



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO PARA LA EVALUACIÓN DE CAUSAS DE
AGRIETAMIENTO EN DIVERSAS REGIONES DE LA
DELEGACIÓN TLÁHUAC**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A :
ENRIQUE LÓPEZ MIRANDA**

**DIRECTOR DE TESIS:
M. EN I. REGINALDO JOSÉ HERNÁNDEZ ROMERO**



MÉXICO, D. F.

JULIO 2006

**“ Para mi más grande heroína,
que conoció villanos y villanías” .**

**Nunca mejor ser humano en mi vida.....
Y por siempre, en mis sueños, tristezas y alegrías.**

A la memoria de mi madre, Elena Miranda Reyes .

**Para mis hijas, Jeannen y Monserrat,
cuya sonrisa y apoyo incondicional, siempre
lo tengo presente... Pero sobre todo, para Isabel,
a quien debo mil cosas..... y la dicha de ser padre.**

Perdón por mis errores y gracias por su apoyo.

**Gracias por la espera y
comprensión, amada
Universidad y Facultad de
Ingeniería, siempre he remado
cuesta arriba,.....hoy se los
debía.**

**“ESTUDIO PARA LA EVALUACIÓN DE CAUSAS DE AGRIETAMIENTO
EN DIVERSAS REGIONES DE LA DELEGACIÓN TLÁHUAC “.**

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Resumen..... | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 1.1 Antecedentes | 5 |
| 1.2 Geología General..... | 7 |
| 1.2.1 Unidades Geomorfológicas y geología regional..... | 8 |
| 2. HIDROGRAFÍA DE LA REGIÓN..... | 11 |
| 3. COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LA REGIÓN..... | 13 |
| 4. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL ÁREA EN ESTUDIO..... | 14 |
| 4.1 Zonificación geotécnica preliminar..... | 14 |
| 4.1.1 Zona lacustre..... | 14 |
| 4.1.2 Zona de transición..... | 15 |
| 4.1.3 Zona Pétreo..... | 15 |
| 4.2 Reconocimiento general y sitios de anomalías..... | 16 |
| • Col. El Mar. | |
| • Tlaltenco | |
| • Tetelco | |
| • San Juan Iztayopan | |
| • Mixquic. | |
| • Santa Catarina Yecahuizótl. | |
| 5. MECANISMO DE FALLA..... | 25 |
| 5.1 Influencia del bombeo profundo en los agrietamientos superficiales..... | 25 |
| 5.2 Comportamiento geohidrológico..... | 25 |
| 5.3 Características generales del sistema de acuíferos. | 30 |
| 5.4 Consolidación regional..... | 34 |
| 5.5 Mecánica de subsidencia..... | 37 |
| 6. TRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE GRIETAS..... | 39 |
| 6.1 Equipo requerido..... | 39 |
| 6.2 Proporciones de la mezcla..... | 41 |
| 6.3 Procedimiento constructivo..... | 41 |
| 6.4 Trincheras y pantallas perimetrales..... | 41 |
| 6.5 Subexcavaciones..... | 41 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 43 |
| 7.1 Acciones de prevención..... | 44 |
| Figuras..... | 49 |
| Bibliografía..... | 50 |

RESUMEN

El crecimiento urbano de los dos últimos siglos, se desarrolló en la zona sensiblemente plana de los antiguos sedimentos arcillosos que constituyeron el fondo de los lagos, con espesores variables entre 100 y 300 m, que sobreyacen a un sistema de acuíferos regionales ubicados a mayor profundidad, cuyo potencial se encuentra gravemente disminuido actualmente por sobreexplotación y genera hundimientos y efectos de distensión en superficie, reflejado en la aparición de zonas de agrietamiento regional activo.

En estudios realizados desde principios de siglo, se mencionan como causantes del hundimiento de la Ciudad la consolidación de las arcillas, encontrándose en algún periodo valores de asentamientos de hasta 40 cm por año, similar a las mediciones registradas en Chalco, mientras que la velocidad de los hundimientos hacia las orillas del ex lago varía entre 5 y 15 cm por año.

En el presente estudio se abordan aspectos de comportamiento geotécnico en la región de Tláhuac, localizada al Sureste de la Ciudad de México, particularmente en zonas afectadas por agrietamiento regional.

Inicialmente se definen las características geológicas y geohidrológicas generales, así como las características geotécnicas del sitio en estudio, el comportamiento y la evolución de los agrietamientos, a partir de una zonificación geotécnica preliminar, propuesta con base en las características geomorfológicas superficiales y la información recopilada de estos sitios.

Se describen los sitios de anomalías y traza de agrietamientos, asociadas con factores de influencia que originan e inciden sobre éste fenómeno: bombeo profundo, evolución de los acuíferos, características y cantidad de extracción en las zonas afectadas, abatimiento de los niveles piezométricos, efectos sobre las edificaciones y servicios, prácticas locales de construcción y mecanismo de falla, con el reflejo en superficie de los efectos de subsidencia de la región.

Se comentan también algunos tratamientos para la estabilización de grietas, proporciones estudiadas, incidencia en las construcciones e instalaciones localizadas en los sitios propensos de afectación por éste fenómeno.

Se hace una reflexión sobre las políticas de aprovechamiento, extracción y disposición final del agua en el Valle de México, la proliferación de los asentamientos irregulares y la ocupación irracional de sitios potenciales de recarga, con fines de urbanización, en sitios con escasa vigilancia y casi nula aplicación de reglamentos de construcción, con la finalidad de medir sus efectos y consecuencias sobre las construcciones, su impacto en líneas vitales y en el equipamiento urbano.

Se prevé que el abastecimiento de agua para la Cuenca de la Ciudad de México continuará por muchos años dependiendo de los recursos subterráneos, en virtud de que el suministro actual, de alrededor de 65 m³, 40 m³ provienen del subsuelo, por lo que es evidente utilizar este recurso con gran eficiencia y considerar una solución integral para las próximas décadas.

Finalmente, se consideran las causas de origen y estimación del comportamiento futuro de las regiones afectadas por agrietamiento y se proponen medidas de prevención y mitigación de daño, así como los aspectos de revisión y evaluación periódica, para identificar los sitios y edificaciones más vulnerables ante futuros eventos sísmicos, catalogando los sitios con agrietamientos regionales, como un fenómeno de lento impacto, progresivo e irreversible, de mayor incidencia en edificaciones con mala calidad de construcción y materiales con pobre resistencia estructural.

Se hace hincapié en que la renivelación y rigidización de las edificaciones ligeras ubicadas en zonas de agrietamiento regional activo, representan soluciones temporales, adecuadas para resolver deficiencias de comportamiento estructural acumuladas a través de los años, pero no actúan sobre las causas de origen, derivadas del hundimiento regional, debido al abatimiento piezométrico por extracción de agua de los estratos permeables profundos del subsuelo.

Para desarrollar el presente estudio, se realizó el reconocimiento general y se efectuó la inspección del terreno, tomando en cuenta las evidencias superficiales, hundimientos locales, fugas de agua, agrietamientos en zonas de cultivo, en terrenos baldíos, afectación en bardas y construcciones someras, deformación de banquetas y hasta en algunos casos, levantamiento de tumbas y deformación de bóvedas en una iglesia (Tetelco).

1. INTRODUCCIÓN

El área urbana de la Ciudad de México, edificada sobre antiguos lechos lacustres, ha sufrido hundimientos regionales desde la época precortesiana, inicialmente con los periodos de sequía y regresiones del Lago, con la colocación de rellenos para la construcción de pirámides y templos ceremoniales aztecas, cuyo imperio se desarrolló entre 1325 y 1521, en un conjunto de isletas localizadas en medio de lagos, cuyos niveles eran controlados por medio de diques, para separar las aguas dulces de las saladas y para el control de las inundaciones.

Posteriormente, con la construcción de la nueva España y con la finalidad de mitigar las inundaciones, se aceleró la desecación de los lagos, a partir de 1789, con la construcción del inicialmente Socavón y Tajo de Nochistongo, el túnel de Tequisquiac, el gran canal de desagüe, la desviación del Río Cuautitlán y más recientemente, con la construcción de túneles para el emisor central, el tren subterráneo y otras estructuras civiles.

En forma paralela, para cubrir las necesidades del crecimiento demográfico de la Ciudad, en el último siglo se incrementó la explotación del agua subterránea, con un grave desequilibrio entre los volúmenes de extracción e infiltración regional, en un complejo mecanismo cíclico de mayor extracción-mayor incidencia de asentamientos, que modificaron la respuesta dinámica del terreno y de las construcciones.

Con el propósito de disminuir los efectos del hundimiento regional en la Ciudad, a principios de los 80's se transfirió una porción de la explotación subterránea hacia la zona de los ex lagos de Xochimilco y Chalco, trasladándose también el impacto de los asentamientos superficiales de terreno.

Actualmente, en la región de Tláhuac, al igual que en otras zonas de la Ciudad, se detectan fenómenos de agrietamiento, que afectan estructuras ligeras, servicios de drenaje y agua potable, cuyas fugas no son advertidas en principio y favorecen el incremento del fenómeno, hasta generar un asentamiento súbito en superficie.

En éste estudio se resumen las características generales de la localidad, los fenómenos detectados, las causas posibles de origen de los agrietamientos y su estado actual, las condiciones primarias para la rehabilitación de las viviendas y servicios, así como las conclusiones y recomendaciones para la mitigación de sus efectos en las construcciones.

Características de la localidad.-

La Delegación Tláhuac se ubica en la porción Sudoriental de la Ciudad de México. Cuenta con una superficie de 8,534.62 Ha (5.75% del Distrito Federal) y se ubica en la zona sur oriente del Distrito Federal; colinda al norte y noreste con la Delegación Iztapalapa, al oriente con el Municipio Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México; al sur con Milpa Alta, hasta el vértice del Volcán Teuhtli y al suroeste y oeste con Xochimilco.

Formó parte de los lagos de Xochimilco y Chalco, que al secarse originaron una superficie de suelo lacustre. Hacia la colindancia con el Estado de México se encuentra una zona de inundación permanente, llamada " La Ciénaga " de Tláhuac, (fig. 1).

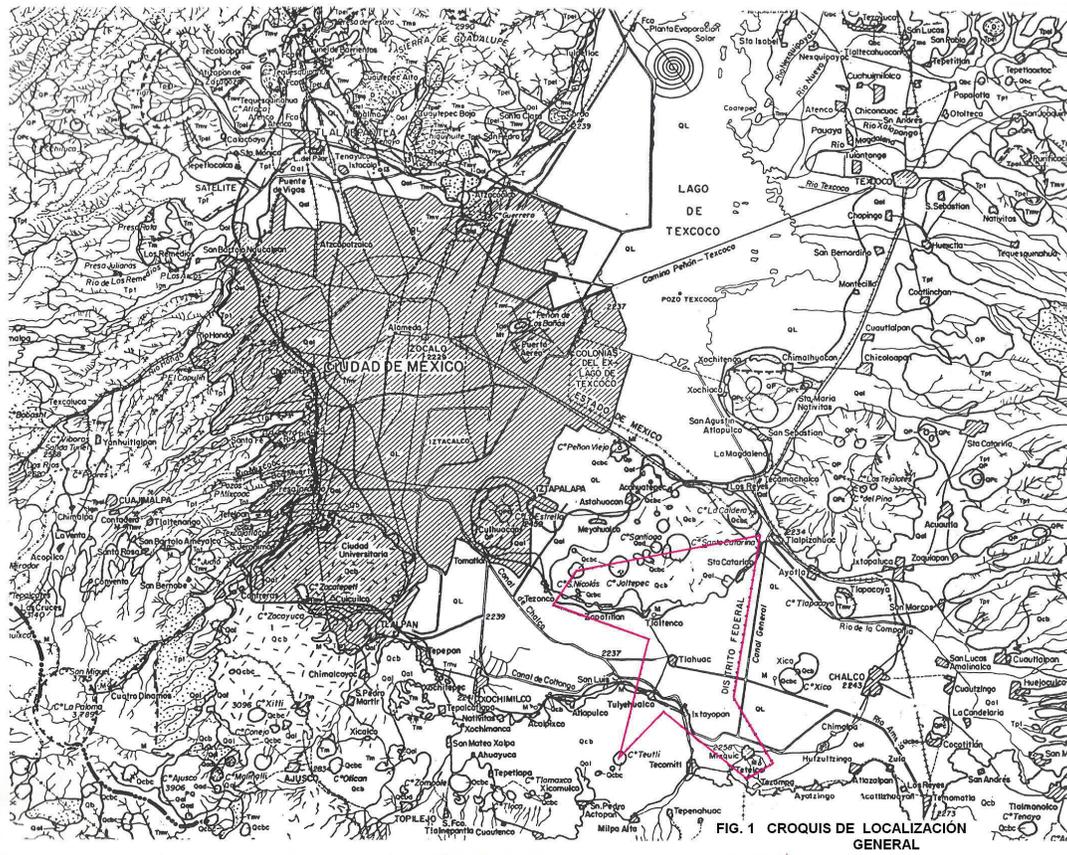


Fig. 1. Croquis de localización general.

Principales Elevaciones. Sus principales elevaciones son: Volcán de Guadalupe, Volcán de Xaltepec; Cerro Tecuautzi y Cerro Tetecón, en la Sierra de Santa Catarina y el Volcán Teuhtli al sur.

Clima. Predomina el clima templado sub-húmedo, con una temperatura media anual de 16°. Las características meteorológicas indican la existencia de temperaturas mínimas promedio de 8.3°, media de 15.7° y máxima de 22.8°; la precipitación pluvial promedio es de 533.8 mm, siendo los meses de Junio y Agosto, en donde se registran las mayores precipitaciones pluviales.

Canales Principales. Dentro de su territorio fluyen cuatro canales: el de Chalco y el Guadalupano, son importantes para la zona de la Delegación y un atractivo de tipo turístico; los otros dos son el Atecuyuac y el Amecameca, adicionalmente existen otros canales más pequeños que configuran el sistema de riego de la zona agrícola.

La Delegación Tláhuac se caracteriza por presentar una gran diversidad de depósitos superficiales; particularmente zonas de antiguos derrames lávicos, hacia las zonas altas, hasta regiones sensiblemente planas, de origen lacustre, conformadas por depósitos arcillosos de alta compresibilidad.

En algunos sitios se identifican secciones en contacto transicional, el cual generalmente es abrupto, con basaltos fracturados, intercalados con arcillas blandas de alta plasticidad, alternados con sedimentos limo arenosos y pié de monte, que se forman en el contacto entre la planicie y los cerros circundantes, cuyas características de espesor y erraticidad, favorecen fenómenos de comportamiento irregular por efectos de subsidencia, presentándose sitios de agrietamiento regional activo, con impacto directo hacia las construcciones y servicios ubicados dentro de la traza de falla.

1.1 Antecedentes

La Ciudad de México, una de las metrópolis más pobladas del mundo, presenta características geomorfológicas particulares, modificadas por el entorno y la extensión de la mancha urbana, cuyo complejo proceso de crecimiento acelerado inicia desde principios del siglo XX y continua hasta nuestros días. Comprende, tan solo para el D.F., aproximadamente 8,700,000 habitantes, a los cuales se integra la población flotante procedente de los municipios vecinos y una migración constante de zonas marginadas, lo que repercute en el comportamiento geotécnico de la región y contribuye al incremento de la vulnerabilidad, por diversos factores.

A lo anterior, se suman las tendencias de crecimiento poblacional por región específica, encontrándose las más altas en las Delegaciones periféricas, (Tláhuac, Xochimilco, Tlalpan y Magdalena Contreras), con tasas superiores al 2% anual (ref. INEGI, censo 2000).

Este crecimiento desordenado redundó en detrimento de las zonas de mayor permeabilidad e infiltración pluvial, de reserva ecológica, forestal, de conservación, etc. y en la ocupación de sitios clasificados de Alto Riesgo por sus características geológicas y geomorfológicas; en zonas de pendientes pronunciadas, de cauces y barrancas, sitios inestables o de rellenos, que favorecen la contaminación del suelo y de los mantos acuíferos subyacentes y en conjunto, disminuyen la calidad de vida de sus habitantes y obligan a la importación de agua potable, procedente de otras cuencas.

Como consecuencia de lo anterior, la Ciudad de México requiere de un caudal de 65 m³/s de agua para satisfacer sus necesidades, de los cuales, 35.4 m³/s son para el D.F. y el resto para la zona conurbada, sin que por otro lado se aproveche el agua que se precipita localmente, cuyo volumen se suma al desalojo de aguas servidas.

Estrechamente ligados, los problemas relacionados con el suministro de agua potable inciden directamente sobre las características y comportamiento geotécnico de la región, ya que la sobreexplotación de los acuíferos de la Subcuenca, ha producido el abatimiento de 10 a 12 m del nivel freático en los últimos 20 años, así como el hundimiento acelerado de la región de suelos blandos, que en promedio presenta valores de 10 cm/año, llegando inclusive a alcanzar 40 cm/año en algunos sitios, entre ellos, secciones contiguas al Peñón del Marqués, al oriente de la Delegación Tláhuac y hacia el Municipio de Chalco, donde el hundimiento registrado fue similar al de la Ciudad de México, de casi 9 metros, en tan solo 35 años de extracción (ref. Boletín No. 10, CNA, DGCOH) y que actualmente presenta zonas deprimidas, con alta posibilidad de inundación.

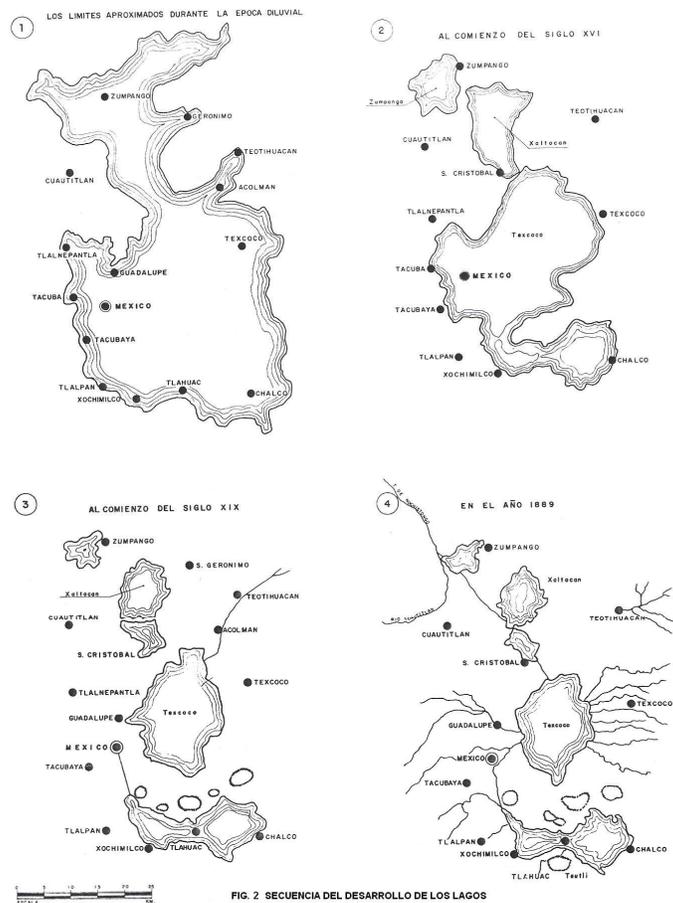
El fenómeno de hundimiento no es nuevo en la zona urbana, se tienen datos publicados por el Ing. Roberto Gayol desde principios de siglo, estimándose valores de 40 cm/año, con tendencia de disminución progresiva hasta los valores actuales, de 10 cm/año en promedio, (ref. Congreso 1996 Morelia, SMMS)cuyo resumen es el siguiente:

- 1898 a 1937.- Se registran hundimientos lineales de 4 cm/año, incrementándose hasta 14 cm/año a finales del mismo periodo.
- 1947 a 1968.- Se registran velocidades de hundimiento de 40 cm/año, disminuyendo gradualmente hasta 10 cm/año.
- 1970 a 2000.- Se presenta una evolución de hundimientos variables entre 7 y 22 cm/año, encontrándose los máximos valores hacia la zona Oriente de la Ciudad, donde coinciden los mayores espesores de arcilla blanda y la batería de pozos profundos de la región.

1.2 -Geología General

La Ciudad de México se localiza dentro de una cuenca endorreica, que se formó al cerrarse el antiguo Valle de México, como resultado de la actividad andesítico-basáltica que edificó la Sierra Chichinautzin al sur de la Ciudad; dicho evento interrumpió el drenaje natural, que corría desde la región de la Sierra de Pachuca hacia la cuenca hidrográfica del Río Amacuzac en el sur, propiciando la formación un sistema de lagos al norte de la Sierra de Chichinautzin y su desecación y azolve paulatino, acompañado por eventos volcánicos cortos durante el Cuaternario, acelerado con el asentamiento poblacional de los Aztecas y la posterior fundación de la Nueva España (fig. 2).

El azolve cubrió discordantemente un terreno de topografía severamente disectada, por lo que tiene una variación notable en su espesor; en términos generales, los espesores aumentan desde el norte hacia el sur, alcanzando en la parte central de la Cuenca unos 200 m, mientras que en el sur es de unos 500 a 600 m. El relleno está formado por material volcánico transportado, interestratificado con tobas y arenas finas que se interdigitan con depósitos lacustres hacia las partes centrales de la Cuenca.



Las manifestaciones volcánicas más trascendentales para el entorno geológico actual, se formaron durante los últimos 700,000 años y consisten en unos 200 conos volcánicos mayores, como Chichinautzin y Tezontepec, además de una veintena de conos en las partes meridionales del vaso de la Cuenca. Estas manifestaciones reflejan la orientación NE-SW del esfuerzo tectónico en la región, estrechamente relacionado con el marco geodinámico de México (Mooser et al, 1996, CFE).

La mayor parte de la zona urbana de la Ciudad de México está edificada sobre la antigua planicie de los depósitos lacustres, mientras que el resto de la misma se encuentra sobre material aluvial, coluvial y antiguos deltas sepultados que conforman la zona de transición, constituido por intercalaciones de arenas, limos y arcillas de consistencia media, entre los depósitos lacustres y lo que propiamente constituye el basamento de los depósitos profundos, mientras que en sus inmediaciones se localizan suelos firmes y materiales pétreos pertenecientes a la Sierras de Chichinautzin, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina, que en conjunto comprenden la denominada Zona de Lomas, según la clasificación geotécnica para el D.F.

1.2.1 Unidades Geomorfológicas y geología regional en la Zona de Tláhuac.

La zona de estudio corresponde a la región sureste de la cuenca de México, dentro de la llamada altiplanicie Neovolcánica; sus límites al suroeste son: las montañas de la Sierra de las Cruces y Zempoala y al sur la Sierra de Chichinautzin, mientras que la parte oriente de la cuenca está limitada por las Sierras Nevada y de Río Frío.

La topografía de la región se caracteriza por una gran extensión sensiblemente plana de origen lacustre, ocasionalmente cubierta por derrames de lava sobrepuestos con numerosos aparatos volcánicos .

Las principales unidades Geomorfológicas son:

Los remanentes de sistemas volcánicos antiguos que afloran en varias localidades aisladas del interior de la cuenca.

Las altas sierras volcánicas terciarias oriental y occidental.

Los abanicos aluviales plio-pleistocénicos que cubren la base de las sierras mencionadas, interestratificadas con capas de lodo y capas de ceniza

El complejo volcánico del Plioceno superior y del Cuaternario, también los aparatos volcánicos juveniles, conos cineríticos y escoriáceos asociados en el complejo o esparcidos en el interior de la cuenca (fig. 3 y 3-A).

Los depósitos lacustres del Cuaternario, que cubren grandes extensiones de la región.

Entre los cerros más importantes de esta zona, destacan el cerro del Peñón (2800 m), Tehuitli (2700 m) y Xico (2350 m), de composición basáltico-andesítica y escoria volcánica.

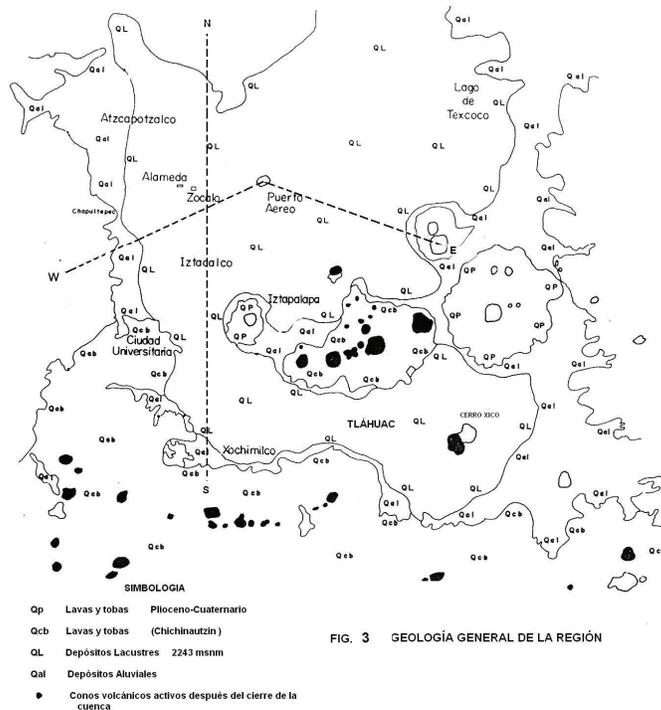
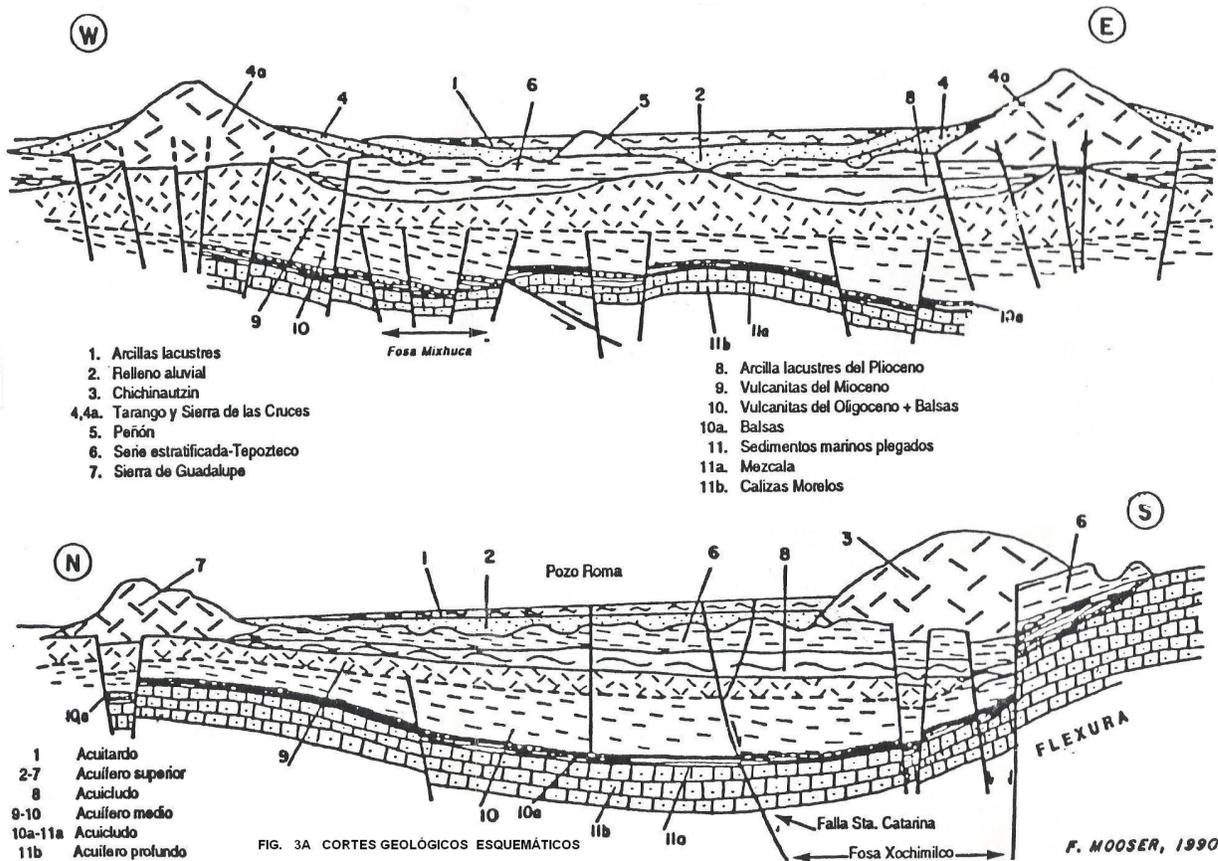


FIG. 3 GEOLOGÍA GENERAL DE LA REGIÓN



2. HIDROGRAFÍA DE LA REGIÓN.

La cuenca de México está subdividida en Subcuencas; la que corresponde a la Subcuenca Sur es la Subcuenca Xochimilco-Tláhuac, desaguan en ella los ríos Ameca, Milpa Alta, San Lucas y San Buenaventura.

El índice de precipitación pluvial anual promedio, supera los 900 mm, por lo que en la parte sur y sureste de la cuenca se encuentran aún manantiales de agua potable que por algún tiempo fueron suministro de la Ciudad de México; en la zona sur, principalmente en la vecindad de las faldas de las montañas, hay áreas de recarga natural de los acuíferos, donde se han identificado algunos pozos noria, con presencia de nivel freático superficial, por efecto de artesianismo (Fuentes brotantes de Tlalpan, parque Huayamilpas y otros sitios aislados).

Desde el punto de vista hidrológico, el extremo oriente del Valle de Tláhuac se puede integrar dentro de la Subcuenca hidrológica de Chalco, por sus características físicas similares. En las partes altas afloran rocas tales como tobas, brechas, aglomerados, etc. todas ellas de composición basáltico-andesítica, cuyo fracturamiento permite buena infiltración hacia los niveles inferiores, constituyéndose en la principal fuente de recarga de los mismos.

Por otro lado, la capa superior de arcilla constituye un sello de confinamiento para el acuífero de la cuenca , debido a su baja permeabilidad (acuitardo) y funciona como un acuífero semi-confinado, que sobreyace a un acuífero confinado hacia la parte central y libre hacia las márgenes.

Este sistema presenta estratificación en la mineralización del agua; el primer paquete contiene agua con mineralización mayor o igual a 1100 mg/l (no apta para consumo humano), en tanto que en el segundo, ésta es de 200-300 mg/l, donde se ubica la batería de pozos en explotación. (Geofísica Internacional, Rodríguez Castillo-González Morán.)

La Subcuenca de Xochimilco-Chalco, se ha venido formando a través de procesos de intemperismo, erosión y acumulación de sedimentos, así como tectonismo, asociado a procesos de volcanismo.

Esta región está representada por un paisaje de conos cineríticos, abanicos volcánicos, laderas, colados de lavas andesíticas y andesítico-basálticas, afectados por erosión reciente, cañadas, valles y planicies lacustres, ésta última constituida por el antiguo Lago de Chalco.

El régimen del flujo subterráneo, a nivel regional, se caracteriza por tener una dirección preferencial N-S hacia la parte norte, y en dirección contraria hacia el Sur, como resultado de las Sierras circundantes, que actúan como zonas preferenciales de recarga del sistema.

Las unidades principales de recarga del acuífero son:

- a) Depósitos lacustres a base de capas arcillosas de 10 a 30 m de espesor, con 25 % de materia orgánica, interestratificadas con arena volcánica, mismas que aumentan su espesor hacia el valle de Chalco, donde presentan espesores mayores a 120 m.
- b) Aluvión de la zona circundante a los cerros, que aumenta de espesor hacia el occidente de la zona lacustre.
- c) Las unidades basálticas identificadas que corresponden a la formación El Pino, Chichinautzin y grupos dacíticos Papayo. En estas zonas la permeabilidad varía entre 10⁻¹ a 1 cm/seg, considerándose por el escaso escurrimiento superficial una muy importante zona de recarga

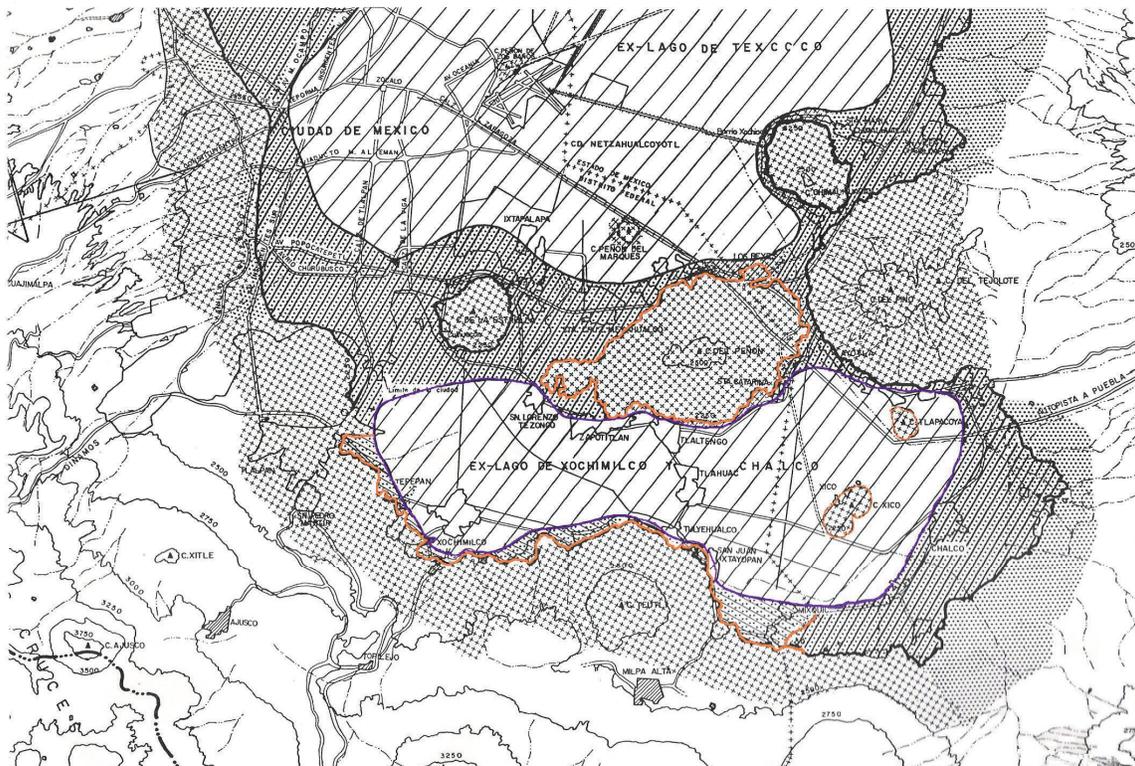
En conclusión, las Sierras que rodean el Vale de México, juegan un papel muy importante en los mecanismos de recarga del acuífero de la región, bajo este esquema, la Sierra Chichinautzin aporta un 40 % de sus volúmenes totales de infiltración hacia la misma; en la Sierra de Las Cruces, el 70 % de sus captaciones circula hacia la Cuenca y el 30 % hacia el Valle de Toluca, mientras que la Sierra Nevada aporta un 50 % hacia la Cuenca y otro 50 % hacia el Valle de Puebla.

4. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL ÁREA EN ESTUDIO

4.1 Zonificación geotécnica preliminar

De acuerdo a la regionalización geotécnica para la Ciudad de México y a la investigación de campo realizada, se puede considerar que la Delegación Tláhuac (fig. 4-A) presenta tres tipos de suelo: a) zona pétreo, b) zona de transición, y c) zona de lago; esta última es el reflejo de la influencia de los antiguos lagos de Chalco y Xochimilco, cuya estratigrafía se ve afectada por la intensa actividad de antiguos conos volcánicos durante los últimos 700, 000 años (Mooser, 1996), lo cual derivó en un proceso de formación y depositación distinto de las arcillas del ex lago de Texcoco, donde actualmente se asienta la Ciudad de México.

FIG. 4-A ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUR DE LA CUENCA



4.1.1 Zona lacustre

Comprende la región central de Tláhuac, que incluye zonas como la Ciénega, Tlaltenco, San Pedro Tláhuac y en general, la zona baja comprendida entre la Sierra Chichinautzin, el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina (fig. 4-A), con elevación promedio de 2240 msnm.

En esta región se detecta superficialmente un estrato de limo de alta plasticidad endurecido por desecación, con espesor variable entre 0.35 y 0.70m, con contenidos de agua entre 15 y 50%, bajo el cual se localiza un potente manto de arcilla y limos blandos de alta plasticidad, con espesor mayor a los 60 m, interestratificados ocasionalmente por estratos de arcilla orgánica y lentes de limo duro.

Una condición similar se presenta hacia la región de Mixquic; no obstante, aquí se identifican intercalaciones de basalto, arena, arcilla y ceniza volcánica, como parte de los depósitos superficiales.

4.1.2 Zona de transición

Algunos de los volcanes de las Sierras de Santa Catarina y Chichinautzin tuvieron actividad hasta épocas muy recientes, encontrándose en algunas zonas al suroeste de estos sitios, una costra de toba superficial de 3.0 m de espesor, subyacida por arcilla de alta compresibilidad, con altos contenidos de agua. Hacia las inmediaciones de San Lorenzo Tezonco se tienen alternancias de basalto, arcilla y arena hasta 180 m de profundidad (con base en la litología de pozos profundos), lo cual permite inferir largos periodos de erosión, arrastre y sedimentación, asociados a los cambios climáticos e intensa actividad volcánica, situación que dio origen a la depositación e intercalación errática de materiales de distinto origen, espesor y comportamiento, que comprenden la frontera entre los derrames pétreos y los depósitos arcillosos blandos, denominada “**zona de transición**”.

En las colonias El Mar, la Conchita y Zapotitlán, comprendidas en esta zona, se encuentra frecuentemente un horizonte de arena limosa fina de color gris oscuro, alternada con estratos de arcilla de alta plasticidad, hasta 8.0 m de profundidad, subyacida por una formación basáltica y horizontes escoriáceos de mala calidad; en éstos sitios, la arcilla desaparece hacia las inmediaciones de los cerros y se registra un mayor espesor de arena, hasta llegar a las formaciones de basalto, donde se detectan inclusive zonas de contacto directo con arcilla de alta compresibilidad, como en las inmediaciones de la Av. La Turba con la Av. Tláhuac, hacia el NE de San Juan Iztayopan, Mixquic y San Antonio Tecómitl, mientras que en la colindancia con la Sierra de Santa Catarina, se reportan espesores de basalto cercanos a 120 m. (Pozo profundo N. 3, Tláhuac, DGCOH, 1994)

4.1.3 Zona Pétreo

En algunas regiones, como San Juan Iztayopan y Tetelco, se localizan afloramientos de basalto, en ocasiones interrumpido por capas de arcilla, tobas o arena volcánica, en forma de islotes, circundados por depósitos arcillosos de origen lacustre con espesor variable, por lo que algunas estructuras civiles se encuentran apoyadas parcialmente en suelo firme en un extremo y también en suelo de alta y mediana compresibilidad.

Hacia las inmediaciones de los cerros Teuhtli, ubicado al sur de la región y la Sierra de Santa Catarina hacia el Norte, la estratigrafía se compone de un estrato de limo y arena de bajo contenido de agua, subyacida por roca basáltica fracturada o fragmentos de basalto y tezontle, denominados “tefra”, donde la problemática de agrietamiento en las edificaciones también obedece a rellenos de mala calidad y vicios constructivos.

Tlaltenco

Ubicado a orillas de la ciénega, antigua región pantanosa, ésta localidad presenta un desnivel variable de 2.5 a 0.5 m hacia ésta última, como resultado en parte de la utilización de rellenos artificiales con diferente espesor, principalmente a ambos lados de la Av. Tláhuac (fig. 6).

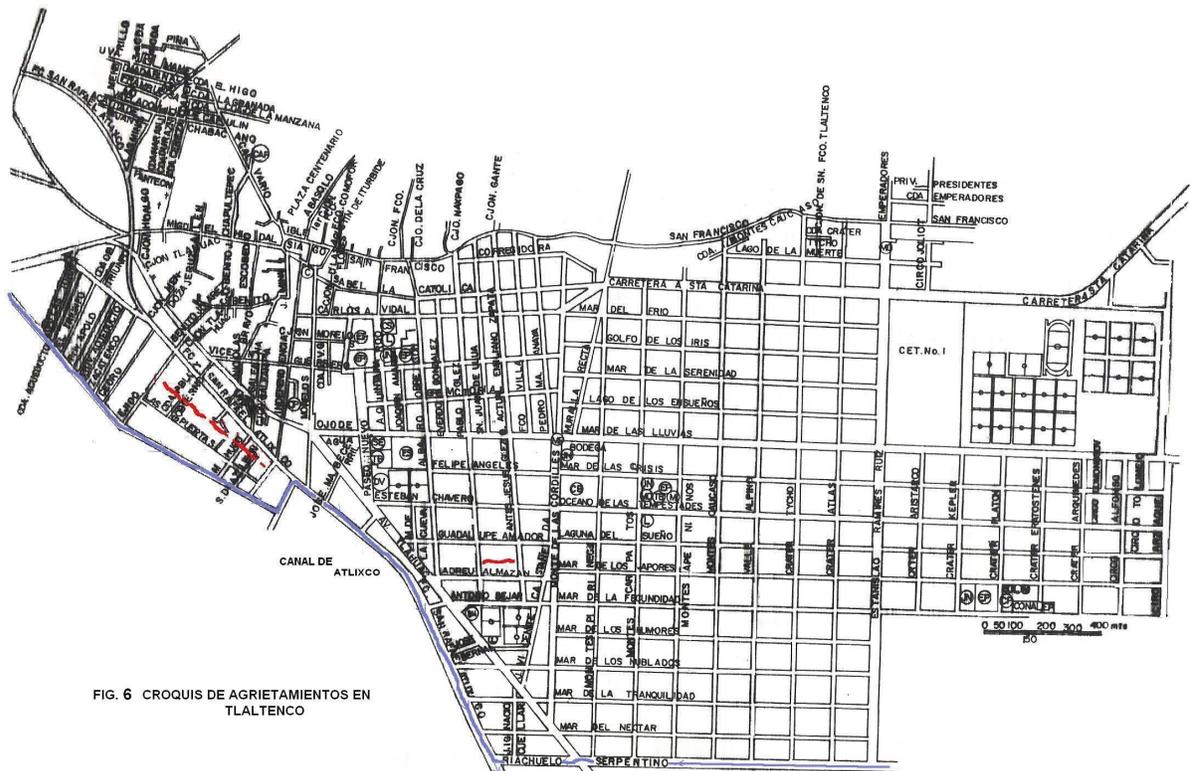


FIG. 6 CROQUIS DE AGRIETAMIENTOS EN TLALTENCO

La calidad de los rellenos detectados generalmente es mala y están constituidos fundamentalmente por cascajo, escombro y materiales de corte combinados en forma heterogénea, colocados a volteo, sin control de compactación, sobre los cuales se asientan las construcciones y servicios de la zona.

El espesor de estos materiales es variable, mientras que en la práctica de construcción de las viviendas y servicios no se acostumbra la colocación de sellos asfálticos o materiales impermeables para impedir la ascensión de sales por capilaridad, lo que favorece mayores condiciones de vulnerabilidad .

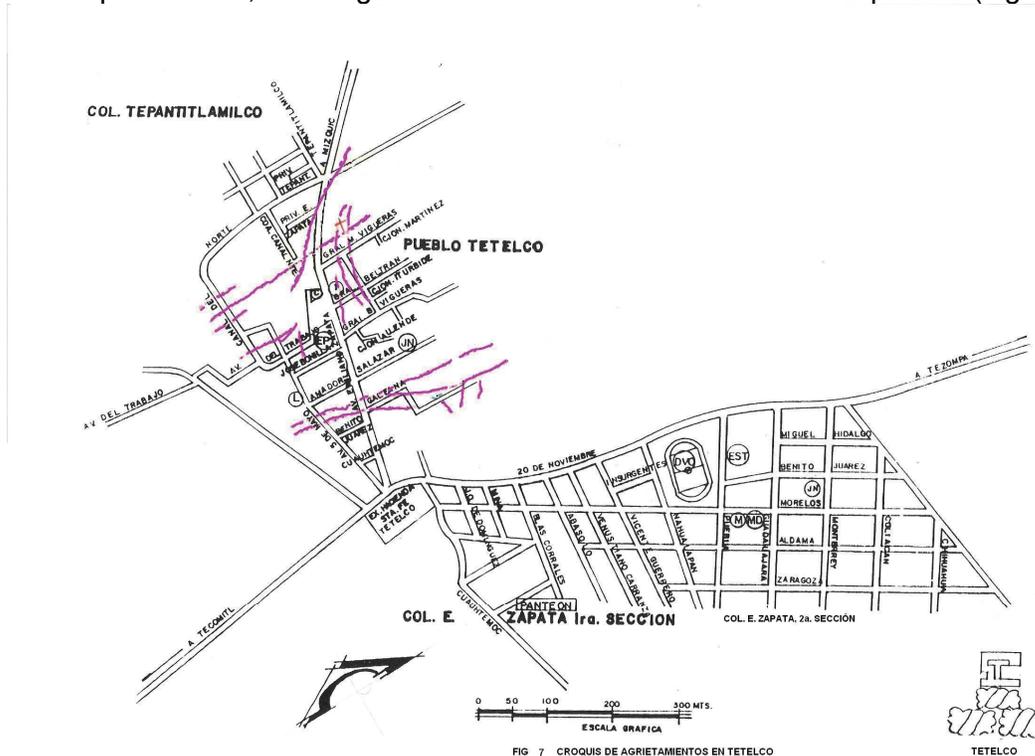
Esta colonia se delimita hacia el norte por la Av. Tláhuac, hacia cuya colindancia se han presentado los agrietamientos y se considera ubicada dentro de la región de suelos blandos, superficialmente endurecidos por desecación.

En estos sitios el terreno natural superficial se encuentra conformado por un limo-arenoso fino color grisáceo oscuro, de consistencia media. En algunas zonas el nivel freático aparece a poca profundidad (menor a 80 cm).

La situación de mayor problemática por agrietamiento se presenta en forma paralela hacia la Av. Tláhuac, entre las calles Ojo de agua y Vicente Castañeda, que afecta principalmente muros y bardas con ausencia de elementos estructurales, aunque no se aprecian viviendas con inmediata o alta posibilidad de colapso.

Colonia Tetelco

Ubicada en las inmediaciones del camino a Mixquic, ésta localidad presenta agrietamiento en aquellos sitios donde la transición de los depósitos, está representada por afloramientos rocosos alternados con materiales de origen lacustre de alta compresibilidad, lo cual genera movimientos diferenciales en superficie (fig. 7).



En esta zona se considera que existen derrames pétreos intercalados con los depósitos lacustres, lo que ocasiona asentamiento diferencial crítico de estructuras localizadas en zonas de alta erraticidad geotécnica.

Tal situación se identifica en la traza de una grieta que corre en forma paralela a la vialidad de la Av. Emiliano Zapata, cruzando ésta a la altura de la iglesia, la que presumiblemente está desplantada parcialmente en roca y en otro extremo en suelos blandos, razón por la cual presenta daños graves en la zona del marco y bóveda principal, además de identificarse daños en diversas viviendas contiguas.

El efecto de consolidación de los depósitos lacustres subyacentes se aprecia en la aparente emersión de las tumbas ubicadas en el patio de la iglesia, las cuales van quedándose arriba debido al asentamiento con mayor velocidad de las construcciones circundantes.

La grieta detectada se extiende hacia la zona deportiva y casas adjuntas, considerándose una menor magnitud de daños hacia las viviendas (zona de transición abrupta, debido a que en esta zona, la consolidación de las arcillas de los estratos superiores, se manifiesta sobre una estructura geológica de roca sólida sepultada (presumiblemente basaltos fracturados).

San Juan Ixtayopan (fig. 8)

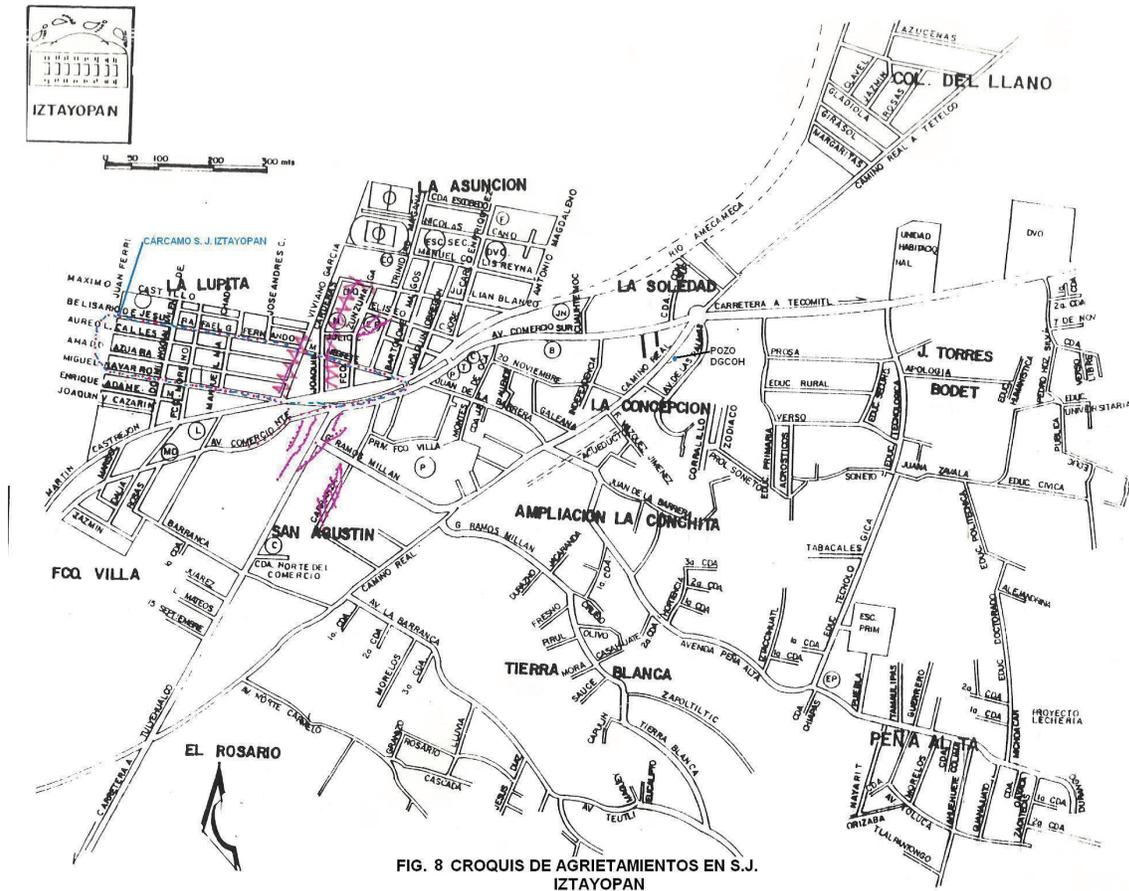


FIG. 8 CROQUIS DE AGRIETAMIENTOS EN S.J. IZTAYOPAN

Barrio La Lupita

Es en ésta localidad donde se registra la mas alta incidencia de estructuras y servicios afectados por agrietamientos, observándose una " grieta " principal que corre diagonalmente entre las calles Manuel Negrete y Zunzunaga, que deteriora las instalaciones de una escuela primaria ubicada en éste sector, construida diez años atrás, donde se aprecian aberturas en muros, pisos y elementos estructurales y que provoca deficiencias en sus servicios y condiciones de funcionalidad. La colonia geotécnicamente se ubica en zona de transición abrupta, mientras que hacia las partes altas se identifican depósitos firmes .

Esta estructura es de las más afectadas de la zona , debido a las características del proyecto arquitectónico, el cual consideró muros de doble altura y techos inclinados, más sensibles de los hundimientos diferenciales generados a ambos lados de la grieta. Los pisos de aulas y pasillos se encuentran agrietados, los mismo que algunas zonas de la losa de cubierta, misma que presenta filtraciones y favorece el debilitamiento de la estructura.

En la zona de canchas deportivas, la magnitud de la grieta llama la atención a simple vista, debido a la separación de los bordes y el escalón de la misma, lo que impide su utilización apropiada, ya que se ha observado que al rellenar en forma parcial la grieta, ésta al cabo de poco tiempo vuelve a presentar movimientos, generando un daño continuo y progresivo a las estructuras cercanas a la misma (figs. 8-A y 8-B)..

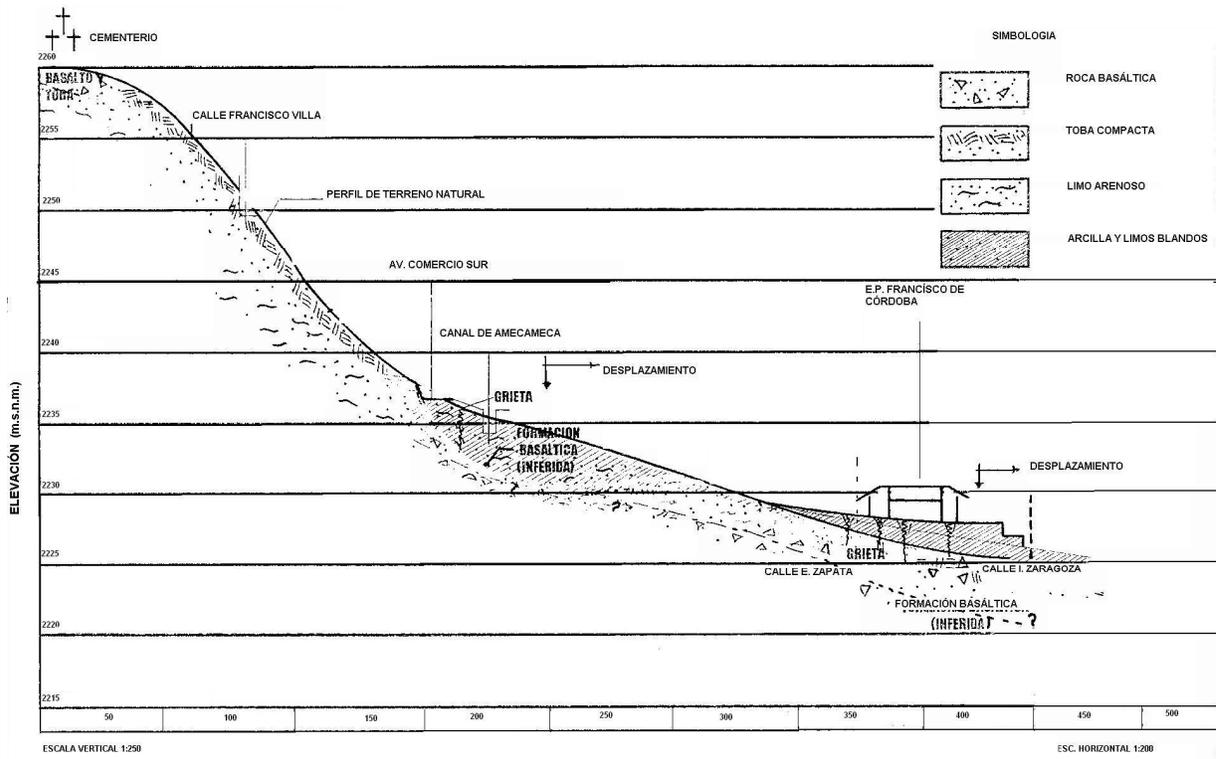
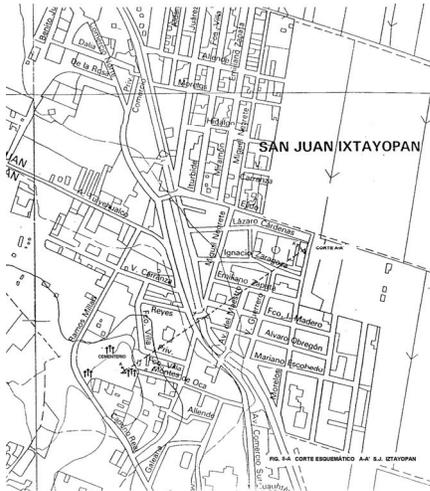


FIG. 8-B. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS DEPOSITOS EXISTENTES EN S.J. IXTAYOPAN.

Se considera que se tendrán graves daños estructurales si no se desligan los muros y elementos afectados por la grieta, por lo que se recomienda recimentar o inclusive cambiar de lugar la escuela, ya que estos fallamientos seguirán siendo activos y de lento impacto, por encontrarse en el subsuelo depósitos de diferente consistencia, razón por la cual una parte seguirá hundiéndose a mayor velocidad que la otra, dañando cada vez más al plantel.

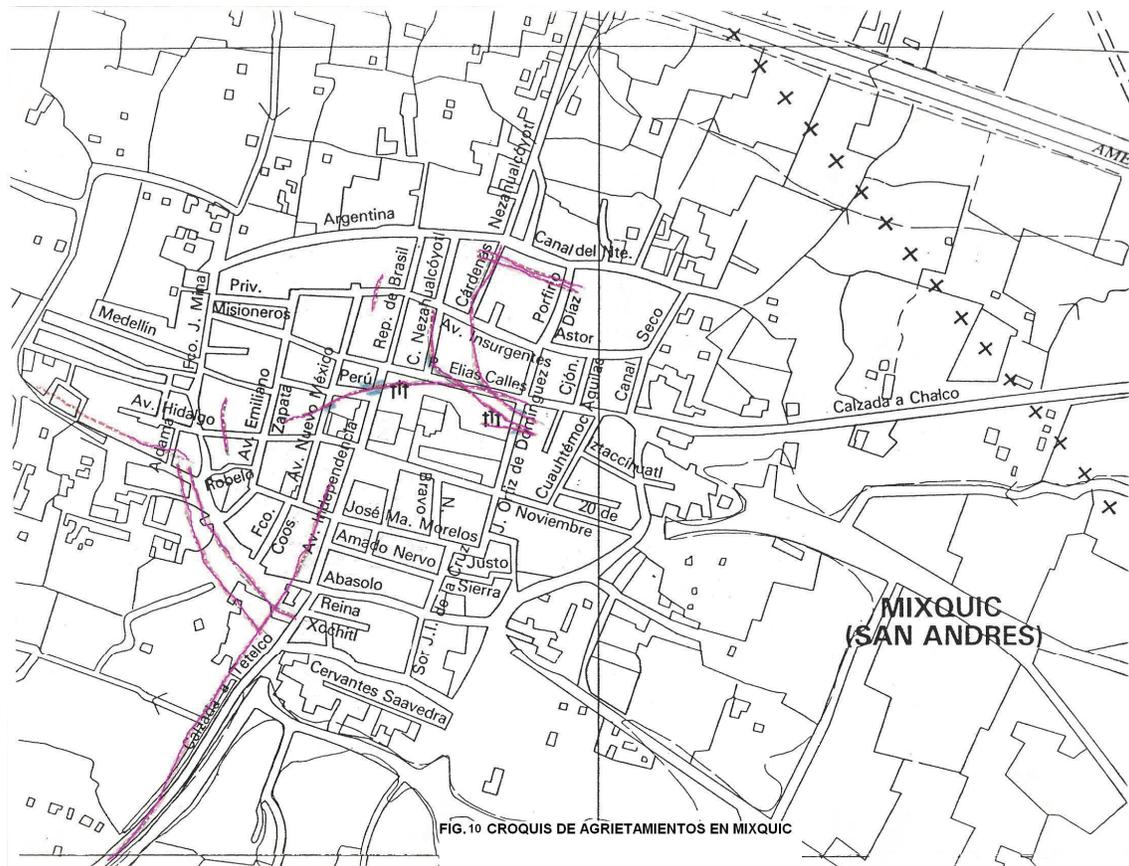
Hacia la vecindad de la Escuela, las viviendas resultan afectadas por agrietamientos en muros y pisos principalmente, detectándose periódicamente fugas en la red de agua potable, según reportes de sus habitantes, lo que hace necesaria la demolición parcial de las secciones afectadas.

En esta región, antiguamente emergía un islote que sobresalía del fondo del lago, por lo que existen depósitos firmes en sus inmediaciones y el patrón de grietas, en su mayoría paralelas a las curvas de nivel de las zonas altas, presenta desplazamientos a manera de falla normal, que dan lugar a un relieve escalonado descendente, perteneciente a la antigua ribera del Lago, alterado por la traza de colectores y canales remanentes (fig. 9).



Mixquic (fig. 10)

En ésta localidad se ubica un centro de alta tradición en el D.F., delimitado hacia el norte por el Río Ameca, Barrio Los Reyes y San Bartolomé, mientras que hacia el sur se ubican los Barrios de San Agustín y San Miguel, caracterizados por una zona lacustre y canales navegables que delimitan porciones de terreno de cultivo (Chinampas), actualmente con apreciable nivel de desecación.



En la región se presenta un fuerte agrietamiento, el cual abarca varias cuadras de la zona central, detectada hacia los extremos del panteón y la Av. Plutarco Elías Calles hasta la Av. Hidalgo, principalmente, representada por un cambio brusco de pendiente o escalón ambos lados de la grieta, que presenta un desnivel estimado de 40 cm, observándose daño en los elementos estructurales de las viviendas localizadas a lo largo de la traza y fuerte agrietamiento en una barda de mampostería hacia la calle Hidalgo (Zona de Transición).

Debido a la alta erraticidad de la traza de agrietamientos, en esta zona, el patrón de falla parece estar controlado por un antiguo derrame de lava sepultada, que subyace a los depósitos arcillosos de la ribera antigua del Lago.

Santa Catarina Yecahuizótl. (fig. 11)

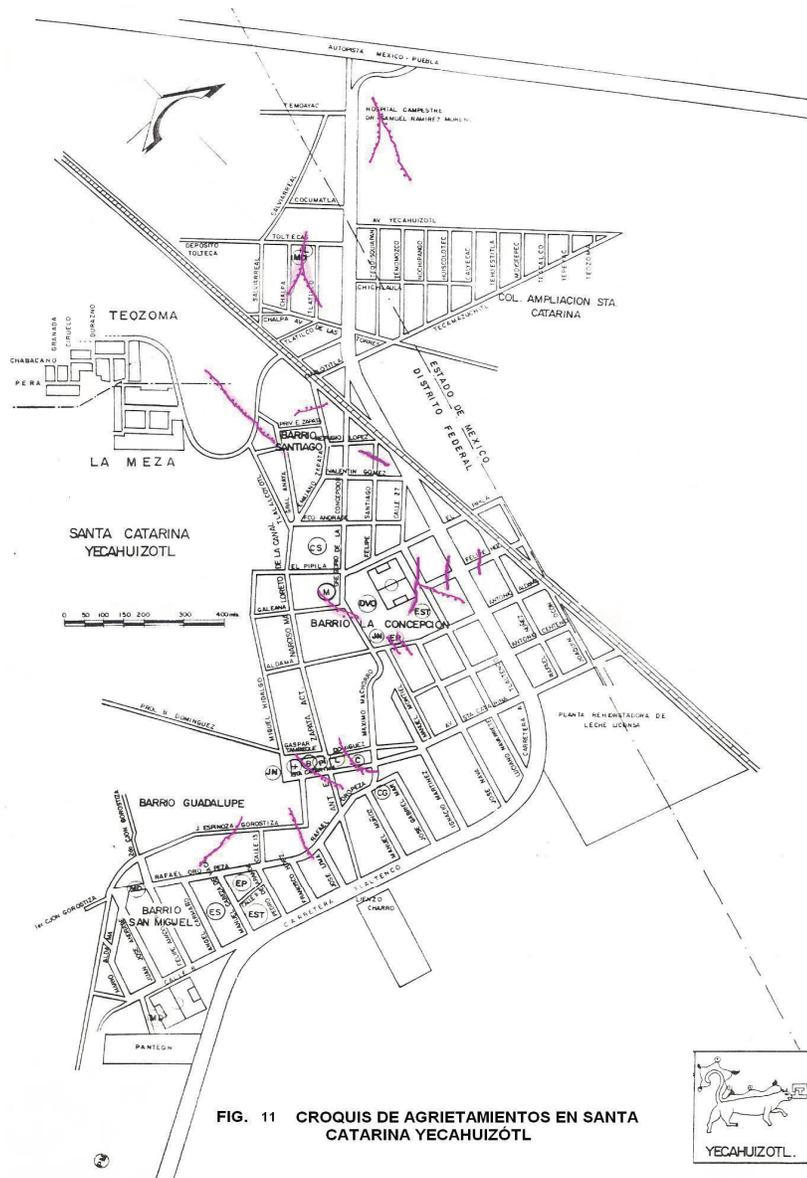


FIG. 11 CROQUIS DE AGRIETAMIENTOS EN SANTA CATARINA YECAHUIZOTL

Esta región se ubica hacia el extremo NE de Tláhuac, colinda con los municipios de Chalco e Ixtapaluca, mientras que hacia el NW, está delimitada por la Sierra de Santa Catarina.

En la localidad se identifican diversas zonas de agrietamiento, localizadas todas ellas en las faldas del Cerro de Santa Catarina, que comprende una transición abrupta entre los depósitos arcillosos blandos lacustres y los depósitos firmes.

El patrón de fracturamientos es irregular y coincide con las curvas de nivel de los cerros circundantes, afectando a diversas construcciones y servicios ubicados en la traza de falla.

5. MECANISMO DE FALLA.

Diversos autores, principalmente a través de foros de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1978, 1990, 1991 y 1996), tales como: Alberro, Hiriart, Juárez Badillo, Marcos Mazari, Raúl Marsal, Reséndiz, Zeevaert y otros, han identificado mediante investigaciones y sondeos, la alternancia de arcillas lacustres con materiales de acarreo fluvial y de origen volcánico.

Dichos análisis consideran que la formación de grietas en las regiones de origen lacustre y zona de transición tiene diversos orígenes, particularmente por la urbanización y cambios de uso de suelo, asociados a la estratigrafía, la estructura geológica subyacente, la pendiente del terreno, propiedades geohidrológicas e influencia humana, por extracción y bombeo, con cambios radicales en el contenido de agua de las arcillas, que en conjunto determinan la evolución de las propiedades mecánicas del subsuelo.

5.1 Influencia del bombeo profundo en los agrietamientos superficiales

Hasta la década de los ochentas, en la comunidad de Tláhuac no se tenían antecedentes de fallamiento de estructuras y de la aparición de grietas en superficie, particularmente porque sus construcciones eran generalmente de uno o dos niveles, edificadas con métodos de autoconstrucción y materiales ligeros, aunque ya se tenían antecedentes del fenómeno del hundimiento regional y agrietamiento incipiente en algunos sitios de la Ciudad de México.

Posterior a los sismos de 1985, se detectaron en esta región zonas de anomalías, caracterizadas por la aparición de grietas superficiales y se tomó interés sobre el fenómeno, atribuyéndose las causas a la posible presencia de rellenos de mala calidad, a la construcción de las estructuras sobre antiguos canales o terrenos fangosos e inclusive al ascenso de la salinidad por capilaridad, así como la aparición súbita de agrietamiento durante el movimiento telúrico .

Se plantea que el grado de consolidación de las arcillas ocasionado por el bombeo profundo, influye significativamente sobre los fenómenos de superficie y contribuye a la aparición de los agrietamientos, combinado con la heterogeneidad de los materiales existentes, caracterizados por la presencia de estratos sumamente compresibles de espesor importante, que subyacen a los depósitos superficiales, endurecidos por desecación, por lo que su patrón de falla es de tipo frágil.

5.2 Comportamiento geohidrológico.

Para definir las características del comportamiento geohidrológico, se consultó un estudio interno de la anterior Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, realizado en 1992, en el cual se monitoreó la zona mediante dos pozos piloto en la región, uno de los cuales se localiza en la parte superior de los depósitos recientes y el otro en los depósitos aluviales antiguos y basaltos (Q al1)

El objetivo de este esquema de prueba, fue definir si con el bombeo en la capa superior (Q al2) se abaten los niveles en la capa inferior (Q al1). Los resultados obtenidos permiten definir un sistema de acuíferos semiconfinados, por lo que se dedujo que no es importante la conexión hidráulica entre ambas unidades.

Para el registro de datos en la capa de depósitos lacustres antiguos, se utilizó la interpretación de cortes litológicos y registros geofísicos de pozos profundos localizados hacia el centro y bordes de la planicie lacustre, cuyo espesor se incrementa hacia el centro, mientras que hacia los bordes se incrementan las capas de arena, estimándose un espesor máximo de 150 m de arcilla hacia el centro de la planicie, donde disminuye de manera importante la permeabilidad; en otro sentido, se considera que la capa superior del acuífero es salina, decreciendo esta condición con la profundidad, por lo cual la batería de pozos están ubicados en los depósitos profundos.

De cualquier manera, la capa de confinamiento arcilloso (acuitardo) permite conformar un acuífero altamente compresible, sobre el cual se asienta la mayor parte de Tláhuac y cuyos horizontes le transmiten regionalmente agua al acuífero en cantidad importante. **Este fenómeno genera una pérdida de presión hidráulica en las arcillas, causada por el bombeo en el acuífero explotado, originado por el déficit entre la extracción y la recarga (fig. 12).**

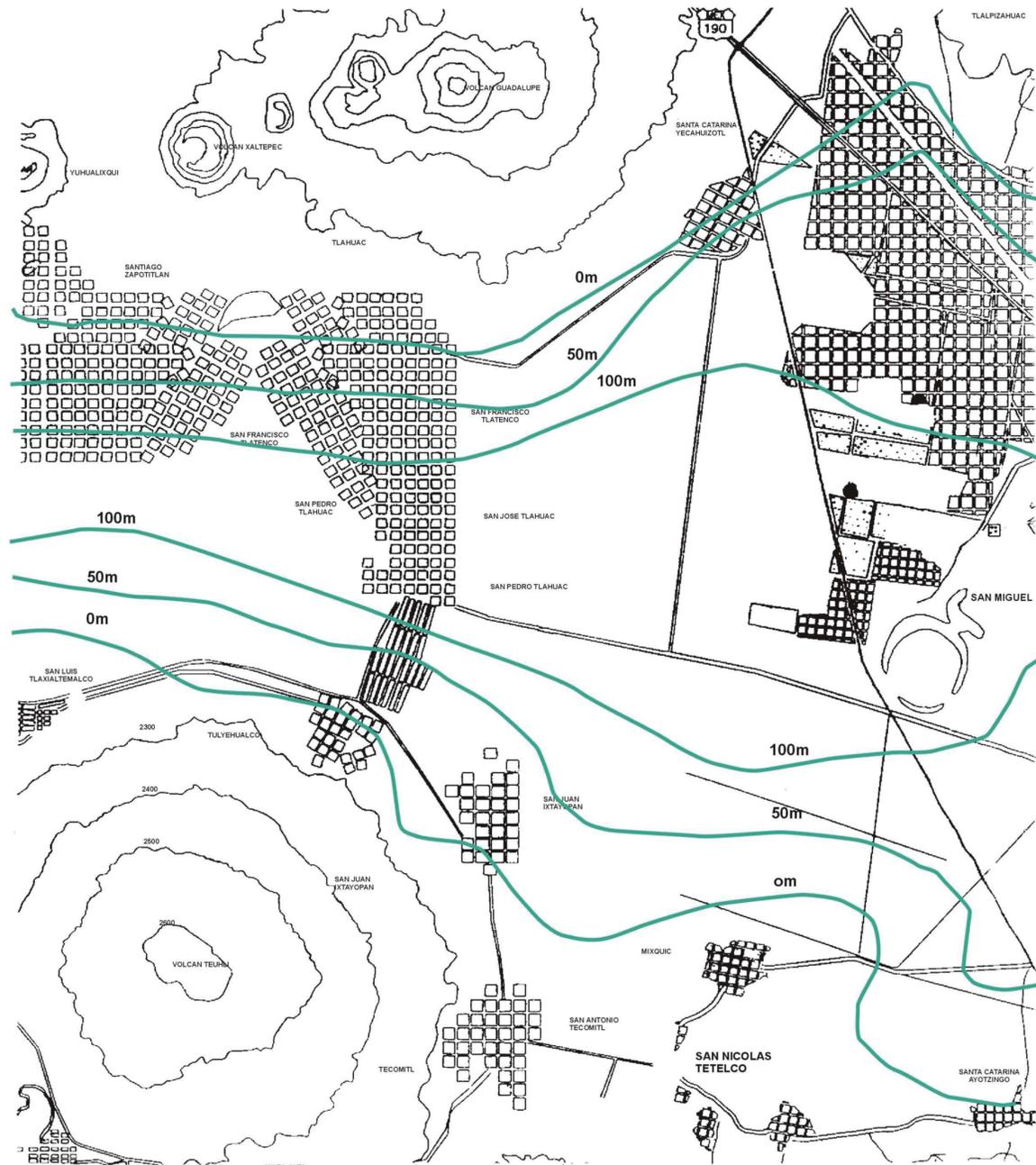


FIG. 12 ESPESOR DEL ACUITARDO

Regionalmente, en la subcuenca de Chalco, el bombeo del acuífero superior provoca hundimiento regional en los alrededores de Xico, Tláhuac y Mixquic, principalmente, debido a que ésta zona presenta los máximos espesores de suelos blandos.

Las fronteras sur-oriente del acuífero confinado en la zona de Tláhuac, son de recarga y aparentemente hacia el norte y occidente presentan salidas subterráneas hacia Texcoco y la Ciudad de México, respectivamente.

Esta situación se aprecia directamente en el acuñamiento de las arcillas hacia la periferia y el enjutamiento en los sitios de máximo espesor, hacia el centro de la planicie, condición de gran importancia para el análisis del hundimiento del terreno.

En general, los principales factores que inciden con el desarrollo de grietas, son los siguientes:

- La transformación del carácter endorreico de la cuenca, para mitigar las inundaciones de la capital, mediante túneles y tajos superficiales.
- La desecación paulatina de zonas permanentemente inundadas (Xochimilco, Tláhuac, Mixquic, Chalco)
- La explotación del agua subterránea en la región, iniciada en la década de los 50's, que generó mayor velocidad en el abatimiento del acuífero.
- A partir de la década de los 70's, la recarga de los acuíferos empezó a disminuir notablemente, debido a la aparición de asentamientos humanos en la zona de mayor permeabilidad (Sierras de Chichinautzin y Santa Catarina), mismos que impiden la infiltración natural del agua de lluvia y de los escurrimientos superficiales provenientes de las zonas altas, así como el entubamiento de los canales a cielo abierto de la región, que transformaron el régimen de infiltración por escurrimiento, al cubrir con asfalto y concreto, los sitios de recarga, **lo que se traduce, además de hundimiento regional, en mayor posibilidad de inundaciones hacia las partes bajas de la cuenca**, claramente ejemplificadas cada temporada de lluvias hacia la parte oriente de la ciudad (p/ejm. Col. Ejército Constitucionalista, Iztapalapa; 1998, Carretera México Puebla, en la zona contigua al canal de la Compañía; en los alrededores de Xico, Cd. Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Ciudad Nezahualcóyotl, etc).

Como se mencionó anteriormente, la demanda de agua potable en el área metropolitana es del orden de los 65 m³/seg y crece rápidamente a razón de 3 m³/seg por año (informe 2002, DGCOH), por lo que ha sido necesaria la extracción en otros sitios para cubrir las demandas locales, (principalmente del Alto Lerma y el sistema Cutzamala, estimándose una sobreexplotación global de los acuíferos del Valle, por lo que el panorama en las siguientes décadas, luce verdaderamente sombrío, considerándose también el alto costo del tratamiento y rebombeo para el desalojo de las aguas servidas).

Este desequilibrio entre la recarga y la infiltración, se agravó con la sobreexplotación de los acuíferos profundos, para cubrir las necesidades de la población, considerándose como paliativos la perforación de pozos a mayor profundidad en las inmediaciones de la Sierra Chichinautzin y Santa Catarina; así como el reequipamiento de los existentes, acelerándose de esta manera, el abatimiento de los niveles piezométricos y con ello, la magnitud de los hundimientos.

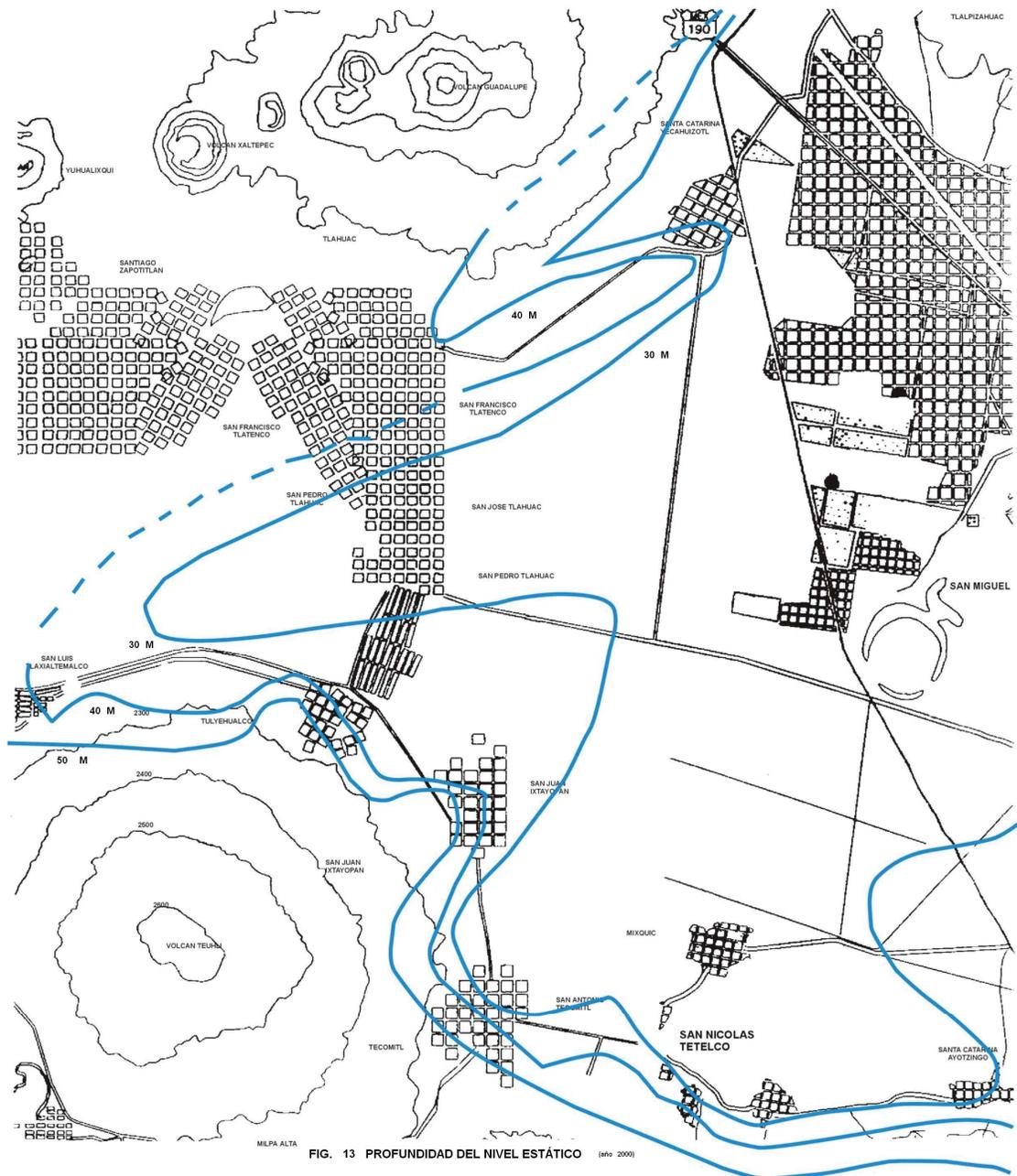
En relación a las propiedades mecánicas de los suelos, particularmente en las zonas de lago y transición, ocurre una constante evolución, observándose hundimiento y agrietamiento regional, favorecido por una disminución de la compresibilidad de los suelos blandos y el aumento de la resistencia al corte de las capas superiores, principalmente a consecuencia de:

- a) La desecación progresiva de los lagos.
- b) El bombeo profundo para el abastecimiento de agua potable.
- c) El efecto de sobrecarga de antiguos rellenos superficiales.
- d) El peso de las estructuras y obras civiles .
- e) El abatimiento del nivel freático por bombeo superficial para la construcción y mantenimiento de estructuras civiles.
- f) El cambio en la condición de infiltración por escurrimiento superficial, canalizado hacia el drenaje, al quedar cubiertos por asfalto y concreto, sitios de recarga natural de los acuíferos.
- g) El reflejo en superficie, de los procesos tectónicos de la región.

Esta situación genera una secuencia de movimientos horizontales y verticales del subsuelo, principalmente en la región de suelos blandos, con mayor afectación en aquellos sitios con depósitos heterogéneos y de contactos litológicos de diferente naturaleza, observándose la formación de grietas en superficie y el correspondiente agrietamiento y asentamiento diferencial de las construcciones e instalaciones subterráneas asentadas sobre estos materiales.

5.3 Características generales del sistema de acuíferos

Dentro de las características importantes del acuífero se encuentra el nivel estático, que define la frontera de la superficie libre del mismo. Su profundidad varía, dependiendo de las características topográficas del terreno; es decir, hacia las partes altas se incrementa la profundidad del nivel estático (PNE), mientras que hacia las partes bajas (planicie lacustre) decrece (fig. 13), situación por la cual se refieren sus cotas, con relación al nivel del mar.



Tomando en cuenta la litología de las rocas que afloran en el sitio y la PNE, se tienen las siguientes zonas potenciales de recarga (fig. 14):

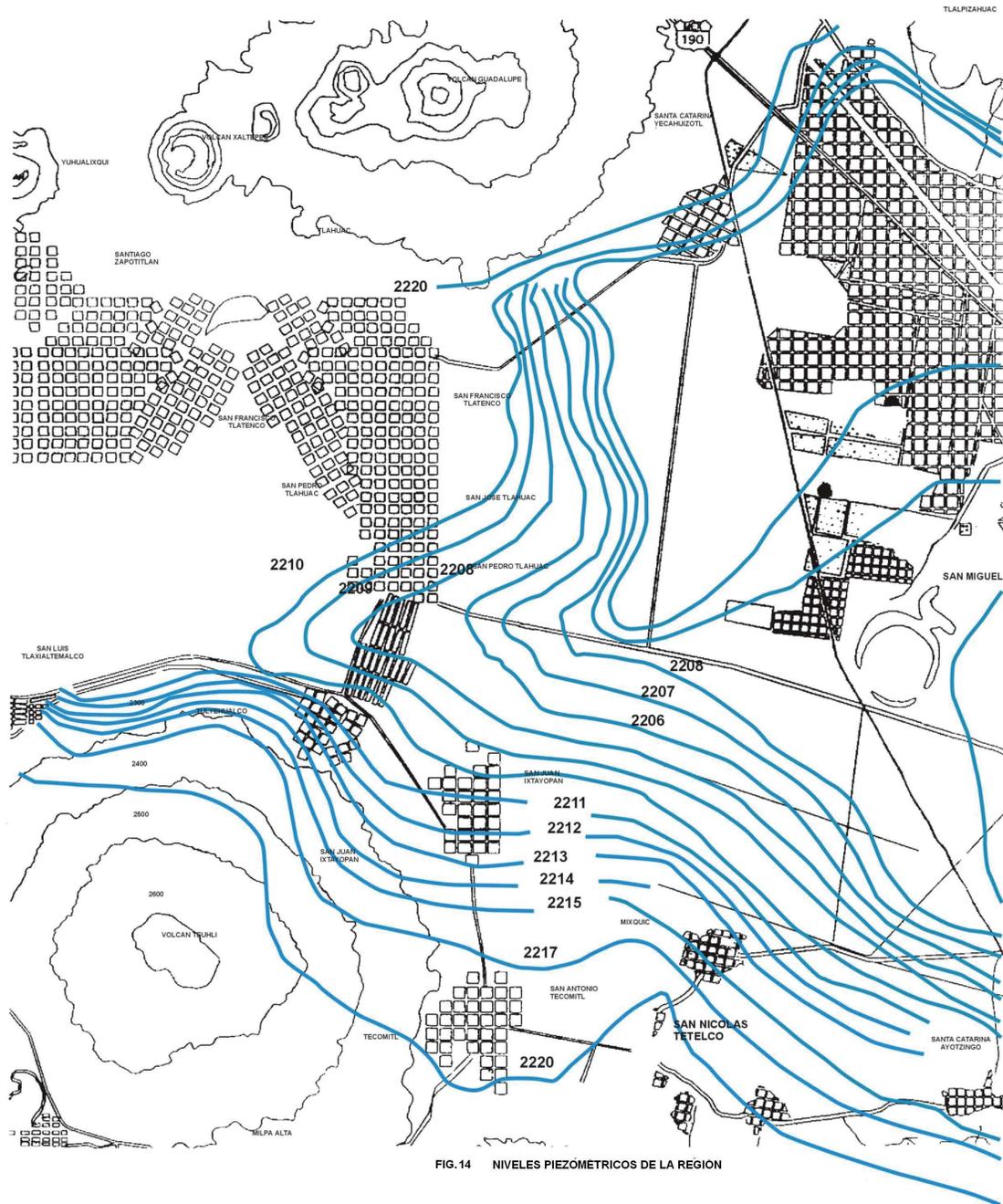


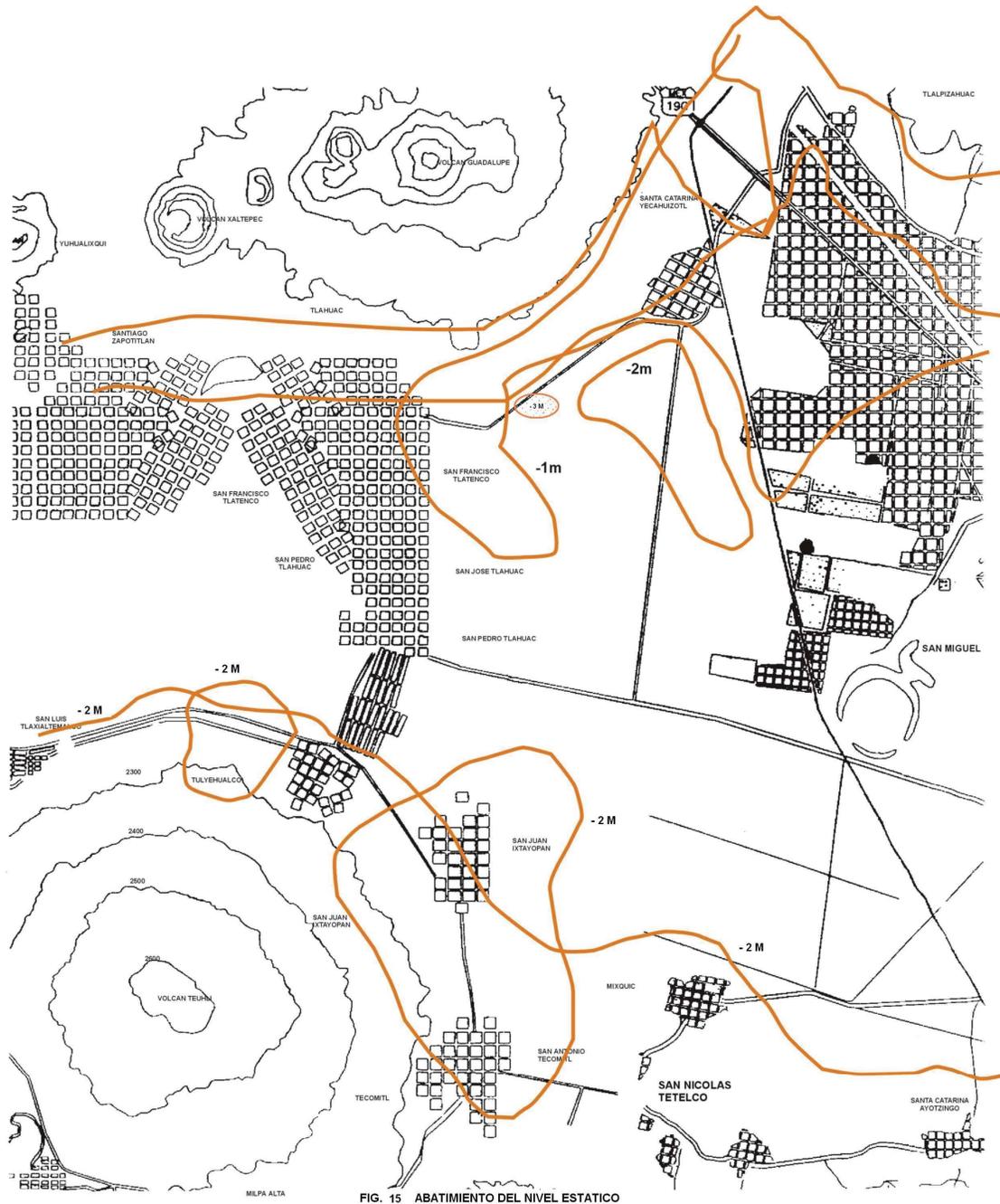
FIG. 14 NIVELES PIEZOMÉTRICOS DE LA REGIÓN

Las sierras Chichinautzin, Santa Catarina y el Cerro El Pino, así como la planicie aluvial que rodea el límite oriental de la planicie lacustre, caracterizados los primeros por basaltos y piroclásticos permeables, que participan en gran medida con los volúmenes de infiltración y recarga, así como sedimentos permeables de la zona.

Debido a los espesores del acuífero, se delimitó la zona del acuífero libre y semi-confinado, estimándose que éste último en el borde oriental de la planicie lacustre se ha transformado en acuífero libre, relacionándose ésta transformación debido al incremento de extracción de éstas márgenes.

De los datos analizados, se define en el acuífero en explotación, una superficie piezométrica radial convergente hacia la planicie lacustre, cuya configuración es claramente influenciada por la geología, la recarga natural y la distribución del bombeo profundo

Por otra parte, derivado de la concentración del bombeo, se han formado e identificado tres depresiones piezométricas, denominadas depresión de Ixtapaluca, Ayotla-Tlalpizahuac y alrededor del ramal Mixquic-Santa Catarina (fig. 15).



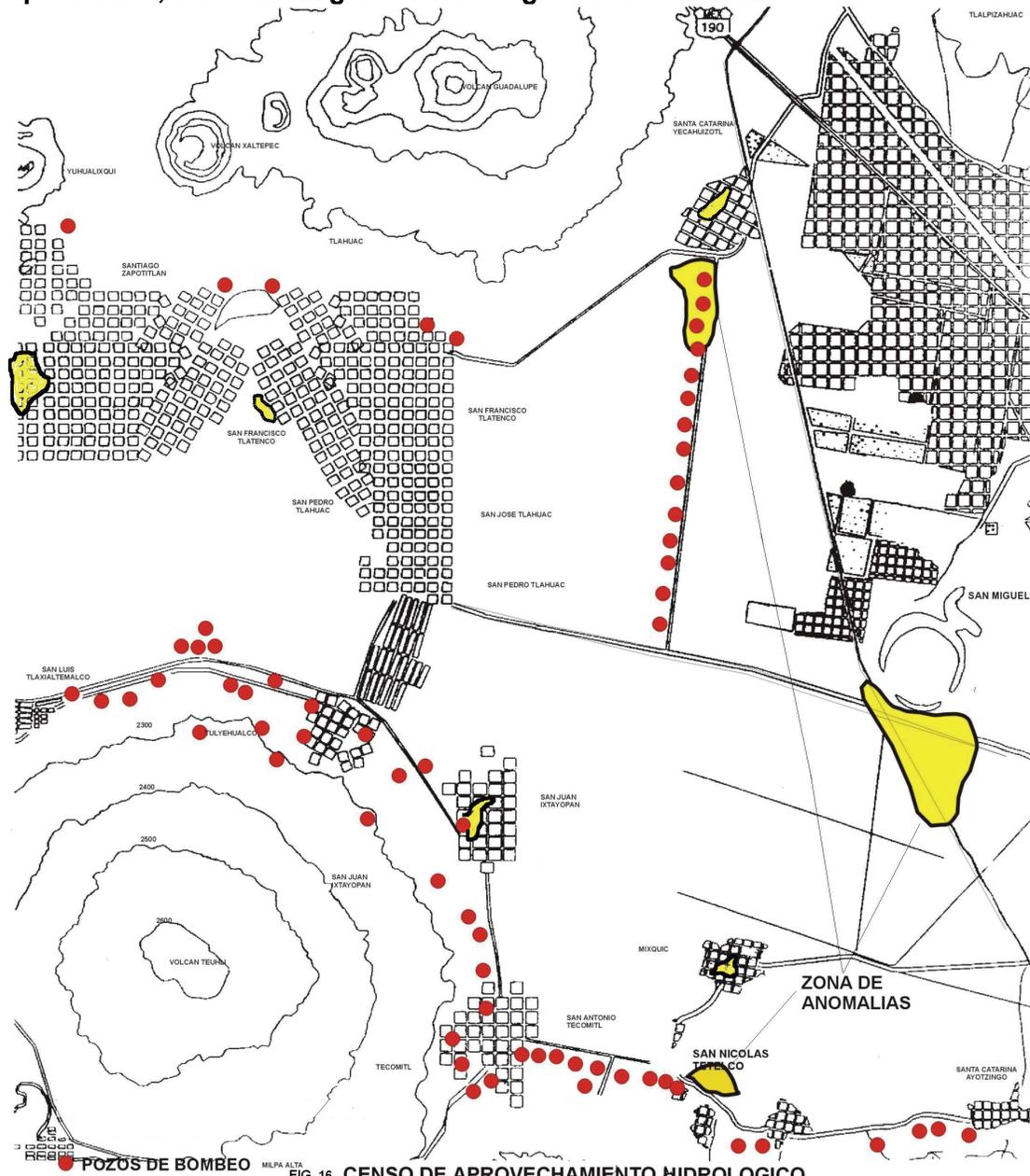
La primera de ellas se presenta en forma alargada en dirección norte-sur con eje convergente en la misma dirección. Este fenómeno está directamente relacionado con

alta extracción, que en esta zona alcanza un gasto instantáneo superior a los 250 litros por segundo (lps) en un área unitaria de 4 km.

La segunda mantiene la depresión en dirección noroeste-sureste, en cuyo sitio se tienen las cargas hidráulicas menores, del orden de 2200 m.s.n.m., también con extracción de gastos instantáneos mayores a 250 lps por área unitaria de 4 km.

Finalmente, se tiene una configuración difusa de la depresión Mixquic-Santa Catarina, en torno a la batería de pozos del ramal del mismo nombre, cuyas concentraciones de extracción en gastos instantáneos son variables entre 107 y 287 lps.

En todos estos sitios existen marcados asentamientos de las estructuras superficiales, así como la generación de grietas de tensión.



Para evaluar la configuración del acuífero, se consultaron monitoreos diversos y un mapa de evolución del nivel estático (DGCOH), apreciándose entonces que la curva de mayor extensión es la de -1m , comprendida entre Ixtapaluca, Tlalpizahuac, Santa Catarina y San Marcos Huixtoco, es decir toda la parte norte de la zona en estudio, registrándose otra disminución del nivel en los alrededores de Tecómitl, Iztayopan, Tulyehualco, Tezompa y Ayotzingo.

La curva cuyo valor corresponde a -3m representa la evolución negativa mas fuerte se presenta hacia los alrededores de la zona de Mixquic-Santa Catarina, aunque no sobre un área relativamente grande. Las consecuencias de dicha evolución pueden asociarse a los fenómenos de agrietamiento superficial .

Por otro lado, debido a que se carece de datos y a la ausencia de pozos hacia el centro del Valle de Tláhuac, no se tienen curvas evolutivas que permitan estimar el fenómeno en dicha zona. Para tener una idea respecto a la distribución del aprovechamiento de gastos por abundancia de extracción, se presentan los picos hacia la zona de Tecómitl y Milpa Alta, con 1353 lps, Tlalpizahuac-Ixtapaluca con 1286 lps, Valle de Chalco con 720, Chalco con 417 y Tulyehualco con 372 lps, respectivamente, **cuya tendencia de mayor extracción nos demuestran que los abatimientos de presión hidráulica se localizan hacia la zona norte y occidental de la cuenca, es decir, en forma perimetral hacia los valles de Tláhuac, Mixquic, Chalco y Santa Catarina, que coincide con los sitios de mayores anomalías superficiales, por fracturamiento regional activo, y por consiguiente, se comprueba la influencia determinante del bombeo profundo en los fenómenos de subsidencia y agrietamiento superficial del suelo (fig. 16).**

5.4 Consolidación regional

Se ha establecido como premisa que el principal factor de influencia para la generación y desarrollo de los agrietamientos detectados, es la consolidación regional de los horizontes arcillosos en Tláhuac, debido a que el subsuelo se caracteriza por la presencia de estratos arcillosos de alta comprensibilidad, alternados con capas o depósitos lenticulares de materiales arenosos y limoarenosos de compacidad variable, cuya distribución horizontal y vertical es errática, pero puede decirse que los suelos arcillosos compresibles disminuyen en cantidad y espesor en las cercanías de los cerros, donde se manifiestan zonas de transición abrupta.

Estos suelos, principalmente los de origen lacustre, acusan mayormente las deformaciones ocasionadas por sobrecargas impuestas que rebasan el grado de preconsolidación, favorecen la variación del contenido de agua y de la relación de vacíos original de la masa del suelo, lo que acelera el proceso de subsidencia.

En general, se plantea que la disminución del nivel freático, (cuya profundidad en estos sitios varía entre 2 y 6 m), por abatimiento de la presión hidráulica, endurece las capas superiores (fig. 17), ocasiona la deformación a diferentes velocidades de los estratos inferiores y origina un estado de tensión en el suelo, el cual es disipado mediante la aparición de grietas.

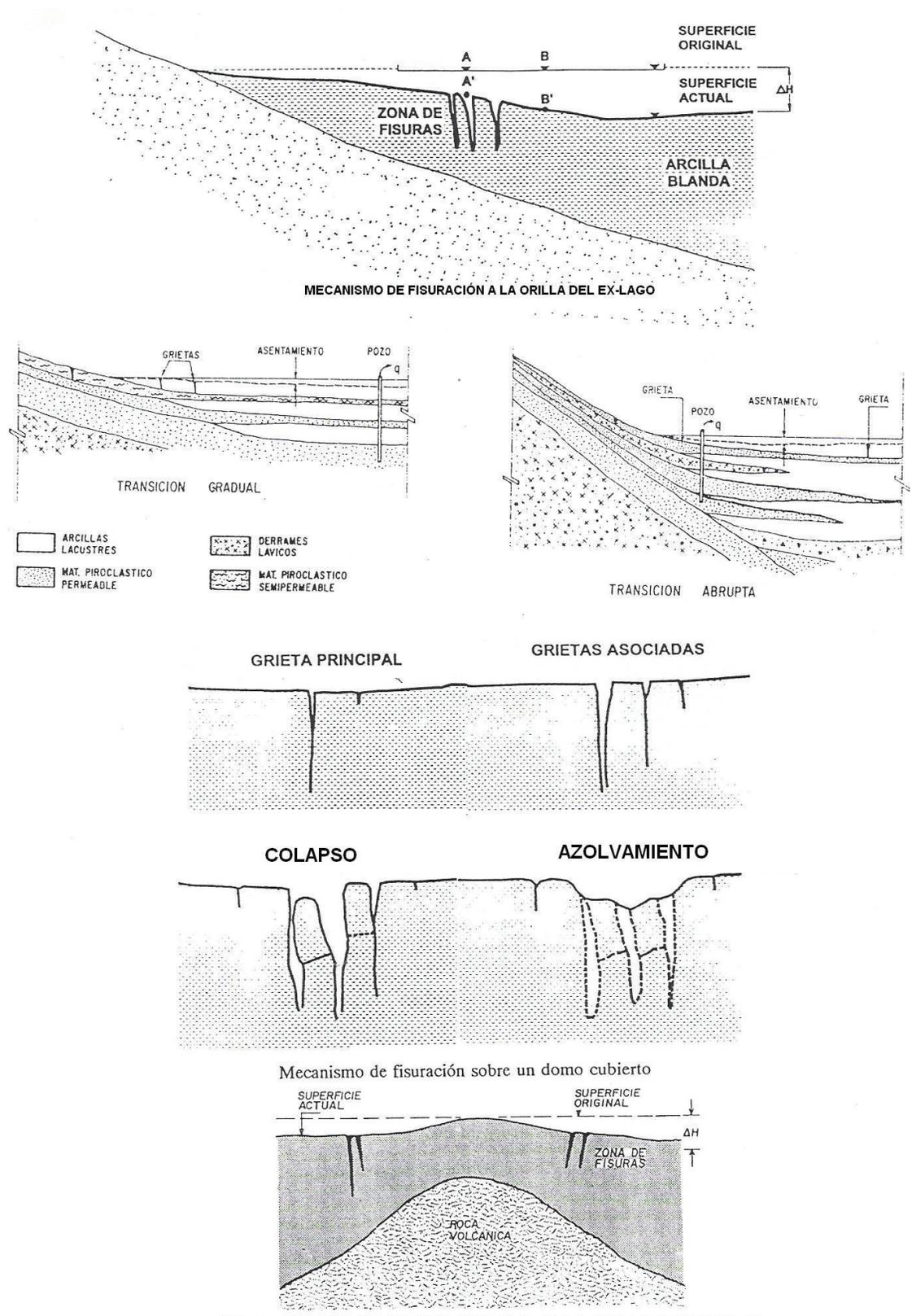


FIG. 17 MECANISMO DE FISURAMIENTO, DESARROLLO Y AZOLVE DE GRIETAS.

5.5 Mecánica de Subsidencia (fig. 18).

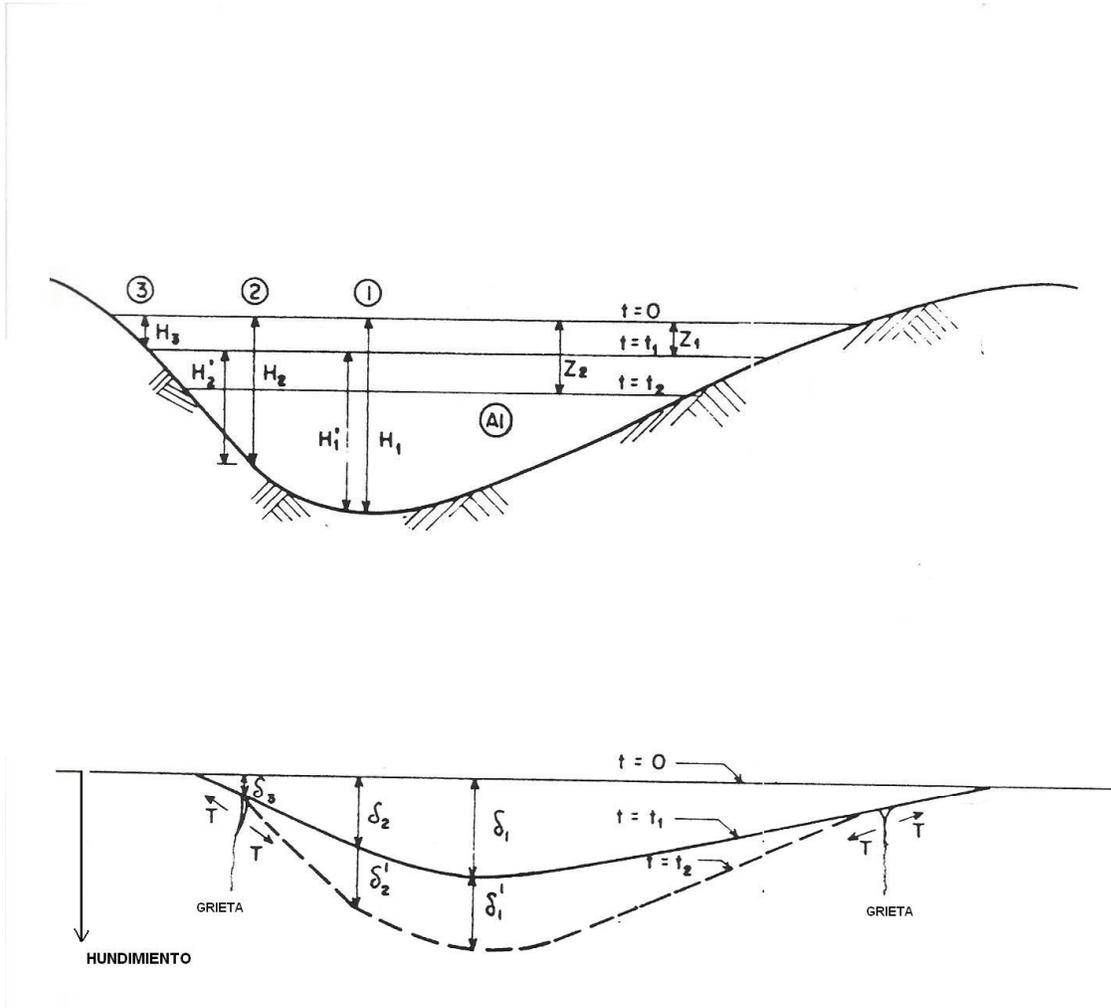


FIG. 18 MECANISMO DE FALLA

El fenómeno ocurre inicialmente en las zonas cercanas a los depósitos firmes, en la zona de influencia de los cerros, donde se encuentran a poca profundidad los derrames basálticos de la región y existen superficialmente suelos blandos, particularmente en las inmediaciones de pozos profundos para la extracción de agua potable, estimándose que las condiciones iniciales para la evolución del fenómeno son las mostradas en la figura 18, mientras que en las zonas donde existe mayor espesor de suelos blandos, éste fenómeno es de impacto lento, aunque progresivo e irreversible, debido a la alta deformabilidad de los depósitos arcillosos, dentro de una región más extensa, por lo que son menos perceptibles sus efectos.

Como resultado del aumento de los volúmenes de extracción de los acuíferos, se produce un abatimiento piezométrico, cuyas consecuencias son asentamientos diferenciales en superficie, por incremento en los esfuerzos efectivos verticales. La magnitud de estos asentamientos es función de la compresibilidad y espesor de los mantos afectados (arcillas y limos de alta compresibilidad que integran los sedimentos de la antigua planicie lacustre).

Como sucede en las regiones afectadas, la diferencia de espesor del manto compresible (H_1 , H_2 y H_3 , ocasionará que en el tiempo t_1 y t_2 , se presenten hundimientos diferenciales (d_1 , d_2 y d_3).

Para un tiempo t_1 , el nivel piezométrico se abate una profundidad Z_1 . Al continuar el bombeo, éste nivel continuará en descenso, hasta que la superficie original llegue a la línea Z_1 . Entonces se tendrá una zona que ya no se comprime y otra subyacente (H_1 y H_2) en la cual continuara la consolidación (d_1 y d_2) y que inducirá flexión en las materiales superyacentes. Esta flexión se traducirá en tensiones perpendiculares (T) al eje de valle, y eventualmente en grietas paralelas al mismo. Al continuar el descenso del nivel piezométrico y no existir continuidad de los materiales superficiales entre las zonas adyacentes a la grieta, se producirá un escalón (ref. El Subsuelo de la Ciudad de México, SMMS, 1978, Marín), **situación que coincide con el comportamiento de los sitios de mayor agrietamiento en la región y por lo tanto, se comprueba el planteamiento anteriormente mencionado.**

6. TRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE GRIETAS.

Una vez que se presentan y se activan las grietas, es necesario restablecer la continuidad entre los bloques de arcilla o de suelo disgregados por efecto de las mismas, con la finalidad de limitar los desplazamientos laterales y rotaciones que se forman en su cercanía.

Existen diversos procedimientos para el tratamiento de estabilización de grietas, la mayoría de los cuales se basa en la inyección de mezclas fluidas y lechadas de mortero de bentonita, para estabilizar la mezcla y disminuir la contracción durante el fraguado, con la finalidad de sellar las fracturas y permitir la restitución de la masa del suelo.

La idea es tratar de sustituir los vacíos generados por la grieta, con una mezcla plástica de bentonita, cemento y agua, cuya consistencia se asemeje al terreno natural original, con la finalidad de que su comportamiento absorba las deformaciones progresivas y conserve el mayor tiempo posible la continuidad horizontal del suelo.

6.1 Equipo requerido

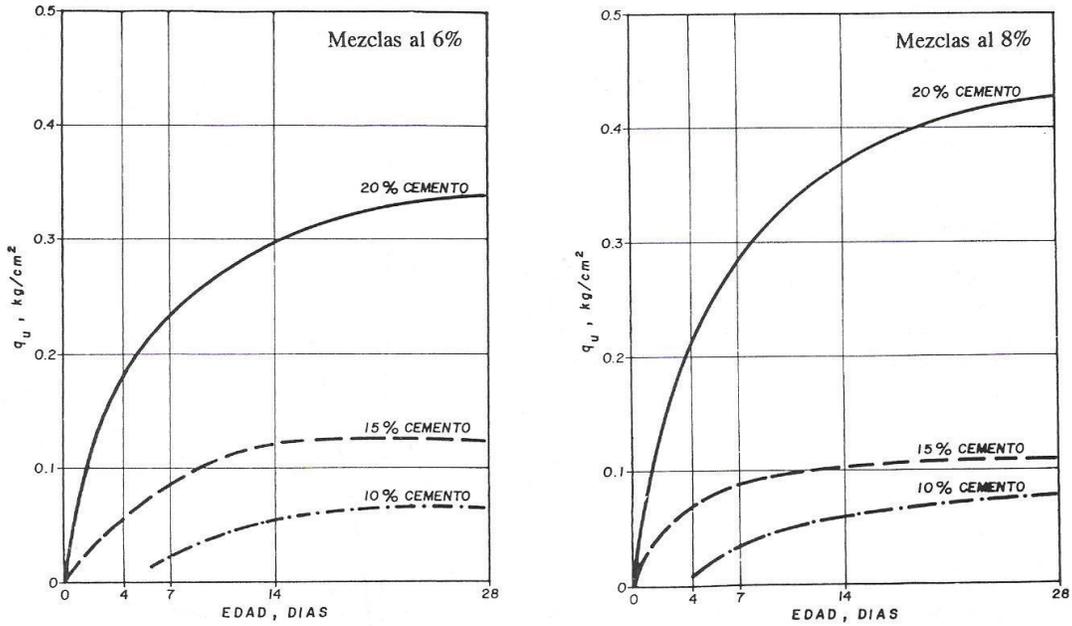
Básicamente, el equipo requerido se compone de un contenedor y agitadores de aspas y de chiflón para la preparación de la mezcla, una bomba de lodos, tuberías, mangueras y boquillas, así como un manómetro para verificar que la presión de inyección no provoque socavación y tubificación adicional en las paredes de la grieta, descrito a continuación:

- a) Agitadores de aspas o chiflón
- b) Tanques de almacenamiento
- c) Bombas de lodos (6L6, moyno o de pistón, con gusano)
- d) Tuberías y mangueras para el manejo y colocación de la mezcla.

6.2 Proporciones de la mezcla

| | |
|----------------------|---|
| 1. De lodo bentónico | Agua: 1m ³ Bentonita 10% en peso |
| 2. De mezcla | Lodo bentónico 1m ³ Cemento 20% en peso |

Las proporciones de mezclas analizadas por Carlos E. Gutiérrez, Alberto Cuevas y otros (Agrietamientos en suelos SMMS 1991, son las siguientes (fig. 19).



Mezclas de bentonita con agua y cemento para relleno de grietas

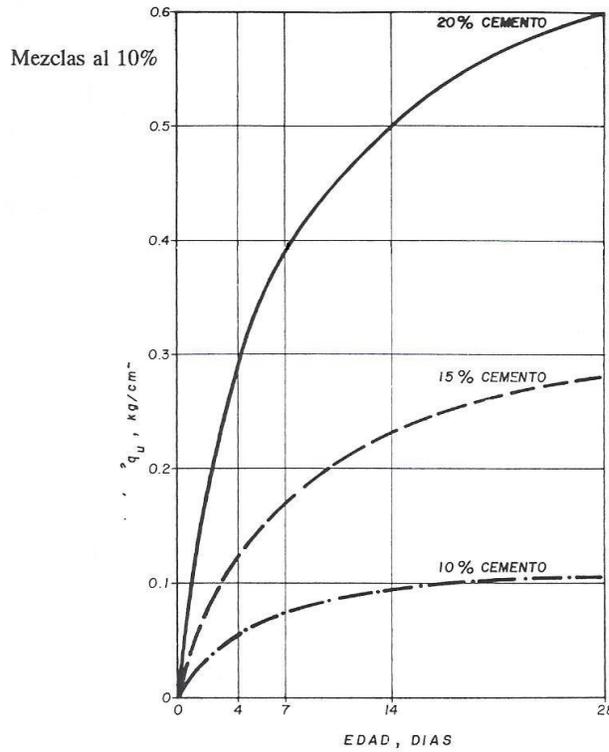


FIG. 19 PROPORCIONES DE MEZCLAS PARA TRATAMIENTO DE GRIETAS

6.3 Procedimiento constructivo

Se deberá hidratar previamente la bentonita, con un reposo mínimo de 8 horas, mientras que el cemento se mezclará una hora antes de iniciar los trabajos de inyección.

Una vez preparada y lista la mezcla, se procederá a realizar un “ lavado ” ligero de la fisura, con agua a gravedad, para evitar que absorba la humedad de la mezcla.

Posteriormente, se iniciará el bombeo a baja presión de la mezcla, cuidando no superar la presión arriba de 1 kg/m², (para evitar la tubificación del suelo circundante y el lavado de finos), hasta complementar su llenado, el cual deberá verificarse con pozos de monitoreo a cada 5 o 10 m de la zona de inyección, de conformidad con la longitud y abertura de las grietas, para posteriormente rellenar estos pozos, con una mezcla de tepetate y tezontle, en proporción de 40 y 60 % respectivamente, compactados al 80% Porter.

Es importante mencionar que los desplazamientos de los bloques del subsuelo y por lo tanto, la abertura de las grietas, continuaran progresando a causa del hundimiento regional, con periodos de estabilidad y otros de mayor aceleración, por lo que el tratamiento realizado deberá ser periódico, de acuerdo con su comportamiento.

Cuando no se cuente con el equipo anteriormente descrito, se podrá realizar la inyección por gravedad, procurando colocar el dispositivo con la mezcla con altura suficiente para que selle los huecos de las grietas, con manguera de nivel o ligeramente de mayor diámetro, debido a la viscosidad de la mezcla.

Estos tratamientos no detienen el fenómeno, sólo mitigan sus efectos, por lo que únicamente deben considerarse de carácter temporal.

6.4 Trincheras y pantallas perimetrales

Paras casos de severa afectación a instalaciones subterráneas (por ejemplo estaciones de servicio y autoconsumo de hidrocarburos y/o materiales peligrosos), conviene habilitar una trinchera de lodo bentonítico, el cual actuará como pantalla o elemento impermeable y plástico para seguir la deformación del terreno. Su alto costo y dificultad para alcanzar la profundidad de influencia de las grietas, limita la aplicación de este procedimiento, por lo que su consideración debe referirse a aspectos especializados. En estos sitios, debe tomarse en cuenta los módulos de deformación elástica del suelo y los esfuerzos de rompimiento de los materiales circundantes, para definir la conveniencia de utilización de estructuras especiales.

6.5 Subexcavaciones

Con la finalidad de renivelar estructuras especiales afectadas en zonas de agrietamiento y hundimiento regional acelerado, se ha utilizado en algunos sitios el procedimiento de subexcavación, el cual consiste en la habilitación de pequeños huecos horizontales y extracción controlada de arcilla blanda bajo la zona de menor deformación, cuyo éxito depende, entre otras cosas, de las propiedades mecánicas del terreno, la experiencia del especialista y la cantidad de huecos rellenada, así como de la rigidez de la estructura por renivelar. Este método se utilizó con éxito en la renivelación y corrección geométrica de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México.

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se considera que la problemática de los fenómenos de agrietamiento detectados en Tláhuac no es un fenómeno aislado de la región, pues en sitios cercanos al cerro de la Estrella, Peñón del Marqués, Cerro de Xico, en Azcapozalco y zonas de transición abrupta, se presenta una condición similar de zonas de agrietamiento, asociadas en mayor o menor medida con el abatimiento de los acuíferos, como consecuencia del bombeo profundo.

Entre las observaciones recopiladas en la exploración de campo se mencionan las siguientes:

- La mayor parte de las viviendas de las colonias periféricas y las zonas afectadas por agrietamiento, fueron edificadas sin asesoría técnica ni control de calidad de la construcción, con desconocimiento total de las características del subsuelo a mayor profundidad de la zona de desplante de la cimentación, sin aplicación de criterios técnicos de reglamentos de construcción.
- No existió una proporción adecuada de las mezclas utilizadas para la construcción.
- Se identificó la utilización irracional de relleno tipo heterogéneo, falta de compactación adecuada, falta de firmes de concreto o espesor muy delgado.
- El empleo de cimentaciones de piedra, falta de cadenas de liga, castillos con cargas excedidas, mezclas pobres, falta de cubiertas, ausencia de materiales impermeables para evitar la ascensión de la salinidad hacia la cimentación, mal junteo, cimentación paupérrima para más de un nivel, etc.
- La utilización inapropiada de zapatas aisladas, con dimensiones insuficientes, falta de área sustentante, coceo a las columnas por falta de cadenas de liga, unión de muros con diferencia de cargas, etc.
- El empleo de materiales con poca o nula resistencia a la tensión, tales como adobe y mamposterías de tabique recocido o tabicón, sin elementos de concreto reforzado.

De los datos hidrológicos recolectados, **se aprecia que el abatimiento de presión en los pozos ubicados en los extremos de la región de Tláhuac, es mayor que aquellos ubicados en la planicie**, debido entre otras cosas, a la dirección del gradiente hidráulico de almacenamiento y de recarga, **lo cual favorece los agrietamientos en dichas zonas.**

En forma similar, la presencia de grietas en zonas de afloramiento rocosos como Tetelco, San Juan Ixtayopan y Mixquic, obedecen a su secuencia de depositación irregular e intermitente, por lo que las arcillas blandas superficiales se consolidan sobre antiguas formaciones rocosas subyacentes, con profundidad variable entre 6 y 15 metros, provocando que el patrón de distribución y fracturamiento en la zona de grietas esté controlado por los derrames pétreos sepultados.

Se concluye que el fenómeno de agrietamiento en la zona de transición es resultado del “ deslizamiento ” o enjuntamiento de la capa superior arcillosa en dirección al valle, formando escalones a manera de escarpes de falla normal, como en la región de San Juan Ixtayopan, por efecto de la consolidación diferencial, acelerada por los procesos del bombeo profundo.

7.1 Acciones de prevención.

Para mitigar los daños producidos a las construcciones por los efectos de agrietamiento, se recomienda implementar las siguientes medidas:

Para la comunidad en general :

- Para nuevas construcciones, de tres niveles o más, así como estructuras importantes, se considera indispensable la realización de estudios de mecánica de suelos, exploración suficiente y asesoría técnica especializada antes de construir en zonas propensas o con antecedentes de agrietamiento.
- No utilizar cimentaciones de piedra.
- No utilizar zapatas aisladas.
- Se requiere colocar elementos impermeables durante el desplante de la cimentación, para evitar su degradación a corto plazo, por efectos de humedad y ascensión capilar salina.
- Prevenir en la cimentación la posibilidad de un piso extra.
- Desligar las estructuras localizadas en forma perpendicular a la traza de grietas.
- Colocar terraplenes de tepetate compactado al 85 o 90 % Proctor o Porter, con espesor mínimo de 60 cm. antes de construir, así como rigidizar desde la cimentación las estructuras.
- Utilizar en los rellenos material adecuado, así como cumplir las normas de compactación.
- Separar constructivamente desde la cimentación, los muros de bardas de las edificaciones
- Utilizar en los pisos “ firmes ” de concreto con un espesor mínimo de 10 cm; en claros mayores, acortarlos mediante cadenas de concreto o armar con malla metálica, con separaciones máximas de 2.5 m entre ellos; colocar dalas de cerramiento en muros colindantes o de fachada.
- En la zona de mayor agrietamiento, evitar las construcciones a una distancia mínima de 2 m respecto a las mismas; desligar los elementos localizados en la traza de grietas mediante juntas constructivas y rigidizar las estructuras en conjunto.

- Colocar juntas flexibles en instalaciones subterráneas alojadas dentro de la traza de falla por agrietamiento, particularmente de agua potable y drenaje.
- Considerar el aprovechamiento del agua de lluvia, mediante proyectos de captación y uso para muebles sanitarios, riego y otros usos afines.

Es necesario recalcar que los poseedores de viviendas ubicadas en zona de agrietamiento, tienen que convivir con el fenómeno y realizar reparaciones de distinta magnitud, para evitar daño en elementos estructurales.

Se debe contemplar que la presencia de grietas favorece el deterioro y afectación de los elementos de carga y aún de los elementos estructurales de las viviendas, de tal manera de considerarlo de lento impacto, progresivo e irreversible, que no obstante, permite en sus inicios identificar el grado de afectación y tomar medidas de refuerzo y rehabilitación, rigidización de los muros y elementos transversales al eje de la grieta, recimentación, desligue, demolición parcial y restitución de la capacidad de carga de las estructuras, etcétera.

A las Autoridades responsables de Desarrollo Urbano, Obras y todas aquellas involucradas en la prestación de servicios y Reordenamiento de Asentamientos Humanos :

Se considera necesario RESTRINGIR TOTALMENTE la autorización de construcciones y el crecimiento de la mancha urbana, hacia los corredores principales de recarga de los mantos acuíferos, tales como la Sierra de Chichinautzin y Santa Catarina, así como la planicie aluvial que rodea el límite oriental de la zona lacustre, en donde afloran basaltos y piroclástos permeables, declarando a las zonas anteriormente citadas y los sitios aledaños como zonas de reserva ecológica, bajo estricto control de autorización de licencias de construcción, condicionando esta última a la construcción y mantenimiento de pozos de absorción y medidas de mitigación en todos los proyectos a realizar, particularmente descritas en los estudios de impacto ambiental y urbano, así como en los Programas Delegacionales de Desarrollo Urbano.

- Desarrollar proyectos tendientes a redefinir y optimizar las políticas de extracción y distribución de aguas procedentes de los acuíferos, paralelamente a difundir campañas de concientización y ahorro del agua.
- Considerar en las políticas presupuestales el incremento de Lagunas de regulación, plantas de tratamiento y reciclaje de aguas servidas, para fines de riego y procesos industriales; intensificar los aprovechamientos locales en las zonas altas,
- Proporcionar a los interesados y en general a los desarrolladores de nuevas construcciones en la región, asesoría técnica y las recomendaciones constructivas para los sitios afectados por los agrietamientos, a través de las Sociedades técnicas y Centros de Educación Superior, áreas u organismos de apoyo a la vivienda y fomentar cursos de autoconstrucción.

- Reubicar o habilitar con conexiones especiales y tuberías flexibles los ductos de drenaje, agua potable, gasoductos, etc, que se ubiquen en las zonas de grietas; instalando pozos de monitoreo y nivelación, referidos a bancos de nivel profundo.
- Condicionar la autorización de licencias de construcción, a aquellas estructuras que cubran los requisitos mínimos de exploración, en las zonas de alta incidencia de agrietamientos.
- Reglamentar la obligación de construir y proporcionar mantenimiento periódico a sus pozos de absorción, para proyectos multifamiliares de vivienda en zonas de recarga, aún cuando éstos formen parte de programas sociales y de políticas de gobierno local y federal.
- Considerar en los planes y programas de Desarrollo Urbano, zonas y sitios propensos de agrietamiento, para condicionar la autorización de licencias de construcción, a la investigación exhaustiva del subsuelo y el cumplimiento de los aspectos técnicos para su estabilización.
- Implementar proyectos de captación y reuso del agua de lluvia, además de los dispositivos ahorradores de agua, en nuevos desarrollos habitacionales, de cumplimiento obligatorio en nuevas licencias de construcción.

La aplicación de estas medidas no detendrán los agrietamientos en los sitios analizados, pero permitirán disminuir sus efectos sobre las construcciones.

Es importante mencionar que en forma paralela al mecanismo de formación de grietas, las fugas de agua potable y de drenaje, contribuyen ampliamente a un desarrollo más rápido y a su exposición en superficie, por lo que se deberán reportar y reparar inmediatamente.

A los Centros de Educación Superior y Sociedades Técnicas :

Como es difícil pensar en la eliminación o disminución de los volúmenes de extracción de agua de los acuíferos subyacentes, se considera que el fenómeno de agrietamiento será cada vez mayor, con afectación a nuevas construcciones y agravando el estado de las ya dañadas, por lo que es necesario desarrollar acciones que permitan conocer el comportamiento real del subsuelo, tales como:

Implementar convenios de colaboración con los gobiernos locales y estatales para instalar instrumentos de medición y monitoreo que permitan conocer con detalle la incidencia, velocidad, magnitud y dirección de los fallamientos, así como la disminución de presiones en el subsuelo, además de la incorporación de investigadores y prestadores de servicio social, en programas de apoyo social y a la titulación, para su seguimiento y atención.

Una línea de investigación adicional para determinar la influencia de asentamientos bruscos de terreno o la aparición súbita de fracturas superficiales, sería el análisis de sismos locales y su relación con los agrietamientos existentes, condición de suma importancia para determinar la probabilidad de aparición en otras zonas de fracturamiento incipiente.

Se considera conveniente la utilización de un sistema de piezómetros localizados estratégicamente en los pozos de extracción, con el objeto de obtener la variación tanto de los niveles estáticos, como de las fluctuaciones de presión de agua, a diferentes profundidades del acuífero.

Instalar y complementar en un sistema integral, la red de bancos de nivel topográfico y bancos de nivel profundo, para conocer la variación espacial de los abatimientos y su influencia en los estratos superficiales y construcciones existentes.

Con los resultados obtenidos se podrán elaborar gráficas que indiquen las evaluaciones de los niveles estáticos y de piezometría, trazando curvas de igual evolución, correlacionándolas con las extracciones y recarga del manto potable, para el manejo integral de las políticas de extracción.

Se han desarrollado estudios y habilitado algunos pozos piloto para inyectar o permitir la infiltración de agua, particularmente de lluvia, en los acuíferos subyacentes, aunque la mayoría de ellos pierden rápidamente sus propósitos por colmatación, debido al azolve y falta de mantenimiento de los mismos, razón por la cual se considera necesario desarrollar mecanismos alternos para facilitar la recarga de los mantos acuíferos y al mismo tiempo, evitar su contaminación.

En este sentido, se considera conveniente realizar una campaña de exploración geotécnica para conocer las propiedades geomecánicas del subsuelo en los sitios afectados por el fenómeno, ubicando con precisión las grietas y fallamientos mediante reconocimientos detallados, apoyados en fotografía aérea y cartografía actualizada de la región, asimismo, mediante la utilización de técnicas de telemetría, medición láser y aplicaciones tecnológicas existentes, a través de convenios con el Gobierno local, Centros de Educación Superior y Sociedades Técnicas, aplicados a Programas Sociales, para conocer y proyectar las tendencias y evolución de los agrietamientos.

Estas acciones permitirán reorientar los programas de uso de suelo, en beneficio de la comunidad, considerando que estos proyectos pueden ser extensivos a diferentes municipios y en diversas partes de la República, donde se tiene problemas de fallamientos en superficie por extracción de agua subterránea, tales como Lerma, Aguascalientes, Querétaro, Celaya, Guanajuato, etc, con las particularidades de cada región.

Con estos aspectos se pretende sensibilizar a las autoridades y comunidad en general, que la falta de previsión en los Programas de Desarrollo Urbano, así como el desconocimiento total de las características del subsuelo, la ocupación indebida de áreas de recarga y zonas propensas de agrietamiento, aunado a la explotación irracional de los mantos acuíferos y una cultura inexistente del aprovechamiento integral del agua, generan problemas de estabilidad en estructuras superficiales, por lo que deberá dársele mayor importancia al fenómeno antes descrito, destinando mayores recursos para la investigación y seguimiento apropiado de la problemática actual; en caso contrario, la falta de visión limitará el aprovechamiento integral del agua, a mediano y largo plazo, con altos costos sociales, técnicos y económicos.

Nota : la información contenida en el presente documento se basa en las referencias asentadas, apreciaciones directas y en los recorridos realizados por el suscrito en los sitios afectados.

(Como consecuencia de la difusión de este material a las autoridades del Gobierno del Distrito Federal, durante la prestación del Servicio Social en el cual se basó el presente trabajo escrito y por recomendación de la Dirección de Control y refuerzo de Edificaciones, de la Secretaría de Obras y Servicios , la comunidad de la Escuela Primaria “ Francisco de Córdoba”, en San Juan Iztayópan, fué reubicada, por detectarse condiciones de inseguridad para los usuarios, autorizándose el proyecto de construcción del inmueble en otra zona con mejores características geotécnicas).

Lista de Figuras

| No. | Figura | Página |
|-----|--|--------|
| 1 | Croquis de localización general | 4 |
| 2 | Secuencia de desarrollo de los lagos | 7 |
| 3 | Geología General de la Región. | 9 |
| 3-A | Cortes Geológicos. | 9 |
| 4 | Croquis de colonias en Tláhuac | 13 |
| 4-A | Zonificación Geotécnica | 14 |
| 5 | Croquis de agrietamientos en la Col. Del Mar. | 16 |
| 6 | Croquis de agrietamientos en la Colonia Tlaltenco | 17 |
| 7 | Croquis de agrietamientos en Tetelco | 19 |
| 8 | Croquis de agrietamientos en San Juan Iztayopan | 20 |
| 8-A | Corte esquemático 1-1 ‘ | 21 |
| 8-B | Croquis de Afectación local | 21 |
| 9 | Levantamiento regional de agrietamientos en San Juan Iztayopan | 22 |
| 10 | Croquis de agrietamientos en Mixquic | 23 |
| 11 | Croquis de agrietamientos en Santa Catarina | 24 |
| 12 | Configuración de la capa del acuitardo | 27 |
| 13 | Mapa de profundidad del nivel estático | 30 |
| 14 | Niveles piezométricos de la región | 31 |
| 15 | Abatimiento del nivel estático | 32 |
| 16 | Censo de aprovechamiento hidrológico | 33 |
| 17 | Mecanismo de fisuramiento, desarrollo y azolve de grietas | 36 |
| 18 | Mecanismo de falla | 37 |
| 19 | Proporciones de mezclas para tratamiento y relleno de grietas. | 40 |
| | | |
| | | |
| | | |

BIBLIOGRAFÍA

1. El Subsuelo y la Ingeniería de cimentaciones en el área de la Ciudad de México. SMMS, México, 1978
2. Informe sobre agrietamientos en la Delegación Iztapalapa, Instituto de Geografía UNAM, José Lugo Hubp, Ortega Guerrero, J.J. Zamorano Orozco y otros.
3. SMM Agrietamiento de Suelos, México (DGCOH 1992-1994)
4. Comisión Nacional del Agua (1986) Boletín de Mecánica de Suelos No. 10 SARH
5. Nuevo mapa Geológico de la Ciudad de México (Mooser-1996)
6. Estudio de las curvas de aceleración sísmica en la Ciudad de México (1ª etapa) Centro de Investigación Sísmica A.C. Luis E. Pérez Rocha, Ma. Zarate Vázquez, Luis Vietez Utesa
7. Mediciones y configuraciones piezométricas de la red de pozos piloto de la DGCOH, localizados en el DF. Chalco y Texcoco, DGCOH 1995
8. Fallamiento de Terrenos en Celaya, SMMS, 1985
9. 3er. Foro del agua "Agua para el siglo XXI", CNA, Cd. Nezahualcóyotl, Junio de 2000.
10. Geología del relleno Cuaternario de la Cuenca de México. F. Mooser, DGCOH 1994
11. Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México (1988). Zoltán de Cerna et al. Instituto de Geología UNAM. Boletín 104.
12. Características Geológicas y Geotécnicas del Valle de México. F.Mooser et. Al. Covitur 1990.
13. Geomorfología del Sur de la Cuenca de México. José Lugo Hubp. Instituto de Geografía UNAM , 1984.
14. Tipos de grietas superficiales existentes en la Ciudad de México y área metropolitana. Informe Interno, DGCOH 1996.
15. Geofísica Internacional. UNAM, Abril 1989. Diversos Autores.
16. Undécima conferencia Nabor Carrillo, SMMS, 1992.
17. Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México. Enrique Santoyo, Efraín Ovando, Federico Mooser, Elvira León. TGC México 2005.