecuencias de haberse asentado en una zona baja. Las inundaciones que ocurren son continuas y permanentes ya que el Valle no cuenta con salidas naturales para el agua que se acumula en él cuando las lluvias son abundantes.

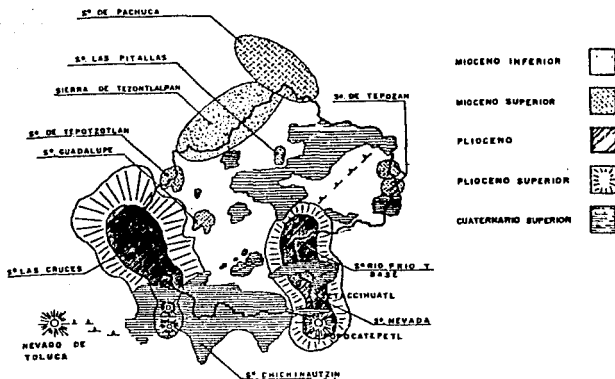


FIG. 2 TRANSFORMACION DEL VALLE DE MEXICO.
EN UNA CUENCA CERRADA R+I. 20'

A raíz de una inundación sucedida en 1449, el emperador Netzahuacoyotl mandó construir los diques de Tláhuac y Mexicaltzingo para protegerse de los lagos del sur, así como un dique de 16 in de longitud con compuertas que iba desde Atzacosico hasta Ixtapalapa, destruido más tarde por los españoles, dejando a la ciudad sin protección (fig. 2).

Años más tarde, en 1555, ocurre otra gran inundación, por lo cual el Virrey Luis de Velasco decide ordenar la construcción de otros diques, el Albarredón Nuevo de los Espaderos y el de San Cristóbal, para separar el lago de Xaltocan del de Texcoco. A pesar de esto, se presentaron dos nuevas inundaciones, una en 1604 y otra en 1607, obligando con ello a las autoridades a dar determinaciones más eficaces.

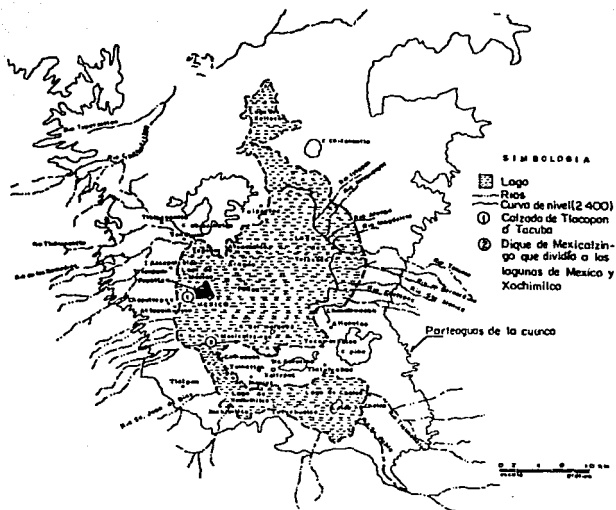


FIG. 3 DESARROLLO HIDROGRAFICO DE LA CUENCA DE MEXICO (Ref. 34)

Enrico Martínez proyectó el túnel de Nochistongo para drenar las aguas del río Cuautitlán hacia fuera del Valle por el lado norte. Los trabajos se realizaron entre 1807 y 1813 cometiéndose el error de dejar el túnel sin revestimiento, por lo que se suscitaron derrumbes que lo inutilizaron. En 1819, sucedió otra gran inundación que mantuvo anegada a la ciudad durante dos años. Se acordó entonces rehabilitar el túnel de Nochistongo convirtiéndolo en tajo abierto. Su construcción duró 150 años y se terminó en 1789.

Por el Gran Canal del Desagüe, el Túnel de Tequisquitac y el Tajo de Nochistongo se drenaron las aguas de la cuenca y poco a poco se fueron secando los lagos de Maltoacan, San Cristóbal y Chalco. El lago de Zumpango recibe parte de las aguas de los ríos Cuautitlán, Tepotzotlán y avenidas de Fachuca, mientras que el lago Xochimilco queda reducido a unos cuantos canales y zona de chinampas que son utilizadas con fines recreativos.

El lago de Texcoco continuaba siendo el vaso más grande, en él descargaban y se regulaban numerosas corrientes naturales y artificiales; las aguas eran extraídas por el Iren General del Valle, contabilizando un volumen medio anual desfogado de 161 millones de metros cúbicos. La diferencia entre las aportaciones y las extracciones era de 57 millones de metros cúbicos anuales, de los cuales se perdía la mayor parte por evaporación. Esto representaba un claro indicador de la cantidad de agua que se desaprovechaba por falta de un buen almacenamiento.

A todo lo anterior hay que agregar, que el crecimiento desordenado de la ciudad, el desarrollo urbano no planificado y el deterioro ecológico ocasionado por la mala educación de la población, han hecho que el panorama cambie completamente. De aquellos grandes lagos sólo queda la historia, y el área donde una vez estuvo el lago de Texcoco, para 1958 era ocupada solamente por ciénagas, terrenos baldíos y basureros, donde se generaban la mayor parte de las tormentas que afectaban ostensiblemente a los habitantes de la ciudad de México y zonas aledañas.

En 1964, el Dr. Nabor Carrillo, preocupado por estos problemas, elaboró una serie de posibles soluciones. Él sabía que era indispensable hacer algo para rescatar la zona del antiguo lago de Texcoco y propuso que se realizaran varios estudios geohidrológicos y de mecánica de suelos para poder iniciar los trabajos de recuperación. Finalmente, gracias a su gestión, el gobierno federal creó en 1965 un fideicomiso denominado Proyecto Texcoco, el cual comprendía un programa completo para lograr el restablecimiento de la zona federal del antiguo vaso de Texcoco.

1.2 Objetivos

1. El objetivo principal del Proyecto es crear un vaso de captación y de regularización de las aguas en el Valle de México, localizado dentro del antiguo lago de Texcoco. Se pretende que este vaso sea el fondo del valle y tenga un doble propósito: el de recoger las aguas que ahora se pierden por falta de un almacenamiento adecuado y el de resolver el peligro de las inundaciones de la Ciudad.

2. La formación del vaso puede lograrse por diferentes procedimientos aconsejados por la técnica. Todos ellos persiguen el objetivo de "exprimir" la esponja del subsuelo. Evidentemente el agua extraída del subsuelo tendrá substancias extrañas, por lo cual requerirá de un tratamiento para hacerla potable. Se pretende investigar la potabilización por medio de un reactor nuclear.

3. Los resultados de la investigación sobre los usos de reactores de doble propósito, electricidad y agua, sugieren la posibilidad de tratar las aguas salobres del subsuelo del lago de Texcoco, para proporcionar agua potable, energía eléctrica municipal e industrial a precios que puedan competir con los vigentes en la ciudad. Además existe la posibilidad, por explorar, de utilizar la salmuera resultante del proceso para fines industriales que coadyuven a la economía del Proyecto.

Una ventaja secundaria pero importante, sería la reducción considerable del problema de tolvaneras, ocasionado por la erosión en el lecho del antiguo lago de Texcoco. La reducción de la contaminación aérea y de caños en las instalaciones municipales, podría además significar un valioso subproducto.

4. Las aguas negras de la ciudad superan en 6 metros críticos por segundo a los compromisos existentes fuera del Valle. Estos excedentes podrían almacenarse y tratarse por métodos nucleares. La investigación respectiva es un aspecto importante del Proyecto Texcoco.

1.3 Alcances

Con el logro de estos objetivos se pretende alcanzar un "status" general de primera calidad, en el que los habitantes de la región y de la Ciudad de México, aprecien en su totalidad la importancia que tiene cuidar el medio ambiente que los rodea.

Para alcanzar las metas establecidas y en base a estudios realizados previamente, se tiene la intención de llevar a cabo la construcción de cuatro lagos: a) Lago de almacenamiento para riego e intercambio de aguas con la zona oriente del antiguo lago; b) Lago de aguas pluviales y negras tratadas para riego de la zona norte del Valle de México y el Mezquital; c) Lago para regularización de avenidas; y d) Lago de aguas saladas.

Además se construirán caminos de acceso y campamentos, tuberías para salmuera y plantas de rebombeo, se realizará también la construcción de pozos de agua potable capaces de suministrar un caudal de 4 m³/s y el acueducto correspondiente.

Se considera dentro del programa, la construcción de plantas de tratamiento de aguas negras con digestores de lodos, con una capacidad de 2 m³ y los canales necesarios para llevar las aguas negras tratadas a los sitios convenientes. Adicionalmente, es necesario hacer obras de encauzamiento y de control de erosión a los ríos del oriente, desarrollar el sistema para riego de fertilización en la zona de Texcoco, estudiar el intercambio de aguas, así como el aprovechamiento de los excedentes sobrantes en el caso de las zonas de Texcoco será necesario realizar obras de mejoramiento, consistentes en canales de desarrollo y zonas verdes y arboladas. Este tipo de obra, al facilitar el uso de las tierras sembradas, originará una gran plusvalía en ellas (Fig. 5).

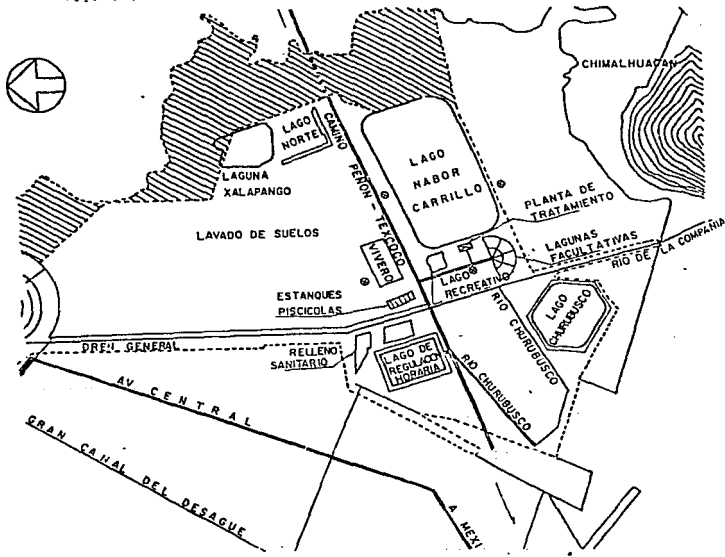


FIG. 5 OBRAS DEL PROYECTO TEXCOCO

2. LOCALIZACION Y TOPOGRAFIA

2.1 Situación Geográfica del Valle

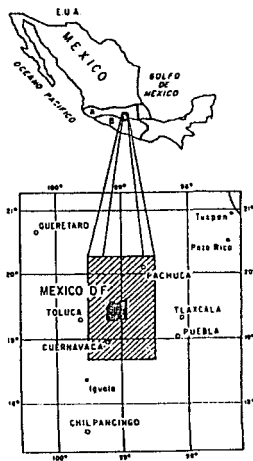


FIG. 6 LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO (De Gónz., et al. 1981)

2.2 Localización del Área de estudio

La zona federal del lago de Texcoco se encuentra situada en el centro de la faja volcánica que atraviesa la República Mexicana, en una planicie cuya altitud promedio es de 2236 m.s.n.m. y queda comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas; $19^{\circ}22'$ y $19^{\circ}37'$ de altitud norte y de $98^{\circ}53'$ a 99° de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Abarca una superficie de 170 km^2 (fig. 7).

La cuenca del Valle de México se encuentra situada en el borde sur de la Mesa Central, a $19^{\circ}26'$ de latitud norte y $99^{\circ}08'$ de longitud al oeste de Greenwich. Tiene una superficie total de 5000 km^2 (fig. 6).

La cuenca está limitada al norte, por las sierras de Tepozotlán, Tezontlalpan y Pachuca; al este, por la serranía de Pachuca y las sierras de Calpulalpan, Río Frio y Nevada; al sur, por la sierra de Chichinautzin y al poniente por la sierra del Ajusco, las Cruces, Monte Alto y Monte Basco. Además de las sierras citadas se encuentran en el interior, las de Guadalupe y Sta. Catarina, la primera está situada al norte de la ciudad de México y separa las zonas lacustres de Texcoco y Zumpango, la segunda formada por una serie de colinas de mediana altura, se localiza entre el valle de Xochimilco, Chalco y el lago de Texcoco. El valle de México tiene 54% de terrenos planos y 46% de áreas cerriles.

2.3 Situación Política

La zona del antiguo lago de Texcoco, esta ubicada al noreste de la Ciudad de México y el área de estudio es la parte no invadida por construcciones urbanas. Comprende parcialmente a los municipios de Texcoco, Atenco, Netzahualcóyotl y Churubusco del Estado de México.

Sobre una superficie aproximada de 14 500 Ha y está limitada al sur, por el bordo de la presa de ciudad Netzahualcóyotl y los poblados de Chimalhuacán; al oeste, por el Dren General del Valle tramo canal de sales y al bordo poniente colindando con ciudad Azteca 3a. sección; al este, por los poblados de Santiago Cuautitlán, San Bernardino, Boyeros, San Felipe, Santa Cruz de Atoyac, San Andrés Riva Palacio, San Miguel Ixcuila, La Magdalena, Atenco, Nexquipayac e Ixtapan; y al norte, por el tanque de evaporación solar de la compañía Sosa Texcoco y por los ejidos de Tepexpan y Santa María Chiconautla.

2.4 Hidrología

El lago de Texcoco funciona como vaso regulador de las corrientes de los ríos de la zona federal, y es alimentado por los siguientes afluentes: al noreste, por los ríos San Juan Tectitahuacán, Papalotla, Xalapango y Coacacoaco; al oriente, por los ríos Texcoco, Chapango, San Bernardino y Santa Mónica; y al sureste, por los ríos Coatepec, San Francisco y de la Compañía (fig. 5).

En el periodo que abarca de 1965 a 1969 el lago ha recibido 218 millones de m³ de aportaciones medias anuales de todas las corrientes antes mencionadas.

Por el sur, el río Churubusco aporta gran cantidad de aguas negras y pluviales de la Ciudad de México. También son desfogadas al lago las aguas negras de ciudad Netzahualcóyotl por medio de varias plantas de bombeo.

Originalmente el lago ocupaba la parte más baja del valle, constituyendo el receptáculo natural de las excedencias de los otros lagos. Sin embargo, para 1969, con el hundimiento de la ciudad de México, el fondo del lago quedó hasta tres metros arriba de esta. No obstante lo anterior, el lago de Texcoco continuaba dando servicio como vaso regulador de corrientes naturales y artificiales, por ello, antes de comenzar la temporada de lluvias, se procuraba tenerlo en los niveles más bajos posibles, como previsión para almacenar las afluencias extraordinarias de agua y después eliminarlas y regularlas, por el Canal del Desagüe, desaprovechando un caudal bastante considerable.

2.5 Topografía

En términos generales la topografía del arriazo es predominantemente plana, con pendientes menores al 1%. Las zonas alrededor del vaso se sitúan a una altitud de 1240 m.s.n.m., como es el caso del municipio de Netzahuatlcoyotl al poniente, San Isidro Atlahuatlco al norte, San Salvador Atenco y Toluca al oriente, y hacia el sur al estado de Chiamahuacán.

Las cadenas montañosas que rodean al Vaso de Texcoco, alcanzan alturas hasta de 2600 m.s.n.m., como la sierra de Río Hondo al este, la Sierra de Pacruca al norte, el Cerro de Chimalhuacán, Sierra Sta. Catarina al sur, así como la Sierra de Acochitlan al oeste.

2.6 Vegetación

La vegetación que actualmente cubre los alrededores de la zona, es el resultado de la presencia de varias especies nativas que han sido alteradas hace millones de años.

En la parte baja y plana, se encuentran generalmente cultivos para ensilaje bajo riego, maíz y frijol en las áreas sin riego.

En la zona de lomeríos entre los 2300 y 2800 m.s.n.m., se presenta en forma dominante un pastizal sin composición florística constante, en el cual se denota una fuerte perturbación humana, donde predominan las gramíneas anuales.

Generalmente conviven en esta comunidad árboles espaciados de pirul y a veces algunos arbustos; en las partes altas de la zona se encuentran dos comunidades de bosque, la de enebro, que es una comunidad abierta de 3 a 6 m de alto, siempre verde y la comunidad de pinarés que generalmente se encuentra entre los 2350 y los 4000 m de altura.

Al centro del ex-vaso, la vegetación se encuentra compuesta por pastizales halófitos inducidos y naturales (*Distichlis spicata* y *Suaeda nigra*). Grandes áreas sin cobertura vegetal, con algunas zonas de inundación permanente y otras de régimen estacional de mayor magnitud, complementan el paisaje.

En las zonas cubiertas con aguas altamente salinas, se desarrolla con facilidad la *spirulina*, alga que posee el más alto contenido de proteínas asimilables conocido (70% aprox.).

Desde el punto de vista agrícola, los suelos del arriazo se clasifican como salino-sódicos y en ellos casi únicamente se desarrollan las especies mencionadas.

En la parte oriental existe la zona agropecuaria de Texcoco donde se cultivan forrajes y hortalizas y se explota el ganado vacuno, porcícola y avícola principalmente. Los suelos de mejor calidad para la agricultura se encuentran entre el pueblo de Los Reyes y Texcoco.

2.7 Vías de Comunicación

En la zona existe el camino Peñon- Texcoco, que comunica a la Ciudad de México con la Ciudad de Texcoco de Mora, que es transitable todo el año. Asimismo, también se cuenta con una amplia red de caminos secundarios, algunos transitables únicamente en época de secas.

La periferia cuenta con carreteras asfaltadas de primer orden, destacando la de México-Lechería que consta de cuatro carriles que comunica a los poblados de Ciudad Netzahualcóyotl, Los Reyes, Chimalhuacán, Chicoloapan, Cuautlalpan, Coatlinchan, San Bernardino, Chapingo, Texcoco, Atenco, Ixtapan, Totolcingo, etc.

También existe la vía de ferrocarril México-Puebla ubicada al sur de la zona, que pasa por los poblados Los Reyes, Chimalhuacán, Chapingo, Texcoco, San Lorenzo, San Martín Texmelucan y Puebla.

2.8 Servicios Públicos

En la zona periférica y con relación a centros educativos, todos los pueblos tienen escuela primaria hasta el sexto grado; la ciudad de Texcoco cuenta con preparatoria y normal de maestros de primaria; Chimalhuacán con secundaria y escuelas de enseñanza técnica; Chapingo con la Universidad Autónoma de Chapingo y Netzahualcóyotl con tres escuelas de nivel profesional.

La mayor parte de las poblaciones aledañas a la zona cuenta con agua potable y sólo siete con drenaje. En relación a atención médica, en la zona existen tres Centros de Salud y trece localidades tienen servicios médicos particulares. El servicio de correo existe en catorce localidades; tres tienen telégrafo; nueve disponen de teléfono y todas cuentan con servicio de energía eléctrica, de transporte, y de campos deportivos. tres cuentan con servicio de mercados.

3. CLIMATOLOGIA

3.1 Generalidades

La precipitación, la evaporación y la infiltración son funciones que tuvieron influencia directa sobre los lagos del Valle de México, los cuales ocuparon un área aproximada de 600 km². Su funcionamiento hidráulico dependía de la intensidad y distribución de las lluvias, que provocaba la descarga de norte a sur, de los lagos de Zumpango y Xaltocan al lago de Texcoco. Por la mayor precipitación al sur de la cuenca el lago de Xochimilco-Chalco también descargaba sus aguas hacia Texcoco, donde la evaporación concentró las sales que lo distinguen.

De acuerdo con datos existentes del periodo de lluvias de 1920 a 1964, la precipitación media anual en la cuenca fue de 700 mm. Las zonas de mayor precipitación, superior a 800 mm anuales se localizan al suroeste, sur y sureste del valle, mientras que en las zonas norte y noreste, donde el terreno es casi plano, sólo se producen lluvias variables de 400 a 500 mm por año. La temperatura media en la planicie varía de 15°C a 16°C, disminuyendo en las partes altas de las sierras del Ajusco, Chichinautzin y Nevada, a valores comprendidos entre 7 y 12°C.

La evaporación potencial oscila entre 900 y 2300 mm por año, notablemente superior a la precipitación pluvial. La velocidad media de los vientos, es aproximadamente de 10 km/h y las direcciones dominantes son NE y NW. Las llamadas tolvaneras o tormentas de polvo que ocurren en el valle proceden principalmente de los terrenos desecados en los lagos de Texcoco, Chalco y Tlahuac. Por los datos disponibles del periodo de 1923 a 1958, se observa que el promedio anual de tolvaneras es de 68, de las cuales 29 tienen duración mayor de tres horas; los meses de marzo, febrero y abril en orden decreciente son los de mayor incidencia. Las tolvaneras más frecuentes provienen del NE y ENE, siendo la región del antiguo vaso de Texcoco la principal fuente de polvo, y las zonas central, norte y oriental de la ciudad de México las más afectadas.

3.2 Clasificación Climática

De acuerdo con el segundo sistema de Thornthwaite, el clima de la región se clasifica como semiseco con pequeña o nula demasia de agua, templado frío con baja concentración térmica en el verano. El periodo de lluvias se presenta de mayo a octubre y la estación seca de fines de octubre hasta fines de abril. En general la precipitación se distribuye de manera irregular y en forma torrencial, siendo julio el mes más lluvioso, y febrero el de mínima precipitación (fig. 9).

Estación: Campamento C.L.T.

- P = Precipitación
- EP = Evapotranspiración
- S = Demasías de humedad.
- d = Deficiencias de humedad.
- HA = Humedad aprovechable.
- AHA = Aprovechamiento de HA.

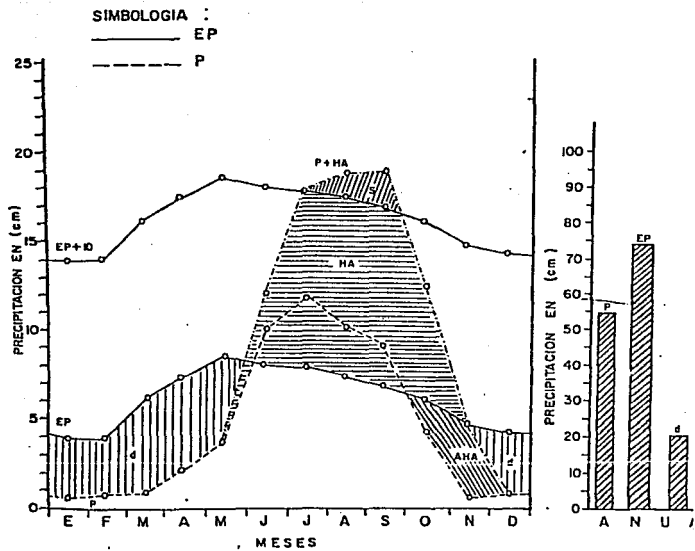


FIG. 9 CLIMOGAMA PARA EL AREA DE ESTUDIO Ref. 10

Según el sistema de Koeppen, modificado por Enriquez García, la zona presenta un clima semiseco, con verano fresco (temperatura del mes más caliente inferior a 18°C) y lluvioso, y un invierno seco con un total de lluvia menor del 5% del total anual.

3.3 Precipitación

La SRH (1971), define un periodo de lluvias de seis meses que comprende de mayo a octubre y un periodo seco de noviembre a abril. Entre ambos periodos, el volumen de agua precipitada llega a alcanzar 603.5 mm que en términos de porcentaje se distribuye en un 87.8% para el periodo lluvioso y 12.2% para el periodo seco.

En general la precipitación se presenta de manera regular y de tipo torrencial, siendo julio el mes más lluvioso y febrero el de mínima precipitación. El dato promedio para 14 años registrados en la estación ubicada en el campamento de la SARH, del centro del Lago, de 1967 a 1980 se presenta en el cuadro 1.

3.4 Temperatura

La temperatura media anual es de 15.3 °C, teniendo una variación de 6.4 °C, la media más baja se registra el mes de enero, con 11.6 °C y la media más alta en el mes de junio con 18 °C. De manera general, las temperaturas medias más altas y más bajas coinciden con las precipitaciones medias más altas y más bajas respectivamente.

Las temperaturas mínimas extremas tienen una variación de 18° C, siendo la más baja en el mes de enero con -10°C y la más alta en el mes de julio con 8°C. Las temperaturas máximas extremas más altas se presentan en los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio, teniendo una variación de 8°C, ya que la más alta se presenta en el mes de abril con 36°C y la más baja en el mes de diciembre con 28°C.

Con relación a los datos tomados de la estación climatológica del campamento del centro del lago de Texcoco, se presentan los promedios resultantes del periodo de 1967 a 1980, en el cuadro 1.

3.5 Evaporación Potencial

Tomando en cuenta las altas temperaturas que se presentan en la zona federal del lago, además de la intensidad, frecuencia y duración de los vientos que favorecen la evaporación, podemos ver que en un lapso de 14 años, hay valores registrados en el centro del lago hasta de 2251 mm con un promedio general de 1812 mm al año.

Año	Temperatura al abrigo (°C)	Húmeda	Temperatura ambiental (°C)	Precipitación (m)	Evaporación (m)	Horas de insolación
-----	----------------------------	--------	----------------------------	-------------------	-----------------	---------------------

1967	23.8	8.7	11.7	507.0	1436.4	1990.0
1968	22.8	7.1	10.6	654.0	2052.0	2709.0
1969	24.4	8.7	24.2	444.0	2251.5	2735.7
1970	23.4	7.1	13.1	466.2	2098.8	2568.5
1971	22.1	7.6	11.1	638.1	2031.6	-
1972	22.8	8.9	10.3	483.6	1224.5	2659.5
1973	23.7	8.1	10.4	1065.0	1842.9	2635.3
1974	24.1	6.9	9.8	498.0	1899.6	2544.7
1975	24.9	7.4	9.7	508.2	1979.4	-
1976	23.5	7.6	9.8	671.4	1858.5	2423.0
1977	24.6	7.6	10.5	513.0	1634.4	2517.8
1978	24.2	8.0	10.6	584.3	1695.0	-
1979	25.1	6.8	10.4	579.0	1853.1	2555.0
1980	25.4	7.0	10.9	483.0	1510.5	2520.8
Promedio General	23.9	7.7	10.9	578.2	1812.0	2332.6

Fuente: Briseño de la Hza y Dirección. (1981). Departamento de Investigación Agropecuaria del Programa Ganadero de la Comisión del Lago de Texcoco, Elaborado con datos de la estación meteorológica del Programa Ganadero. Campamento Central del Lago de Texcoco.

Cuadro 1.
 Muestreo de las condiciones climáticas en el Campamento Central del Lago de Texcoco, 1967-1980.

De acuerdo con los datos que se presentan en el cuadro 1, en un periodo de 14 años, la cantidad de agua evaporada es tres veces mayor que el volumen de agua que se precipita en la zona federal del ex-lago de Texcoco, lo cual provoca de manera directa una alta concentración de sales en la superficie del suelo, ya que con tales niveles de evaporación, no sólo se depositaron sobre la superficie aquellas sales en solución acarreadas por los escurrimientos, sino que al desecarse la superficie, se produce un ascenso del agua que se encuentra en el manto freático superficial, misma que también acarrea en su ascenso por capilaridad las sales que contiene en solución, incrementándose de esta manera la salinidad en la superficie del suelo.

3.6 Vientos

La SARH (1961), menciona que los vientos presentes en la zona son de tres tipos: Vientos de altura, Vientos rasantes y Vientos convectivos.

Los vientos de altura son los del poniente, que provienen del Ajusco a una altura aproximada de 3000 m.s.n.m. (760 m sobre el terreno de la zona del lago).

Los vientos rasantes son los del NE, SSE, N y NW. Los del NE son vientos polares que entran al ex-lago de Texcoco y salen por Amecameca, algunas veces toman la dirección de Tlanepantla y se dirigen rumbo al Valle de Toluca. Los vientos del SSE provienen del antiguo Lago de Chalco. Los vientos del N provienen de las montañas y son vientos fríos que corren de norte a sur durante la noche y los vientos del NW provienen de Fachuca.

Los vientos convectivos se producen durante las horas más calientes del día, debido a que el intenso calentamiento del aire superficial origina movimientos convectivos de masas de aire, provocando grandes remolinos.

3.7 Heladas

En la zona se presentan heladas de noviembre a abril, y en ocasiones hay heladas tardías que causan serios daños a los cultivos agrícolas que circundan el ex-lago de Texcoco.

4. GEOLOGIA DEL VALLE DE MEXICO

4.1 Extensión y Límites de la Cuenca de México

La cuenca de México forma parte de la provincia geotectónica de gran riesgo sísmico, conocida como Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), el cual bisecta a la República Mexicana en su porción meridional, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México (fig. 10).

El CVT, tiene una extensión aproximada de 920 km, desde Bahía de Banderas en el Estado de Jalisco, hasta Punta Delgada en el Estado de Veracruz. La zona de influencia norte-sur del CVT es variable en su porción central; desde la ciudad de San Luis Potosí, al norte, hasta el poblado de Chaucingo en el Estado de Morelos, al sur, son alrededor de 400 km; siendo de aproximadamente 100 km hacia el Golfo de México, entre el poblado de Teziutlán, Puebla, al norte, y la ciudad de Orizaba, al sur, en el Estado de Veracruz.



FIG. 10. MÁXIMA EXTENSIÓN DE LA FAJA VOLCÁNICA (Mecser, 1978)

La cuenca de México, comprende una superficie aproximada de 9600 km² y la limitan al norte, las cuencas del Río Tula y de la Laguna de Metztlán; al sur, la del Río Amacuzac; al oriente, las cuencas de los Ríos Tecolutla, Atoyac y Mixteco; y al poniente, la cuenca alta del Río Lerma.

Tiene un contorno irregular de forma alargada, cuyo eje mayor está orientado NE-SW con una extensión aproximada de 140 km, desde la sierra de las Cruces al suroeste, hasta la sierra de Fachuca al noreste, atravesando el lago de Texcoco. La zona más angosta comprende la porción meridional de la región, desde la sierra Tezontlalpan al noroeste, hasta el cerro Tláloc al sureste, su longitud es de 65 km más o menos.

De sus 9600 km² de superficie, la cuenca de México comprende aproximadamente; 4800 km² de la porción oriental del Estado de México; 2540 km² del sur de Hidalgo, 843 y 100 km² de los sectores orientales de los Estados de Tlaxcala y Puebla respectivamente, y 1320 km² del Distrito Federal.

4.2 Cretácico

Schlaepfer (1968) y Mosser (1975) han logrado establecer la secuencia estratigráfica en diferentes sectores de la Iverca, basados en información y criterios actuales obtenidos de tres pozos profundos. En estos cinco los perforados: Petróleo Veracruz (Tancitaro) a 2025 m; Copalco a 2293 m; Tulyehualco a 2100 m; Minahuacán a 2452 m y Arzac a 2100 m. Los otros ocho pozos estuvieron a cargo del Distrito Federal: Avenida Cien Mártires a 2200 m; San Juan de Aragón a 2132 m; Tláhuac a 2211 m; Pto. San Joaquín a 2247 m; La Costanera-S a 2217 m; Avenida Interamericana a 2251 m; Coapa I a 2232 m y Coapa II a 2212 m. Por los resultados de estos pozos, fue posible determinar la complejidad de la columna estratigráfica, estructural y litológica, la diversidad en la textura, composición y ubicación de los sedimentos, es consecuencia de las variadas formas en que éstos fueron transportados (fig. 11).

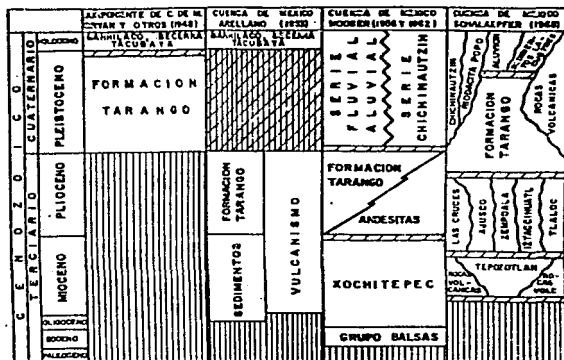


FIG. 11. TABLA DE CORRELACION ESTRATIGRAFICA GENERALIZADA
(Ref. 32)

Las rocas marinas del Cretácico, son la base de la secuencia volcánica y sedimentaria continental del Terciario y del Cuaternario en la cuenca de México.

En el pozo Mihuca-1, fue encontrado el tramo de calizas arcillosas del Cretácico Superior de la Formación Morelos a una profundidad de 1550 m. En el Tulyehualco-1 a 2100 m, las calizas no son arcillosas y son del Cretácico Medio de la Formación Cuautla, lo que denota el estilo de deformación y de fallamiento en bloques que conforman el basamento de la cuenca.

Entre las rocas del Cretácico y las del Terciario, existe una gran discordancia, puesto que no hay evidencias de rocas del Paleoceno hasta el Eoceno Medio. La discordancia está representada por los Grupos Morro y Balsas del Eoceno Superior y del Oligoceno. El Grupo Balsas aflora en la porción sur de la cuenca y el Morro al norte de la misma, cerca de Amajac, Hidalgo. En la cuenca, el Pozo Texcoco-1 cortó una sección de 55 m de conglomerados del Morro a una profundidad de 1950 m, estos sedimentos terrígenos están asociados con evaporitas y arcillas, lo que indica la presencia de depresiones locales eodorrénicas, producto del fallamiento en bloques distensivos de la secuencia calcárea cretácica, durante el Eoceno Tardío.

4.3 Mioceno

De acuerdo con Mooser (1975), Aguayo y Marin (1987), durante el Mioceno Inferior y Medio, en la cuenca hubo reactivaciones tectónicas, con el consecuente fracturamiento y fallamiento de la misma. Los sistemas estructurales son conjugados SW-NE y SE-NW, probablemente generados por los esfuerzos compresivos de la Placa de Cocos. El fracturamiento SW-NE, está representado por la falla Apan-Tláloc que incide en el extremo sur del Tepoztlaco. El otro sistema estructural, SE-NW, corresponde a los alineamientos Popocatepetl-Cerro de los Ritos-Cerro de Chimalhuacán y Sierra de Guadalupe.

El desarrollo de fallas y fracturas está asociado con actividad volcánica de diversa composición, desde andesitas y riodacitas hasta andesitas básicas y dacitas. A este complejo volcánico se le denominó Formación Nochitepec, que aflora en la sierra del mismo nombre al noreste del poblado de Nochimilco. Apparentemente la formación está muy extendida en el interior de la cuenca. Durante el Mioceno Tardío la secuencia anteriormente descrita, estuvo sujeta a procesos fluviales, derivándose los conglomerados de la Formación Tepoztlán, su local tipo se encuentra en el poblado del mismo nombre en el estado de Morelos. En este tiempo también hubo actividad volcánica, la que se manifiesta en las sierras de Guadalupe, Tepoztlán y Tepozán. La secuencia volcánica está compuesta por andesitas y dacitas, y fue denominada por Mooser (1975), como Grupo de las Sierras Menores.

4.4 Plioceno

En el Plioceno, hubo nuevamente una fuerte actividad tectónica que ocasionó la formación de sistemas de fallas y fracturamientos conjugados SE-NW y SW-NE. El primer fracturamiento incide en la Sierra de Salazar, mientras que el segundo afecta a la Sierra las Palmas en el poniente de la cuenca, lo cual es visible en la Barranca de Contreras. La actividad volcánica se manifestó en toda la cuenca con la emisión de andesitas y dacitas porfíricas en las Sierras Nevada y Rio Frio, al oriente / en las Sierras de las Cruces y Zempoala, al poniente de la misma, denominadas por Mober (1975) como Grupo de las Sierras Mayores.

Al pie de las sierras que circundan a la cuenca de México se depositaron abanicos aluviales y lahares, intercalados con capas de cenizas, cenizas, suelos, gravas y arenas de origen fluvial; a todo este complejo volcano-sedimentario, se le conoce como Formación Tarango (Sánchez-Biaz, 1989) cuya localidad tipo está al sur-poniente de la Ciudad de México. Hacia el mismo rumbo, se detecta que la Formación Tarango se encuentra cubierta por lavas del Grupo Chichinautzin, pertenecientes a los derrames del tipo en la zona del Fedregal de San Angel. En la porción occidental de la cuenca, la Formación Tarango está al pie de la Sierra de las Cruces, desde la región norte de Cuajimalpa hasta la parte occidental de San Pedro Atlapulco, al sur de la Marquesa, Mex.

Hacia el centro y norte de la Cuenca de México, son comunes los suelos tobáceos y pumíticos en la región de Tequiquiac, Nochistongo y Tula. Además, existen también tobas lácteas centoníticas, denominadas como serie Nochistongo y Requena.

4.5 Cuaternario

Durante el Plioceno Tardío y el Cuaternario Temprano, nuevamente se desarrolló una fuerte actividad tectónica, en la que los sistemas oeste-este fueron dominantes en la zona de la Malinche, al norte de Puebla y en el Nevado de Toluca. Los nuevos sistemas estructurales, tuvieron flexiones con dirección oeste-suroeste y este-noreste. Uno de estos sistemas está representado por la Sierra del Huasco, así como por los pequeños conos aislados que conforman la Sierra de Santa Catarina y la Sierra del Chichinautzin que contiene abundantes materiales volcánicos de tezontle.

La actividad tectónica dio origen a efusiones de andesitas y sucesivamente, andesitas basálticas. En el Cuaternario Tardío, los basaltos fueron tan abundantes, que se acumularon más de 1000 m³ de rocas volcánicas, formando con ellas la Sierra del Chichinautzin y creándose la cuenca endorréica de México.

Del Cuaternario Tardío al Reciente, los valles se cerraron, entre el Popocatepetl al este, la Sierra de Zempoala al sur, y las cabeceras del sistema hidrográfico al norte. Por esta causa la cuenca se fue azolvando rápidamente por un aporte considerable de abanicos filitales en forma de abanicos de deyección, formados por los ríos, Hondo, Malcoac, Contreras y por otros ríos sepultados por las lavas del Ajusco.

Hacia el norte de la cuenca, el río de las avenidas de Pachuca, el Cuautitlán, el Teotihuacán y el de la Compañía, también formaron conos de deyección. Hacia el centro, los sedimentos limo-arenosos se estratificaron con cenizas volcánicas y pómez provenientes de las erupciones volcánicas de la Sierra Ajusco-Chichinautzin. Con esto se fue creando el relleno lacustre de la cuenca de México, el cual varía desde unos cuantos centímetros en el perímetro de la cuenca, hasta 100 o 200 en el lago Xochimilco-Chalco y en el de Texcoco, respectivamente.

Los esfuerzos distensivos que afectan a la cuenca, han creado tres sectores de la misma que son catalogados de alto riesgo sísmico, por que inciden en zonas que tienen un espesor considerable de sedimentos lacustres. Los dos primeros sectores están dentro del área metropolitana y conforman un graben afectando a las colonias: Nápoles, Del Valle, Narvarte y Roma-Centro y cuya prolongación hacia el noreste incide en el eje distensivo NW-SE, en el Lago de Texcoco hasta el poblado de Singuilucan, Hgo. El otro sector corresponde a la zona de Chalco-Xochimilco con un espesor de sedimentos lacustres de cerca de 500 metros. El tercer sector, es otro graben que incluye a Zumpango, Tizayuca y Pachuquilla, y que por tener una densidad de población baja, se han detectado índices bajos de riesgo sísmico.

La situación actual de la provincia geológica en general, y del subsuelo de la ciudad de México en particular, es consecuencia de una intensa actividad antropogénica desordenada, que ha sobre-explotado en forma irracional, las aguas de los acuíferos subterráneos, sobre todo a partir del siglo XIX, al grado tal de agotar los manantiales, cambiar la calidad del agua del subsuelo, y no menos importante, causar hundimientos diferenciales permanentes del subsuelo en el área metropolitana.

5. ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO

5.1 Generalidades

Según sondeos realizados previamente a la construcción del Lago Dr. Nabor Carrillo, la estratigrafía y las propiedades del subsuelo en la zona federal del lago son muy semejantes a las de la Ciudad de México.

Marsal y Mazari (1959), dividieron en tres zonas el subsuelo de la cuenca de México, lacustre, con espesor de material compresible mayor de 20 m; de lomas, conformada por las sierras periféricas e interiores; y de transición, que se sitúa entre las anteriores, con estratos compresibles menores de 20 m. Estos tres tipos de subsuelo se presentan en la subcuenca de Texcoco de la siguiente forma. La zona lacustre, situada en la parte baja de la cuenca, con topografía casi horizontal; la zona de lomas, caracterizada por las sierras de Guadalupe, Río Frío, Sta. Catarina, Peñones y Chimalhuacán; y la zona de transición, que presenta dos condiciones, la gradual, en la que los estratos lacustres reducen su espesor y se interdigitan paulatinamente con materiales aluviales; y los piroclásticos de las sierras, y la abrupta, en la que los rellenos lacustres son interrumpidos horizontalmente por cuerpos volcánicos en Chimalhuacán, los Peñones y parte de la sierra de Guadalupe (Fig. 11).

5.2 Depósitos Lacustres

Desde el punto de vista mineralógico, las arcillas del Valle de México, han sido estudiadas en varias ocasiones, en general se concluye que corresponden a arcillas montmoriloníticas o bentoníticas, con cantidades considerables de ceniza y vidrio volcánico, así como diversos lasálticos y diatomitas. Además se ha señalado también la presencia de minerales amorfos y materia orgánica.

En lo que se refiere a las formaciones lacustres del lago de Texcoco, tenemos las siguientes: (Munillo y Morales, 1991):

Formación Superficial (FS). Está constituida por arcillas consolidadas por coágulo, arenas limosas y limos arenosos, con un espesor promedio de 1.5 m; al desplazarse hacia la Sierra de Guadalupe hasta 4.0 m y hacia el centro, sur de la región disminuye, sobre todo en las antiguas zonas bajas del antiguo.

Presenta un contenido de agua promedio de 61% y está surcada por innumerables grietas verticales milimétricas con limo, arena fina, con profundidad superior a 4.0 m y que penetran el estrato subyacente.

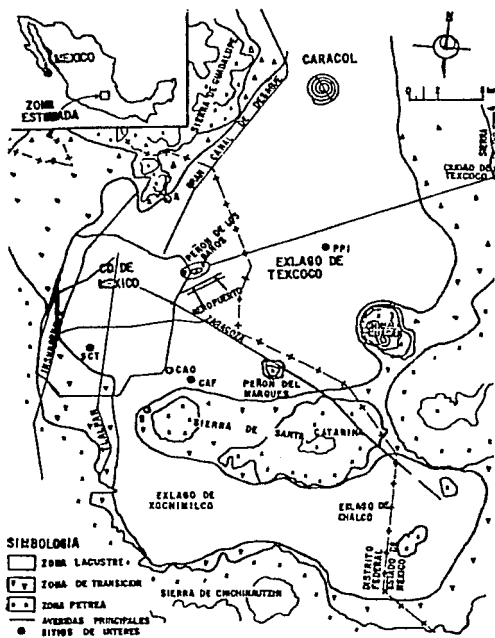


FIG. 12 LOCALIZACION Y ZONIFICACION DEL EXLASSO. (Pag. 25)

Existen rellenos sanitarios y de escombros con un espesor máximo de 6.0 m y se localizan al centro del vaso y al oriente del aeropuerto, respectivamente.

Formación Arcillosa Superior (FAS). Presenta un espesor de 17 m al norte y más de 40 m al sur; su espesor varía en dirección este-oeste de 17 a 38 m cerca del aeropuerto. Está conformada por las arcillas más deformables e intercalada por lentos y estratos arenosos, limoarenosos y de vidrio volcánico entre los cuales destaca una capa de arena volcánica en estado suelto con un espesor que varía entre 0.2 y 2 m y que se encuentra a una profundidad de 3 m en el norte y oriente y se profundiza hasta 12 m hacia el sur. Sobre este estrato se localizan arcillas con contenidos de agua máximos de 600%. En la zona norte, la FAS se encuentra intercalada por estratos limoarenosos de mayor espesor que en el centro y sur. Su contenido de agua medio es de 303%.

Capa Dura (CD). Se caracteriza por tener cenizas volcánicas depositadas en una etapa geológica de desecación. Presenta espesores de 3.5 m al norte y oriente y desaparece paulatinamente hacia el sur, esto proporciona la evidencia de que en el pasado hubo niveles permanentes de agua. La profundidad de su frontera superior, varía de 16 m al poniente del caracol hasta cerca de 48 m en Chimalhuacán, y de 16 m en el oriente, hasta 30 m en las cercanías de la Sierra de Guadalupe. A este estrato lo conforman materiales limoarenosos, arenosos y limosos intercalados en ocasiones por arcilla; su contenido de agua es de 59% y su resistencia a la penetración estándar (SPT) es muy variable, con valores que van de 8 a más de 50 golpes en una misma zona.

Formación Arcillosa Inferior (FAI). Tiene el mismo origen que la superior, se distingue por su menor contenido de agua (255%), y por su mayor resistencia al esfuerzo cortante, presenta además menor compresibilidad. En esta formación, aparecen más frecuentemente estratos limoarenosos y de vidrio volcánico que en la FAS. Tiene un espesor máximo de 20 m al centro del lago y disminuye hasta desaparecer hacia la periferia.

Depósitos Profundos (DP). Se les conoce también como segunda capa dura, están constituidos principalmente por limos, arenas finas y limas muy compactas. Su horizonte superior se localiza a 24 m de profundidad en el oriente y se prolonga hasta 70 m en el sur. Su contenido de agua promedio es de 50%. Dentro de estos depósitos queda también la llamada Tercera Formación Arcillosa (TFA), la cual presenta un espesor mayor de 6 m y un contenido de agua medio de 147%. Se ubica a una profundidad de 52 m al centro del embudo. Bajo la formación arcillosa anterior se encuentran depósitos aluviales similares a los de la parte superior, con un contenido de agua medio de 37% y una mayor cantidad de gravas.

Existe una cuarta formación arcillosa entre 145 y 160 m de profundidad, que por lo general no es alcanzada por las exploraciones convencionales (fig. 13).

5.3 Características y Propiedades

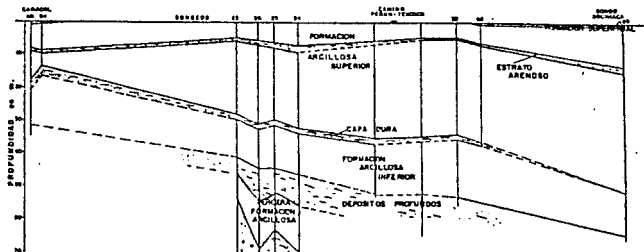
De acuerdo con Morales y Murillo (1991), se han realizado sondeos en el área y se ha detectado la presencia de gases al centro y sur de la región, principalmente gas metano que se encuentra en suspensión en el agua de los Depósitos Profundos, entre la FAI y la TFA, con presión máxima de 370 rPa. Además, los suelos del ex-lago se caracterizan por la presencia de sales disueltas en el agua intersticial de las arcillas, presentando valores medios de 54000 mg/l en los primeros 60 m, los cuales se reducen gradualmente con la profundidad a 1620 mg/l entre 213 y 184 m, así como al alejarse hacia la periferia, donde la concentración salina queda comprendida entre 232 y 1613 mg/l para profundidades menores de 200 m. La concentración máxima de las sales en las aguas subterráneas es de 18% y se reduce a 1% hacia la metrópoli y alrededores de la zona lacustre.

5.4 Propiedades Índice

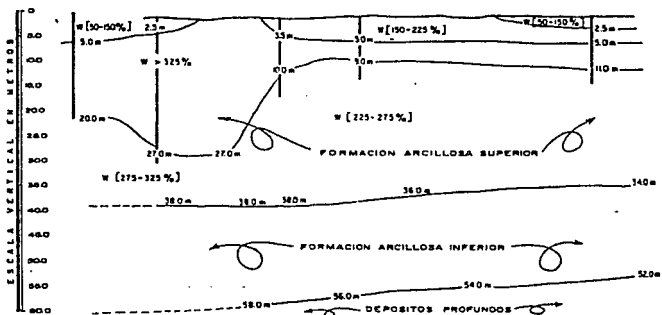
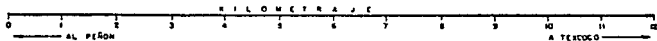
En el cuadro II, se presentan los valores medios de las propiedades índice para cada formación. Se puede observar que los valores reportados para el contenido de agua y límite plástico son semejantes a los de la Ciudad de México, al realizar la corrección por contenido de sales. Los valores medios del límite líquido y densidad relativa de sólidos resultan mayores y menores respectivamente a los de otras zonas. Los valores de la relación de vacíos son similares a los de la zona metropolitana en suelos sin cargas superficiales y poco afectados por bombeo (zona virgen). Los valores medios de la densidad de sólidos, relación de vacíos y resistencia en compresión no confinada para la Capa Dura, Depósitos Profundos Superiores y Tercera Formación Arcillosa, no son representativos debido al escaso número de datos.

5.5 Propiedades Mecánicas

Las arcillas del valle son altamente compresibles y sumamente impermeables, por tener relaciones de vacíos muy altas y una estructura flocculada en general. Sin embargo, se dice que las características de compresibilidad en la zona del Lago de Texcoco, resultan más desfavorables que las de la Ciudad de México (Murillo y Morales, 1991). Además es posible apreciar dos zonas, una similar a la virgen y otra donde las arcillas han sido preconsolidadas por acción del bombeo.



Perfil del Lago de Texcoco. Dirección N-S.



NOTAS:

La escala vertical del 0, corresponde a la elev. 2252.90 m. referida al nivel medio del mar
W Contenido natural de agua

FIG. 13 PERFILES ESTRATIGRAFICOS DE LA ZONA DEL LAGO. (Ref. 23)

Cuadro II. Valores medios de Propiedades Índice

Formación	Contenido de agua (%)	Límite Líq. (%)	Límite Plás. (%)	Índice de sol. (%)	Relación de líquidos (%)	Resistencia al corte Cu (kPa)
F.S.	61	69	44	2500	1.7	14.7
F.A.S.	331	101	71	2460	7.3	12.7
C.D.	58	71	37	2530	1.2	26.3
F.A.I.	255	242	66	2450	5.9	31.4
D.P. Sup.	49	94	47	2420	1.5	53.0
T.F.A.	147	182	69	2170	3.5	47.1
I.P. Inf.	37	48	25			

Los coeficientes medios de compresibilidad (α_v), en la proximidad de la carga de preconsolidación (σ_p), son de 0.042 y 0.016 (kPa)⁻¹ para las Formaciones Arcillosas Superior e Inferior respectivamente, con máximos de 0.1 (kPa)⁻¹ que se presentan bajo la parte afectada por secado de la FAS y disminuyen con la profundidad (fig. 14).

En el cuadro III se presentan los valores de la resistencia de las formaciones arcillosas; resultados de las pruebas de compresión no confinada (σ_c), triaxiales no consolidadas no drenadas (UU) y de veleta in-situ. Las menores resistencias se encuentran a poca profundidad, entre la capa superficial y el estrato arenoso de la FAS, con un valor medio de 10.8 kPa y mínimos de 3 kPa. La sensibilidad de las arcillas (S_t), entre 2 y 40 con valor medio de 3.17 en pruebas in-situ. Las pruebas triaxiales y de veleta se realizaron con equipos especialmente diseñados para los suelos blandos del Lago de Texcoco.

De acuerdo con Murillo y García (1978), se ha observado que después de aumentar la resistencia al esfuerzo cortante por consolidación, al aplicar cargas en la superficie mayores de 49 kPa, esta propiedad pueda disminuir 30% por degradación de la estructura de las arcillas.

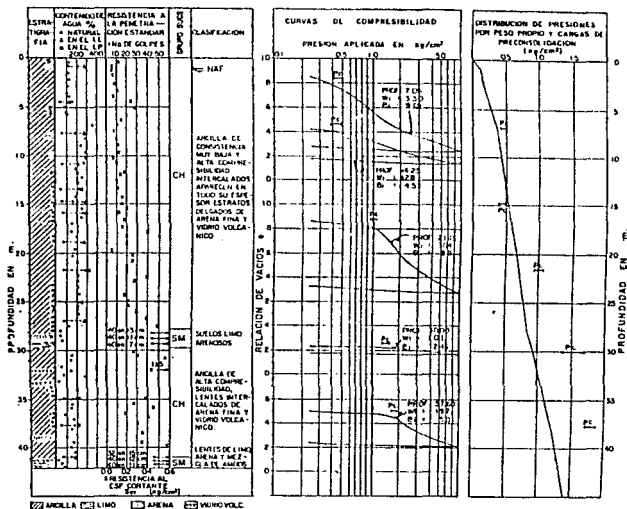


FIG. 14 PERFIL TÍPICO DE LA ZONA AFECTADA POR BOMBEO PROF. 23

Cuadro III. Resistencia al Esfuerzo Cortante

Formaciones	C_u 1 Pa	C_u 1 Pa	C_{max} 1 Pa	C_{ur} 1 Pa	St --
F.A.S.	12.7	20.5	21.4	6.3	3.17
F.A.1.	26.5	36.5	41.6		

C_u = Cohesión en compresión no confinada, C_u = Cohesión en triaxial (CU), C_{max} y C_{ur} = Cohesión insitu máxima y residual, con veleta.

En pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU), se determinó que el ángulo de fricción interno aparente (ϕ_a) se reduce de 41 a 34° cuando la velocidad de deformación cambia de 94 a $0.045\%/hora$ y que a largo plazo, el ángulo de fricción aparente es de 29° en términos de los esfuerzos efectivos (Aiberro e Hiriart, 1973). En triaxiales consolidadas drenadas (CD) en compresión y extensión, se obtuvieron ángulos de fricción interna (ϕ') de 45° y 50° respectivamente (León et al. 1974).

5.6 Propiedades Dinámicas

Debido a que la cuenca de México, se encuentra localizada en el centro de la faja volcánica que atraviesa el país de este a oeste, queda sujeta a los grandes esfuerzos tectónicos y erupciones volcánicas que en ella ocurren desde el Terciario Medio hasta la fecha, así como a intensos sismos provocados por la subducción de la placa de cocos del Océano Pacífico bajo la placa de Norteamérica.

Por esta razón, las características dinámicas de los suelos lacustres han sido largamente estudiadas, ya que en ellos los sismos se amplifican notablemente.

Mediante prospección sísmica de refracción se han registrado cuatro "mantos sísmicos": el primero con espesor de 30 m al centro del lago, corresponde a la Formación Superficial y a la FAS y su espesor disminuye hacia el norte, tiene una velocidad de propagación de ondas compresionales de 600 a 900 m/s. El segundo estrato tiene una velocidad de 1700 m/s y profundidad de 30 a 480 m al centro de la región (PP1), reduce su potencia al norte y corresponde a los depósitos lacustres y aluviales constituidos por la FAI, Depósitos Profundos y la serie Estratificada Tepozteco. El tercer manto sísmico está formado por las volcánicas del Oligoceno y Mioceno, tiene velocidades de 2200 a 3100 m/s y lo constituyen corriente lávicas, tobas y aglomerados, se localiza de 480 a 1450 m de profundidad al centro del lago y su espesor se reduce hacia el norte y aumenta hacia el sur. Finalmente el cuarto cuerpo sísmico tiene velocidad mayor de 4500 m/s y aparece a una profundidad de 700 m al norte y de 1450 m en la parte central.

Se han llevado a cabo ensayos dinámicos de laboratorio en columna resonante, triaxiales cíclicos con consolidación isotrópica y anisotrópica, de corte simple cíclico, así como pruebas de campo empleando excitación en el fondo de sondeos (down hole) y sonda suspendida (Jaime 1987). Los intervalos de resultados para el Lago de Texcoco se muestran en los cuadros IV y V y los sitios están señalados en la fig. 12.

Cuadro IV. Propiedades Dinámicas

Sitio	Profundidad m	G máx. MPa	D %	γ mín. %
CAO	11.6-38.2	Columna Resonante 2.7-9.7		5.1-10.8
CAF	7.5-26.7	3.5-7.1	9.1-11.4	5.1-8.6 (10^{-3})
CAO	12.6-38.2	Triaxiales Cíclicos, Consolidación Isotrópica 1.5-11.2		
CAF	7.3-34.6	2.5-11.4	3.8-19	1.6-131 (10^{-2})
CAO	12.3-31.0	Corte Simple Cíclico 0.3-1.2		24-1200 (10^{-2})

Cuadro V. Velocidad de la onda de corte C_s (m/s) determinada con sonda suspendida

	Zona Preconsolidada	Zona Virgen
F.S.	118	113
F.A.S.	64	54
C.D.	267	192
F.A.I.	180	134
D.P.	506	358

El mismo Jaime (1987), señala que las arcillas de la Cuenca presentan un comportamiento casi elástico para deformaciones angulares (γ), de 10^{-4} a 10^{-1} % y su relación de amortiguamiento (D) está entre 2 y 5% en ese intervalo de deformaciones. Además, el módulo de cortante (G) es mayor en la zona preconsolidada que en la virgen.

El módulo de cortante se degrada en función del número de aplicaciones de carga y depende de la relación de vacíos, la relación de esfuerzos principales (σ_1/σ_3), y del nivel de preconsolidación. Por otro lado, la respuesta sísmica en campo libre utilizando un modelo unidimensional con propagación de ondas SH incidiendo verticalmente, verifica la influencia de las características geométricas del subsuelo.

Los sismos que principalmente afectan al Valle de México tienen su origen en diferentes partes de la República Mexicana, sin embargo, el daño que causan en el interior de la cuenca de México es debido a su ubicación geográfica (entre las zonas de influencia del Cinturón Circumpacífico), estos son los lugares con la máxima actividad sísmica en el mundo (Jaime, 1987).

Varios sismos con magnitudes mayores de 6^o originados fuera de la cuenca (con distancias epicentrales de hasta 400 km) se han sentido en ella con muy altas intensidades. En cambio, en otras partes del mundo a distancias epicentrales mayores de 100 km se verifica una gran atenuación del movimiento sísmico. Esto manifiesta la fuerte amplificación sísmica que hay en el subsuelo del Valle.

De acuerdo con Rosenblueth y Elorduy (1969), desde el punto de vista sísmico, la Ciudad de México es única y en ella se observa lo siguiente:

- Periodos dominantes del suelo de hasta 5 s.
- Factores de amplificación de onda hasta de 50 en espectro de amplitudes de Fourier (Singh y Suárez, 1986).
- Un gran efecto de interacción suelo-estructura.

Los sismos con focos lejanos producen los mayores daños a estructuras localizadas en las zonas de los lagos de Texcoco y Mochimilco-Chalco y de Transición.

Las grietas que se producen en los depósitos lacustres del Valle de México, han sido mencionadas desde épocas prehispánicas. De acuerdo con Murillo, 1990, la literatura geotécnica las ha mencionado en múltiples ocasiones y se han desarrollado modelos teóricos sobre su generación.

La formación de grietas se manifiesta generalmente en la época de lluvias, sin embargo, en la época de estiaje también se presenta este fenómeno en la Costra Superficial y en la parte superficial de la Formación Arcillosa Superior.

De acuerdo con Murillo et al, 1991, las grietas deben su aparición a diferentes causas; una de ellas es cuando al cambiar en forma rápida el estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas superficiales, debido a la variación del contenido de

agua, se ocasiona una disminución de las fuerzas de tensión preexistentes, producidas por la evaporación, esto último ocasiona también la existencia del fenómeno de capilaridad y por ende la correspondiente aparición de grietas.

Otra causa importante del agrietamiento se produce cuando hay hundimiento regional: hacia las fronteras de la zona lacustre se manifiestan grietas por tensión (Santoyo, 1990; Murillo, 1990), las cuales siguen por lo común trayectorias semejantes a curvas de nivel topográfico. Las lluvias favorecen su aparición, pero pueden presentarse sin su participación. También se puede presentar agrietamiento por una variación rápida en los esfuerzos horizontales a consecuencia de una excavación o por la aplicación de cargas horizontales.

En conclusión, se puede decir que las características de deformabilidad y resistencia de los suelos arcillosos del ex-lago son más desfavorables que los de la zona lacustre de la ciudad de México, lo que aunado a un nivel freático casi superficial, a una alta incidencia sísmica y a un intenso agrietamiento, representan graves problemas para la ingeniería de cimentaciones y obras térreas. Por esto se considera que ningún estudio llevado a cabo en el área, está de sobra, por el contrario, todo lo que se realice con el fin de conocer mejor el comportamiento del subsuelo, será de gran valía para toda la gente que se dedica o tiene algo que ver con la construcción.

La construcción de este lago se realizó con el fin de controlar los ríos torrenciales que descargan al oriente del exvaso, y al mismo tiempo aprovechar estas aguas, que mezcladas con las provenientes de una planta de tratamiento de aguas negras, darían 1 m³/s de agua utilizable para fines industriales, turísticos o agrícolas.

Antes de la construcción del lago, se presentaban continuas inundaciones en la zona, debido a que la topografía del terreno es sensiblemente plana y las grandes avenidas de los ríos de oriente se estancaban allí, además en épocas de estiaje el agua se evaporaba totalmente, y con ello se perdía la oportunidad de aprovecharla.

Después de realizar estudios de importancia a escala natural en el área, se recomendaron tres métodos para la formación de lagos: Bombeo en Pozos Someros, Dragado convencional y Lluviación de las Arcillas con Explosivos.

Durante 1957 y 1960 se realizaron las pruebas correspondientes para determinar la mejor opción. El método de Lluviación de las Arcillas con Explosivos, consiste en provocar la pérdida de resistencia de las arcillas y limos por la acción de explosivos, transformándolos en un líquido viscoso que puede transportarse por tuberías mediante bombeo. Se efectuaron varios ensayos en los que se cambiaron las cargas, la distribución y los tipos de explosivos y se notó que no hubo una reducción suficiente de la resistencia al corte, de los materiales afectados por la detonación, además el cambio de estado sólido a líquido de la arcilla, ocasionaba un problema de contaminación en la zona donde se ubicaban, por lo tanto el método se desechó por inconveniente.

El método de Dragado convencional se llevó a cabo realizando pruebas con una draga flotante proporcionada por el IDH. Se excavaron 24000 m³ dejando talud de 1:1 a profundidades variables entre 2.8 m y 6.0 m, pero al igual que el método anterior, existió el problema de contaminación de la zona donde fuera depositado el material dragado, y adicionalmente el costo era elevado, por lo cual tampoco fue aceptado.

El Bombeo en Pozos Someros fue el método que se consideró más conveniente. Esta se basa en el mecanismo que provoca el hundimiento en la ciudad de México. Al extraer agua del subsuelo, se altera el equilibrio de presiones hidrostáticas y ocurre la consolidación de las formaciones arcillosas compresibles.

La prueba del método en cuestión, se desarrolló extrayendo agua salada de 16 pozos distribuidos según una cuadrícula de 100 m por lado, ocupando una superficie total de 9 ha.

Dichos pozos tenían 60 cm de diámetro y 60 m de profundidad. Con camisa perforada de 23 cm y filtro de arena y grava. En promedio se sostuvo un gasto de 50 l/s provocando un abatimiento piezométrico del orden de 6.2 m en la Capa Dura y de 15 m en los depósitos profundos.

En base a las inversiones efectuadas, gastos de operación y mantenimiento, el costo resultó más económico comparado con los métodos anteriores, además se consideró la ventaja de producir agua salada con valor para la industria del álcali y la certeza de que con esta técnica no habría material de desperdicio. También se contempló el hecho de que el proceso de consolidación inducido, mejora las características del subsuelo y reduce considerablemente los problemas de estabilidad en las depresiones formadas. A continuación se presenta el modelo matemático que se utilizó para trabajar en la formación del lago experimental, el cual se realizó con el fin de tener cierto grado de certidumbre acerca del comportamiento del subsuelo, durante los años que el mismo se sujetó a la acción del bombeo.

6.2 Definición y Calibración del Modelo Matemático

Los objetivos principales que se tuvieron en mente al realizar este modelo fueron: determinar si en el período previsto se alcanzaría el volumen de asentamientos deseado y si su distribución sería satisfactoria.

Para mayor seguridad se realizó una nueva verificación del modelo empleado, habiéndose efectuado otra prueba de bombeo en el campo experimental con manejo de micromolineté y se concluyó nuevamente, que el modelo teórico reproduce en forma satisfactoria el comportamiento del sistema hidrológico del subsuelo.

La calibración de este modelo matemático, se basó principalmente en la evolución piezométrica y en los asentamientos observados en el campo piloto. Fue definido por Alberro, et al (1974), y supuso las siguientes hipótesis:

a) La estratigrafía del subsuelo del Lago de Texcoco consta de cuatro capas de materiales de propiedades mecánicas e hidráulicas diferentes; la primera es el estrato semiconfinante superior de 35 m de espesor o FAS, formado por arcillas compresibles que descansan sobre un estrato permeable de 3 m de espesor constituido por arenas limosas, denominado comúnmente Capa Dura (CD). Inmediatamente después, se encuentra una formación de arcillas compresibles de 15 m de espesor, denominada estrato semiconfinante inferior o (FAI), que descansa sobre el estrato permeable inferior, el cual tiene a su vez un espesor de 14 m (Fig. 16).

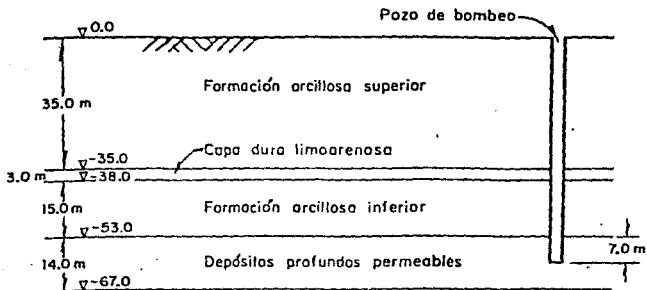


FIG. 16 ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DEL LAGO DE PRUEBA DEL PROYECTO TEXCOCO (Ref. 1)

Los espesores de las distintas capas se eligieron de acuerdo con los valores promedio obtenidos de los sondeos BNF 1 y BNF 3 realizados por Plan Texcoco.

- b) El flujo de agua se considera vertical en los estratos semiconfinantes, y horizontal en las capas permeables.
- c) Los abatimientos piezométricos iniciales son los registrados por los piezómetros.
- d) Los acuíferos son de extensión horizontal ilimitada.
- e) El gasto total de bombeo de un pozo es la suma del gasto que proviene de la reducción del almacenamiento en los estratos permeables y del gasto del agua expulsada por consolidación de los estratos semipermeables. El asentamiento de la superficie del terreno por consolidación de los estratos semipermeables, crea un lago cuyo volumen es igual al del agua extraída de la arcillas.
- f) Los estratos permeables trabajan en forma independiente, es decir, su interacción es nula.
- g) Para el análisis del comportamiento del nivel piezométrico y del volumen extraído de los mantos semipermeables, es aplicada la teoría de Hantush para tiempos cortos.

La aceptación de cada una de estas hipótesis estuvo ampliamente fundamentada en datos y consideraciones diversas. La primera se apoyó en los sondeos BNF 1, BNF 2 y BNF 3. La segunda hipótesis se justificó porque la permeabilidad en los acuíferos principales es al menos del orden de 10^3 veces mayor que la de los estratos semiconfinantes. Cuando esto sucede, la velocidad del agua en las arcillas es mucho menor que en las capas permeables; al respecto Neuman y Witherspoon demostraron que cuando existe un contraste de permeabilidades del orden de 10^3 , los errores que se cometen debido a la suposición del flujo vertical en las arcillas, son imperceptibles.

En cuanto a la hipótesis d, debido a que las fronteras que limitan los estratos permeables en la dirección horizontal se encuentran muy alejadas, el error que resulta de suponerlos de extensión infinita, es despreciable. Esto quedó comprobado al ajustar el modelo con base en los registros obtenidos en el campo experimental.

La hipótesis e fue consecuencia de que el agua extraída solo puede provenir de las arcillas o de los estratos permeables (llamados acuíferos principales). Además, el cambio de volumen de la arcilla se debe casi exclusivamente al agua desalojada, ya que el material sólido que contiene es prácticamente incompresible.

El tiempo t que debe transcurrir para que la interacción entre estos dos estratos permeables sea perceptible, está dado por:

$$t = \frac{b'^2 S'_a}{6 K'}$$

donde b' , K' y S'_a son el espesor, la permeabilidad y el almacenaje específico respectivamente, de la arcilla que los separa. La aplicación de esta ecuación al campo experimental al Lago de Texcoco, da:

$$t = \frac{(35)^2 \times 5.2 \times 10^{-2}}{6 \times 47 \times 10^{-5}} \text{días} = 63 \text{ años}$$

para la capa arcillosa superior, y

$$t = \frac{(15)^2 \times 1.6 \times 10^{-2}}{6 \times 1.44 \times 10^{-5}} \text{días} = 110 \text{ años}$$

para la capa arcillosa inferior.

Dado que el periodo previsto de bomba fue de cinco años, el espesor del estrato semiconfinante (arcillas), se consideró infinito para efectos del cálculo de los abatimientos y de los gastos. Este hecho a su vez implicó la utilización de la Teoría de Hantush para tensiones críticas.

Si en la anterior ecuación, se utilizara la nomenclatura usual en mecánica de suelos, se tendría lo siguiente:

$$t = 0,35 \frac{H^2}{C_v}$$

donde $2H$ es el espesor total del manto arcilloso inferior drenado en ambas caras y C_v es el coeficiente de consolidación de la arcilla del manto arcilloso inferior.

Si se compara esta ecuación con la utilizada clásicamente en mecánica de suelos para determinar el tiempo t_u necesario para alcanzar un grado de consolidación ($U\%$) para un flujo unidimensional:

$$t_u = T_u \frac{H^2}{C_v}$$

en que T_u es el llamado factor tiempo, resulta que $t = t_{85\%}$. Esto implica que el tiempo t que debe transcurrir para que la situación entre los dos estratos permeables sea perceptible, corresponde a un grado de consolidación del manto arcilloso inferior, igual a 85%.

A primera vista, un grado de consolidación de 85% puede parecer muy elevado. Sin embargo, debe observarse que la presencia de los dos mantos permeables, es decir, del drenaje de la arcilla por sus extremos superior e inferior se toma en cuenta en todo momento. Lo que se desprecia es el efecto de la presencia de cualquiera de los mantos en el drenaje efectuado por el otro. El resultado anterior debe interpretarse en el sentido de que para que esta influencia sea importante, el grado de consolidación debe ser mayor a 85%.

6.3 Método Constructivo del Lago

Para lograr la formación del Lago Dr. Nabor Carrillo, se instaló un sistema constructivo consistente en una red de 130 pozos de 60 m de profundidad cada uno, con un diámetro de 65 cm en los primeros 5 m y de 45 cm en los 55 m restantes (fig. 17).

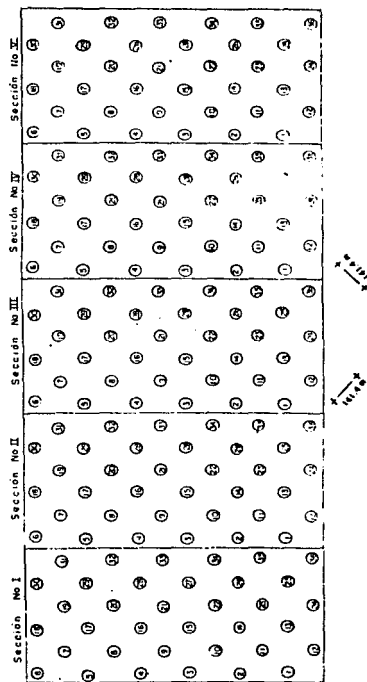


FIG. 17 PLANTA DE LA INSTALACION DE POZOS EN EL LAGO
DR. SAVOR CARRILLO (P. 1. 29)

El bombeo del lago fué iniciado en la seccion 3 en enero de 1973 y se continuó por casi seis años seguidos, suspendiéndose en 1978. Durante el tiempo que operaron las bombas, el nivel dinámico en los pozos se abatió generando paulatinamente depresiones piezométricas en las capas permeables del subsuelo, particularmente en la Capa Dura y en los Depositos Profundos.

El área total del bombeo fue representada por una superficie rectangular de 3 x 1.2 km, donde se creó la mencionada red de 180 pozos que formaban una malla de 141.4 x 141.4 m, que trabajaban conjuntamente con un gasto medio de 1.9 lvs/seg.

El aceme de los pozos estuvo formado por tubería metálica ranurada de 8 5/8" de diametro y 5/8" de espesor; el espesor que quedaba libre entre ademe y perforación, se llenaba con material de filtro (arena y grava bien graduadas). Se aseguró que la extremidad inferior de la tubería estuviera cerrada y para ello se le colocó un tapón de concreto de 1 m de longitud. Se desplantó dentro del acuífero areno-limoso compacto, en una profundidad mínima de 3 m (fig. 19), (Rodríguez 1982).

Para medir los asentamientos ocurridos, se utilizaron bancos de nivel superficiales y profundos (figs. 20 y 21). Los datos obtenidos se graficaron contra el tiempo y contra el volumen de agua extraído. Se pudo observar que los mayores asentamientos se produjeron en las secciones 3, 4 y 5, reportándose un hundimiento máximo en la seccion 3 de 3.52 m y un hundimiento medio de 2.5 m. En porcentaje los asentamientos promedio fueron los siguientes:

Capa	%	cm
Formacion Arcillosa Superior	18	49
Formacion Arcillosa Inferior	68	164
Depositos Profundos	14	37

El bombeo se continuó hasta que la curva de volumen extraído contra tiempo, se tornó asíntótica con respecto a este último, habiéndose extraído aproximadamente 50 millones de metros cúbicos de agua salobre (tipo de agua que constituye el acuífero superior del ex-lago de Texcoco) (fig. 22). El agua obtenida del bombeo fue utilizada en el lavado de suelos y riego de las zonas pastizadas, y que debido a su bajo contenido salino no fue posible su aprovechamiento en la industria de Soya Texcoco.

Se considera importante mencionar que los asentamientos en el área nunca fueron uniformes, las variaciones que revelaron sus perfiles se debieron en parte a cambios estratigráficos del subsuelo y en parte a interrupciones en el bombeo por fallas mecánicas del equipo.

POZOS SOMEROS

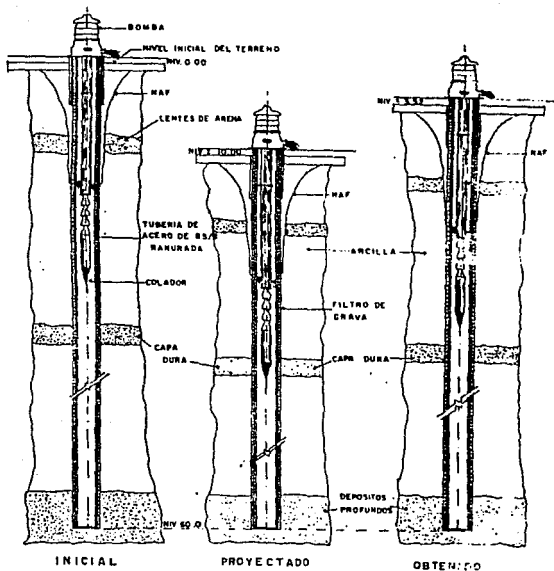


FIG. 19 DETALLE DE LOS POZOS INSTALADOS EN EL AREA DEL LAO (Ref. 20)

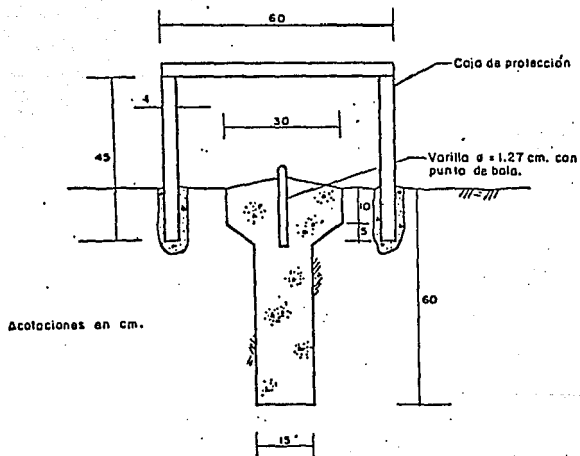


FIG. 20 BANCO DE NIVEL SUPERFICIAL

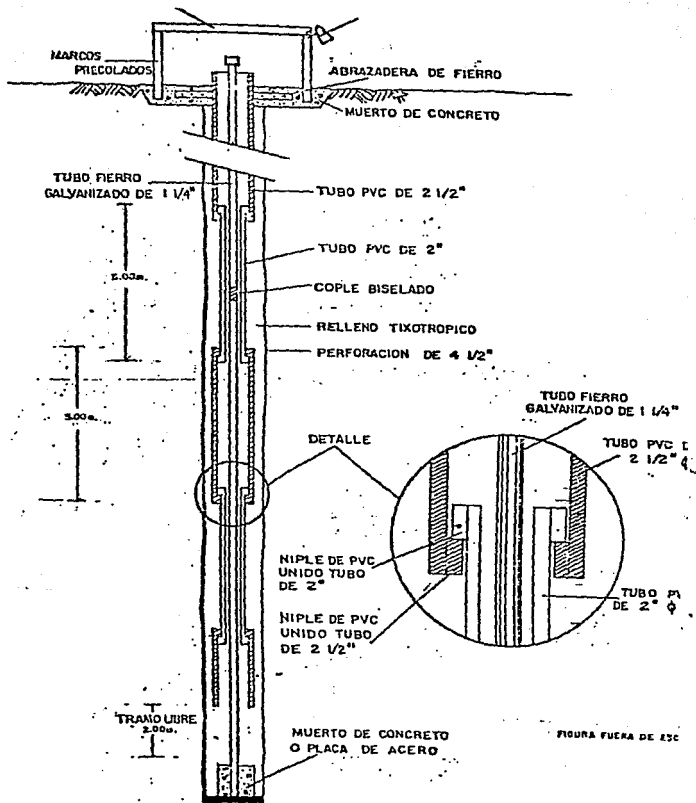


FIG. 21 BANCO DE NIVEL PROFUNDO

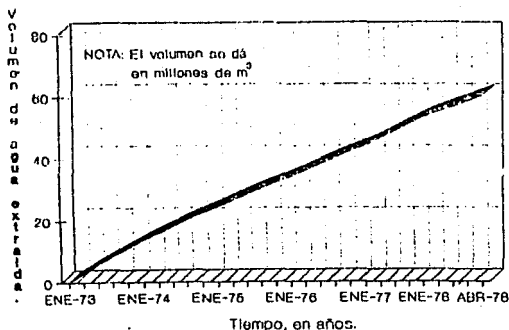


FIG. 22 CURVA DEL VOLUMEN DE AGUA EXTRAIDA CONTRA TIEMPO

6.3 Fallas e Irregularidades

El fondo final del lago distó mucho de ser plano. además se observó que su topografía última mostró depresiones e irregularidades. Otras desventajas de utilizar el método de consolidación de las arcillas, fueron el continuo desgaste y atascamiento de las bombas, debido sobre todo a la succión de material abrasivo fino (arena o ceniza volcánica), que se introducía en las bombas a pesar del filtro y del cedazo. Esta situación provocó que el funcionamiento de las bombas fuera inconstante, lo que trajo como consecuencia la formación de un fondo disparado del lago generado (fig. 23).

El volumen de agua bombeado fue inferior al proyectado, ya que la eficiencia del equipo de bombeo, estimada como la relación del volumen bombeado y el que debía extraerse según especificaciones del fabricante, fue de 33%. Esta baja eficiencia se debió a los siguientes hechos:

1) Los motores eléctricos de las bombas de los pozos trabajaron a 50 cps en lugar de trabajar a 60 cps, durante tres años (1973 a 1976), hasta que se realizó el cambio de frecuencia en la zona, es decir, que en vez de girar a 1760 rpm, trabajaron a 1460 rpm.

2) Fallas mecánicas en los equipos de bombeo e interrupciones en la operación, ocasionadas principalmente por la pérdida de verticalidad en los pozos, a consecuencia de la consolidación del subsuelo. Debido a esto se presentaban deformaciones en el ademe y se producían contactos entre éste y la bomba del pozo, generando desgastes e castivos en las bombas, lo que obligaba a pararlas, desmontarlas y arreararlas.

PERFIL DE ASENTAMIENTOS EN LA LINEA H

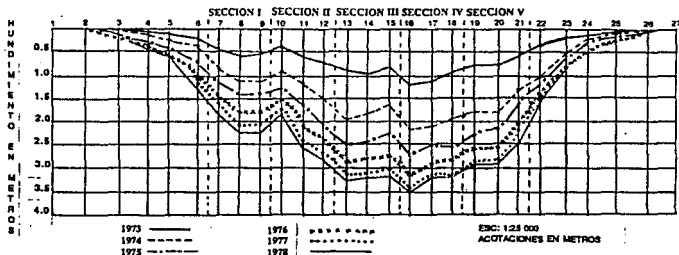


FIG. 23 EVOLUCION PIEZOMETRICA AL CENTRO DEL LAGO

Sin embargo, a pesar de los problemas mencionados, se logró formar un lago de 11.9 millones de metros cúbicos de capacidad de almacenamiento, construido por el método de consolidación de las arcillas, dejando como última etapa constructiva, la formación de un bordo perimetral al lago, para lograr la capacidad considerada en el proyecto de 36 millones de metros cúbicos.

El Lago Dr. Nabor Carrillo cubre actualmente una extensión casi rectangular de 9.5 km² (aproximadamente de 2.3 M 4.1 km), de 11 780 m de perímetro, medidos al eje de la corona del bordo perimetral que lo circunda.

6.3 Asentamientos y Grietas

Durante la formación del lago, la velocidad de asentamiento fue de 42 cm/año, con máximos de 1.15 m en el primer año de bombeo. Los abatimientos piezométricos en la Capa Dura y en los Depósitos Profundos Superiores fueron de 15 y 30 m respectivamente, al final del período de bombeo (fig. 24). Del hundimiento regional inducido por el bombeo, las Formaciones Arcillosas Superiores e Inferior contribuyeron con el 15 y 70.5% de la deformación respectivamente (Munillo, 1984). El resto de los asentamientos (14.5%) correspondió a la consolidación de estratos arcillosos profundos afectados por el abatimiento piezométrico a profundidad mayor de 80 m.

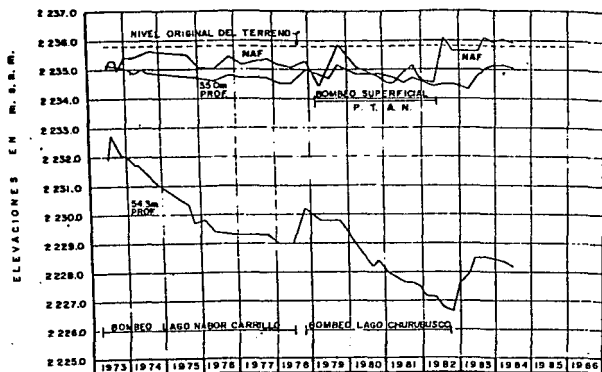


FIG. 24. EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA EN LA ESTACIÓN 10 (R-1-30)

Por el intenso bombeo a que se sometió la zona, según Munillo y Morales (1981), se esperaba un fuerte asentamiento radial circular a los pozos, debido a las diferencias en la capacidad específica de los pozos y a la estratigrafía. En lo que se refiere a los hundimientos, no resultaron uniformes en el caso de pozos, si bien se formó una depresión cónica alrededor de cada uno de éstos.

En un principio, se formaron algunas grietas concéntricas a los pozos, pero posteriormente, el patrón de agrietamiento fue irregular y se desarrollaron las grietas principalmente alrededor del área de bombeo y algunas en la distancia media entre pozos. La trayectoria de las grietas perimetrales fue semejante a la de las curvas de nivel de la depresión en proceso de formación. La generación de los agrietamientos fue gradual y la apertura alcanzaba su máximo en pocos meses, hasta 1.6 m. Las mayores manifestaciones grietas asociadas a erosión lodos. lo que favoreció la formación de rupturas tipo graben.

La longitud de estas grietas pocas veces fue superior a 200 m y en general presentaban agua en su interior.

La máxima profundidad medida fue del orden de 5 m, determinada con una sonda para piezómetros. Generalmente, los bordes se erosionaban rápidamente y la grieta se azolvaba en unos cuantos meses. Para verificar si el agrietamiento del fondo del lago Nabor Carrillo tendría pérdidas por fugas a través de grietas importantes, se inundó la zona con agua salobre, sin que ésta se perdiera, por lo que se decidió suspender el tratamiento de grietas originalmente considerado al término de la etapa de bombeo.

7. EVOLUCION Y COMPORTAMIENTO DEL LAGO

7.1 Comentarios

Siempre que se proyecta una obra de ingeniería de gran envergadura, se hace necesaria una estimación previa del futuro comportamiento de la misma, ya sea por medio de un modelo matemático, una maqueta a escala, una simulación, etc., con el fin de determinar la rentabilidad, funcionalidad y factibilidad de la obra en cuestión.

Para diseñar correctamente, hay que identificar plenamente las necesidades bajo las cuales se requiere trabajar, para enmarcar las probables soluciones y poder elegir la más conveniente.

Las necesidades que se tenían que cubrir cuando se proyectó la construcción de los lagos del programa Texcoco, eran complejas y variadas, ya que la región había perdido sus lagos, sus bosques y sus suelos, la transparencia de su atmósfera y la bondad de su clima, generando con ello graves problemas de salud y bienestar para los habitantes del oriente y norte de la ciudad, y más aún para los de la zona conurbada. Además, hay que agregar que la zona tenía en esa época una elevación mayor a la de la Ciudad de México, por lo tanto representaba una seria amenaza de inundaciones para la metrópoli.

Los estudios que se tuvieron que hacer, para encontrar soluciones a estos problemas, rescatar los recursos de la cuenca del ex-lago y mejorar el nivel de vida de las comunidades que la habitan, resultaron de tal importancia, que en base a datos obtenidos de los mismos, se han podido llevar a cabo con más agilidad las obras que abarca el Proyecto Texcoco.

De estas últimas, destaca por su relevancia la construcción del lago más importante del proyecto, el cual pudo realizarse, gracias a que hubo un apoyo presupuestal adecuado y la disponibilidad de recursos técnicos necesarios. Es así que en 1983 se termina completamente el Lago Dr. Nabor Carrillo, incluyendo el bordo perimetral que lo circunda. En ese mismo año se inició su llenado con las aportaciones de los ríos del oriente y con los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Actualmente, está considerado como uno de los lagos artificiales más grandes de la República Mexicana, es 50 veces mayor que el lago de Chapultepec. Debido a esto, el ecosistema regional ha mejorado lo suficiente como para ser un amortiguador del clima extremo de la región y el único refugio importante dentro del Valle, para las aves migratorias que viajan hacia el sur desde Alaska, Canadá y los Estados Unidos.

El aprovechamiento del lago en usos agrícolas será también de suma importancia, habiéndose construido las obras complementarias para enlazar las aguas almacenadas hacia las zonas de intercanbio.

La unidad de riego San Bernardino corresponde a la primera etapa de este aprovechamiento, que contempla el intercambio de agua subterránea usada para fines agrícolas, por agua residual tratada. De acuerdo a los convenios establecidos, se construyó la infraestructura básica de conducción de aguas tratadas y pluviales, quedando pendientes los sistemas de distribución y drenaje a nivel parcelario.

El procedimiento constructivo del lago, considero necesaria la instalación de instrumentos, para poder medir los movimientos presentados en la obra durante su construcción, así como del bordo perimetral que lo circunda. También se colocaron bancos de nivel y testigos para verificar los hundimientos que se suscitaran.

7.2 Instrumentación

Con el objeto de observar y controlar el comportamiento del método de construcción, se instaló la instrumentación necesaria consistente en: Bancos de nivel superficial, bancos de nivel profundo, deformímetros, inclinómetros, y piezómetros abiertos y neumáticos (Rodríguez, 1982) (fig. 25). Además, fue planeada y colocada con el fin de evaluar la magnitud y evolución de los siguientes factores:

- a) Evolución Piezométrica.
- b) Hundimientos Superficiales.
- c) Enjutamiento de las Formaciones Arcillosas Compresibles.
- d) Desplazamientos Horizontales.

7.3 Evolución Piezométrica

Estas mediciones sirven para determinar la influencia de bombeo en el estado de presiones de la masa del subsuelo, a fin de conocer la evolución de éstas y su relación con los hundimientos generados. Dentro del área del Lago Nabor Carrillo, fueron instaladas nueve estaciones piezométricas (fig. 25).

En cada estación se instaló un piezómetro abierto en la Cepa Dura (fig. 26), otro en los Depósitos Profundos permeables y además, en aquellas estaciones donde se detectó la capa permeable que se ubica entre los 18 y 22 m. de profundidad, se colocó un piezómetro adicional. Se instaló también en cada estación, un tubo ranurado en toda su longitud a 12 m de profundidad para determinar el nivel de aguas freáticas.

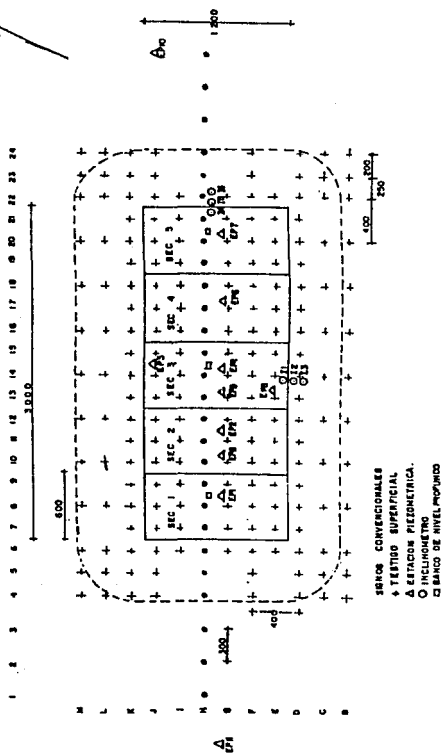


FIG. 25 PLANTA DE LOCALIZACION DE INSTRUMENTOS (R+I. 29)

ESC: 1 : 25 000 ACT EN METROS

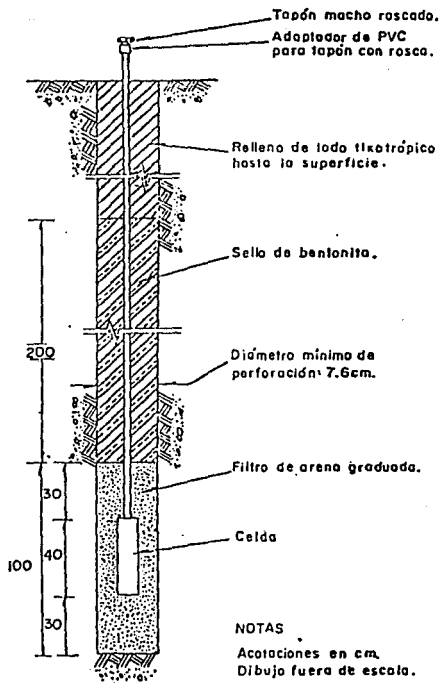


FIG. 26. PIEZÓMETRO ABIERTO.

7.4 Hundimientos Superficiales

La determinación de la magnitud y evolución de los hundimientos superficiales permitió conocer el volumen hundido y el rendimiento del sistema constructivo. Se define el hundimiento de bombeo como la relación entre el volumen hundido y el volumen de agua extraído por bombeo.

Para este fin se instalaron 241 testigos de concreto simple, ligados "in situ" y distribuidos en una cuadrícula con repetición de 20 m en x y y , como se puede ver en la figura 27.

Las observaciones se realizaron periódicamente y se referencian a puntos localizados cerca del camino Peñón-Tenocco, los cuales están referenciados a su vez al Banco de Nivel de la Estación Hidrográfica de la Cuenca del valle de México, instalado en el cerro del Peñón de los Baños, fuera de la influencia del hundimiento provocado por la formación del lago (fig. 27).

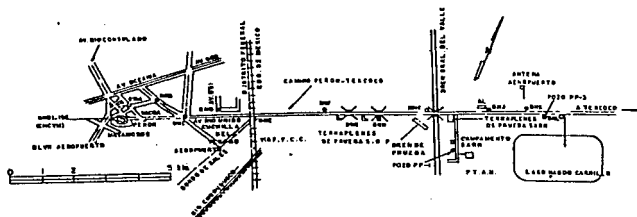


FIG. 27 LOCALIZACIÓN DE BANCOS DE NIVEL EN EL CAMINO PEÑÓN-TENOCO (Ref. 30)

7.5 Enjambamiento de las Formaciones Arcillosas Compresibles

Es de suma importancia, poder conocer la magnitud y evolución de la deformación por consolidación de los dos estratos arcillosos compresibles, situados entre la superficie y el horizonte superior de los depósitos lacustres, con el fin de establecer su contribución en los hundimientos totales.

Para poder llevar a cabo lo anterior, se instalaron tres estaciones de bancos profundos. Cada banco consiste de un tubo rígido que se instaló desde la superficie hasta la capa resistente. Mediante nivelaciones de su extremo superior, fue posible conocer el hundimiento del punto de apoyo. Cada estación estaba formada por dos bancos profundos y uno superficial. Los bancos profundos quedaban apoyados uno en la Capa Dura y otro en los Depósitos Profundos. Para calcular el asentamiento total y el parcial en cada una de las formaciones se instaló junto a ellos un banco superficial.

7.6 Desplazamientos Horizontales

Para determinar los desplazamientos horizontales producidos en el área de hundimiento y alrededor de la misma se instalaron dos estaciones de inclinómetros, constituidas cada una por tres aparatos llevados hasta los Depósitos Profundos, (60 m) (fig. 26).

7.7 Asentamientos Observados

De acuerdo con las observaciones realizadas, se registró que los asentamientos aumentaron con el tiempo (fig. 19) y que los hundimientos fueron mayores en las secciones III, IV y V del lago. Las variaciones que se presentan en los perfiles de asentamiento, son consecuencia principalmente de la aportación de la recarga natural de la parte oriente.

En la figura 20, se muestran las curvas del volumen de agua extraída del subsuelo y del volumen generado por hundimiento. Se presentan además en la figura 21, los histogramas del mismo suceso contra tiempo, como se puede ver, hay una diferencia notable debido a que el hundimiento no sucedió como se esperaba, ya que el rendimiento del bombeo fue disminuyendo con el tiempo. El volumen de almacenamiento generado hasta Diciembre de 1970, por ejemplo, era de $11.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ aproximadamente, y la extracción del agua del subsuelo era de $45.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, con lo cual se obtenía un rendimiento aproximado del 23% y mostraba una clara tendencia a disminuir con el tiempo (fig. 32).

La evolución de la compresión de las Formaciones Arcillosas Superior e Inferior, se obtuvo de los bancos de nivel colocados en la zona.

Cabe señalar que la Formación Arcillosa Inferior es la que más contribuyó al hundimiento total por estar drenada en sus dos frentes (la Capa Dura y los Depósitos Profundos), las cuales presentaron abatimientos piezométricos medios de 15 y 30 m respectivamente, en cambio, la Formación Arcillosa Superior está drenada principalmente por su frontera inferior.

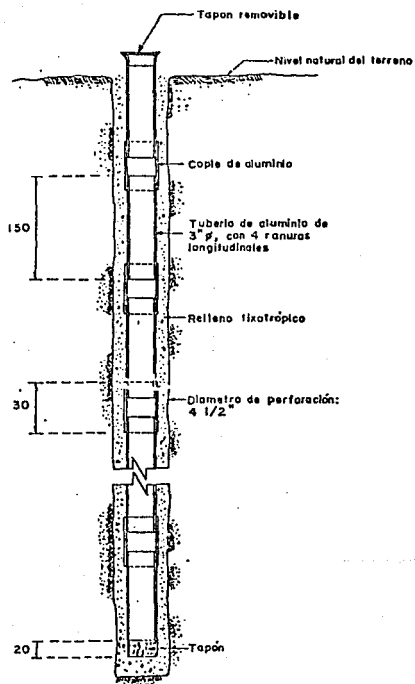


FIG. 28 INCLINOMETRO

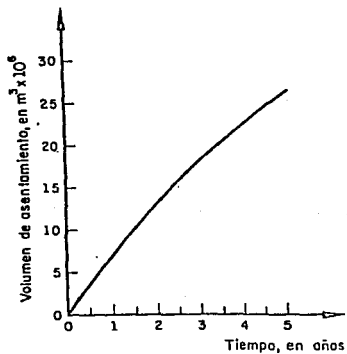
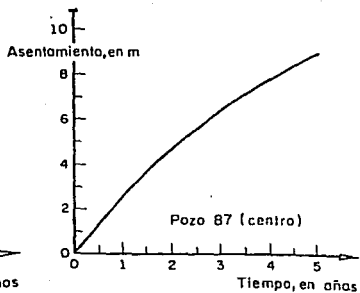
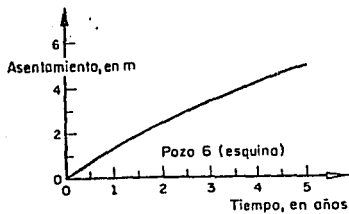


FIG. 20 ÁSENTAMIENTOS ESTIMADOS EN LA CAPA DURA DEBIDOS AL BOMBEO (ref. 2)

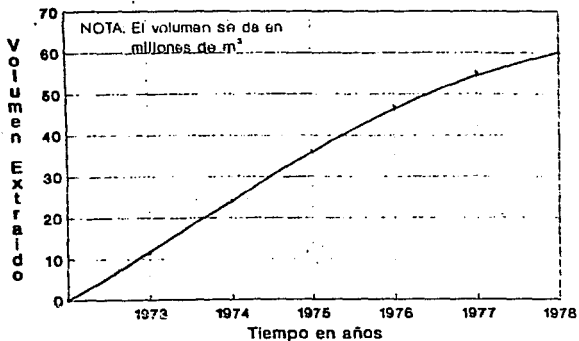
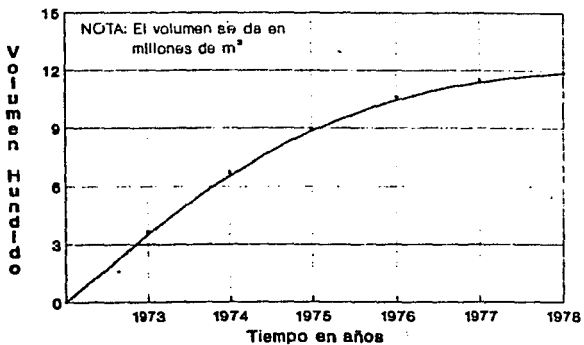


FIG. 90 CURVAS DEL VOLUMEN DE AGUA ENTRAIDA Y DE ALMACENAMIENTO LOGRADO CON EL TIEMPO

FIG. 21 INDICADORES DE LOS VOLÚMENES ACUMULADOS DE AGUA
ENTRADA Y DE ALMACENAMIENTOS LOGRADOS

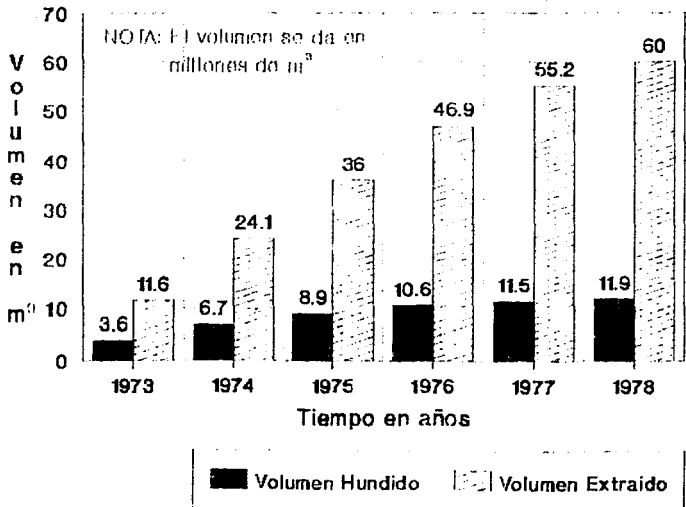
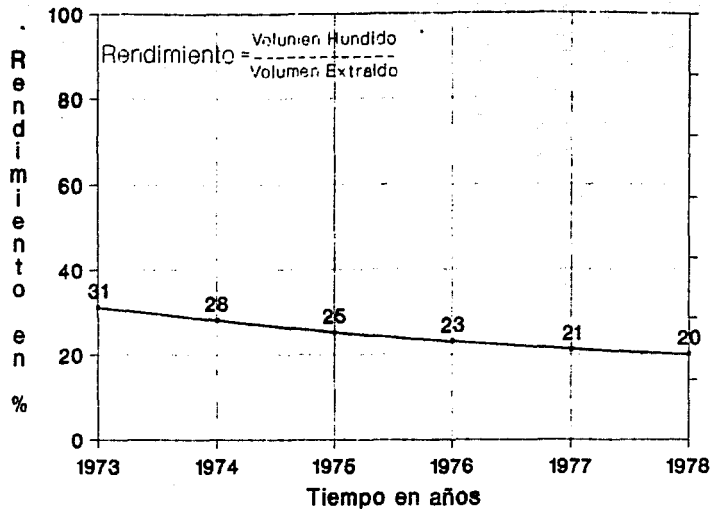


FIG. 32 CURVA DE RENDIMIENTO CONTRA TIEMPO



8. BORDO DR. NABOR CARRILLO

8.1 Diseño

En la formación del lago Nabor Carrillo se había logrado hasta 1978, una depresión que permitía el almacenamiento de 11.9 millones de metros cúbicos hasta el nivel del terreno natural, lo cual era bastante inferior a la capacidad proyectada (36 millones de m³).

Los hundimientos generados por el bombeo en los últimos seis meses habían sido muy pequeños, acusando una reducción sustancial en la eficiencia del método constructivo, por lo que se consideraba necesario rehabilitar el equipo y construir pozos nuevos si se quería seguir trabajando en la formación del lago con el mismo método; sin embargo, hacer esto requería de un tiempo excesivo (5.5 años), y en consecuencia se retrasarían los beneficios que produjera el riego de 4900 ha, la protección del acuífero de Texcoco mediante su aprovechamiento más racional y el mejoramiento del ambiente en la zona.

Por otra parte, la planta de tratamiento de aguas residuales entraría en servicio en 1979, y era indispensable contar con el lago para poder almacenar 1 m³/s de agua tratada que produciría la planta.

Por todo lo anterior, se llegó a la conclusión de que era necesario acelerar de alguna forma los trabajos para disponer de la capacidad de almacenamiento del lago. Se propusieron varias alternativas y se realizaron los estudios requeridos para escoger el más favorable.

Posteriormente, se decidió ampliar el área de embalse para lograr la capacidad faltante mediante la construcción de un bordo perimetral, el cual tiene las siguientes características de diseño: 15.20 m de base, 2.70 m de altura promedio, 4.0 m de corona, talud interior 2:1, talud exterior 1.5:1 y una longitud de 11778 m.

Con la construcción de este bordo, se pretendía lograr una capacidad de almacenamiento de 36 millones de metros cúbicos en un tiempo no mayor de un año. Además se consideraba que previo tratamiento de impermeabilización del fondo del lago, al llenarse éste se produciría un hundimiento adicional por sobrecarga, que se traduciría en 6 millones de metros cúbicos más de capacidad de almacenamiento. Sin embargo, esto no ha sucedido, ya que el subsuelo no se comportó como se esperaba.

8.2 Características del Subsuelo

Se realizaron estudios del subsuelo en la zona, con el fin de poder calcular la estabilidad de los taludes, así como los asentamientos del fondo. Para esto, se hizo un sondeo continuo inalterado y cuatro de penetración estándar, para poder tener información detallada de la estratigrafía y de las propiedades índice de la masa de suelo.

La profundidad de los sondeos de penetración estándar, varió de la superficie a 80 o 150 m.

Durante la ejecución de los sondeos, se obtuvieron muestras con penetrómetro estándar de 60 cm de longitud, 5 cm de diámetro exterior y 3.5 cm de diámetro interior, hincado dinámicamente con un martinete de 63.5 kg de peso y 75 cm de altura de caída libre. En la figura 33 se muestra un perfil estratigráfico, que corresponde al sondeo inalterado y las características encontradas por capa se reportan en el cuadro VI, además, en el cuadro VII se presenta un resumen de las características de compresibilidad del mismo sondeo.

Todas las muestras extraídas fueron clasificadas en el laboratorio manual y visualmente de acuerdo al SUCS, y se les determinó el contenido natural de agua. Además a las muestras típicas, se les determinaron sus límites de consistencia líquido y plástico, composición granulométrica por mallas, porcentaje de partículas finas y densidad de sólidos.

Cuadro VI. Valores Medios de las Propiedades Índice y Mecánicas encontradas en el sondeo inalterado

Capa	Profundidad, m de		w %	Ss	e	γ_M t/m ³	γ_{su} kg/cm ²
FS	0.00	0.40	123.9	-	-	-	-
FAS	0.40	31.70	360.2	2.41	3.65	1.18	0.16
CI	31.70	32.80	73.6	2.44	1.72	1.53	0.53
FAI	32.80	48.80	221.9	2.39	3.43	1.20	0.27
DF	48.80	-	45.9	-	-	-	-

FS = Formación Superficial Superior
 FAS = Formación Arcillosa Superior
 CI = Capa Iura
 FAI = Formación Arcillosa Inferior
 DF = Depósitos Profundos

Cuadro VII. Características de Compresibilidad

Profundidad (m)	e_0	e_1	w_1	Coef. de Compresibilidad (cm^2/kg)	Presión para e_{max} (kg/cm^2)	Intervalo de preconsolidación (kg/cm^2)
2.33	2.39	10.25	423.8	2.4	0.34	-
3.28	2.28	10.14	457.8	7.0	0.51	0.51-0.57
11.78	2.24	10.45	467.5	7.4	0.54	0.52-0.57
19.69	2.42	10.30	423.7	4.2	0.60	0.51-0.56
25.13	2.30	10.60	442.2	4.0	0.65	0.55-0.61
29.63	2.41	10.66	410.0	2.9	0.75	0.74-0.86
34.70	2.27	11.19	499.2	3.4	1.27	0.95-1.08
39.81	2.28	8.20	268.9	1.2	1.90	1.40-1.65
42.83	2.35	10.10	431.1	2.4	1.95	1.15-1.32
46.98	2.34	5.01	215.2	0.8	2.50	1.80-2.15

8.3 Análisis de Asentamientos

Para llevar a cabo el análisis de asentamientos, se revisaron cinco secciones a lo largo del bordo, reportándose únicamente la más desfavorable. Los puntos analizados fueron bajo el pie, al hombro de ambos taludes, bajo el centro de la corona, para esto se utilizó el método de J. O. Osterberg.

Para obtener las características de la consolidación de las arcillas, fue necesario realizar pruebas de consolidación unidimensional en especímenes representativos de suelo. Con los resultados obtenidos, se calculó la magnitud de los asentamientos teóricos del bordo. En el cuadro VIII se presentan los asentamientos al centro del bordo y hasta una profundidad de 27.00 m.

Cuadro VIII. Cálculos de Asentamientos

Prof. de la mtra.	Espesor (m)	P (t/m^2)	e_0	P_1 (t/m^2)	e_1	s	$s/(1-s)$	n (cm)
3.33	4.5	1.6	9.9	6.2	6.60	1.35	0.123	55.48
3.28	4.0	2.4	9.8	5.5	6.78	1.02	0.094	37.78
11.78	10.0	3.0	6.2	5.3	6.10	0.15	0.021	20.60
19.69	3.5	4.1	5.7	5.9	5.25	0.42	0.042	14.70
25.13	5.0	4.3	3.7	6.2	5.30	0.40	0.037	10.65

Total: 27.0

 $\sum n = 1.47$

De acuerdo con el análisis de consolidación efectuado para un estrato de 32 # drenado por ambos lados y con las características de diseño del bordo, se obtuvo que $t_{50} = 49$ años y $t_{100} = 210$ años. Además, se hizo la separación en estratos de 4 y 13 metros y se obtuvo para la Formación Arcillosa Superior, un asentamiento de 50 cm para un tiempo de cinco años.

8.4 Análisis de Estabilidad

Esto se realizó con el fin de garantizar la seguridad contra deslizamiento, contra la falla por tracción.

Considerando que el bordo está desplazado sobre arcillas blandas saturadas, se determinó que la condición más desfavorable se presenta al final del periodo de construcción ya que en esta etapa se presenta el mayor esfuerzo cortante en la masa de suelo de cimentación, además, en ese momento la resistencia del suelo es menor, después de esta condición, la resistencia aumenta por consolidación.

Al término de la construcción, la resistencia a lo largo de la superficie de falla se mantiene constante o disminuye al aumentar los esfuerzos intersticiales, debido a que no se ha presentado una consolidación apreciable.

Una vez terminada la construcción del bordo, se inició con mayor velocidad la consolidación del subsuelo, produciéndose un incremento en la resistencia y aumentando la estabilidad de la estructura, al incrementarse el momento resistente.

De lo anterior y haciendo un análisis a corto plazo, se encontró que el factor de seguridad (F.S.) mínimo es de 1.30 para estructuras con talud de 2:1 interior y de 1.01 exterior, respectivamente (Cuadro IX y fig. 34).

Cuadro IX. Obtención del factor de seguridad mínimo.

Cx	No. de Circuitos	F.S.
c1	1	1.81
c3	3	1.73
c9	9	1.75
c1	1	1.33
c3	3	1.81
c4	4	1.35
c5	5	1.30
c6	6	1.33
c7	7	1.42

Cx = Centro del Círculo Analizado

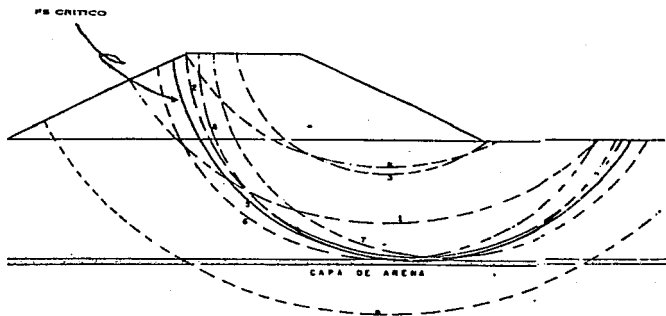


FIG. 34 RESUMEN DEL ANALISIS DE ESTABILIDAD (RW. 31)

8.5 Construcción

La construcción del bordo perimetral al lago Dr. Haber Carrillo, corresponde a la segunda etapa constructiva del mismo, iniciada el 30 de agosto de 1977, con el fin de lograr la capacidad establecida en el proyecto de 36 millones de metros cúbicos.

El proceso constructivo del bordo requirió de dos fases, en la primera se realizó inicialmente la limpieza, trazo y nivelación de la superficie de carpante, posteriormente vino la excavación, la colocación y compactación al 90% de su compactación relativa de filtros horizontales y finalmente la construcción del bordo hasta un metro de altura, compactado al 95% de la prueba proctor S.A.R.M. con un contenido de agua igual al óptimo + 2%, con el objeto de que el bordo se comportara en forma dúctil. El espesor de las capas en estado suelto fue menor de 30 cm. Por último se efectuó una excavación en el bordo para colocar el filtro vertical; el material producto de esta excavación se utilizó en la siguiente etapa (fig. 35).

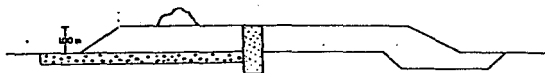


FIG. 35. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO. PRIMERA FASE.

En la segunda fase se comenzó con una escarificación de la parte superior del bordo, con el fin de optimizar la liga de los materiales impermeables colocados hasta la altura de diseño. Se procedió después a excavar en la parte central del bordo para construir la segunda parte del filtro vertical; se siguió con la colocación del material impermeable en la corona, a la cual se le dejó una pendiente del 5% hacia aguas adentro. Se concluyó con la colocación de un geotextil termosoldado de polipropileno marca Tyvar, con permeabilidad semejante a la de una araña media; sobre éste se llevó a cabo la construcción de un filtro de grava-arena bien graduada, compactándola al 90% de su compactación relativa, sobre la cual se colocó un enrocamiento en el talud interior. El talud exterior se estabilizó con el objeto de prevenir la erosión del bordo (fig. 36).

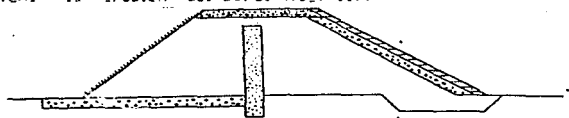


FIG. 36. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO. SEGUNDA FASE.

8.6 Red de Flujo

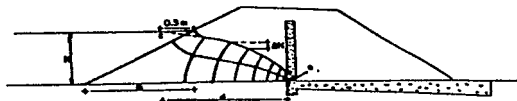
Destaca en la sección tipo, el filtro vertical (arena), que se encuentra conectado a un sistema de filtros horizontales (grava), alojados en la cimentación, con una separación de 20 m formados por grava bien graduada con menos del 5% de finos, los cuales van envueltos en un textil filtrante de fibra sintética (bajalombra), para evitar su contaminación con el material arcilloso de la cimentación.

El filtro vertical tiene como función principal actuar como material autosealante de grietas transversales, por lo cual se colocó con una CR menor o igual a 90°, ya que, en caso de que las grietas se presentaran por efecto de los hundimientos diferenciales, las partículas del filtro podrían desplazarse para obturarlas parcialmente.

Además, este sistema de filtros verticales intercepta el agua que circula a través del bordo y se conduce por los drenes horizontales, con lo que se reduce el riesgo de tubificación en la estructura, al mismo tiempo que la mitad del bordo aguas afuera se mantiene seca por la forma en que se presenta la red de flujo (fig. 37).

El análisis de flujo de agua a través del bordo, se calculó empleando el método de Casagrande, con el propósito de conocer el gasto por filtración, la influencia que el flujo ejerciera en la estabilidad de la estructura y la posibilidad de que el agua produjera arrastre de sólidos.

De acuerdo con el análisis realizado se obtuvo un gasto $Q=0.064 \text{ m}^3/\text{día}$ (64 l/día). Asimismo el factor de seguridad contra tubificación, considerando una descarga libre, fue de $F_{\text{stub}}=1.5$. Tomando en cuenta que en este caso la descarga es sobre el filtro vertical, no existe la posibilidad de arrastre de las partículas del suelo. Además el geotextil de polipropileno termosoldado (Typar), que cubre el talud interior, evita que el material impermeable sea arrastrado al invertirse el flujo durante el vaciado.



$$Q = \frac{1}{2} (K_1 + K_2) \cdot H \cdot L$$

$$\begin{aligned} K_1 &= 2.3 \text{ m} \\ K_2 &= 0.71 \text{ m} \\ H &= 0.34 \text{ m} \\ L &= 0.78 \text{ m} \end{aligned}$$

FIG. 37. RED DE FLUJO (Ref. 31)

Cabe señalar, que debido a la premura con que tenía que ponerse en operación el Lago Dr. Nabor Carrillo, no se pudo colocar el filtro vertical en todo el bordo, así como tampoco el geotextil Typar; sin embargo, se revisan periódicamente todas las secciones para ver que trabajen correctamente y se ha registrado, que en las zonas sin geotextil se presentan erosiones ligeras por efecto del oleaje, que desestabilizan la chapa de enrocamiento.

El material impermeable utilizado para la construcción del bordo, fue extraído de los bancos de préstamo que se localizan alrededor de la zona del ex-lago de Texcoco. En el laboratorio de control de calidad de la Comisión del Lago de Texcoco, S.A.R.H., se determinó el banco más adecuado, vigilando muy de cerca el cumplimiento de las especificaciones que debía cubrir el material.

En el Cuadro X se presentan cinco bancos de préstamo ensayados y las características del material impermeable con que se construyó la estructura.

Cuadro XI. Material empleado en la construcción del bordo.

Tipo de material	Banco	arena %	Finos %	L L %	I P %	SUCS	unac. %	Ss	γ_{max} kg/m ³	Proctor moist %																																																																				
Toba	Chimalhuacán I	49.44	50.56	32.2	11.8	CL	6.7	2.70	1495	22.5																																																																				
		47.77	52.21	31.2	11.2						Toba	La Magdalena 2	35.70	64.20	33.3	10.9	CL	17.0	2.68	1410	26.0	35.00	65.00	33.7	12.1	Toba	La Magdalena Parte Sup. 3	34.60	65.30	32.2	6.4	ML	12.4	2.64	1495	24.4	44.30	55.20	32.8	6.5	Toba	La Magdalena Parte Inf. 3	40.20	59.70	39.3	12.8	ML	18.7	2.60	1360	30.5	13.60	86.40	39.2	10.5	Toba	Chicoloapan 4	28.52	71.84	64.0	19.6	MH	34.2	2.82	1240	39.5	32.72	67.28	64.0	21.3	Toba	huercula 5	55.20	44.70	32.5	9.5	ML-CL	6.3
Toba	La Magdalena 2	35.70	64.20	33.3	10.9	CL	17.0	2.68	1410	26.0																																																																				
		35.00	65.00	33.7	12.1						Toba	La Magdalena Parte Sup. 3	34.60	65.30	32.2	6.4	ML	12.4	2.64	1495	24.4	44.30	55.20	32.8	6.5	Toba	La Magdalena Parte Inf. 3	40.20	59.70	39.3	12.8	ML	18.7	2.60	1360	30.5	13.60	86.40	39.2	10.5	Toba	Chicoloapan 4	28.52	71.84	64.0	19.6	MH	34.2	2.82	1240	39.5	32.72	67.28	64.0	21.3	Toba	huercula 5	55.20	44.70	32.5	9.5	ML-CL	6.3	2.64	1570	22.5	52.20	44.70	32.4	10.5								
Toba	La Magdalena Parte Sup. 3	34.60	65.30	32.2	6.4	ML	12.4	2.64	1495	24.4																																																																				
		44.30	55.20	32.8	6.5						Toba	La Magdalena Parte Inf. 3	40.20	59.70	39.3	12.8	ML	18.7	2.60	1360	30.5	13.60	86.40	39.2	10.5	Toba	Chicoloapan 4	28.52	71.84	64.0	19.6	MH	34.2	2.82	1240	39.5	32.72	67.28	64.0	21.3	Toba	huercula 5	55.20	44.70	32.5	9.5	ML-CL	6.3	2.64	1570	22.5	52.20	44.70	32.4	10.5																							
Toba	La Magdalena Parte Inf. 3	40.20	59.70	39.3	12.8	ML	18.7	2.60	1360	30.5																																																																				
		13.60	86.40	39.2	10.5						Toba	Chicoloapan 4	28.52	71.84	64.0	19.6	MH	34.2	2.82	1240	39.5	32.72	67.28	64.0	21.3	Toba	huercula 5	55.20	44.70	32.5	9.5	ML-CL	6.3	2.64	1570	22.5	52.20	44.70	32.4	10.5																																						
Toba	Chicoloapan 4	28.52	71.84	64.0	19.6	MH	34.2	2.82	1240	39.5																																																																				
		32.72	67.28	64.0	21.3						Toba	huercula 5	55.20	44.70	32.5	9.5	ML-CL	6.3	2.64	1570	22.5	52.20	44.70	32.4	10.5																																																					
Toba	huercula 5	55.20	44.70	32.5	9.5	ML-CL	6.3	2.64	1570	22.5																																																																				
		52.20	44.70	32.4	10.5																																																																									

9. COMPORTAMIENTO DEL BORDO DR. NABOR CARRILLO

9.1 Instalación de Secciones Instrumentadas

Cuando se construyó el bordo Dr. Nabor Carrillo, se consideró necesario instalar cinco secciones de control instrumentadas con el fin de observar el comportamiento y evolución de las condiciones de estabilidad y seguridad del bordo. Además de poder prevenir las fallas que pudieran ocurrir en la estructura (Fig. 39).

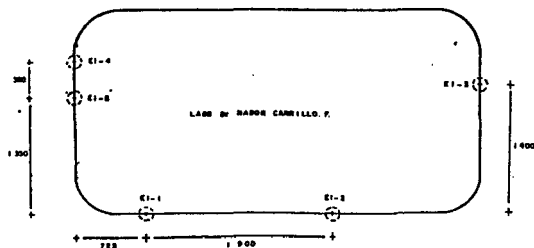


FIG. 39 LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES INSTRUMENTADAS (Ref. 29)

La instrumentación utilizada tiene como objetivos principales los siguientes: la medición de las deformaciones verticales (asentamientos), deformaciones horizontales y la determinación del estado de esfuerzos en el terreno natural (Rodríguez, 1982).

En lo que se refiere a las deformaciones verticales (asentamientos), se utilizó la siguiente instrumentación: testigos superficiales, celdas hidráulicas de asentamiento y bancos de nivel profundo.

Se colocaron 37 testigos superficiales en cada una de las secciones, quedando distribuidos sobre la superficie del bordo y del terreno natural, los cuales son nivelados periódicamente.

Los testigos colocados sobre el terreno natural en las cercanías del bordo nos permiten conocer los asentamientos producidos por la influencia del mismo, hasta una distancia de una vez y media el ancho de desfilante del terraplén.

Las celdas hidráulicas fueron colocadas a un metro de profundidad del terreno natural y se instalaron cinco en cada estación. Quedaron colocadas al centro del bordo, bajo los hombros y centro de cada talud (fig. 39).

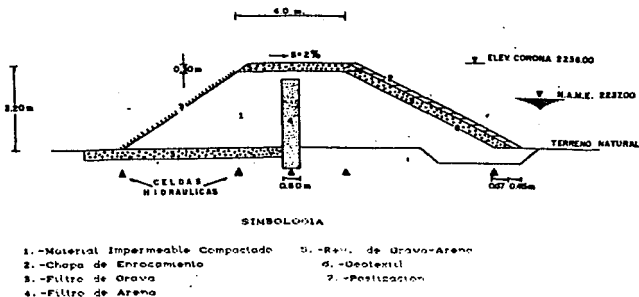


FIG. 39 SECCION TIPO DEL BORDO NABOR CARRILLO (Ref. 31)

El conjunto de bancos de nivel profundo instalados, permite conocer los asentamientos de los diferentes estratos. Se colocaron cuatro bancos profundos en la estación uno, a diferentes profundidades.

En cuanto a las deformaciones horizontales, se instalaron para su medición dos inclinómetros del tipo Slope Indicator, los cuales proporcionan una distribución de desplazamiento horizontal con respecto a la profundidad. Los inclinómetros fueron colocados en las estaciones uno y dos.

Finalmente, para poder determinar el estado de esfuerzos en el interior de la masa de suelo, se miden las presiones del agua intersticial por medio de piezómetros.

Para ello se utilizaron dos tipos de Piezómetros, el abierto o tipo Casagrande y el neumático.

El primero fue colocado en un estrato permeable, a una profundidad de 6.30 m en la estación uno. El segundo tipo fue instalado en materiales de baja permeabilidad, por su corto tiempo de respuesta, quedando instalados tres piezómetros en la estación uno a profundidades de 2.30, 4.40 y 11.9 m.

En la figura 40 se muestra una planta y un perfil de la instalación de los instrumentos.

Durante el proceso de construcción del bordo, el equipo de compactación destruyó dos inclinómetros, tres piezómetros neumáticos, un piezómetro abierto y cuatro bancos de nivel profundos en las secciones I y II, por lo que únicamente se reportan resultados de testigos superficiales (bancos de nivel), y de celdas hidráulicas de asentamiento.

Es importante mencionar que la construcción del bordo se suspendió por dos años del cadenamiento 5+500 al 2+000 aproximadamente, por lo que los asentamientos no corresponden al mismo lapso de tiempo.

9.2 Asentamientos Registrados

En marzo de 1981, se realizó la lectura inicial en las celdas hidráulicas de asentamiento de la sección I. La evolución en el tiempo de los movimientos verticales registrados se reporta en la figura 41, donde se puede observar que los mayores asentamientos alcanzaron un valor de 2.30 m en la celda 4. En un lapso de cuatro años. Los asentamientos máximos en las secciones II, III, IV y V fueron del orden de 1.16, 0.30, 0.50 y 0.80 respectivamente para ese periodo. Cabe mencionar que las celdas en la sección III se colocaron antes de que se iniciara la construcción del terraplén, ya que la construcción en esta zona se inició el 8 de julio de 1983, mientras que en la sección I la construcción se inició el 30 de agosto de 1979 y posteriormente se instalaron los instrumentos. Mediante nivelaciones periódicas se ha determinado la evolución de la construcción del bordo y sus asentamientos a partir del 10 de abril de 1981 (fig. 42).

En la figura 43, se presenta el perfil del centro de la corona del bordo, indicándose algunas estructuras importantes como las descargas de la Planta de Tratamiento de aguas residuales, el Canal Colector, etc. En la elaboración del perfil se usaron datos obtenidos mediante el seccionamiento a cada 200 m y se encuentran referidos al nivel del mar.

El punto fijo que se toma como partida para las nivelaciones, es el banco de la C.H.C.V.M. localizado en el Cerro del Peñón de los Baños.

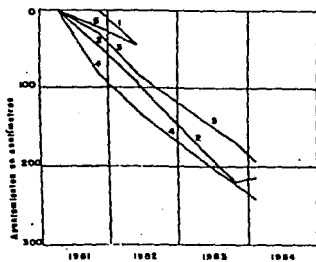


FIG. 41. ASENTAMIENTOS CONTRA TIEMPO. SECCION I.

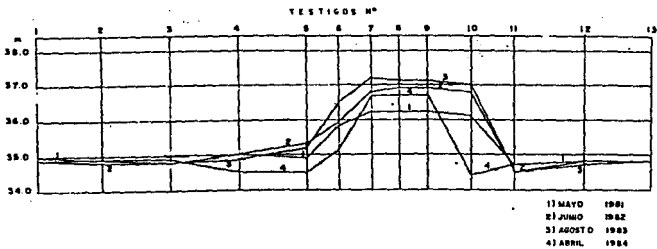


FIG. 42. PERFILES DE ELEVACIONES. SECCION II.

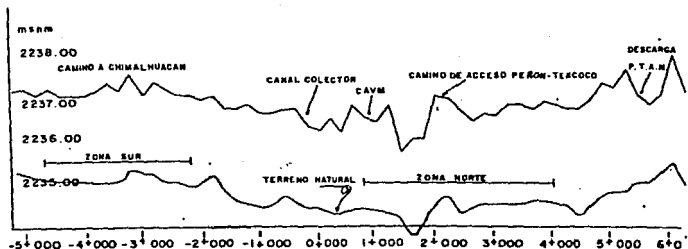


FIG. 48. PERFIL DEL BORDO PERIMETRAL AL LAGO NABOR CARRILLO 1983
(R+I. 31)

Asimismo la nivelación reportada corresponde al mes de noviembre de 1983. Se puede observar también lo accidentado de la rasante, que muestra los hundimientos diferenciales que se presentaron a todo lo largo de la estructura, ya que durante la fase constructiva se alcanzó en general la elevación 2237.5 aproximadamente. Además se puede apreciar que el terreno natural se encuentra a una menor elevación en la zona norte.

El punto más elevado de la corona (2237.95 m.s.n.m.), se localiza cerca de la descarga de la Planta de Tratamiento de aguas residuales en el cadenasamiento 6+000, y el más bajo (2235.70 m.s.n.m.), a un lado del camino de acceso Peñón-Tezcoco, en el cadenasamiento 1+400. Entre el punto más alto y el más bajo, se presentó una diferencia de 2.25 m. Conviene hacer notar que a partir de 1982, Sosa Tezcoco abrió un nuevo campo de pozos cerca del lado norte del Lago, lo que probablemente ha influido en los asentamientos en esa zona, y que el nivel del terreno natural ha descendido.

En la figura 44 se puede observar que los trabajos asentamientos se presentaron en las secciones I y II, lo cual se debió posiblemente a que el terreno ha presentado falla por capacidad de carga, lo que provocó movimientos de 21 cm en un lapso de 189 días en la sección I y de 23 cm en la sección II en 89 días.

Del 18 de agosto de 1961 a 1964, la velocidad de asentamiento disminuyó. En las secciones III, IV y V, los movimientos que se presentaron hasta 1964 son de 35, 52 y 55 cm respectivamente.

La última velocidad registrada de las deformaciones, está comprendida entre 1.6 y 2.3 mm/año. Para las secciones IV y I respectivamente.

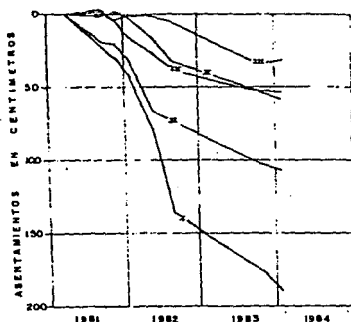


FIG. 44. ASENTAMIENTOS CONTRA TIEMPO. TOMADOS AL CENTRO DE CADA UNA DE LAS CINCO SECCIONES.

9.3 Conclusiones

En conclusión se puede mencionar que los estudios que se realizaron sobre la estratigrafía de la zona, antes de llevar a cabo la construcción del bordo, no fueron utilizados para analizar con ellos los asentamientos ocurridos, esto por suponerse que las distintas velocidades de asentamiento son debidas posiblemente a variaciones locales de las propiedades del subsuelo, a la estratigrafía de la zona y a la diferencia de carga aplicada.

Los mayores asentamientos se presentaron en la parte norte del lago, paralela al camino Peñón-Texcoco, probablemente influenciada por el bombeo que realiza Sosa Texcoco en esa zona.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Los asentamientos en la sección III son menores debido a que en esa zona, los estratos están preconsolidados, de acuerdo con estudios realizados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales y además debido a que la altura del bordo es menor.

Las celdas hidráulicas de asentamiento instaladas en las cinco secciones dieron buenos resultados, por lo que se hace recomendable su utilización en este tipo de obras.

10. BALANCE ECOLOGICO

10.1 Comentarios

La compleja situación ambiental que prevalece actualmente en el Valle de México, así como el grave deterioro ecológico, son consecuencia del desajuste que ha existido entre las acciones humanas y el medio natural.

La acelerada industrialización y la falta de planeación para la urbanización de las grandes ciudades, dieron lugar a una proliferación de asentamientos irregulares, impactando negativamente los ecosistemas existentes.

Desde mediados de siglo, los altos índices de crecimiento demográfico y el acelerado desarrollo del país han repercutido de manera determinante en el deterioro del medio ambiente. Los patrones socioculturales externos que se adoptaron han derivado en una sociedad altamente contaminante, los desechos, muchos de ellos no biodegradables, y la falta de infraestructura para el manejo de éstos, han permitido que la sociedad vea la degradación de la naturaleza como una consecuencia del desarrollo.

Ante la gravedad de la problemática existente, de sus alcances y repercusiones, la nación en general ha demandado de manera urgente, acciones tendientes a corregir y prevenir los asentamientos humanos e industriales que puedan desequilibrar los sistemas ecológicos que aún se conservan.

De ahí la necesidad de implementar programas realmente eficaces para lograr la recuperación de suelos y aguas afectadas por derrames accidentales; el desarrollo de nuevas técnicas de almacenamiento, la planeación de infraestructura y tecnología que frene el deterioro del entorno natural.

Un claro ejemplo del esfuerzo que el gobierno está realizando para cooperar con la recuperación del medio ambiente, es el Proyecto Texcoco.

En este proyecto se contempló la restauración de la subcuenca hidrológica del embalse de Texcoco, la cual quedaba incluida dentro de las zonas más degradadas del valle cuando se iniciaron los trabajos para su recuperación en 1969. Se habían perdido sus aguas, sus rioses y sus quebradas, existían además asentamientos irregulares de la población que vivía en los alrededores, los que aumentaban el deterioro de la atmósfera y generaban graves problemas de salud pública, no sólo para ellos sino también para los habitantes de el área conurbada al oriente del Valle de México.

Sin embargo, el Proyecto del Lago de Texcoco, ha ejecutado trabajos que han ido cambiando radicalmente el área degradada y paulatinamente se rescatan y aprovechan los recursos, agua y suelo de la región, beneficiando con ello sobre todo a la población rural de la zona alta y mejorando el ambiente de las localidades aledañas en el Estado de México y el D.F.

No obstante las restricciones de tipo financiero por las que atraviesa el país, los resultados alcanzados por el Proyecto Texcoco han sido considerables. Las obras llevadas a cabo, han permitido asegurar el funcionamiento del embalse como centro regulador del sistema hidrológico del sureste del valle.

La obra destaca por su importancia e influencia la construcción del Lago Dr. Nabor Carrillo, considerado como uno de los lagos artificiales más grandes de la República Mexicana. A cual cuenta con una capacidad de almacenamiento suficiente para sostener un distrito de riego de 10.0 ha aproximadamente.

10.2 Recuperación del Ecosistema Regional

Actualmente, es evidente el beneficio ambiental, que genera la existencia del Lago Dr. Nabor Carrillo en la zona federal del ex-lago de Texcoco. El paisaje ha cambiado tanto, que de aquellos sucesos pantanosos e insalubres sólo queda el recuerdo. Ahora se puede apreciar el cambio con sólo recorrer la zona, además se refleja la importancia de un trabajo realizado con la intención de mejorar el ecosistema regional.

Desde su terminación, en 1983, este lago almacena y regula las crecientes del sistema hidrológico del noreste de la cuenca, así como los afluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales. El agua de los ríos de oriente ya no irrunda la región, puesto que ya existen obras que encauzan las corrientes hacia el lago, evitando que se dispersen como antiguamente sucedía.

Ahora se puede intercambiar el agua tratada y almacenada en el lago, por el agua potable que se extrae de los acuíferos subterráneos en zonas rurales y comunidades cercanas. Para que el intercambio resulte atractivo a los agricultores, por cada m³ de agua subterránea rescatada se les entregará el doble de agua tratada para que dispongan de riego suficiente en las parcelas, de esta manera se podrán recuperar 4 m³/s de agua potable, la cual será utilizada exclusivamente para fines domésticos, protegiendo racionalmente los acuíferos de la zona. Además, hay que mencionar que con el agua del lago se pueden regar los sembradíos de las comunidades aledañas, con ello se asegura el éxito de los cultivos y se eleva la probabilidad de cosechas abundantes.

En lo que respecta a las tolvaneras, éstas prácticamente han dejado de existir, ya que el lago cubre actualmente una superficie aproximada de 950 ha, que antes eran sólo suelos desecados; susceptibles de ser levantados por los vientos que atraviesan la zona; a esto hay que agregar que los alrededores del lago están pastizados y existen barreras de árboles, lo que impide la formación de las tormentas de polvo que caracterizaban a la región como semidesértica.

Debido a su antigua condición de semidesierto, el clima en la zona era extremo, con temperaturas de hasta 36° C en verano y de -10° C en invierno, esto trajo como consecuencia el escaso desarrollo de las especies vegetales por la falta de agua, ya que la que confluía al centro del lago era presa fácil de la evaporación. Ahora, con la presencia del lago Dr. Nabor Carril, se tiene un excelente amortiguador para evitar los cambios bruscos de temperatura, merced a la extensión de su embalse y a su profundidad, el agua ya no se pierde; además, el fenómeno de la evaporación aumenta la humedad relativa del ambiente para la mejoría y saneamiento de la ecología regional.

Hay que considerar también, que con los trabajos realizados para la corrección de cuencas en la zona alta, se provoca la recarga natural del acuífero subterráneo, los cuales no sólo se han conservado sino que se notan indicios de su recuperación. Además, se tiene un aumento considerable en la humedad del suelo, lo que coadyuva a la producción del mismo, es decir, que con la recuperación de los suelos que circundan el lago, es factible la implantación de especies vegetales y el fácil desarrollo de árboles, los cuales funcionan como cortina contra el viento y a la vez como pulmón para la Ciudad de México y el área metropolitana.

Con la construcción del lago, se cuenta ahora con la infraestructura necesaria para racionalizar y aprovechar el agua que llega a la Zona Federal, además, de que se puede controlar y hacer un uso eficiente de las demasías, así como abatir y controlar la contaminación del agua en todas sus manifestaciones facilitando con esto, la contribución al desarrollo rural integral de las comunidades de la región.

Actualmente, el lago es un habitat adecuado para las aves nativas de la región y para las aves que emigran desde Alaska, Canadá y Estados Unidos. Estas vuelan hacia el sur y paran en México, contabilizando en el invierno del 89 una población de más de 500 mil individuos de 130 especies diferentes. Se favorece también el desarrollo de la vida silvestre en y alrededor del lago; hay peces, víboras, sapos, patos, reses, borregos, etc. todos conviven armónicamente en un medio que les permite sobrevivir, realizar libremente las actividades propias de su especie.

Se ha avanzado en gran medida en el mejoramiento del sistema de drenaje de las zonas aledañas, puesto que gran parte de las obras de desagüe de los municipios conurbados desalojan en la zona federal del lago, de ahí pasan a las plantas de tratamiento de aguas residuales y sus efluentes son regulados y estabilizados por el Lago Dr. Nabor Carrillo evitando con esto el riesgo de inundaciones que antiguamente se le presentaba al oriente de la Ciudad de México.

Esta obra, ha permitido avanzar en la neutralización de los efectos negativos del excesivo crecimiento urbano en el Valle de México. Este lago, en conjunto con las praderas y bosques, zonas agrícolas y refugios silvestres, constituye además, una importante zona de recreo y esparcimiento, lo que permite el desarrollo social y físico de las familias que habitan en sus alrededores. Representa también un gran pulmón para el área metropolitana y las poblaciones aledañas, mejorando el clima y transformando el ambiente regional.

En resumen, la continuidad de acciones similares y los resultados obtenidos aplicados a la solución de problemas semejantes, debe ser ejemplo a seguir en toda la República Mexicana para ayudar a la recuperación del ecosistema mundial.

La actitud de respeto que tomemos ante la naturaleza nos permitirá crecer en forma más racional y madura, otorgando igual prioridad al desarrollo y a la protección y conservación del medio ambiente.

11. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en un campo experimental que se bombeó durante 1967 y 1968. Alberro et al (1974), realizaron un análisis de asentamientos para el área donde fueron colocados los pozos que formarían el lago Dr. Nabor Carrillo.

El método que se adoptó para la construcción del lago consistió en extraer agua de las dos formaciones arcillosas, drenándolas a través de los estratos permeables (la Capa Dura y los Depósitos Profundos).

Del análisis realizado se concluyó, que los asentamientos serían sensiblemente iguales al volumen de agua que se extrajera de las arcillas en la zona de interés. Se supuso entonces, que en un lapso de cinco años en el que se mantuviera constante el bombeo, se lograría una depresión capaz de almacenar un volumen que fluctuaría entre 27 y 37 millones de metros cúbicos; sin embargo, no sucedió de esa manera, ya que sólo se logró formar un vaso de 11.9 millones de metros cúbicos de almacenamiento.

Para explicar este hecho, existen las siguientes razones: a) Cuando se trabajó en el campo de prueba (Lago recreativo), se obtuvieron datos que fueron utilizados posteriormente, para la calibración del modelo matemático-hidráulico aplicado a la formación del lago Nabor Carrillo, por lo mismo se supuso que el rendimiento obtenido en un lapso de 10 meses en el lago experimental, se trasladaría y tendría un comportamiento lineal, lo cual no sucedió; b) Se consideró una estratigrafía ideal, en la que la Capa Dura presentaba un espesor de 2.0 m y de extensión infinita, sin embargo, en el tramo donde sucedieron los menores asentamientos (secciones I y II), la Capa Dura sólo tiene un espesor de 0.5 m según Alberro, (1981) y después crece a los 2.0 m en las secciones III, IV y V. Esto y la existencia de un flujo subterráneo en la sección uno, fue lo que hizo que disminuyeran los asentamientos generados en esa zona; c) Las bombas no trabajaron con la eficiencia requerida debido a el ciclaje que existía en la zona cuando se empezó con el método constructivo utilizado; d) Las bombas se dañaban porque los pozos perdían su verticalidad continuamente, esto era provocado por los movimientos del subsuelo, ya que las bombas de turbina necesitan ejes verticales para trabajar adecuadamente y al presentarse deformaciones en el ademe se producen contactos entre éste y la bomba del pozo, generándose desgates excesivos en las bombas, lo que obligaba a pararlas para desmontarlas y arregiarlas, ocasionando con ello una pérdida de tiempo considerable; y e) Debido a que las bombas no trabajaban a los 60 ciclos especificados, se calentaban y se provocaban fallas mecánicas constantes en el equipo, por lo cual era interrumpida la operación de las mismas.

Tres años después de haberse iniciado el bombeo, se realizó el cambio de ciclaje por la Compañía de Luz y Fuerza, sin embargo, para entonces ya se había perdido hasta un 50% en valores de capacidad de gasto y carga de las bombas en comparación con lo proyectado originalmente. Los efectos del problema de pérdida de verticalidad se lograron reducir mediante el diseño de una junta universal que permitía cierta flexión a la flecha rígida de la bomba. Los pozos que se repusieron por haberse colapsado, se construyeron con un ademe telescópico que permitía al ademe del pozo seguir los movimientos del subsuelo. No obstante, el efecto de los desplazamientos horizontales del subsuelo sobre el ademe no se pudo evitar.

En conclusión, podemos observar que los problemas presentados durante la formación del lago, sucedieron por la inexperiencia existente en trabajos similares. Además, de que las condiciones de energía eléctrica existentes en la zona, no eran las adecuadas para ejecutar el proyecto conforme se había concebido. Hay que agregar también, y esto es de suma importancia, que el subsuelo no se comportó como se esperaba debido a las variaciones de la estratigrafía inicialmente supuesta.

Aún cuando la experiencia adquirida en la Ciudad de México, hacía aplicable cierta forma de trabajo en la Zona Federal del lago, no se contaba con la misma historia de cargas, por lo cual se analizaron las características del subsuelo en el Lago de Texcoco con el fin de obtener un perfil estratigráfico lo más completo posible y así prever el comportamiento del mismo con cierta exactitud. Sin embargo, surgieron problemas que en su momento influyeron decididamente en la obtención de resultados.

Por lo tanto, se hace recomendable para este tipo de trabajos, tener al alcance todos los elementos necesarios para poder llevar a buen término el proyecto establecido, como por ejemplo, repuestos de bombas para la sustitución inmediata de las que fallen, sin tener que interrumpir por eso el bombeo constante de los mantos permeables del subsuelo, y lo que se considera más importante, hacer estudios complementarios para interpretar con más claridad el comportamiento del subsuelo.

Desde que se realizó la formación del lago de prueba con pozos someros, se presentó el problema de bajo rendimiento en el trabajo de las bombas, sin embargo, no se corrigió del todo para su aplicación a la formación del lago Dr. Nabor Carrillo. Además, las condiciones de trabajo no cambiaron en esencia aún cuando la extensión y el tiempo de bombeo para la construcción del nuevo lago lo exigían. Por lo tanto, se supone que una de las principales razones, de no haber logrado el almacenamiento proyectado, aparte de las variaciones estratigráficas, es precisamente el escaso rendimiento presentado por el método constructivo a largo plazo.

Ahora, con la experiencia existente, se puede recomendar el uso del método en casos similares, pero con las adecuaciones correspondientes. Además, se considera indispensable la realización de pruebas de consolidación (tantas como sea posible), de muestras inalteradas provenientes del sitio de interés, para lograr un mejor conocimiento del posible comportamiento del subsuelo.

Se recomienda por lo mismo, realizar constantes análisis de los abatimientos y asentamientos generados en el desarrollo del bombeo, con el fin de orientar a quienes tengan a su cargo el control de la operación y ejecución de los trabajos del proyecto y así garantizar un mayor rendimiento tanto del equipo como de la gente que lo manobra.

Dichas medidas, cumplirían dos objetivos principales: detectar cualquier anomalía o presencia de factores no previstos, y definir posturas tendientes a incrementar la eficiencia de los trabajos a realizar.

La utilización de instrumentos de medición en este tipo de obras se hace indispensable, ya que se obtienen resultados confiables del proceso, sólo que es necesario incrementar la vigilancia sobre los operadores de maquinaria pesada y de camiones, para evitar que estos los destruyan.

A pesar de los problemas suscitados durante la construcción del Lago Dr. Nabor Carrillo, se lograron los objetivos propuestos en el proyecto, por lo cual se considera de suma importancia la adopción de este método en trabajos similares, con la salvedad de que ahora ya se tiene experiencia previa y por lo tanto mayor probabilidad de obtener altos rendimientos.

La construcción del mencionado lago, así como las obras complementarias llevadas a cabo por el Proyecto Texcoco, son ejemplos a seguir en la recuperación del medio ambiente nacional. Los trabajos que se realicen con ese fin, siempre serán bien vistos por la sociedad y tendrán el apoyo que se requiere por parte del gobierno y de los profesionistas que pueden ejecutarlos.

REFERENCIAS.

1. Alberro J., et al, (1974). Análisis de Asentamientos para la Construcción de los Lagos del Plan Texcoco. Instituto de Ingeniería U.N.A.M.
2. Alberro J. y Hanell J., (1981). Development of Artificial Reservoirs by Consolidation. Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, Sweden.
3. Briseño de la Hoz y Tarín V., (1962). Fasco Salado (*Distichlis Spicata*), su Producción, Manejo, Conservación y Utilización. Comisión Lago de Texcoco. Departamento de Investigación Agropecuaria.
4. Comisión Lago de Texcoco, (1978). Lago Texcoco Sur. Departamento de Instrumentación. S.R.H.
5. Carrillo N., (1969). Proyecto Texcoco. Memoria de los Trabajos Realizados y Conclusiones. S.H.C.P. Nacional Financiera.
6. Carrillo N., (1969). El Hundimiento de la Ciudad de México y Proyecto Texcoco. S.H.C.P.
7. COMEC S.A., (1973). Plan Lago de Texcoco. Planos. Anteproyecto Final.
8. COMEC S.A., (1973) Agua Potable. Anteproyecto Final. Memoria de Cálculo.
9. Dirección de Agrología, (1971). Estudio Agrológico Especial del Lago de Texcoco. Tomo I. S.R.H. Dirección General de Grande Irrigación y Control de Ríos.
10. Departamento de Salinidad y Drenaje, (1981). Estudio Agrológico Detallado del Ex-lago de Texcoco. S.A.R.H. Comisión del Lago de Texcoco. Programa Agrícola.
11. Departamento de Instrumentación, (1975). Lago Texcoco Sur. Investigaciones Geohidrológicas en el Area.
12. Dirección de Geotecnia, (1981). Bordo Perimetral del Lago Dr. Nabor Carrillo. Programa de Terminación. Comisión del Lago de Texcoco.
13. Flores T., (1918). El Tequesquite del Lago de Texcoco. Anales del Instituto Geológico de México.
14. GEOTEC S.A., (1973). Lago de Texcoco. Trabajos Friccionales en el Area.

13. GELTSC.S.A.. (1972). Piezómetros Neumáticos Texcoco Sur. Sondaje Continuo Inalterado. SII-TS.
16. Instituto de Ingenieria, U.N.A.M., (1977). Alternativas Posibles para el Desarrollo del Lago de Texcoco. Contrato entre la Comision del Lago de Texcoco y el I. de I.
17. Instituto de Ingenieria, U.N.A.M., (1974). Analisis de Asentamiento y Abatimientos Generados en el Lago de Texcoco Sur por Bombas.
18. Instituto de Ingenieria, U.N.A.M., (1981). Avenidas de Diseño en los Rios al Oriente del Lago de Texcoco. Investigacion realizada para la Comision del Lago de Texcoco.
19. Jaime A., (1988). Geotecnia y Sismicidad en el Valle de Mexico. Instituto de Ingenieria, U.N.A.M.
20. Jaime A., (1987). Caracteristicas Dinamicas de la Arcilla del Valle de Mexico. Tesis Doctoral. U.N.A.M.
21. Juarez B. E. y Rico R. A., (1978). Mecanica de Suelos. Tomos I y II. Editorial Limusa.
22. Murillo F. R. y Garcia A. G., (1979). Ex-lago de Texcoco. El Subsuelo y la Ingenieria de Cimentaciones en el area urbana del Valle de Mexico. S.M.M.S.
23. Morales R., Murillo R. y Hernandez A., (1991). Subsidence of the Former Texcoco Lake. Fourth International Symposium on Land Subsidence, Houston.
24. Murillo R. y Morales R., (1991). El Subsuelo del Ex-lago de Texcoco. IX Congreso Panamericano de Mecanica de Suelos. Viña del Mar, Chile.
25. Murillo R., Morales R. y Hernandez A., (1991). Agrietamiento Lacustre al oriente del Valle de Mexico. Simposio sobre Agrietamientos. (En imprenta).
26. Marsal R. y Mazari M., (1959). El Subsuelo de la Ciudad de Mexico. U.N.A.M.
27. Mosser F., (1956). Los Ciclos de Vulcanismo que formaron la Cuenca de Mexico. XX Congreso Geologico Internacional.
28. Memorias de las Obras del Sistema del Drenaje Profundo de la Ciudad de Mexico, D.D.F., (1976). Tomo I.
29. Rodriguez J. L., (1982). Aspectos Geotecnicos del Bordo Ferimetral al Lago Dr. Nabor Carrillo en el Ex-vaso de Texcoco. Tesis de Licenciatura. E.N.E.F. Aragon. U.N.A.M.

30. Rosenblueth E. y Eleroux J., (1969). Características de Temblores en la Arcilla de la Ciudad de México. Volumen Nabor Carrillo. S.H.C.F. México.

31. S.A.R.H. Unidad de Apoyo Técnico, (1961). Bosques y Fauna en la Zona Federal del Lago.

32. Varios Autores, (1984). Obras Recientes en el Lago de Texcoco. S.M.M.S.

33. Varios Autores, (1989). Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México. S.M.M.S.

34. Varios Autores, (1978). Lago Texcoco Sur. Evolución, del Proceso de Construcción. Alternativas y Recomendaciones. S.R.H. Comisión del Lago de Texcoco.

35. Varios Autores, (1990). El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco años del Sismo. S.M.M.S.