

03060



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**DIRECCION GENERAL DE POSGRADO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**AGRIETAMIENTO EN SEDIMENTOS LACUSTRES  
UBICADOS EN ZONAS CERCANAS A LA SIERRA  
DE GUADALUPE**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**(AGUAS SUBTERRANEAS)**

**P R E S E N T A:**

**XOCHITL ALICIA ESCOBAR AUBERT**

**ASESOR DE TESIS:**

**DR. ADRIAN ORTEGA GUERRERO**

**MEXICO, D. F.**

**2004**



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

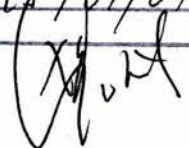
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Xochitl Alicia Escobar Alvarez

FECHA: 15/01/04

FIRMA: 

**A mi familia:**  
**Mi hija, mi nieta**  
**y mi Madre**  
**quien me ilumina con la luz**  
**de su lejana estrella**

***A mis maestros  
compañera(o)s  
y amiga(o)s***

# **AGRIETAMIENTO EN SEDIMENTOS LACUSTRES UBICADOS EN ZONAS CERCANAS A LA SIERRA DE GUADALUPE**

## **CONTENIDO**

	<b>página</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1.- Introducción</b>	<b>3</b>
<b>1.1.- Generalidades</b>	<b>3</b>
<b>1.2.- Objetivo</b>	<b>4</b>
<b>1.3.- Metodología</b>	<b>4</b>
<b>1.4.- Localización del área en estudio</b>	<b>4</b>
<b>2.- Caracterización Geológica, Hidrogeológica y Geotécnica del área en estudio</b>	<b>6</b>
<b>2.1.- Geología</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1.- Geología regional</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2.- Geología particular</b>	<b>9</b>
<b>2.2.- Hidrogeología</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1.- Historia de aprovechamiento del acuífero</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2.- Unidades hidrogeológicas</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3.- Parámetros hidráulicos</b>	<b>14</b>
<b>2.2.4.- Hundimientos en la zona de estudio</b>	<b>16</b>
<b>2.3.- Geotecnia</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1.- Características geotécnicas del área en estudio</b>	<b>18</b>
<b>3.- Características del Agrietamiento en el área de estudio</b>	<b>23</b>
<b>4.- Discusión de Resultados</b>	<b>27</b>
<b>4.1.- Zonificación y Jerarquización del agrietamiento</b>	<b>27</b>
<b>4.2.- Modelo conceptual del origen del agrietamiento</b>	<b>28</b>
<b>5.- Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>32</b>
<b>6.- Bibliografía</b>	<b>35</b>

# **AGRIETAMIENTO EN SEDIMENTOS LACUSTRES UBICADOS EN ZONAS CERCANAS A LA SIERRA DE GUADALUPE**

## **RELACIÓN DE FIGURAS, PLANOS Y ANEXOS**

### **FIGURAS**

Figura No. 1	Localización del área en estudio
Figura No. 2	Geología regional del área en estudio.
Figura No. 3	Esquema estructural de la Sierra de Guadalupe
Figura No. 4	Mosaico de fotografías aéreas del área en estudio
Figura No. 5	Esquema evolutivo de la Cuenca de México
Figura No. 6	Esquema evolutivo de Lagos de la Cuenca de México
Figura No. 7	Curvas de igual hundimiento en la ciudad de México
Figura No. 8	Longitud e Intensidad de agrietamiento y sitios de observación
Figura No. 9	Esquema de presiones hidrostáticas
Figura No. 10	Origen del agrietamiento
Figura No. 11	Modelo hidrogeológico conceptual del origen de agrietamiento

### **TABLAS**

Tabla No. 1	Deformaciones obtenidas en puntos de observación
-------------	--

### **PLANOS**

Plano No. 1	Geología del área en estudio.
Plano No. 2	Detalle de acuíferos en el área de estudio.
Plano No. 3	Exploración Geotécnica realizada en el área de estudio.
Plano No. 4	Zonificación de agrietamiento.

# **AGRIETAMIENTO EN SEDIMENTOS LACUSTRES UBICADOS EN ZONAS CERCANAS A LA SIERRA DE GUADALUPE**

## **RESUMEN**

El gran crecimiento territorial de la mancha urbana y desarrollo poblacional de la ciudad de México, ha originado la necesidad de establecer una infraestructura urbana en terrenos formados por suelos lacustres altamente compresibles o aluviales poco consolidados que han generado los consabidos problemas geológicos y geotécnicos, lo que deriva de la alta compresibilidad y baja resistencia al corte que tienen este tipo de suelo; por otra parte un alto porcentaje del suministro de agua potable de la ciudad (70%) se realiza por medio de aprovechamientos subterráneos, explotación que en los últimos años ha marcado más el desequilibrio hidrogeológico de la cuenca de México.

Este desequilibrio se ha acentuado en los últimos 30 años y en la actualidad se ha intensificado, mediante la aparición de grietas en el subsuelo, las cuales están provocando severos problemas a las edificaciones urbanas, pavimento y sistemas de transportes, como es el caso del tren subterráneo de la ciudad de México.

Extensas zonas urbanas están siendo afectadas por el agrietamiento de los sedimentos no consolidados, como consecuencia de la extracción de agua del subsuelo; considerando el alto riesgo de falla en las estructuras afectadas por este efecto, se decidió estudiar el agrietamiento en sedimentos lacustres que se han presentado en la zona contigua a la formación pétreo de la Sierra de Guadalupe, debido a que es una zona de alta densidad poblacional, afectada intensamente por el agrietamiento.

El estudio del agrietamiento reviste de importancia no solo por los altos costos que se incurren en la reparación o demolición de edificios habitacionales, escuelas, puentes, etc, sino en el riesgo de falla que se tiene al presentar un mal comportamiento en las cimentaciones sobre todo en condiciones sísmicas.

Desde aproximadamente 10 años se han realizado diversos estudios sobre el origen y formación de grietas, sin embargo está información se encuentra dispersa, siendo este uno de los objetivos de este trabajo la recopilación, ordenamiento, interpretación y análisis de información existente, dándole una utilización práctica en la ingeniería civil e hidrogeológica. Por lo que se consideró los procesos de abatimiento de las presiones intersticiales y deformabilidad volumétrica del subsuelo, enfocados a formación, evolución y desarrollo del agrietamiento de los sedimentos lacustres no consolidados y consolidados. Por



último se establece un modelo conceptual del proceso de agrietamiento que define las variables que intervienen.

En esta investigación se realizó en primera instancia una fotointerpretación y un levantamiento a detalle de grietas del área en estudio, considerando además estudios hidrogeológicos y geotécnicos realizados dentro del área en estudio.

## **1.- Introducción**

### **1.1.- Generalidades**

El agrietamiento del terreno es un proceso inducido principalmente por la extracción excesiva de agua del subsuelo (Juárez B. E., 1991, Cruickshank G. 1998, DDF 1975, CNA-PROMMA 1997 y 1998), dado que se provoca lo que se conoce como hundimientos diferenciales (Melgoza Carlos A. *et.al.*, 1978, Morozco Juan *et.al.*, 1991), proceso en donde intervienen diversos factores entre los que se pueden mencionar: tipo de suelo, propiedades hidráulicas del acuífero, características geométricas del acuífero, presencia de macizos rocosos inmersos en el depósito lacustre-aluvial y el desequilibrio hidrogeológico que se esté estableciendo en la zona.

El problema de agrietamiento se empezó a detectar desde la década de los años setenta (Cruickshank G. 1998, Mosser F. *et.al.*, 1975), empezaron aparecer grietas longitudinales superficiales que por su magnitud ocasionaron daños a los edificios, pavimentos, puentes y pasos a desnivel. Los sitios donde se observa este tipo de fenómeno presentan, como características comunes, el tipo de suelos, fuertes abatimientos del nivel freático y variaciones de presión de poro.

Desde un inicio las investigaciones efectuadas asociaban este tipo de agrietamiento a la extracción de agua, aunque se desconocía cómo era el mecanismo. En primera instancia consideraba como resultado de esfuerzos tensionales en la estructura del suelo, sin embargo, es necesario asociar además la probabilidad de ocurrencia de agrietamiento a la historia geológica y condiciones estructurales del propio depósito lacustre-aluvial, así como de la formación rocosa que funciona como base de suelos compresibles.

Considerando que el efecto de agrietamiento en suelos es uno de los problemas que aquejan a la ciudad de México, se inició la investigación sobre *Agrietamiento de sedimentos lacustres ubicados en zonas cercanas a la Sierra de Guadalupe*, debido a que se trata de una zona donde se ha detectado la problemática y se tiene un conocimiento geológico estructural (Aguayo J. E. *et. al.*, 1989, Zoltan de Cserna *et. al.*, 1988 y Ferrari L. *et.al.*, 1990) que permite buscar esa asociación entre los factores planteados y la generación de grietas, por lo que se trata de caracterizar el comportamiento del agrietamiento de los depósitos superficiales y su interacción con el acuífero del área, así como su impacto urbano y ambiental.

Es importante mencionar que la presencia de agrietamiento en los suelos lacustres presentes en el área conurbada de la ciudad de México y Estado de México ha sido investigada en las dos últimas décadas por diversos autores, algunos de éstos trabajos son base fundamental en el desarrollo de esta

investigación (Marsal R. J., 1978, Aguayo E. et.al., 1989, Vázquez Sánchez E. et.al., 1989, Dante J. Morán Centeno, 1984, Cruickshank G. 1998, Federico Mosser et.al., 1975, León Portilla Miguel et.al., 1975, entre otros). Dichas investigaciones han dado prioridad a zonas donde se han registrado mayores afectaciones, como es el caso del centro y suroriente del Distrito Federal, no así en las inmediaciones de la Sierra de Guadalupe.

## **1.2.- Objetivo**

El objetivo principal del presente trabajo es definir conceptualmente el modelo hidrogeológico que explique mecanismo de generación de grietas en el terreno, debido a la interacción del acuífero con respecto a los depósitos de origen lacustre que funcionan como acuitardo.

## **1.3.- Metodología**

La investigación sobre agrietamiento de suelos realizada se basó, en primera instancia, en la recopilación de información geológica, estructural, hidrogeológica y geotécnica del área en estudio. Procesada la información, se analizó la problemática desde un enfoque hidrogeológico considerando principalmente la orientación e intensidad de agrietamientos existentes con respecto a zonas de extracción del acuífero, con la finalidad de definir en primera instancia el modelo hidrológico conceptual del agrietamiento de los suelos así como la zonificación de mayor impacto de este efecto alrededor de la Sierra de Guadalupe.

Con la información recabada, se procedió a la detección, ubicación y obtención de la orientación de grietas y fracturas sobre un mosaico de fotografías aéreas de la Ciudad de México a escala 1:30,000 (L-6 F-008 a F-020, L-7 F-017 a F-029, L-8 F-007 a F-019), tomadas el 2 de diciembre de 1994. La fotointerpretación sirvió de base para establecer la correlación entre el agrietamiento de los sedimentos, fracturamiento de la roca confinante, parámetros geológicos gobernantes (geomorfología y litología principalmente) y sitios de extracción de agua subterránea.

Los sitios de interés se detectaron mediante recorridos de campo, apoyándose para la presentación de datos, con cartas topográficas de INEGI a escala 1:50,000 (E14A29 y E14A39 edición 1998), actualizada en versión AUTOCAD.

## **1.4.- Localización del área en estudio**

El área en estudio se localiza en la porción norponiente de la Cuenca de México, particularmente en la planicie que circunda la Sierra de Guadalupe. El área queda limitada al norte por el Cerro de Tultepec, al oriente por el depósito de evaporación solar "El Caracol", al sur por el área conurbada de la ciudad de

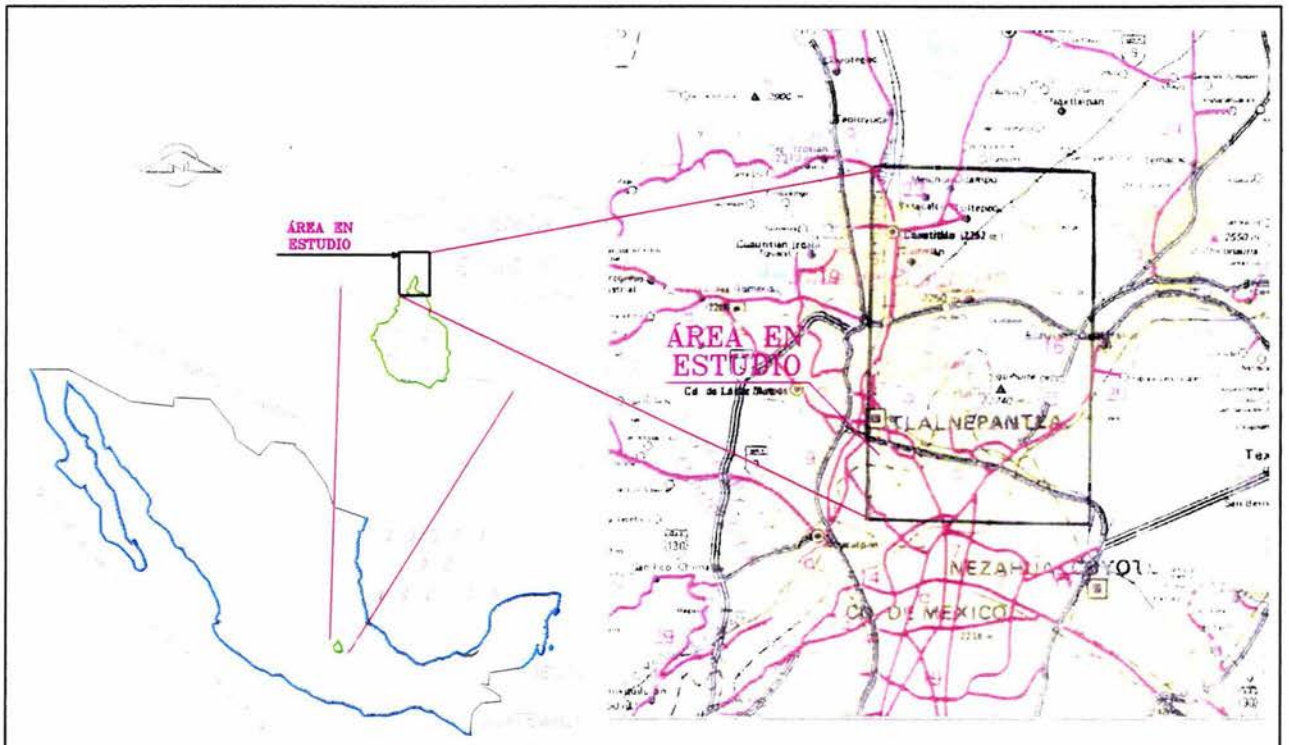
México, y al poniente por las estribaciones de la Sierra de Las Cruces; de acuerdo con la división política la zona de estudio queda englobada en las delegaciones Gustavo A. Madero y Azcapotzalco, así como en los municipios de Tlalnepantla Poniente y Oriente, Cuautitlán, Tultitlán, Coacalco y Ecatepec.

La Sierra de Guadalupe, ubicada en la porción central del área en estudio, está representada por el C. Pico Tres Padres, con una elevación máxima de 3,000 msnm. Las laderas de la Sierra presentan fuertes pendiente y barrancas pronunciadas constituidas superficialmente por gran cantidad de caídos y rodados. En contraste, la planicie con una elevación promedio de 2,240 msnm se caracteriza por estar constituida por un potente espesor de sedimentos donde se han ocurrido grandes agrietamientos de importancia.

El área en estudio tiene una extensión del orden de 450 km<sup>2</sup>, quedando definida geográficamente por 19° 41' y 19° 27' de latitud norte y 99° 02' y 99° 12' de longitud oeste.

Debido a que el área en estudio se encuentra en zonas altamente urbanizadas, el acceso puede realizarse con relativa facilidad. La figura número 1 presenta en forma gráfica la localización del área en estudio.

**FIGURA No. 1: LOCALIZACIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO**



Referencia Bibliográfica:  
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 1994  
Guía Roji de carreteras 2000-01, 2000

## **2.- Caracterización Geológica, Hidrogeológica y Geotécnica del área en estudio**

### **2.1.- Geología**

#### **2.1.1.- Geología regional**

##### **Fisiografía**

El área en estudio pertenece a la provincia fisiográfica conocida como Cinturón o Faja Volcánica Transmexicana (CVT), la cual bisecta a la porción meridional de la República Mexicana, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México, constituido principalmente por sistemas estructurales complejos de fosa y pilares (Aguayo Camargo J. E. *et.al.*, 1989), particularmente el área en estudio se encuentra enclavada en la porción septentrional del CVT y específicamente al poniente del Cuenca de México, en donde se pueden observar elevaciones topográficas de pendientes abruptas a moderadas, con pequeñas barrancas rodeadas por planicies aluviales.

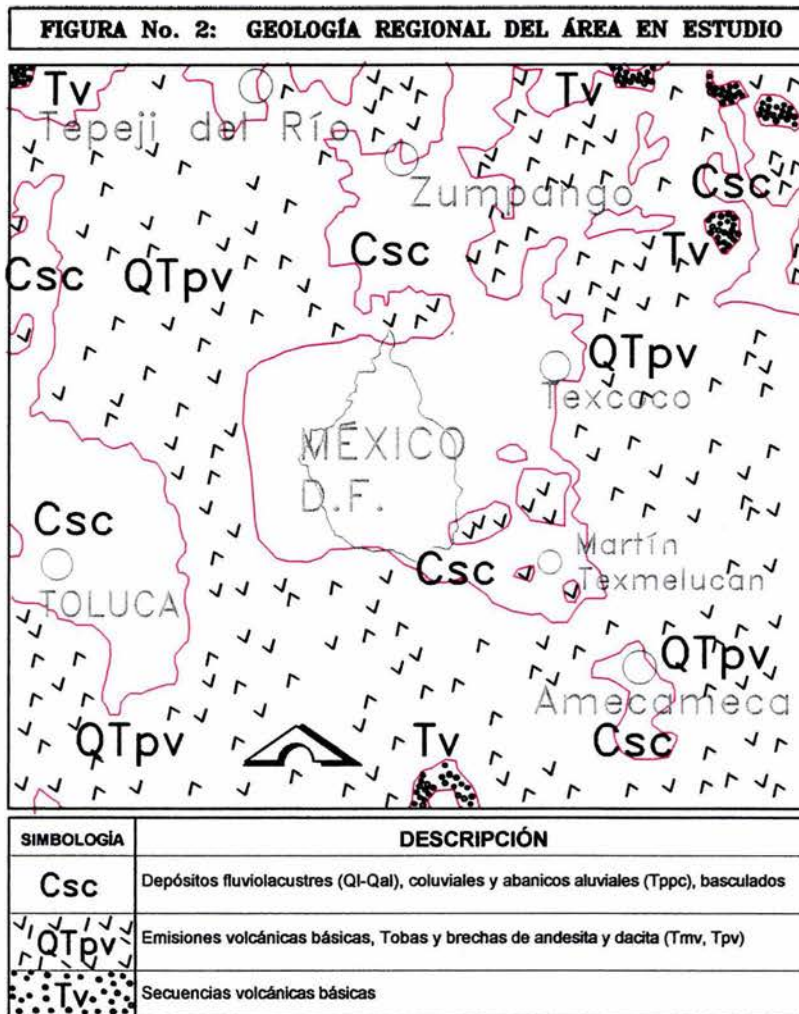
##### **Geomorfología**

Geomorfológicamente el CVT y por ende el sitio en estudio, están constituidos por sierras volcánicas de elevaciones abruptas, con valles escalonados y cuencas endorreicas donde se observan abanicos granulares con el consecuente desarrollo de arroyos intermitentes que siguen el patrón estructural regional que labran el relieve y depositan sus sedimentos en las llanuras aluviales circundantes caracterizadas por presentar pendientes suaves a semiplanas (Vázquez Sánchez E. *et.al.*, 1989 y Aguayo Camargo E. *et.al.*, 1989).

##### **Geología**

La CVT, de edad Cenozoica, es de origen volcánico desarrollada bajo un ambiente geotectónico de arco continental (Ortega Gutierrez *et.al.*, 1991), cronológicamente (Fernando Ortega Gutiérrez *et.al.*, 1999, Dante J. Morán Centeno, 1984) la región está constituida por una gran variedad de rocas volcánicas que fueron emitidas a través de un importante número de aparatos volcánicos originados en el Cenozoico, la actividad volcánica en la región dio lugar a secuencias volcánicas básicas (**Tv**) localizadas al nororiente del área en estudio, emisiones volcánicas básicas, tobas y brechas de andesitas y dacitas (**QTpv**) que conforman las elevaciones topográficas del área mencionada y en la planicie por depósitos fluviolacustres, coluviales, y abanicos aluviales basculas (**Csc**) que se caracterizan por una gran heterogeneidad en la granulometría y por espesores que adelgazan

hacia los márgenes de las estribaciones topográficas. En la figura 2 se puede apreciar la geología regional que caracteriza el área en estudio.



Referencia bibliográfica:  
 Carta Geológica Mexicana escala 1:27000,000, UNAM & SEMIP, quinta edición, 1999

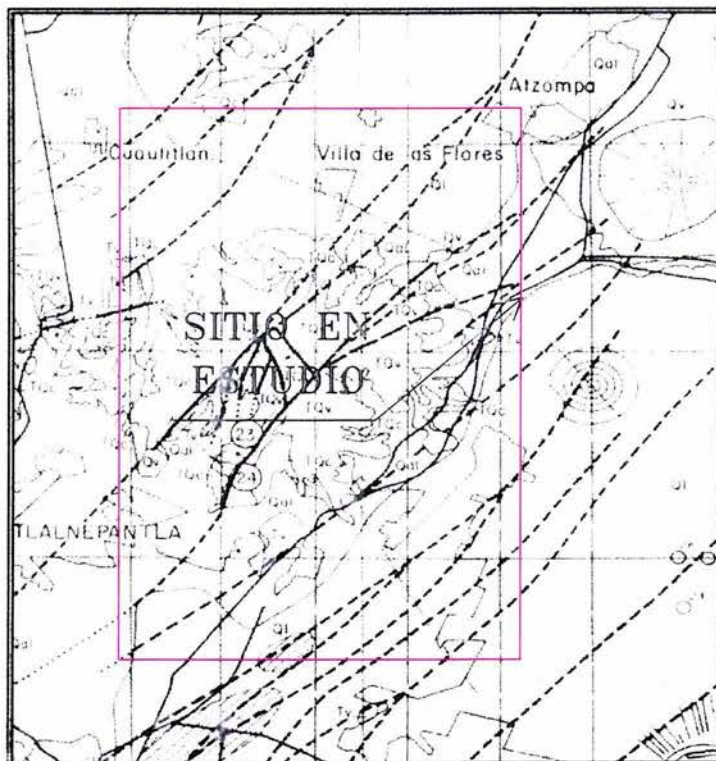
Particularmente la región, que ya se encontraba bajo un sistema de pilares y fosas tectónicas desde el Plioceno (comentario personal del Dr. Hugo Delgado) incrementa el cierre de sus cuencas y valles a fines de Pleistoceno e inicios del Holoceno (Mosser Federico et.al., 1975) dando paso a la formación de un gran cuerpo de agua en el que se propició un ambiente de depósito lacustre sujeto a oscilaciones batimétricas, dando paso a lo que en la actualidad se denomina Cuenca de México, bajo estas condiciones ambientales, se generó (Castillo R. 1978 y Girault, 1964) la acumulación de sedimentos clásticos arcilloso, limoso, arenoso y vidrio volcánico (Formación Arcillosa Inferior-**FAI**). Cuando la región se vio sujeta a períodos de sequía se depositaron sedimentos aluvio-lacustres de composición predominantemente limo arcillosa y arenas finas limosas de consistencia muy

firme a dura a compacta, cementados con carbonato de calcio arcillosa (**1° Capa Dura-CD**) para nuevamente registrarse intercalaciones de arcillas, limos y limos arenosos que representan recuperación del nivel de agua (Formación Arcillosa Superior-**FAS**), por último se tiene el registro de desecación natural y artificial dando paso a la formación de una capa dura superficial constituida por arcillas limo arenosos y rellenos artificiales de escombros de construcciones (Manto Superficial-**MS**).

En la Sierra de Guadalupe (Aguayo Camargo J. E. *et al.*, 1989, Vázquez Sánchez E *et al.*, 1989, Zoltan de Cserna *et al.*, 1988 y Mooser F., 1975) existe una serie de fallas normales que cortan principalmente los depósitos piroclásticos de edad miocénica, llegando a presentarse en estructuras de fosas escalonadas, como es el caso de las fallas Tenayuca y Chiquihuite mostradas en la figura número 3, las fallas presentan una orientación preferencial NE-SW con buzamiento indistintos con ángulo promedio de 60° grados, llegan a presentar longitudes promedio de 4 km y desplazamientos que varían de unos cuantos centímetros a varios metros. En conjunto la estructura presenta un arreglo conjugado definido, que frecuentemente se encuentran sellados y enmascarados por depósitos de talud.

Con relación al agrietamiento de la planicie fuera del área que nos ocupa, se puede decir (Murillo F R. *et al.*, 1978, Melgoza Carlos 1978), que estas presentan una orientación preferencial NE-SW y con menor frecuencia NW-SE, estas estructuras se encuentran enmascarados por la urbanización característica de la ciudad.

**FIGURA No. 3: ESQUEMA ESTRUCTURAL REGIONAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE**



Investigaciones estructurales regionales efectuadas por el Instituto de Geología, muestran el comportamiento predominante en la Sierra de Guadalupe, lo que corrobora la tendencia preferencial del agrietamiento de los suelos lacustres detectados en el área de estudio

Referencia bibliográfica:  
Zoltan de Cserna *et al.*, 1988  
Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México.  
Instituto de Geología, Boletín 104

### 2.1.2.- Geología particular

Para llevar a cabo el levantamiento geológico a detalle del área en estudio, se llevaron a cabo diversos recorridos de campo con la finalidad de realizar un mapeo detallado y verificar sitios interés conforme lo interpretado en la fotointerpretación realizada, en términos generales se puede decir que la Sierra de Guadalupe presenta una morfología caracterizada por pendientes fuertes y abruptas constituidas por rocas volcánicas, en las laderas se aprecian pequeñas barrancas con depósitos de talud, desprendimientos de bloques inestables y ocasionalmente depósitos fluviales de corrientes torrenciales intermitentes. En general las zonas bajas presentan un relieve de suave pendiente constituidas por depósitos granulares de tamaño medio a grueso en las inmediaciones de la Sierra, varando a medida que se alejan hacia el valle a sedimentos granulares finos.

De los recorridos de campo se pudo verificar la secuencia litología de la Sierra de Guadalupe descrita por J. E. Aguayo Camargo *et.al.*, 1989 y E Vázquez Sánchez *et.al.*, 1989, que de acuerdo a la nomenclatura definida por dichos autores se puede decir que la base de la sierra se encuentra definida por toba de lapilli muy fracturada de edad Mioceno Medio y Tardío (**Tmv**), de composición predominantemente dacítica y en menor proporción andesítica, textura porfídica y estructura pseudoestratificada, es decir, en muestras de mano se aprecia una intercalación de dos diferentes composiciones, una de ellas constituida por fragmentos angulosos tamaño arena de andesita, plagioclasas, ferromagnesianos y micas embebidos en una matriz microcristalina de color café oscuro al intemperismo y gris rojizo oscuro al fresco, su espesor varía de entre 2 cm a 15 cm, ocasionalmente presenta vesículas alargadas de hasta 25 cm de longitud; la otra secuencia presenta una composición de mayor contenido de plagioclasa, pequeños fragmentos angulosos tamaño arena de dacita y en menor proporción cuarzo y micas, embebidos en una matriz microcristalina, su espesor varía de 1 cm a 8 cm, color café claro al intemperismo y café rojizo claro al fresco, ocasionalmente presenta rodados embebidos en su textura de 10 cm y un alineamiento de capas, características que indican la dirección del depósito. La toba en general se aprecia en los cerros El Jaral, El Panal, El Tenayo, Chiquihuite, Tlalayotes, Zacatenco y Gordo entre otros, presenta superficialmente un perfil de meteorización de hasta 10 m de espesor. A medida que se asciende topográfica y litológicamente se aprecian afloramientos de edad Plioceno Temprano (**Tpv**) de andesita de color gris y textura afanítica intercaladas ocasionalmente como tobas líticas y pumíticas color café grisáceo las elevaciones que la representan son los picos Pico tres Padres, Moctezuma, El Picacho y El Fraile entre otro. Es de mencionar que ocasionalmente se presentan abanicos constituidos por material piroclástico y aluvial granular no consolidado de edad Pliocénica (**Tppc**).



Las barrancas localizadas en las partes altas de la ladera se encuentran constituidas por caídos y rodados angulosos de andesita embebidos en una matriz arena con grava limosas color café rojizo claro de poco espesor, a medida que estas se aproximan e invaden la planicie el depósito varía a arena y grava limosa de color café claro y ocasionalmente algún rodado andesítico (**Qal**).

La planicie que circunda a la Sierra, en general se encuentra enmascarada por la urbanización característica del área metropolitana, más sin embargo se puede apreciar en las diversas áreas verdes, suelos finos constituidos principalmente por arcillas limosas de color café oscuro (**Ql**). Es de mencionar que superficialmente se presenta rellenos de escombros y cascajos de anteriores demoliciones de hasta 2 m de espesor.

En la figura 4 se presenta el mosaico de fotografías aéreas que sirvieron de base para el levantamiento geológico-estructural a detalle reportado en el Plano 1 a escala 1:50,000 del área en estudio.

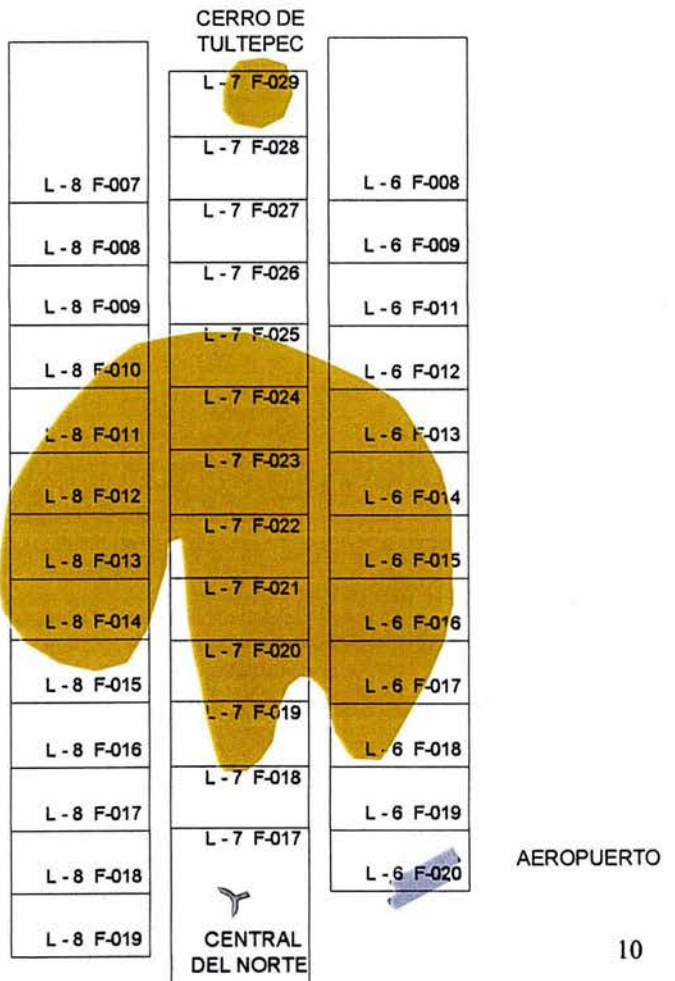
**FIGURA No. 4:  
MOSAICO DE  
FOTOGRAFÍAS AÉREAS**

AEROFOTO SA de CV

FOTOGRAFÍAS A ESCALA 1:30,00,

EDICIÓN 2 DE DICIEMBRE DE 1994

SIERRA DE  
GUADALUPE



AEROPUERTO

## 2.2.- Hidrogeología

En la porción central del CVT se han reconocido diferentes eventos geológicos ocurridos a partir de fines del Cretácico hasta el Pleistoceno (G. Cruickshank 1998), siendo alguno de ellos los ocurridos durante el Mioceno Plioceno representado por la formación de la Sierra de Guadalupe, así como la actividad volcánica de edad Cuaternaria que incremento el cierre del drenaje natural (Hugo Delgado *et. al.*, 1998) dándole a al paisaje un carácter geomorfológico endorreico afectado con el consecuente desarrollo de lagos.

Para comprender de forma global el comportamiento hidrogeológico de la Cuenca de México y en particular el área en estudio que nos ocupa, se dará a continuación un resumen de las características hidrogeológicas más sobresalientes de acuerdo a diversas investigaciones realizadas. A continuación se desglosan los diferentes eventos geológicos que dieron origen y controlan el comportamiento hidrogeológico de la Cuenca de México (Federico Mosser *et.al.*, 1975, G. Cruickshank 1998, J. E. Aguayo Camargo *et.al.*, 1989 y E Vázquez Sánchez *et.al.*, 1989).

<b>FASE</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>EDAD</b>
1°	Secuencias clásticas carbonatadas fuertemente plegadas y falladas por eventos tectónicos, No afloran en la C. de M.	Fines del Cretácico inicios del Paleoceno (65 m. a.)
2°	Depósitos de grava y rodados de caliza intercalados con depósitos de yeso y tobas de composición intermedia a ácida, se encuentran rellenando los sinclinales y fosas tectónicas. No afloran en la C. de M. pero perforaciones realizadas por PEMEX las han detectado a la profundidad de 2,265 m en la zona del Lago de Texcoco	Fines del Eoceno (37 m. a.)
3°	Tobas intermedias a ácidas (ignimbritas) y depósitos fluviales	Oligoceno Medio (32 m.a.)
4°	Derrames dacíticos y andesíticos muy fracturados y alterados - S <sup>a</sup> Tezontlalpan -	Oligoceno Sup. Mioceno inf. (24 a 20 m. a.)
5°	Tobas de composición dacítica y andesítica con sus respectivos derrames - base de la S <sup>a</sup> de Guadalupe -	Mioceno Med-Sup (14 a 10 m. a.)
6°	Derrames y tobas andesíticas y dacíticas crearon extensos abanicos volcánicos - coronan la S <sup>a</sup> de Guadalupe-	Fines de Mioceno Plioceno (6 a 1.8 m. a.)
7°	Derrames y brechas de andesitas basálticas	Pleistoceno (1.3 m. a.)
8°	Derrames y brechas básicas que cierran el drenaje natural, formación de la C. de M. - S <sup>a</sup> Chichinautzin-	Fines Pleistoceno (0.02 m. a.)
9°	Formación de un gran Lago y posterior desecación del mismo	Holoceno (0.01 m. a. N. D.)

En forma general se puede decir (Zoltan de Cserna *et al*, 1988) que la cuenca presenta dos sistemas estructurales característicos originados a partir de procesos

volcánicos, uno representado por sistemas de bloques y fosas en los que predomina una dirección suroeste a noreste y otro actualmente activo, que se caracteriza por una dirección preferencial oeste a este. En la figura 5 se puede apreciar esquemáticamente la evolución de la cuenca de México (Federico Mosser et.al., 1975).

### **2.2.1.- Historia de aprovechamiento del acuífero**

Para conocer a mayor detalle el comportamiento de los depósitos lacustres superficiales, haremos referencia (G. Cruickshank 1998, G. Figueroa 1991) al acervo histórico de las culturas que la poblaron y entendieron la problemática hidrológica gobernante en la zona. Se tiene conocimiento que los Mexicas realizaron diversas obras hidráulicas que controlaban los arroyos y lagos existentes, ya fuera en épocas de grandes avenidas o de estiaje. En el primero de los casos por medio de chinampas (palabra nahuatl chinamitl = seto o cerco cercado hecho de palos, el cerco era rellenado con cieno de fondo de lagos poco profundos, con vegetación acuática flotante hasta formar una parcela cultivable de forma rectangular) que tenían como finalidad ganar áreas cultivables y en segundo caso por medio de construcción de sistemas de canales que utilizaban para riego.

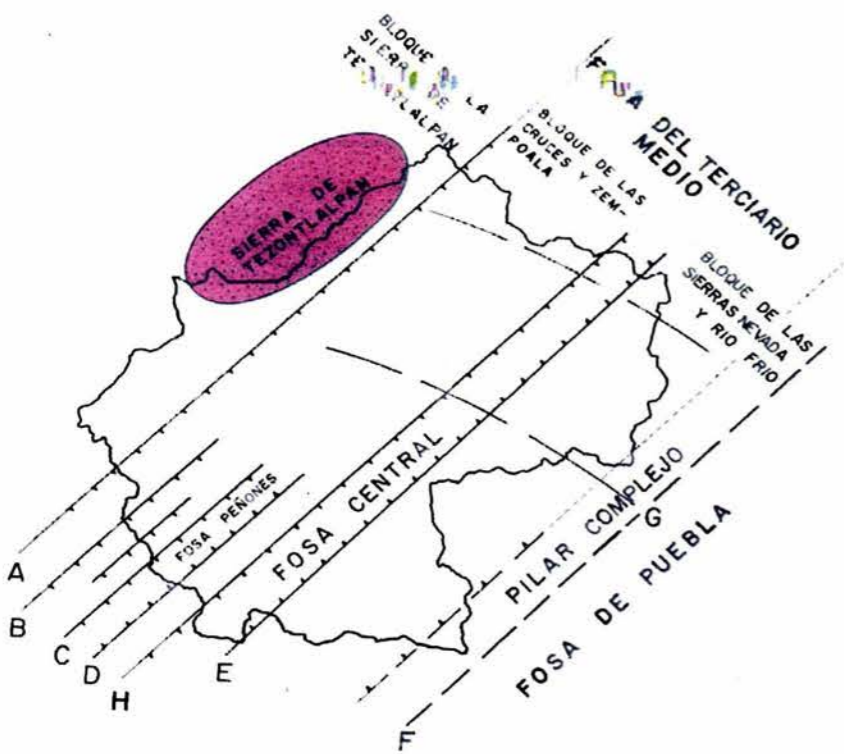
Durante la conquista el control hidráulico de la zona decayó, lo que consecuentemente provocó grandes y variadas inundaciones en diferentes períodos de tiempo, dado que se carecía del conocimiento de período de lluvias de la región.

Para esa época (G. Cruickshank 1998), uno de los principales afluentes al gran Lago de México era el río Cuautitlán, el cual desaguaba en la zona de Zumpango; otro de los grandes afluentes era el Río de la Avenidas de Pachuca que descargaba en la zona de Citlaltepec, ambos cauces hacían que la laguna de Zumpango "derramara" sus excedencias en la Laguna de Xaltocan (San Cristóbal) y esta a su vez en el Lago de Texcoco, que consecuentemente provocaban grandes inundaciones en la ciudad de México. Los lagos de agua dulce del sur nunca representaron peligro inminente para la ciudad. Este proceso puede comprenderse al resumir los diferente niveles de los lagos para el año 1864, referidos al lago de Texcoco.

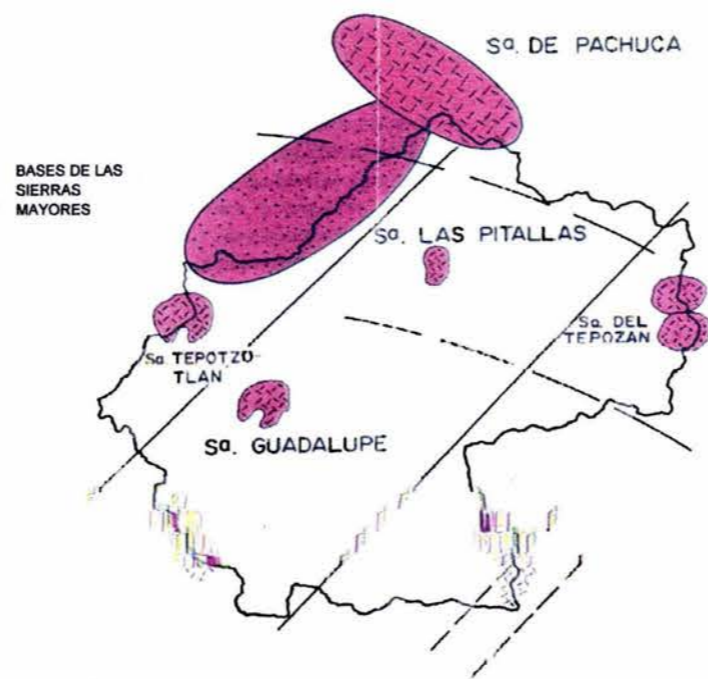
<b>LAGO</b>	<b>Nivel (m)</b>
Zumpango	6.062
Xaltocan	3.474
San Cristóbal	3.597
Texcoco	0.000
Ciudad de México	1.907
Xochimilco	3.119
Chalco	3.082

**FIGURA No. 5: ESQUEMA EVOLUTIVO DE LA CUENCA DE MEXICO**

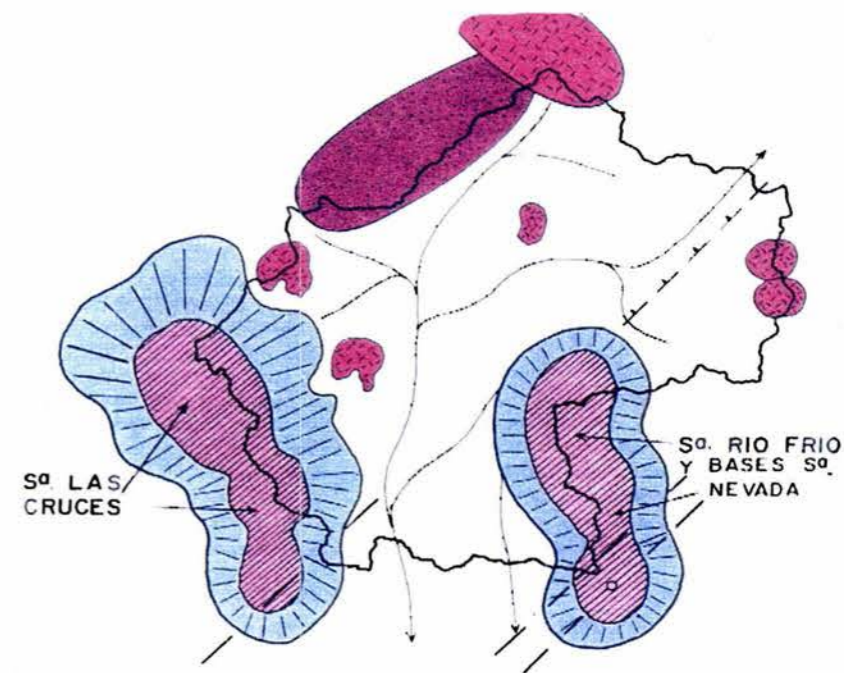
**MIOCENO INFERIOR**



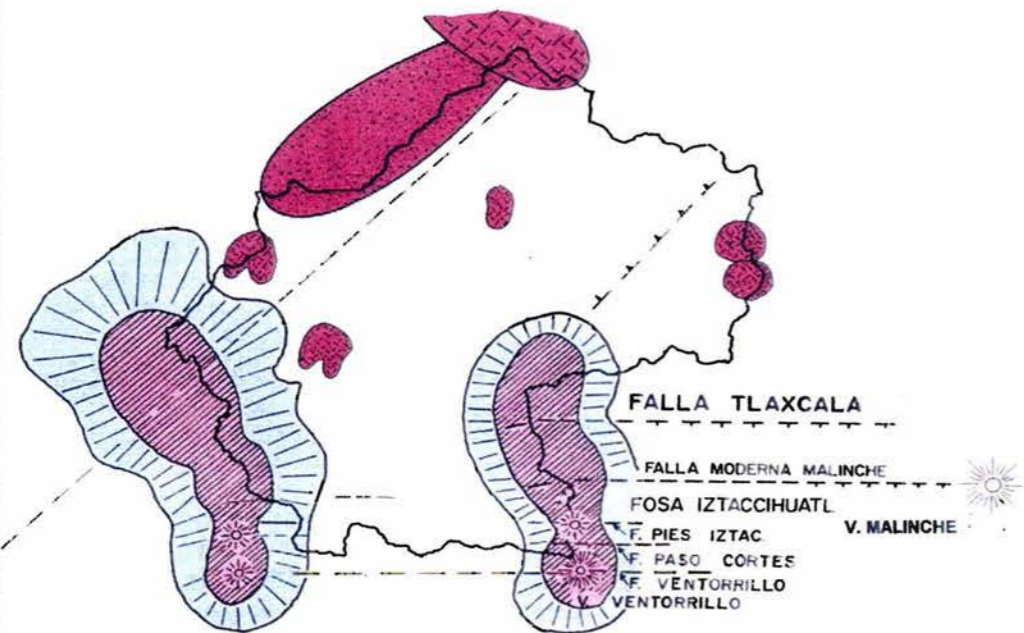
**MIOCENO SUPERIOR**



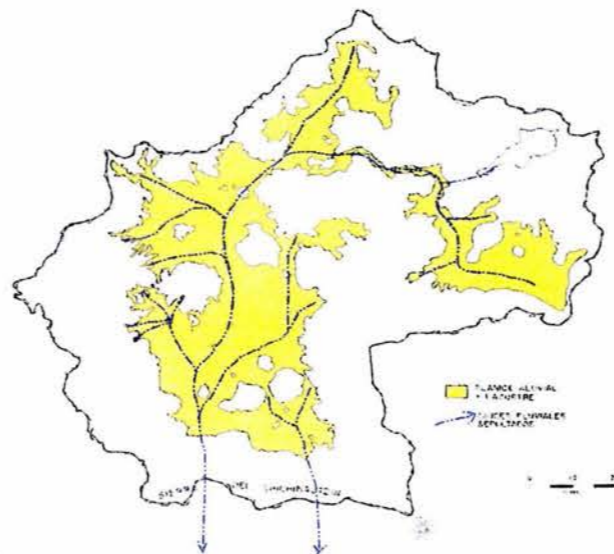
**PLIOCENO**



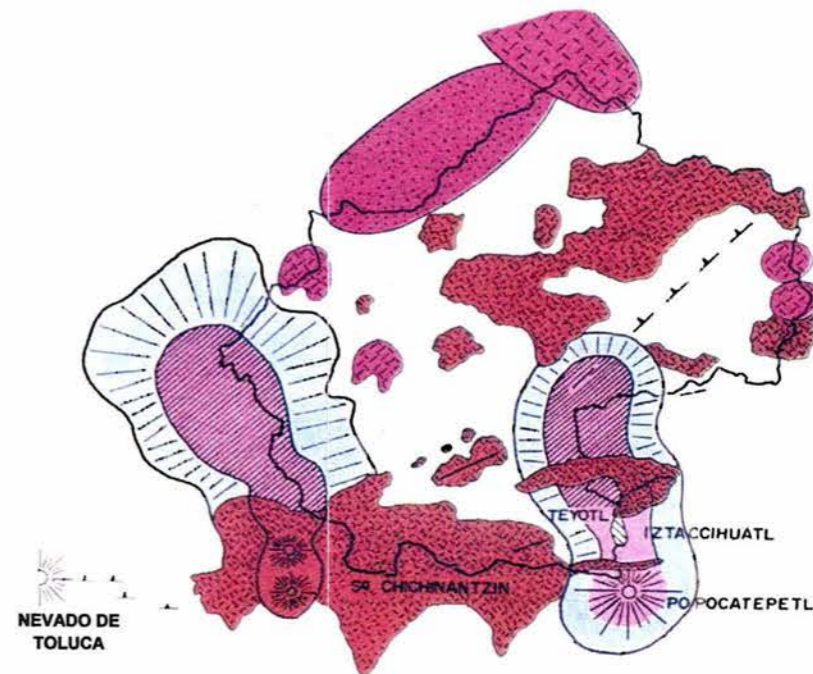
**PLIOCENO SUPERIOR**



**PLIOCENO SUPERIOR**  
**Escurrimiento Fluvial**



**CUATERNARIO SUPERIOR**



Referencia Bibliográfica: Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, Tomo I, DDF, 1975

Como puede apreciarse los lagos se encuentran escalonados o en escarpes, definiéndose la tendencia preferencial del drenaje; en la actualidad el Lago de Texcoco es una mínima porción de lo que originalmente ocupó (ver figura 6). Este panorama hidrológico general, define desde sus inicios las principales fuentes de abastecimiento del acuífero de la zona, que de acuerdo con el autor, se inició su explotación en el año 1847 por medio de un pozo bombeo, para 1864 se tenían 200 pozos de extracción y para 1888 ascendían a 1000, posteriormente en el primer tercio del siglo XX se tiene una intensa explotación de las aguas subterráneas dada la gran demanda poblacional, lo que a la fecha a tenido como consecuencia una sobreexplotación del manto acuífero.

Bajo este marco hidrogeológico (G. Cruickshank 1997, C. Melgoza P. 1978, A. Ellstein R. 1978), se tiene el conocimiento que originalmente la presión hidrostática original se encontraba prácticamente en la superficie del terreno y que debido a la continua extracción de agua de forma incontrolada, se propició que esta presión descienda conforme se abate el nivel freático en los depósitos lacustres que conforman el acuitardo superficial.

### **2.2.2.- Unidades hidrogeológicas**

Habiendo descrito los principales eventos que dieron origen a las condiciones hidrológicas que gobiernan el área en estudio, a continuación se describirán de acuerdo con un criterio hidrogeológico (A. Ortega G. *et.al.*, 1989, D. Rudolph *et al*, 1999, Ch. Vincent P, 1994 y J. Campos E. *et. al.*, 1997), los suelos y rocas que actualmente la representan:

#### ***Acuitardo en rocas volcánicas***

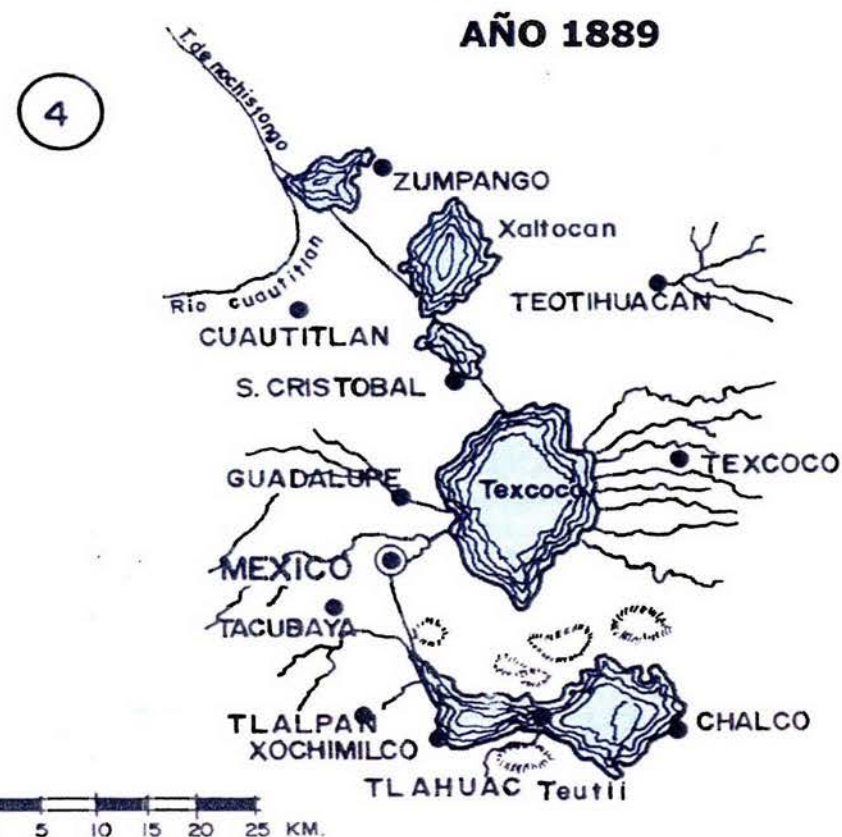
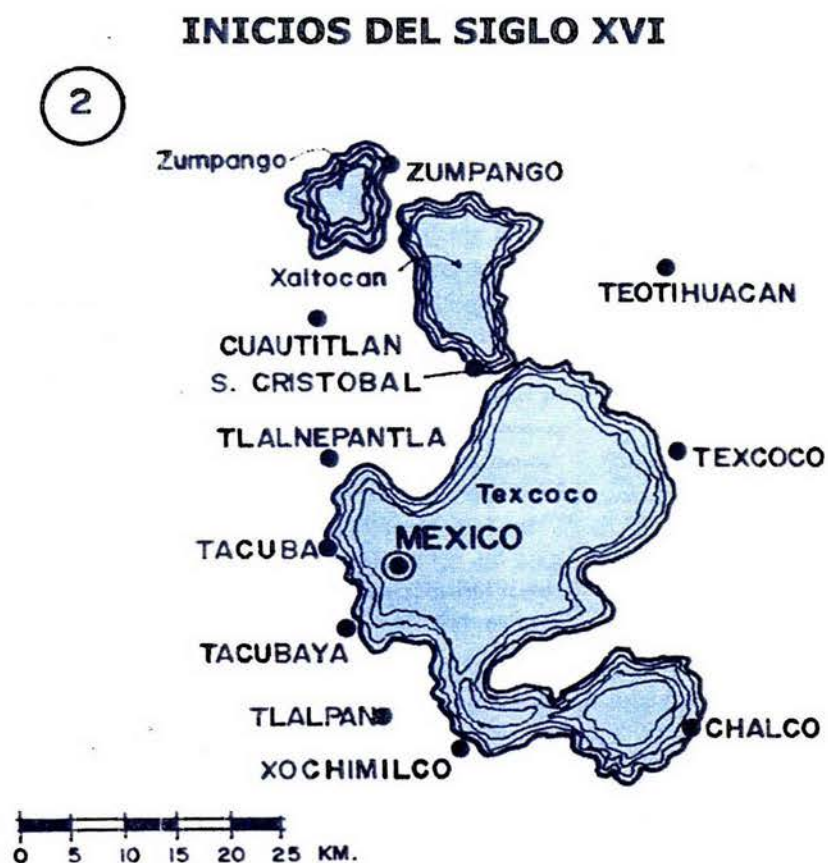
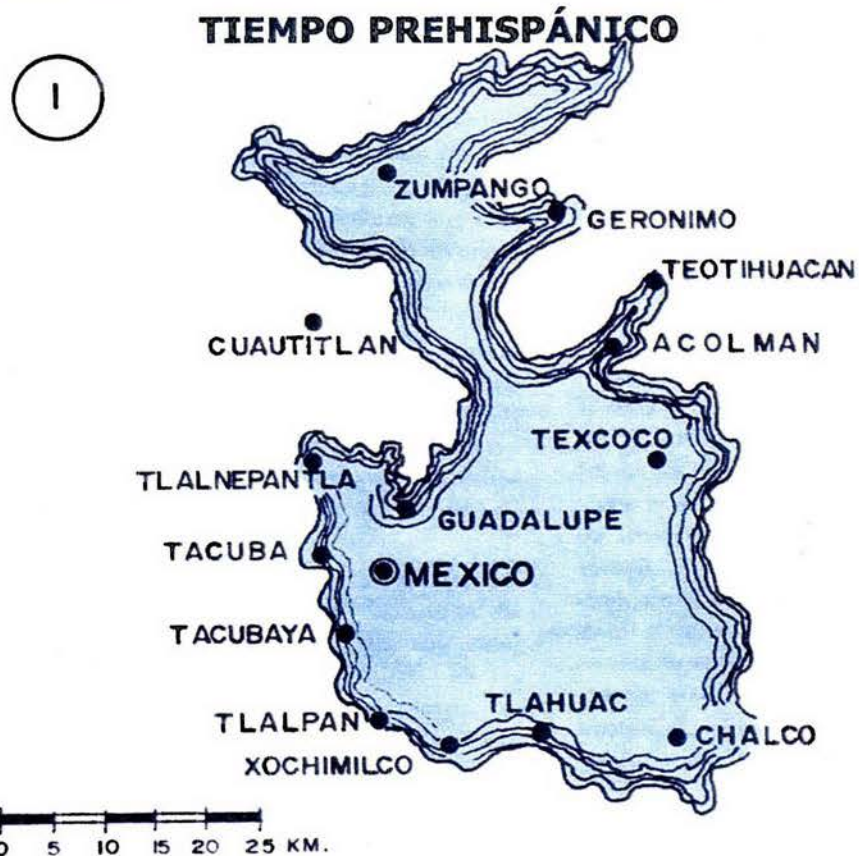
Importantes depósitos de flujo de lava de composición andesítica y dacítica y gruesos espesores de material piroclástico de edad terciaria, fracturados y fallados, se encuentran conformando las elevaciones topográficas. De acuerdo con el autor presentan un bajo índice de permeabilidad.

Habiendo descrito con anterioridad que la Sierra de Guadalupe está constituida por rocas y tobas de composición básica, fracturadas de edad miocénica, en las cuales predomina una estructura granular cerrada, resta decir que de acuerdo con la clasificación hidrogeológica mencionada, estos afloramientos representan esta unidad.

#### ***Acuífero en depósitos aluviales y piroclásticos***

Depósitos de piroclasto y aluviales no consolidados, se encuentran en las estribaciones de la Sierra y subyaciendo a suelos lacustres. Se caracterizan por

**FIGURA No. 6: ESQUEMA EVOLUTIVO DE LOS LAGOS DE CUENCA DE MEXICO**



presentar una granulometría que le infiere condiciones óptimas de almacenamiento y facilita el movimiento del flujo de agua subterránea.

Con respecto a los depósitos granulares de abanicos aluviales, caídos y depósitos de grava y arena no consolidados observados superficialmente en las estribaciones de la Sierra y planicie próxima a la misma, se puede deducir conforme a la geomorfología del área, que éstos continúan hacia el valle, donde quedan representados por depósitos de grava, arena, limos y arcillas, que varían conforme se profundiza a conglomerados y brechas con intercalaciones de arcillas, tobas e inclusive derrames lávicos básicos fracturados. Estos depósitos presentan grandes espesores en la zona de valle y tienden a adelgazarse hacia las márgenes.

### ***Acuitardo en depósitos lacustres***

Representado por la llanura que circunda a la Sierra de Guadalupe, se encuentra constituido por potentes espesores de suelos arcillo-limosos originados en un ambiente lacustre. El tamaño, forma y composición de sus clastos le permiten el almacenamiento de agua pero a su vez restringen el movimiento del flujo de agua subterránea.

Por último tenemos a los suelos que integran la planicie o valle que circunda a la Sierra, constituidos principalmente por depósitos arcillo-limosos de color café, originados bajo un ambiente lacustre, el espesor de estos suelos varía de milímetros a 200 m y en forma general se encuentran enmascarados por la urbanización del área metropolitana.

### **2.2.3.- Parámetros hidráulicos**

Estudios hidrogeológicos (Lesser y Asociados 1997) efectuados para la Comisión Nacional de Agua, subdividen a la unidad hidrológica "*acuífero en depósitos aluviales y piroclásticos*" en acuífero Cuautitlán y acuífero Cd. de México-Texcoco; es de mencionar que el comportamiento global del acuífero está gobernado por sus condiciones de origen, como es su composición y comportamiento hidrológico global (Christian Vincent Pitre 1994), por lo que no es válido efectuar subdivisiones por conveniencias geográficas, sin embargo, se comentarán los parámetros más relevantes de acuerdo con la ubicación geográfica en el área de estudio:

#### ***Acuífero Cuautitlán***

Se encuentra ubicado en la zona norte del área en estudio, limitado por los cerros de Tultepec y Santa María Chiconautla, la Sierra de Guadalupe y estribaciones de la Sierra de Las Cruces.

En general, el terreno presenta una morfología de pendiente suave que buza en dirección oriente, con una elevación topográfica promedio de 2240 msnm, constituido principalmente por depósitos aluviales (acuífero) y lacustres (acuitardo); los principales parámetros hidráulicos son los siguientes:

<b>UNIDAD HIDROGEOLÓGICA</b>	<b>CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA</b>	<b>POROSIDAD n</b>	<b>TRANSMISIVIDAD 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s</b>	<b>COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO</b>
DEPÓSITOS LACUSTRES 0 - 350 m	Kh = 10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-8</sup> m/s Kv = 10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-10</sup> m/s	0.55		
DEPÓSITOS ALUVIALES Y PIROCLÁSTICOS 0 - 800 m	Kh = 10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-5</sup> m/s Kv = 10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-6</sup> m/s	0.20	3.11	1.2

Es de mencionar que en el período de octubre de 1996 a octubre de 1997 se detectó un comportamiento negativo en los niveles estáticos (Lesser y Asociados 1997), presentando en promedio un descenso de -0.40 m, el comportamiento general antes y después de este lapso fue estable, es decir, se mantuvo en equilibrio con respecto a la extracción.

#### *Acuífero Cd. de México- Texcoco*

Se encuentra localizado en la zona sur del área en estudio, particularmente limitada por la Sierra de Guadalupe, depósito de evaporación solar "El Caracol", área conurbada de la ciudad de México y estribaciones topográficas de la Sierra de Las Cruces.

En términos generales se puede decir que el terreno presenta una morfología de pendiente suave que buza en dirección surponiente, la elevación topográfica promedio es de 2240 msnm, constituida principalmente por depósitos aluviales (acuífero) y lacustres (acuitardo); los principales parámetros hidráulicos son los siguientes:

<b>UNIDAD HIDROGEOLÓGICA</b>	<b>CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA</b>	<b>POROSIDAD n</b>	<b>TRANSMISIVIDAD 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s</b>	<b>COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO</b>
DEPÓSITOS LACUSTRES 0 - 400 m	Kh = 10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-8</sup> m/s Kv = 10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-10</sup> m/s	0.60		
DEPÓSITOS ALUVIALES Y PIROCLÁSTICOS 0 - 1000 m	Kh = 10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-4</sup> m/s Kv = 10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-6</sup> m/s	0.20	3.61	1.5

Mediciones piezométricas efectuadas en octubre de 1996 y octubre de 1997, detectaron que el nivel estático promedio presenta una evolución negativa del orden de -0.50 m (Lesser y Asociados 1997), el comportamiento general antes y



después de este lapso fue estable, es decir, se mantuvo en equilibrio con respecto a la extracción.

De acuerdo a lo anterior, se puede decir, que los acuíferos mencionados presentan parámetros de comportamiento casi similares, permitiendo asegurar una similitud en sus condiciones de origen como se mencionó en párrafos anteriores.

En el plano 2 se presenta la localización y caracterización de los acuíferos mencionados.

#### **2.2.4.- Hundimientos en la zona de estudio.**

Es bien sabido que los hundimientos de la ciudad en México han sido y son muy considerables, ocasionados principalmente por las características geológicas y sobre explotación de acuífero antes mencionadas, por lo que investigadores y dependencias gubernamentales han tenido bien registrar los hundimientos en diferentes períodos de tiempo, a continuación se resume resultados de registros obtenidos:

<b>UBICACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>1891 a 1970 *</b>	<b>Junio 1966 a Marzo '70 *</b>	<b>1997 **</b>
SUR - PONIENTE		0.2 m	1 cm/año
SUR - CENTRO		0.3 m	5 cm/año
SUR		0.4 m	10 cm/año
SURORIENTE	6.0 m	0.5 m	15 cm/año

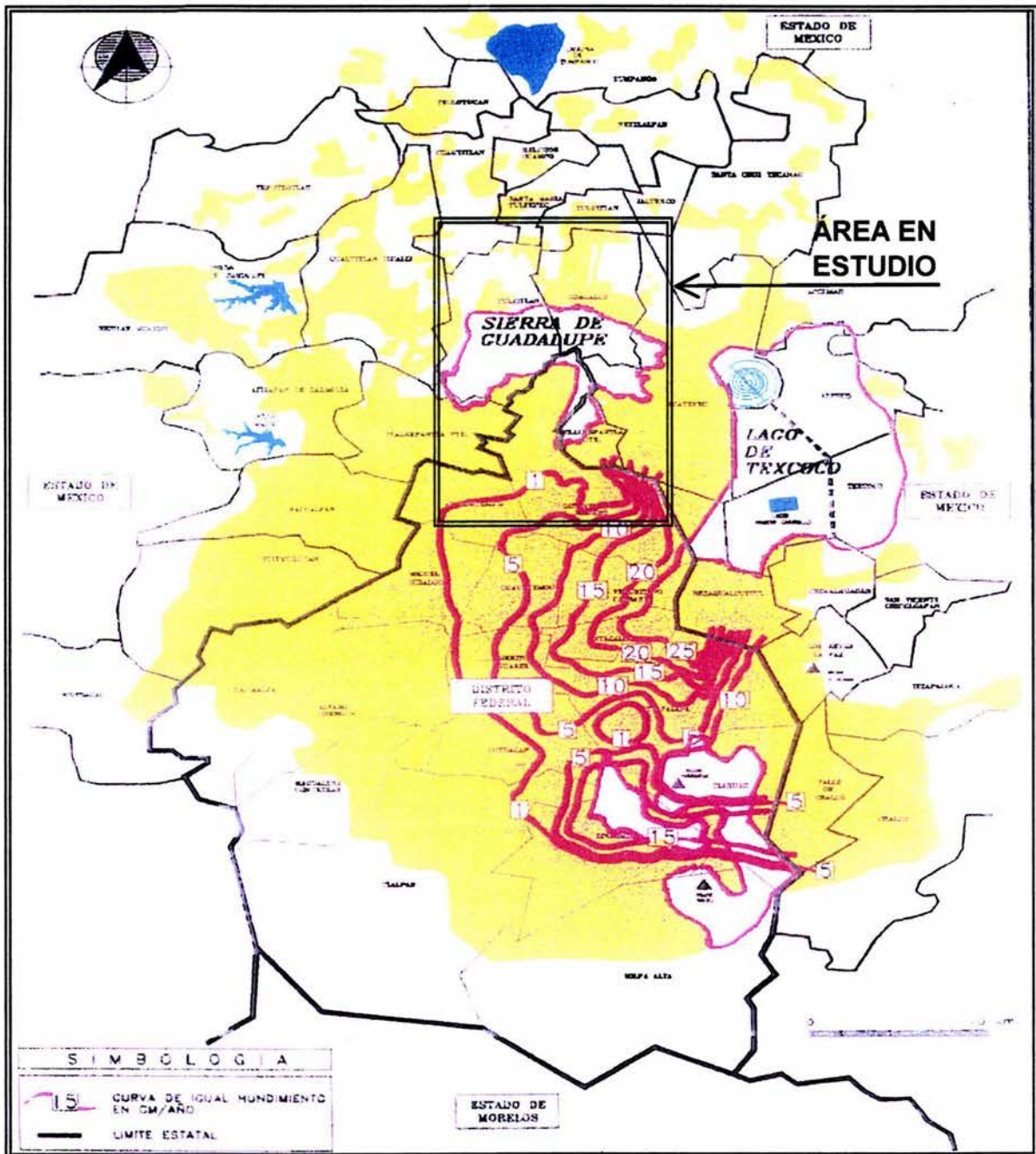
\* R. N. Farvolden *et.al.*, 1989

\*\*G, Cruickshank G. 1998

A partir de lo antes expuesto, se puede decir, que la zona con mayor hundimiento puntual es la suroriente, o bien, la más próxima al aeropuerto internacional Benito Juárez.

Con el fin de complementar la información recabada, se llevó a cabo un control de deformaciones en cinco puntos representativos del área en estudio, de los cuales se obtuvieron parámetros de deformación similares a los realizados por las investigaciones mencionadas. Los resultados obtenidos serán comentados en el apartado de *características del agrietamiento del área en estudio*. En la figura 7 se presenta esquemáticamente curvas de igual hundimiento (G. Cruickshank 1997) de la ciudad de México.

**FIGURA No. 7: CURVAS DE IGUAL HUNDIMIENTO DE LA CIUDAD EN MÉXICO**



Investigaciones de hundimientos efectuados por CNA, muestran el comportamiento de hundimientos predominante en la ciudad de México, lo que corrobora la tendencia preferencial de hundimientos de los suelos lacustres detectados en el área de estudio

Referencia bibliográfica:

Gerardo Cruickshank García, 1997

Abastecimiento de agua a la zona metropolitana del Valle de México Informe preliminar para el Banco Internacional de Desarrollo (CNA)

### **2.3.- Geotecnia**

En este apartado se tratará la caracterización de los depósitos lacustres de acuerdo con el criterio geotécnico (Rodolfo del Castillo, 1978), que como se comentó en párrafos anteriores la aparición de grietas en los suelos superficiales no es una causa inducida únicamente por el comportamiento hidrodinámico del acuífero y su entorno, sino también por el comportamiento mecánico de los mismos. A continuación se dará un resumen de la zonificación litoestratigráfica (J. E. Aguayo Camargo *et.al.*, 1989 y E Vázquez Sánchez *et.al.*, 1989) del área en estudio, a saber.

#### **Zona pétrea**

Rocas extrusivas de edad Mioceno Medio y Tardío (**Tmv**) y depósitos volcánicos de edad Plioceno Temprano (**Tpv**) en la base y cima de la Sierra de Guadalupe respectivamente

#### **Zona de transición**

Representado por la acumulación de abanicos aluviales formados predominantemente por material piroclástico y aluvial granular no consolidado de edad pliocénica (**Tppc**), así como depósitos aluviales y fluviales de variable espesor y extensión, intercalados con depósitos piroclásticos de edad Pleistoceno a Holoceno (**Qal**). Depósitos que presentan una gran heterogeneidad granulometría.

#### **Zona lacustre**

Representada por la planicie que circunda a la Sierra de Guadalupe, constituida predominantemente por sedimentos finos de origen lacustre de edad Pleistoceno y Holoceno (**Ql**). De forma ascendente (Rodolfo del Castillo, 1978) el depósito está representado por sedimentos clásticos arcilloso, limoso, arenoso y vidrio volcánico (**FAI**), sobre estas secuencias se tiene un lente constituido por limo, arenas finas limosas de consistencia muy firme a dura a compacta, cementados con carbonato de calcio (**1°CD**), sobreyaciendo éstos suelos se encuentra una intercalación de arcillas, limos y limos arenosos (**FAS**), superficialmente se tiene una capa dura de arcillas limoarenosas y rellenos artificiales actuales (**MS**).

De acuerdo con el autor, en el área de estudio se tienen registros hasta una profundidad del orden de 45 metros, los cuales quedan definidos por la siguiente secuencia estratigráfica:

<b>SIMBOLOGÍA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>ESPESOR (m)</b>
MS Manto Superficial	Manto o costra superficial, arcillas arenosas de consistencia medianamente firme, ocasionalmente escombros de demoliciones	2
FAS Formación Arcillosa Superior	Arcillas bentónicas, montmorillonitas y carbonato de calcio, intercaladas con lentes de arenas, limos y algunos horizontes de arena fina pumítica. Consistencia blanda a muy blanda, alta plasticidad, con alto contenido de agua.	29
1° CD Capa Dura	Limo, arenas finas limosas de consistencia muy firme a dura a compacta, cementados con carbonato de calcio	2.7
FAI Formación Arcillosa Inferior	Intercalación de suelos arcillosos, limosos, arenas y gravas con vidrio volcánico. Consistencia blanda a firme, alta plasticidad y alto contenido de agua.	12
DP Depósitos Profundos	Interstratificación de horizontes arena arcillosos con gravas, arcillas limoarenosas y arenas pumíticas. Compactos y saturados.	indefinido

De acuerdo con los registros en sondeos efectuados para definir el nivel de agua freática, este se encuentra a una profundidad promedio de 2.50 m.

### 2.3.1.- Características geotécnicas del área en estudio.

Con el fin de caracterizar geotécnicamente el área en estudio, se recurrió específicamente a estudios geotécnicos, efectuados para el reforzamiento de la cimentación y desplome de edificios habitacionales dañados por la aparición de grietas longitudinales localizadas en la porción suroriente y norte del área en estudio.

Particularmente el estudio de mecánica de suelos efectuado para la cimentación de un conjunto habitacional en la Colonia Moctezuma (T. Hdez et.al., 1999) localizado en la porción sur oriente del área en estudio, se encuentra desplantado sobre suelos lacustres de configuración topográfica sensiblemente plana, actualmente en un terreno urbanizado; de acuerdo a la exploración mecánica realizada se detectó la siguiente columna estratigráfica:

<b>ESPESOR PROMEDIO (m)</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	<b>PROPIEDADES INDICE Y MECÁNICAS</b>
0 a 2	Relleno artificial, heterogéneo formado con tepetate conteniendo escombros y cascajo de antiguas demoliciones. En esta parte se tienen restos de cimentaciones de concreto	
2 a 2.5	Arena arcillosa color café grisáceo claro, de suelta a mediana compactación (SC)	A = 70% F = 30% $\omega$ = 25% LL= 35% IP = 15 %
2.5 a 7	Limo gris verdoso con nódulos arcillosos grises y pequeñas concreciones blanquecinas, consistencia blanda a muy	A = 5% F = 95% $\omega$ = 157% LL= 191% IP = 120 % $\gamma$ = 1.262 ton/m <sup>3</sup>

	blanda y alta compresibilidad. (MH) n= entre 2 y 8 golpes	$c = 2.6 \text{ ton/m}^2$ $\phi = 1^\circ$ $m_v = 0.04 \text{ cm}^2/\text{kg}$
7 a 11	Limo café claro con nódulos arcillosos grises, consistencia muy blanda, a los 10.5 m de profundidad presenta un lente arcilloso negro. (MH) n = nulo	A = 2% F = 98% $\omega = 114\%$ LL= 126% IP = 70 %
11 a 13	Arcilla café rojizo con pequeños nódulos arcillosos grises, consistencia muy blanda y alta plasticidad. (CH), n = 1 a 5 golpes	A = 1% F = 99% $\omega = 140\%$ LL= 201% IP = 139 % $\gamma = 1.329 \text{ ton/m}^3$ $c = 1.5 \text{ ton/m}^2$ $\phi = 1.5^\circ$ $m_v = 0.06 \text{ cm}^2/\text{kg}$
13 a 15	Arcilla café verdosa con nódulos arcillosos grises, consistencia muy blanda y alta plasticidad (CH) n = nulo	A = 2% F = 98% $\omega = 171\%$ LL= 230% IP = 162 %

Donde: n = Número de golpes, A = Contenido de arena, F = Contenido de finos,  $\omega$  = contenido natural de agua, LL = Límite Líquido, IP = Índice Plástico,  $\gamma$  = Peso volumétrico, c = Cohesión,  $\phi$  = Ángulo de fricción interna,  $m_v$  = Coeficiente de variación volumétrica.

La exploración geotécnica realizada detectó el nivel de agua freático a la profundidad de 2.60m.

De acuerdo con los estudios de mecánica de suelos efectuados en Tultitlán y Coacalco Edo. de México (T. Hdez et.al., 1999), se puede resumir lo siguiente:

El terreno ubicado en Tultitlán pertenece a una amplia zona de lo que fue el lago de Xaltocan, de tal manera que presenta una configuración topográfica sensiblemente plana, que antes de la construcción estaba dedicada a la agricultura; en sitios localizados existían pequeñas áreas inundadas en forma permanente a manera de lagunetas, en donde se propiciaba la generación de vegetación tipo lacustre.

La zona lacustre de referencia se localiza al norte de la Sierra de Guadalupe, de tal manera que el espesor de los suelos se incrementa hacia el norte, dado que hacia el sur se tiene la zona pétreo y corresponden a los terrenos más elevados, los cuales aportan la mayor parte del agua pluvial que reconoce hacia la zona baja y plana, potencialmente inundable.

De forma general se puede decir que el fraccionamiento habitacional fue construido en un terreno formado por suelos aluvio-lacustres de naturaleza limo arcillosa, de consistencia blanda, de alta plasticidad y compresibilidad. El espesor de los suelos lacustres en la zona varía entre 8 m y 15 m, incrementándose hacia el noreste. Estos suelos lacustres están interestratificados con lentes delgados de arena fina, presentan en general un color café claro a blanco.

Los suelos superficiales limo arcillosos tienen un color café claro a blanco, fisuras y microquedades originadas por raíces fósiles degradadas, dependiendo del

contenido de minerales arcillosos y han sido afectados por proceso de desecación. Los suelos al ser excavados presentan ostensiblemente una gran fisuración que se suma a microquedades originadas por la presencia de gran cantidad de raíces fósiles degradadas.

Para conocer con detalle el comportamiento geomecánico del terreno se llevó a cabo una exploración de campo que consistió en la ejecución de dos sondeos someros del tipo de pozo a cielo abierto, con una profundidad máxima de 4.00 m y dos sondeos mecánicos profundos de tipo mixto, donde se intercaló la prueba de penetración estándar con la obtención de muestras inalteradas con tubo liso de pared delgada tipo Shelby de 10 cm de diámetro. La profundidad máxima de los sondeos mecánicos fue de 16 m la cual se resume a continuación:

<b>ESPESOR PROMEDIO (m)</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	<b>PROPIEDADES INDICE Y MECÁNICAS</b>
0 a 4.80	Limo arcilloso, color gris oscuro a gris verdoso, consistencia muy heterogénea de blanda a dura, de alta plasticidad y compresibilidad. (MH) n = 1 a 46 golpes	A = 16% F = 84% $\omega$ = 138% LL = 149 % IP = 88 % $\gamma$ = 1.289 ton/m <sup>3</sup> c = 2.6 ton/m <sup>2</sup> $\phi$ = 3° $m_v$ = 0.099 cm <sup>2</sup> /kg
4.80 a 5.40	Arena arcillosa de color gris verdoso, compacta, de plasticidad media. (SC) n = 33 a 38 golpes	A = 66% F = 34% $\omega$ = 21% LL = 32% IP = 15 %
5.40 a 7.20	Arena arcillosa de color gris verdoso, muy compacta, de plasticidad media (SC), varía a arcilla arenosa dura (CL) n = mayor a 50 golpes	A = 60% F = 40% $\omega$ = 26% LL = 40 % IP = 18 %
7.20 a 7.80	Arcilla arenosa de color gris verdoso, de consistencia dura, de media plasticidad. (CH) n = 37 golpes	A = 12% F = 88% $\omega$ = 46% LL = 57% IP = 31 %
7.80 a 9.00	Arcilla arenosa y limo arcilloso de color gris verdoso, de consistencia dura, de media a alta plasticidad. (CH) n = mayor a 50 golpes	A = 10% F = 90% $\omega$ = 37% LL = 54 % IP = 30 %
9.00 a 11.40	Limo arcilloso de color gris verdoso, de consistencia firme a dura y de media a alta plasticidad. (MH) varía a arcilla arenosa (CL) n = 12 a 18 golpes	A = 9% F = 91% $\omega$ = 54% LL = 71% IP = 35 % $\gamma$ = 1.473 ton/m <sup>3</sup> c = 6.8 ton/m <sup>2</sup> $\phi$ = 6° $m_v$ = 0.048 cm <sup>2</sup> /kg
11.40 a 12.60	Arcilla arenosa de color gris verdoso, de consistencia dura y de media plasticidad. (CL) n = mayor a 50 golpes	A = 14% F = 86% $\omega$ = 30% LL = 40 % IP = 17 %
12.60 a 16.00	Secuencia de capas de arena arcillosa, arcilla arenosa y limo arcilloso de color gris verdoso, muy compactos o duros, de media a alta plasticidad (SC, CL, MH) n = 23 a 18 golpes	A = 5 % a 78 % F = 95% a 22 % $\omega$ = 32% a 87% LL = 37% a 110% IP = 16% a 55 %

En los sondeos no se detectó el nivel freático.

Con respecto al terreno donde se construyó la unidad habitacional de San Rafael Coacalco, como era de esperarse presenta condiciones semejantes a las descritas para el ubicada en Tultitlán, es decir, se encuentra en una zona de lo que fue el ex lago de Xaltocan, presenta una configuración topográfica sensiblemente plana anteriormente utilizada para fines agrícolas, en algunos sitios se aprecian lagunetas con vegetación tipo lacustre.

Durante los recorridos de campo se pudo apreciar, sobre todo en las vialidades principales e interiores de la unidad habitacional, ondulaciones superficiales o depresiones, deformaciones que causan agrietamiento longitudinal en la carpeta asfáltica de las calles.

Este tipo de deformación superficial se puede asociar a sitios donde existieron lagunetas y a cauces superficiales intermitentes, los cuales en época de lluvia saturan los materiales, reduciendo su resistencia y aumentando la compresibilidad; en época de estiaje por contracción volumétrica se genera la formación de grietas y fisuras, principalmente por desecación.

En las deformaciones superficiales también interviene la vegetación arbórea ya que es una de las múltiples formas de pérdida de agua del subsuelo; con frecuencia en la zona se puede apreciar en las áreas deprimidas por ondulaciones en el terreno natural, una correlación con la presencia de árboles y su densidad.

Se pudo observar también que en la mayoría de los edificios que han experimentado un desplomo o hundimiento, este coincide con la zona de calle colindante que ha sufrido hundimiento o depresión.

La exploración de campo fue similar a la reportada anteriormente, reportándose la siguiente secuencia estratigráfica:

<b>ESPESOR PROMEDIO (m)</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	<b>PROPIEDADES INDICE Y MECÁNICAS</b>
0 a 5.10	Arcillas limosas, de color gris oscuro a gris verdoso, de consistencia muy heterogénea de blanda a medianamente firme. (CH) n = 2 a 5 golpes. Se aprecian grietas de hasta 1.0 m con abertura del orden de 1.5cm.	A= 7% F = 93% $\omega$ = 177% LL= 207 % IP = 140 % $\gamma$ = 1.266 ton/m <sup>3</sup> c = 2.0 ton/m <sup>2</sup> $\phi$ = 5° $m_v=0.116$ cm <sup>2</sup> /kg
5.10 a 6.90	Limo arcilloso de color gris verdoso de consistencia blanda a firme, de alta plasticidad y compresibilidad. (MH) n = 3 a 15 golpes	A = 17% F = 83% $\omega$ = 28% a 82% LL= 67% a 130% IP = 15 % a 27 %
6.90 a 7.50	Limos arcillosos de color gris verdoso, de consistencia dura. (MH) n = mayor de 50 golpes	A = 10% F = 90% $\omega$ = 43% LL= 54 % IP = 22 %
7.50 a 8.70	Limo arcilloso, de color gris verdoso, de	A = 7% F = 93% $\omega$ = 48%

	consistencia firme. (MH) n = 12 golpes	LL= 54% IP = 21 %
8.70 a 10.50	Secuencia de capas de limo arcilloso y arcilla arenosa de color gris verdoso, de consistencia dura y mediana plasticidad. (MH a CL) n = mayor de 50 golpes	A = 24% F = 76% $\omega$ = 32% a 52% LL=38% a 64% IP=17% a 34%
10.50 a 11.70	Limo arcilloso de color gris verdoso, de consistencia muy firme. (MH) n = 25 golpes	A = 9% F = 91% $\omega$ = 42% LL= 60% IP = 25 % $\gamma = 1.498 \text{ ton/m}^3$ $c = 4.8 \text{ ton/m}^2$ $\phi = 6^\circ$ $m_v=0.0586 \text{ cm}^2/\text{kg}$
11.70 a 12.30	Arcillas limosas con poca arena fina, de color gris verdoso, de consistencia dura. (CL) n = mayor de 50 golpes	A = 21% F = 86% $\omega$ = 39% LL= 32 % IP = 12 %
12.30 a 14.50	Arcilla arenosa de color gris verdoso de consistencia muy firme. (CH) n = 18 golpes	A = 9 % F = 91% $\omega$ = 86% LL= 86% IP = 51 %
14.50 a 16.00	Secuencia de arenas limosas de color gris verdoso, muy compactas. (SM) n = 25 golpes	A= 39% F= 61% $\omega$ = 53% LL= 60% IP = 24 %

En los sondeos no se detectó el nivel freático.

De acuerdo a lo antes expuesto, se puede decir, que los depósitos granulares superficiales que conforman el terreno en estudio, presentan características de suelos constituidos por finos arcillosos o limosos con arenas, de consistencia blanda a dura, de plasticidad media a alta, baja resistencia al corte y alta a muy alta compresibilidad, permitiendo asegurar una similitud en sus condiciones de origen y por ende semejante comportamiento mecánico. En el Plano 3, se reporta la ubicación de las exploraciones geotécnicas realizadas, perfil estratigráfico y resultados de pruebas de laboratorio.



### **3.- Características del Agrietamiento en el área de estudio**

Habiendo resumido en los capítulos precedentes la información básica necesaria para la interpretación del comportamiento de grietas en el área de interés, se dará paso al trabajo de campo y gabinete con el cual se concretó la finalidad de analizar el comportamiento de grietas en la zona de estudio.

El levantamiento geológico estructural reportado en el plano 1 se realizó en primera instancia mediante la fotointerpretación del mosaico de fotografías aéreas donde se detectaron los aspectos macroestructurales regionales y mediante extensos recorridos de campo se detallaron las condiciones locales de intensidad, espaciamiento, orientación mediante el rumbo y echado, abertura, profundidad, longitud, relleno y tipo de relleno de cada familia o sistema de fracturas o agrietamientos observados, información básica que auxilió en la definición de las secciones geológicas y detalles estructurales locales.

Como puede apreciarse en el plano mencionado, la zona rocosa está gobernada por sistemas de fallas normales regionales, así como sistemas de fracturamiento ortogonal; puede apreciarse también una alineación estructural preferencial en los sistemas de fracturas debido a la presencia de fallas normales local orientadas en dirección N 10° W, en cuanto al alineamiento preferencial ortogonal presenta una dirección preferencial N 66° E y otro en dirección N 80° W, se aprecia igualmente un alineamiento en dirección N 30° E con buzamiento prácticamente horizontal que representa la pseudoestratificación de las litologías expuestas.

En la zona de planicie se pudo observar que el agrietamiento en el terreno presenta una orientación preferencial N 50° a 75° E y N 15° a 35° W, con buzamiento prácticamente vertical, lo cual se puede interpretarse como un patrón controlado por sistemas estructurales regionales, aunque localmente se presenten desplazamientos debido a la inestabilidad en los flancos de promontorios topográficos.

A continuación se resumen las características que definen los sistemas de fracturas y grietas, los cuales se diferencian principalmente en que las primeras se originan debido a esfuerzos (tensionales, compresibles o cizalla) y los segundos presentan una separación en si mismos debido a procesos postdepositacionales (Edwin Simons Robinson, 1990), las características generales son las siguientes:

**Fractura:**

- a).- Orientación  
La orientación del sistema de fracturamiento ortogonal, está definido en promedio por el echado y rumbo presente en el siguiente cuadro:

<b>Sistema</b>	<b>Rumbo</b>	<b>Echado</b>
S1	N 50° a 70° W	entre 80° - 90° NE
S2	N 40° a 65° E	entre 80° - 90° NW
S3	N 10° E	entre 0° - 10° NW y 0° - 5° SE

- b).- Intensidad  
Fracturamiento intenso, es decir, el espaciamiento entre las fracturas o grietas varía entre 0.5 m y hasta 3 m.
- c).- Abertura  
Los tres sistemas de fracturas presentan por lo general aberturas que oscilan entre 1 mm a 150 mm.
- d).- Profundidad  
Los sistemas de fracturas presentan profundidades variables que a medida que se profundizan tienden a cerrarse, de acuerdo a lo observado en campo las profundidades variaron desde 0.5 m a 2 metros.
- e).- Tipo de relleno  
Las fracturas del sistema S-1 y S-3, se presentan limpias y sin relleno con superficies poco rugosas, las representadas por S-2 se observan con relleno de composición areno arcillosa compacta y color café claro.
- f).- Longitud  
La longitud máxima y mínima se estimó de acuerdo a la fotointerpretación, las cuales son 5 km y 1 km respectivamente.

**Grieta:**

- a).- Orientación  
La orientación promedio de los sistemas de fracturamiento se resume a continuación:

<b>Sistema</b>	<b>Rumbo</b>	<b>Echado</b>
S1	N 15° a 35° W	vertical
S2	N 65° a 75° E	vertical

- b).- Intensidad  
Intensidad media, el espaciamiento entre grietas varía entre 5 y 30 m.
- c).- Abertura  
Los dos grupos presentan aberturas amplias y limpias, es decir, que no tienen relleno. La abertura varía entre milímetros hasta 1 m
- d).- Profundidad  
Se desconoce la profundidad que alcancen, pero de acuerdo a criterios de grietas en suelos arcillosos (John A. Cherry, 1989), estas pueden atravesar el total del espesor del depósito lacustre.
- e).- Tipo de relleno  
En general se sellan a poco tiempo de originarse debido a los desprendimientos ocurridos en las paredes de las mismas grietas.
- f).- Longitud  
La longitud máxima y mínima se estimó de acuerdo a la fotointerpretación, las cuales son 2 km y 100 m respectivamente.

Cabe mencionar que uno de los problemas en el levantamiento a detalle de las grietas, se debió principalmente a que cuando estas se presentan lo suficientemente evidentes, eran selladas a corto plazo por cuestiones de urbanización de la gran urbe, ya que su aparición rompe con la estructura de pavimento u originan "zanjas" en zonas de áreas verdes como son parques o deportivos, mantenimiento que tiene la finalidad de reparar las zonas dañadas, pero muy frecuentemente las bardas y banquetas afectadas, guardan como mudo recuerdo los daños causados por el alineamiento de dichas grietas.

Con el fin de verificar y complementar la información recavada por investigaciones anteriores, en los diversos recorridos de campo, se llevó a cabo una supervisión de mediciones de hundimiento en cinco sitios representativos del área en estudio, cabe mencionar que las observaciones se efectuaron en un lapso aproximado de dos años y que en ese periodo de tiempo se observó en diversas ocasiones, la reparación del área urbana afectada por agrietamiento reponiendo la sección de pavimento, guarnición, banquetas y muro de contención, siendo las principales características en los puntos de observación las que a continuación se enlistan:

SITIO DE OBSERVACIÓN	UBICACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO	CARACTERÍSTICAS DEL AGRIETAMIENTO					
		Orientación	Intensidad	Abertura cm	Profundidad m	Tipo de relleno	Longitud aproximada m
Las Salinas	NOR - ORIENTE	NE 72 SW	@ 1.5 m	6.0	no determinada	grava y arena arcillosa	561
Aragón	SUR- ORIENTE	NE 56 SW	@ 0.7 m	12.0	no determinada	arenosa	400
Peñón de los Baños	SUR	NW 33 SE	@ 1.0 m	15.0	no determinada	grava y arena arcillosa	545
Insurgentes	SUR-CENTRO	NE 68 SW	@ 2.0 m	8.0	no determinada	arenosa	615
Molinos	SUR-PONIENTE	NW 70 SW	@ 15.0 m	6.0	no determinada	arcillosa arenosa	466

Aunado a las características del agrietamiento de los sitios de observación y siendo la finalidad la determinación de la deformación causada por el agrietamiento, se efectuó la medición del desplazamiento en cada una de las grietas de los sitios mencionados; los resultados obtenidos son los siguientes:

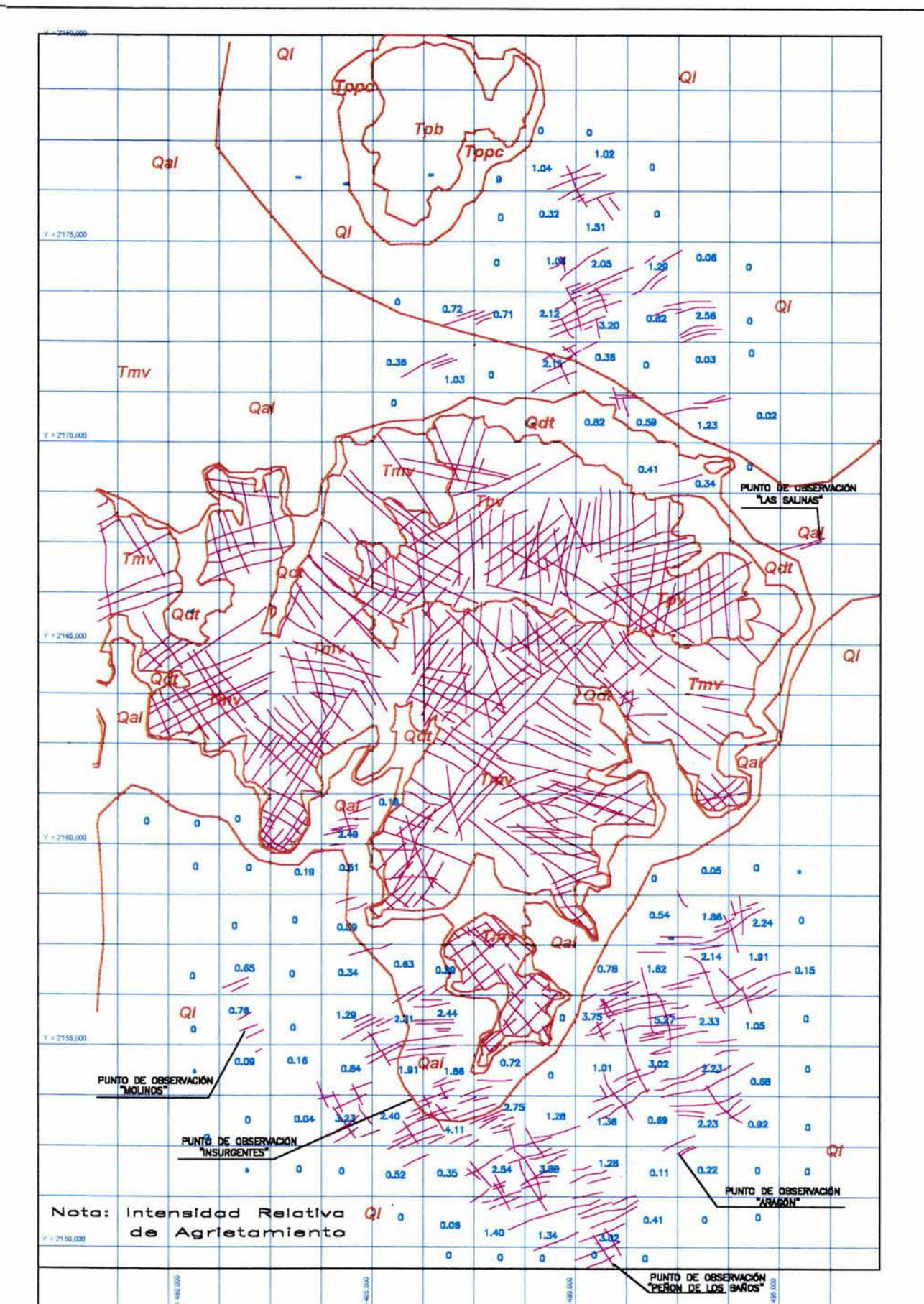
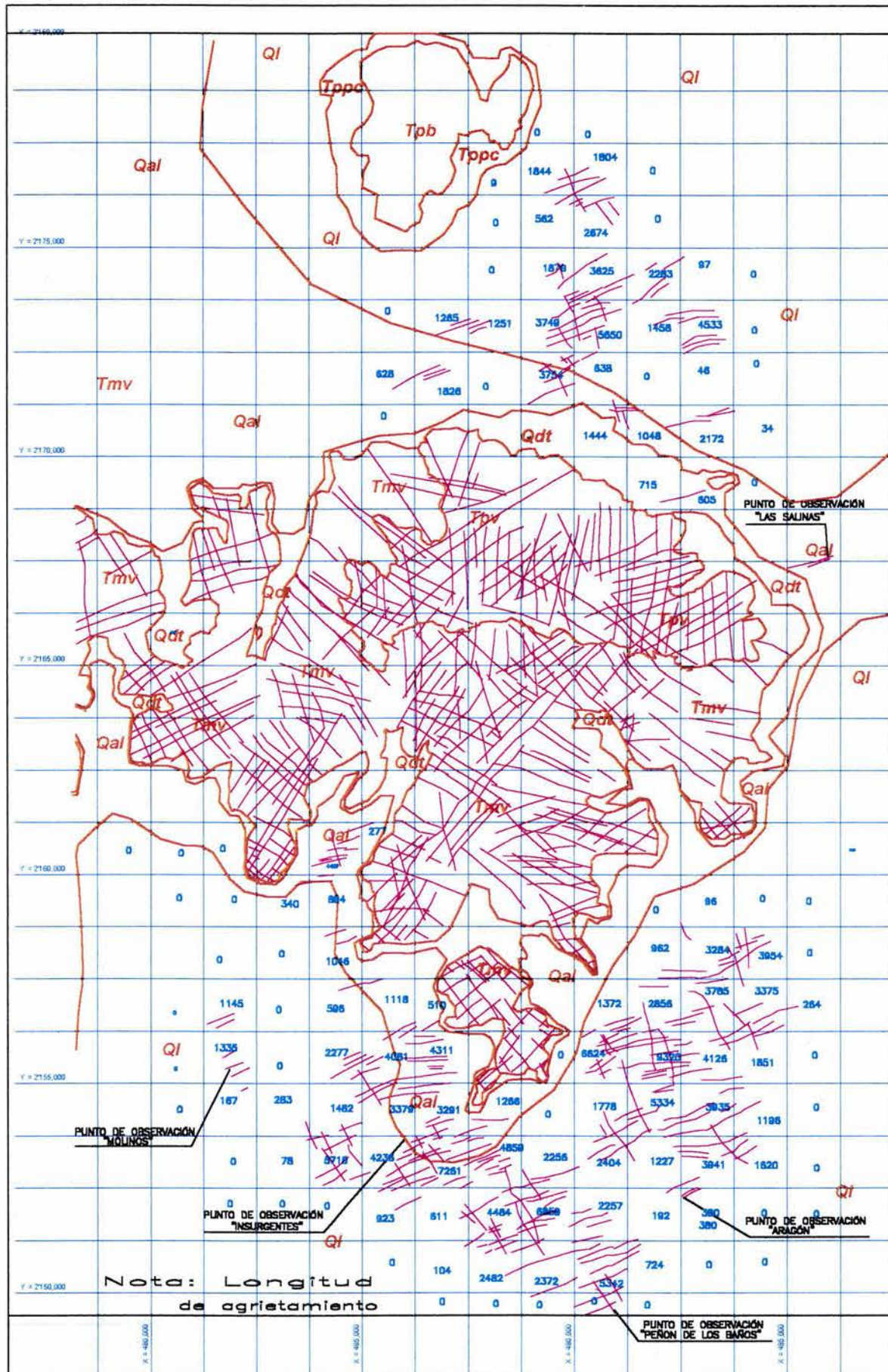
**TABLA No. 1: DEFORMACIONES OBTENIDAS EN PUNTOS DE OBSERVACIÓN**

SITIO DE OBSERVACIÓN	UBICACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO	ORIENTACIÓN	DEFORMACIONES cm/año			
			Año 1999	Año 2000	Año 2001	promedio
Las Salinas	NORORIENTE	NE 72 SW	6.4	6.0	6.1	6.2
Aragón	SURORIENTE	NE 56 SW	14.0	15.1	14.5	14.5
Peñón de los Baños	SUR	NW 33 SE	12.8	11.1	12.7	12.2
Insurgentes	SUR-CENTRO	NE 68 SW	9.4	9.6	9.7	9.6
Molinos	SURPONIENTE	NW 70 SW	0	4.8	5.2	5.0

Con los datos obtenidos se pudo corroborar que los valores determinados guardan una semejanza con los ya reportados, por lo que el terreno continúa con una tendencia de hundimientos similar a la ya conocida. En la figura 8 se presenta esquemáticamente la ubicación general de los sitios de observación, así como la densidad de agrietamiento por 1.25 km<sup>2</sup> obtenida.

Una vez analizada la información recopilada y procesados los datos obtenidos a través del desarrollo de la investigación, se procedió a conceptualizar de forma global la problemática del comportamiento del agrietamiento de los suelos que rodean a la Sierra de Guadalupe. A continuación se analizarán los resultados obtenidos.

FIGURA No. 8: LONGITUD E INTENSIDAD DE AGRITAMIENTO Y SITIOS DE OBSERVACIÓN



#### 4.- **Discusión de Resultados.**

Considerando que el comportamiento del *Agrietamiento de Sedimentos Lacustres ubicados en zonas cercanas a la Sierra de Guadalupe*. Se encuentra regido por condiciones geológicas, hidrogeológicas y geomecánicas que lo gobiernan, a continuación se describirán los tipos de suelo, características hidrogeológicas y mecánicas, geometría de los depósitos, y por último, comportamiento global causante del agrietamiento de los suelos en el área en estudio.

##### 4.1.- **Zonificación y Jerarquización del agrietamiento**

Como se comentó en párrafos anteriores, el origen del agrietamiento en los suelos que nos ocupa, es un conjunto de factores regionales que controlan la mecánica de los mismos, por lo que el diseño del patrón que presentan en superficie y en la roca confinante subyacente con arreglo de sistemas de pilares y fosas no es un caso aislado o aleatorio, de acuerdo con el levantamiento de grietas reportado en el plano 1, observaciones de campo generales y sitios de observación, se puede decir de forma general, que estas presentan una marcada tendencia al alineamiento estructural regional, una intensidad media con espaciamiento entre 5 m y 30 m con aberturas carentes de relleno y en el caso de que se presenten será de los propios derrumbes de las paredes de las mismas. La abertura de las grietas varía entre milímetros hasta 2 m, presentando longitudes entre 100 m y 2 km respectivamente.

Ahora bien, con el fin de considerar un parámetro que auxilie en la determinación de riesgo del agrietamiento en el área de estudio, se llevó a cabo la obtención de densidad de grietas existentes en 1.25 km<sup>2</sup> mediante la cuantificación de la longitud total de las mismas con respecto a la diagonal principal de la superficie de referencia (ver figura 8).

Una vez obtenido estos parámetros se correlacionaron con los datos reportados del hundimiento de la ciudad de México en diferentes períodos de tiempo (Adrián Ortega *et.al.*, 1989, G. Cruickshank 1997), de esta forma se generaron rangos que representaran zonas de riesgo, siendo estos valores los siguientes:

ZONA DE RIESGO	RANGO DE DEFORMACIÓN cm/año	ACURENCIA
BAJO	0 a 3	POCA
MADIO	3.1 a 9,4	REGULAR
ALTO	9.5 a 15	FRECUENTE

Definido los rangos de riesgo, se efectuó la correlación con las diversas investigaciones, siendo éstos los siguientes resultados:

INFORMACIÓN RECOPIADA				VALORES PROMEDIOS OBTENIDOS (X.E.A. 2001) DEFORMACIÓN PROMEDIO cm/año	ZONAS DE RIESGO Densidad/km <sup>2</sup>
UBICACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO	1891 a 1970 (A. O. et.al., 1989)	Junio 1966 a Marzo 1970 (A. O. et.al., 1989)	1997 (Cruickshank 1998)		
NORORIENTE				6.2	MEDIO
SURPONIENTE		0.2 m (5.0 cm/año)	1 cm/año	5.0	MEDIO
SURCENTRO		0.3 m (7.5 cm/año)	5 cm/año	9.6	ALTO
SUR		0.4 m (10.0 cm/año)	10 cm/año	12.2	ALTO
SURORIENTE	6 m (7.6 cm/año)	0.5 m (12.5 cm/año)	15 cm/año	14.5	ALTO

En el plano 4 se presenta la zonificación del agrietamiento y su impacto en el área de estudio.

#### 4.2.- Modelo conceptual origen del agrietamiento

De acuerdo con los comentarios descritos en los incisos precedentes, se puede decir que el basamento del área en estudio tiene un origen característico de ambiente marino de plataforma que se elevó como consecuencia de grandes esfuerzos tectónicos que plegaron, deformaron y fallaron las secuencias clásticas carbonatadas, debido al continuo esfuerzo tectónico la región presentó grandes y variadas emisiones volcánicas que dieron origen a elevaciones topográficas y rellenos granulares en los pliegues y fosas expuestas.

La continua manifestación de emisiones piroclásticas, dio paso a la formación de grandes espesores de depósitos granulares que rellenaron paulatinamente las zonas bajas por donde fluían ríos y arroyos que seguían el patrón estructural gobernante. El marco tectónico dio paso a la formación de cuencas endorreicas convergentes que propiciaron la formación de un ambiente de lago donde predominó la acumulación de depósitos granulares finos. El ambiente establecido fue posteriormente modificado y alterado por el factor humano propiciando el descenso del nivel a agua hasta alcanzar dimensiones del actual Lago de Texcoco, condiciones que establecieron desde su origen la dirección del flujo de agua subterránea hacia los depósitos granulares gruesos sobreyacidos por los depósitos lacustres superficiales. En este marco geológico y entorno hidrogeológico se pueden diferenciar las unidades de acuitardo volcánico, acuífero en depósitos granulares y acuitardo lacustre.

Como es de esperarse, la morfología de la cuenca tanto en su fase inicial como actual controla la dirección del movimiento del flujo subterráneo, para el caso que nos ocupa, es decir, en la actualidad las partes altas de la Sierra de Guadalupe funcionan como acuitardo volcánico donde se presenta gran parte de la filtración por los diferentes sistemas de fracturamiento, el movimiento del flujo prosigue a

través de los depósitos de talud y aluvial localizados al pie de la Sierra hasta alcanzar los depósitos granulares gruesos de la zona baja de la planicie que funcionan como acuífero, depósitos que se encuentran confinados por los sedimentos lacustres superficiales que funcionan como acuitardo, o bien como capa confinante y por rocas volcánicas básicas como capa impermeable.

Particularmente los sedimentos lacustres, denominado capa confinante, se caracterizan por presentar de forma general una baja conductividad hidráulica, se encuentran constituidos superficialmente por un manto o costra de arcillas arenosas de consistencia medianamente firme y ocasionalmente por escombros y cascajo de antiguas demoliciones (MS), el espesor de esta costra es en promedio de 2 m, cubren o enmascaran a arcillas bentónicas, montmorillonitas y carbonato de calcio, intercaladas por lentes de arenas, limos y algunos horizontes de arena fina pumítica, de consistencia blanda a muy blanda, de acuerdo con exploraciones mecánicas se reporta una penetración estándar entre nulo y 8 golpes hasta mayores de 50, alta plasticidad en un rango entre 15% y 162%, con alto contenido de agua entre  $\omega = 25\%$  a 177%, baja resistencia al corte entre 1.5 ton/m<sup>2</sup> y 4.8 ton/m<sup>2</sup> con ángulo de fricción interna entre  $\phi = 1^\circ$  y  $6^\circ$  y alta compresibilidad valores entre 0.04 cm<sup>2</sup>/kg y 0.12 cm<sup>2</sup>/kg (FAS), lo que le infiere un carácter de heterogeneidad en el comportamiento mecánico e hidráulico característico de éstos suelos, el espesor promedio es del orden de 30 m; bajo estas arcillas se tiene un lente constituido por limo, arenas finas limosas de consistencia muy firme a dura a compacta, cementados con carbonato de calcio (1° CD) que representa registros de eventos de sequía, a este depósito se le determinó un espesor promedio de 2.7 m, posteriormente se tiene el registro de intercalación de suelos arcillosos, limosos, arenas y gravas con vidrio volcánico, de consistencia blanda a firme, alta plasticidad y alto contenido de agua (FAI) con un espesor aproximado de 12 m.

Subyaciendo estos depósitos se tienen registrados horizontes interestratificados de arena arcillosos con gravas, arcillas limo arenosas y arenas pumíticas, compactos y saturados (DP) de espesor indefinido, estas secuencias representan la porción superior de la unidad hidrogeológica denominada acuífero, del cual se puede decir en términos generales que presenta una conductividad hidráulica del orden de  $K_h 10^{-2}$  a  $10^{-4}$  m/s y  $K_v 10^{-4}$  a  $10^{-6}$  m/s, una transmisibilidad aproximada de 3.4 y coeficiente de almacenamiento promedio de 1.3

Debido al gran auge poblacional que presenta la Cd. México, se ha registrado en los últimos años una sobreexplotación del manto acuífero, que de acuerdo con el marco hidrogeológico del área, se tiene el conocimiento (G. Cruickshank 1998, P. Girault 1964, N. Carrillo 1969 y R. Marsal *et. al.*, 1987) que la presión hidrostática original se encontraba prácticamente en la superficie del terreno, y que debido a la continua extracción de agua de forma incontrolada, se propició a que esta presión



descienda conforme se abate el nivel freático en el acuitardo lacustre. El continuo efecto de disminución de presión hidrostática genera en el acuífero granular profundo (G. Cruickshank 1997), un abatimiento del nivel dinámico independiente del que se produce en el acuitardo, generándose diferentes presiones hidrostáticas en cada una de las unidades hidrogeológicas debido principalmente a la diferencia de permeabilidad y transmisibilidad de cada una de ellas (ver figura 9).

De acuerdo con las teorías de consolidación (Peter L. Berry *et.al.*, 1993, G. Sowers *et.al.*, 1975, L. Zeevaert 1983) y particularmente las desarrolladas por E. Juárez Badillo en 1960 con respecto al comportamiento de grietas en suelos lacustres (E. J. B. *et.al.*, 1991), se puede decir que estas se generan a consecuencia de la extracción de agua que abate las presiones hidrostáticas del acuitardo, generándose en la parte superior del depósito lacustre esfuerzos de tensión en el agua, que consecuentemente generan compresiones en las tres direcciones ortogonales en la estructura sólida del suelo. Cuando la lluvia cae llega a formar una delgada capa o lámina de agua (encharcamientos o inundaciones) sobre el depósito, entonces las tensiones del agua se disipan al igual que las correspondientes compresiones de la fase sólida. El equilibrio crítico se rompe y se genera la grieta.

La teoría antes mencionada supone que a cualquier profundidad la permeabilidad permanece constante durante el proceso de consolidación debido a que las deformaciones verticales para cualquier profundidad analizada generalmente son pequeñas. El concepto hidrogeológico de consolidación de Gibson (Murray Fredlund 1995) considera por el contrario que la permeabilidad disminuye en función al incremento de las deformaciones que se registran conforme a la profundidad, debido a efectos de esfuerzo verticales.

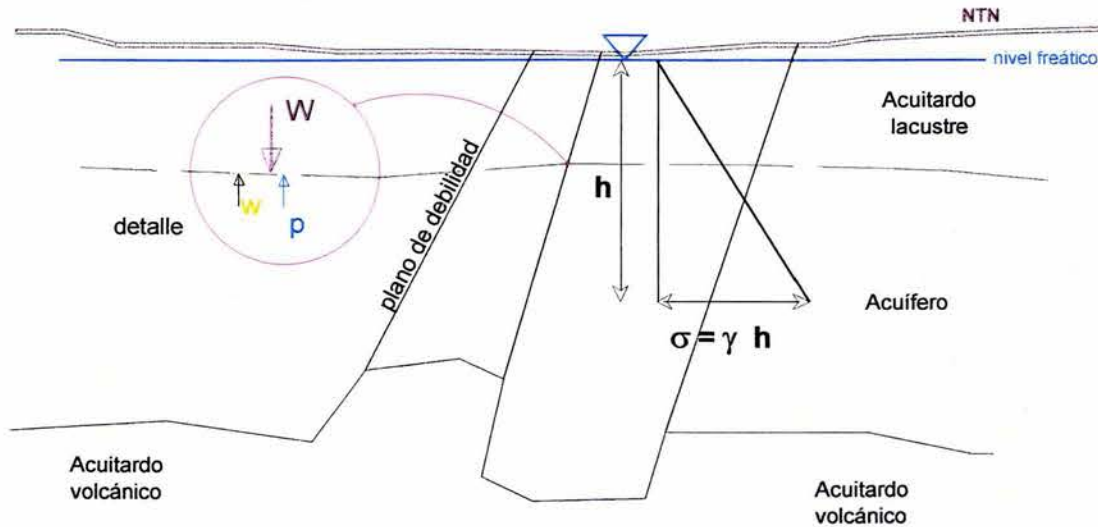
Grietas que se generan de acuerdo con el mecanismo descrito normalmente son superficiales, de acuerdo con mediciones realizadas (E. J. B. *et.al.* 1991 y G. Cruickshank 1997 y 1998), la profundidad queda acotada por la presencia del nivel freático, sin embargo cuando el abatimiento se debe a efectos de extracción profunda, es decir, cuando el abatimiento de las presiones se origina en el acuífero profundo, la profundidad de la grieta tiende a ser mayor e inclusive afecta prácticamente todo el espesor del acuitado superior (John A. Cherry 1989). La figura 10 presenta esquemáticamente este fenómeno.

FIGURA No. 9.- ESQUEMA DE PRESIONES Y ORIGEN DEL AGRIETAMIENTO

CONDICIONES INICIALES

1

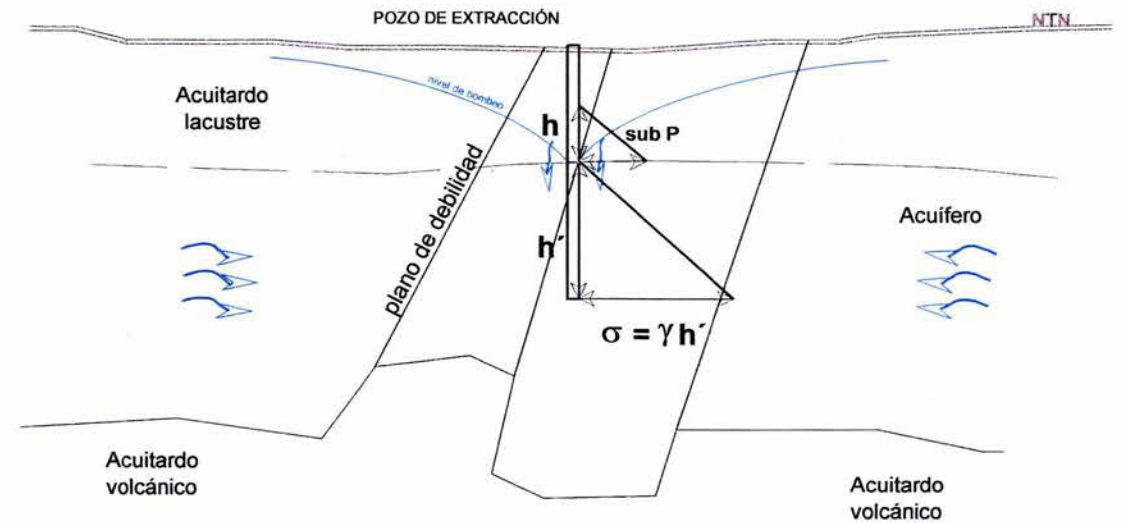
- a).- Teóricamente la presión hidrostática ( $\sigma$ ) se incrementa con la profundidad, a partir del nivel freático
- b).- Las partículas sólidas (grava-arena-finos) y fluido (agua) que constituyen el acuitardo transmiten el esfuerzo total  $W$  al acuífero
- c).- Las partículas sólidas presentes en el acuífero representan el esfuerzo efectivo  $w$  (contacto intergranular) y  $p$  la presión poro-agua que mantiene en equilibrio el esfuerzo total  $W$



CONDICIONES DE ABATIMIENTO

2

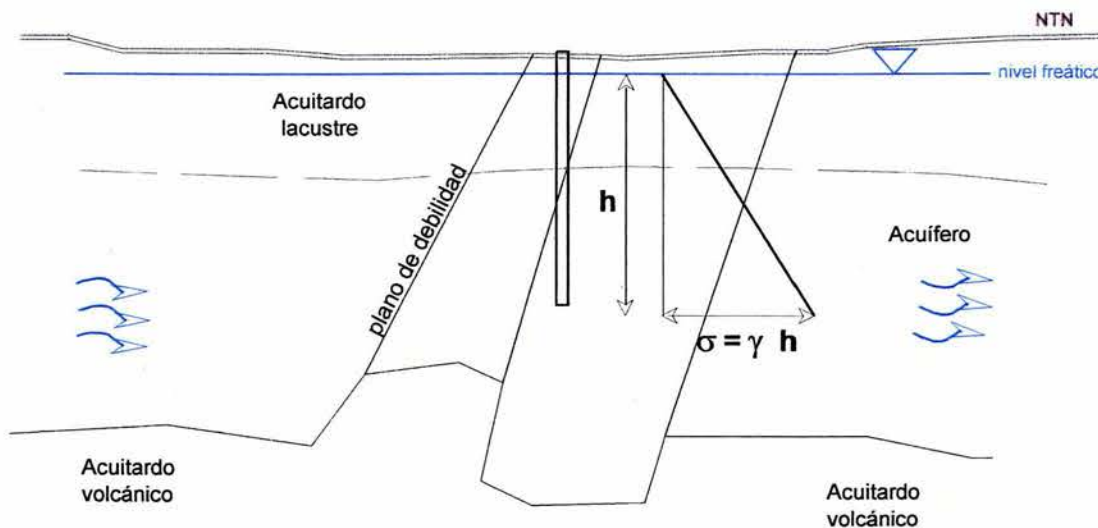
- a).- Abatimiento del nivel freático por extracción de agua del subsuelo
- b).- Se genera una subpresión en la base del acuitardo al iniciarse un abatimiento del gradiente hidráulico, consecuentemente  $W$  se reduce y el esfuerzo efectivo  $w$  (contacto intergranular) se incrementa, dando paso al proceso de consolidación
- c).- Se genera tensión capilar en el acuitardo.



CONDICIONES CRÍTICAS DE EQUILIBRIO

3

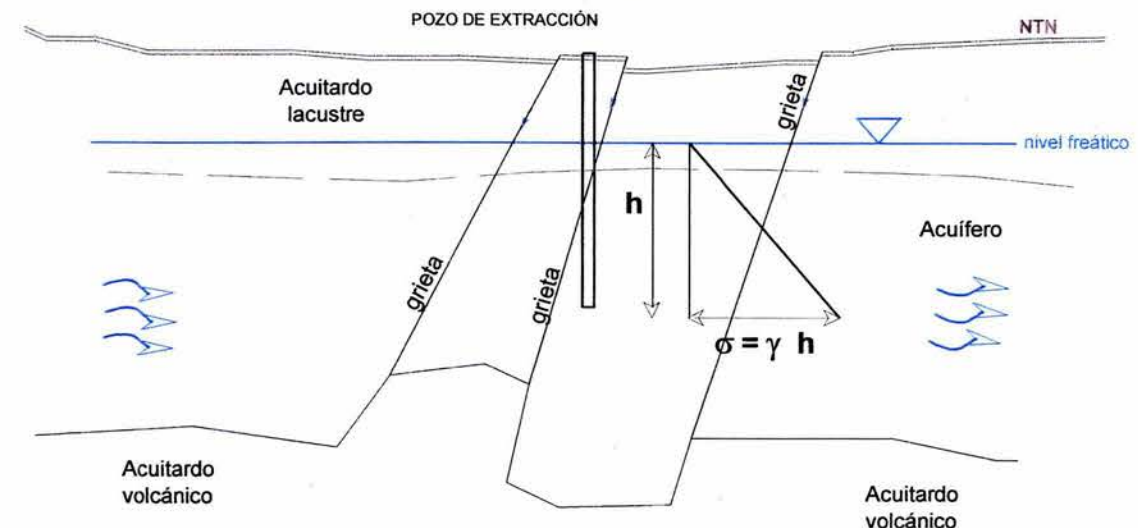
- a).- Cuando por condiciones naturales la recarga del acuífero es mayor a la extracción de agua del subsuelo, el nivel freático se recupera total o parcialmente
- b).- Se presenta una recuperación de gradiente hidráulico, disipación de tensión capilar, relajación de esfuerzos de compresión en la fase sólida y filtración de agua.



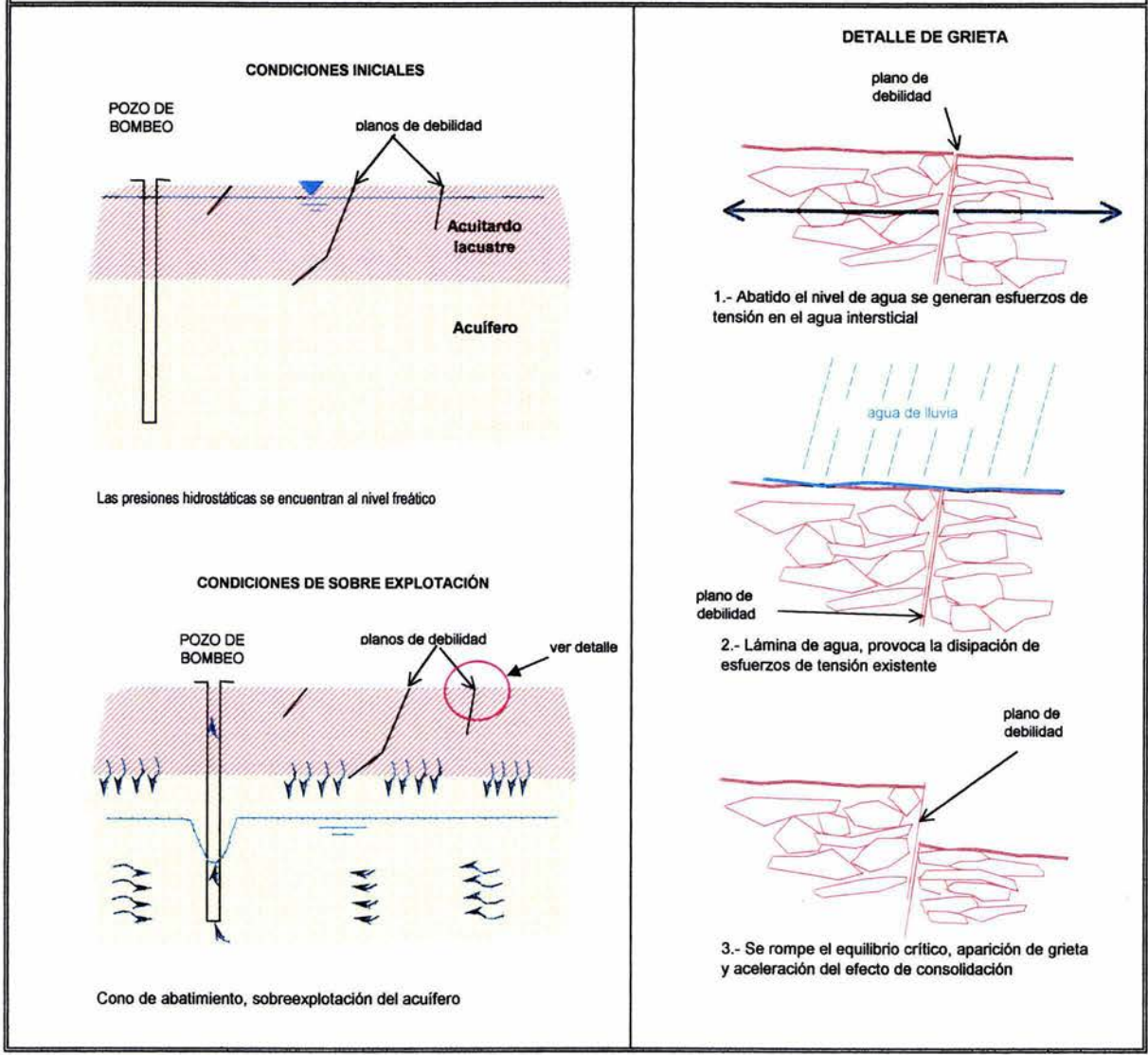
AGRIETAMIENTO

4

- a).- Al presentarse un abatimiento del nivel freático, se genera en la fase sólida del acuitardo condiciones de fuerzas de tensión, perdiéndose el estado crítico de equilibrio en los planos de debilidad existentes.
- b).- Incremento de esfuerzo efectivo ( $w$ )
- c).- El agua fluye por sufosión a través de planos de debilidad existentes, incrementando el agrietamiento debido a remoción de partículas

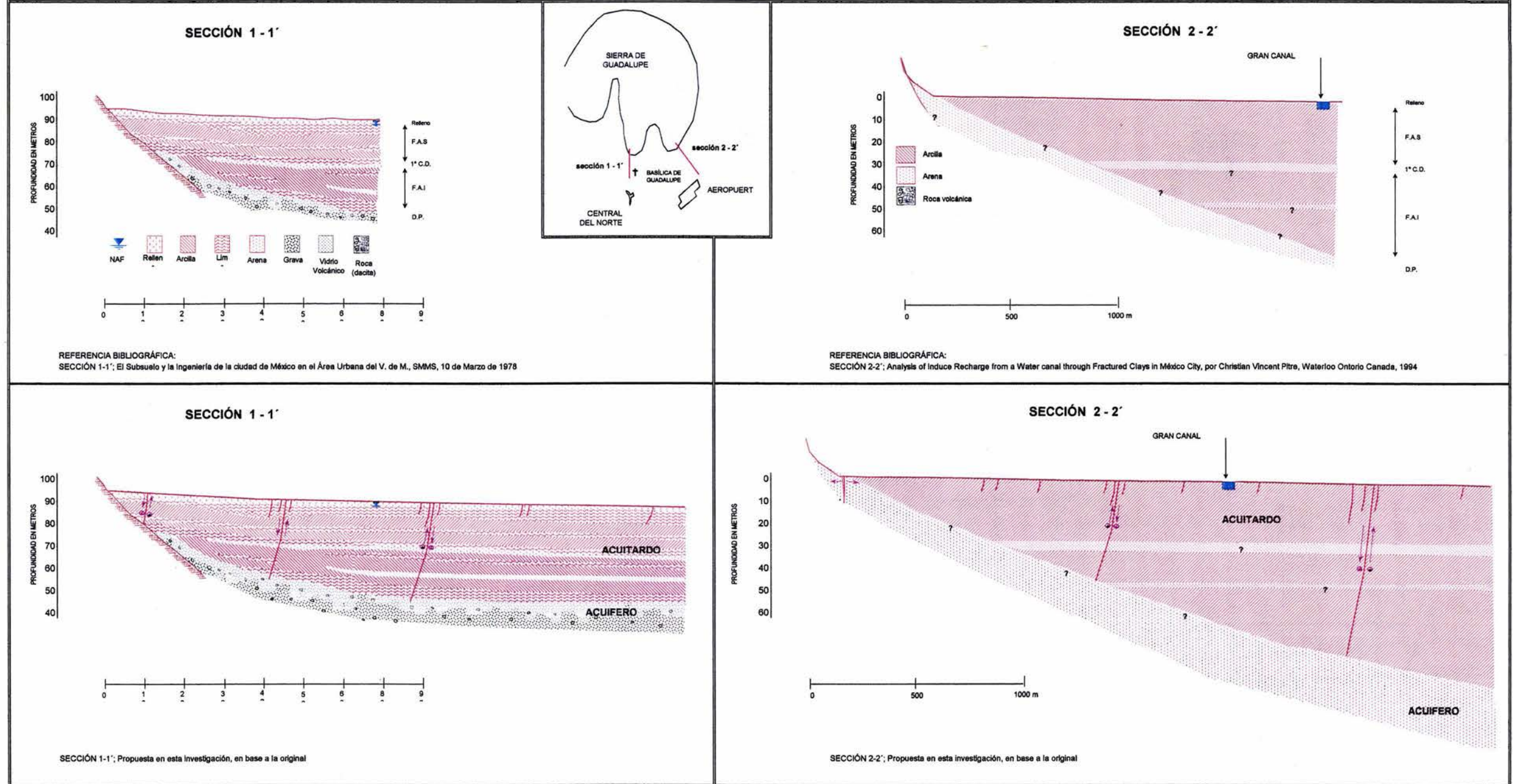


**FIGURA No. 10: ESQUEMA DE ORIGEN DEL AGRIETAMIENTO**



Por último, habiendo descrito de forma particular la formación de grietas en sedimentos lacustres, podemos decir que estas se presentan con mayor frecuencia en la porción superficial del acuitardo y que ocasionalmente llegan a atravesar su espesor en los planos de debilidad originados a partir del comportamiento estructural regional que gobierna tanto a los acuitardos como acuífero relativamente confinado, aunado a dicho efecto se tiene el proceso de sufosión, que es la remoción de partículas finas de suelos debido al movimiento de agua subterránea, contribuyendo o acelerando la formación de la grieta (J. Lugo H. Et. al., 1991). De forma esquemática en la figura 11 se presentan el modelo hidrológico conceptual del agrietamiento en suelos lacustres limítrofes con la Sierra de Guadalupe.

FIGURA No. 11: MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DEL ORIGEN DEL AGRIETAMIENTO



## 5.- Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se dará de forma sucinta las conclusiones y recomendaciones más sobresalientes del *Agrietamiento de Sedimentos Lacustres ubicados en zonas cercanas a la Sierra de Guadalupe, localizada al Norte del área conurbada del Distrito Federal y Estado de México.*

### Conclusiones

1. Los sedimentos lacustres, denominados acuitardo, están constituidos principalmente por arcillas bentoníticas, montmorillonitas, lentes de arenas, limos y algunos horizontes de arena fina pumítica, limo, arenas finas limosas cementados con carbonato de calcio, arenas y gravas con vidrio volcánico, se caracterizan por presentar una baja conductividad hidráulica, consistencia muy blanda a dura o compacta según sea el caso, alta plasticidad, baja resistencia al corte y alta compresibilidad, lo que le infiere un carácter de heterogeneidad en el comportamiento mecánico hidrológico característico.
2. Subyaciendo a los sedimentos lacustres, se tienen horizontes interestratificados de areno arcillosos con gravas, arcillas limo arenosos y arenas pumíticas, compactos y saturados de espesor indefinido, estas secuencias representan la porción superior de la unidad hidrogeológica del acuífero, del cual presenta en términos generales una conductividad hidráulica del orden de  $K_h 10^{-2}$  a  $10^{-4}$  m/s y  $K_v 10^{-4}$  a  $10^{-6}$  m/s, una transmisibilidad aproximada de 3.4 y coeficiente de almacenamiento promedio de 1.3
3. De acuerdo al análisis de grietas en el área de estudio, el agrietamiento de los suelos se debe principalmente a factores regionales que controlan la mecánica particular de los mismos.
4. El agrietamiento se caracteriza por una intensidad media con espaciamiento entre 5 m y 30 m, aberturas carentes de relleno y en el caso de que se presenten son los derrumbes de las mismas paredes. La abertura de las grietas varía de milimétricas hasta 2 m y longitudes entre 100 m y 2 km
5. El comportamiento superficial de las grietas está definido por el nivel freático, esfuerzos de tensión en el agua y compresión en la fase sólida, cuando el suelo se satura la tensión se disipa y cuando empieza el proceso de desecación inicia el esfuerzo de compresión rompiéndose el equilibrio crítico y generándose la grieta.

6. Aunado al los cambios de presión hidrostática generados por la sobreexplotación del acuíferos, se tiene el efecto de sufosión que acelera la formación de la grieta al remover las partículas finas por movimiento de agua.
7. Las grietas generadas en los planos de debilidad existentes por los sistemas estructurales que gobiernan los suelos que circunda a la Sierra de Guadalupe y roca confinante subyacente. La profundidad de éstas grietas varía entre milímetros hasta afectar prácticamente todo el espesor del acuitado.
8. Los rangos definidos para las zonas de riego, se obtuvieron a partir de la correlación entre datos reportados por diferentes investigaciones incluyendo esta, los rangos definidos son los siguientes:

ZONA DE RIESGO	RANGO DE DEFORMACIÓN cm/año	ACURRENCIA
BAJO	0 a 3	POCA
MADIO	3.1 a 9,4	REGULAR
ALTO	9.5 a 15	FRECUENTE

9. Los valores de deformación de las zonas en riego en el área de estudio, se enlistan a continuación:

INFORMACIÓN RECOPIADA				VALORES PROMEDIOS OBTENIDOS (X.E.A. 2001) DEFORMACIÓN PROMEDIO cm/año	ZONAS DE RIESGO Densidad/km <sup>2</sup>
UBICACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO	1891 a 1970 (A.O. et.al., 1989)	Junio 1966 a Marzo 1970 (A. O. et.al., 1989)	1997 (Cruickshank 1998)		
NORORIENTE				6.2	MEDIO
SURPONIENTE		0.2 m (5.0 cm/año)	1 cm/año	5.0	MEDIO
SURCENTRO		0.3 m (7.5 cm/año)	5 cm/año	9.6	ALTO
SUR		0.4 m (10.0 cm/año)	10 cm/año	12.2	ALTO
SURORIENTE	6 m (7.6 cm/año)	0.5 m (12.5 cm/año)	15 cm/año	14.5	ALTO

10. La paleotopografía del terreno es decir la configuración topográfica de la base de los sedimentos lacustres juega un papel preponderante, dado que si esta tiene una variación brusca, lo cual se refleja en los espesores de sedimentos compresibles, el riesgo de agrietamiento será mayor. En una zona donde existan depresiones y domos, los espesores de los sedimentos lacustres sometidos a abatimientos de presión de poro, serán distintos y con ello presentan asentamientos diferenciales que propiciarán el agrietamiento aun mayores.
11. Aunado a lo anterior, como ya se ha mencionado las condiciones estructurales de la formación confinante también interviene, dado que el sistema de

fracturamiento preexistente inducirá el agrietamiento de los sedimentos superficiales, mediante un proceso similar a las grietas por reflexión.

12. El plano No. 4 concluye la información de presencia de grietas y su impacto en la zona de estudio y las figuras No. 9 a 11 el modelo conceptual del origen del agrietamiento.

## Recomendaciones

1. La información disponible sobre las condiciones piezométricas de las formaciones geohidrológicas, está muy dispersa y sobre todo no está actualizada, por lo que es necesario implementar un programa específico para generar, recopilar y ordenar los datos que proporcione la instrumentación de los sondeos que se realicen en el área metropolitana. En efecto se recomienda que en el Reglamento de construcciones del D.F. se añada un capítulo donde se obligue a la instalación de piezómetros, que permitan conocer la evolución de las presiones intersticiales del subsuelo, así como bancos de nivel profundos, flotantes y superficiales y con ello tener elementos para predecir y diagnosticar zonas potenciales de agrietamiento.
2. Se recomienda que un Instituto de investigación o Dependencia Gubernamental efectúe las mediciones de las presiones intersticiales y hundimientos regionales.
3. Es necesario llevar a cabo un padrón del comportamiento de los sistemas de agrietamientos detectados, con el fin de caracterizar a mayor detalle las zonas de riesgo y su impacto en la urbanización de la zona.
4. Se recomienda llevar a cabo una exploración directa con fines hidrogeológicos para detallar el comportamiento mecánico del acuitardo lacustre y acuífero confinado.
5. Es necesario realizar una comparativa real de la extracción de agua y la recarga del acuífero para valorar tanto la alteración del mismo como las afectaciones que causen en el comportamiento de las grietas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Moran Centeno Dante, 1984

Geología de la República Mexicana  
INEGI & UNAM-FI

Vázquez E. -Sánchez Z, L.R: Jaimes – Palomera, 1989

Geología de la Cuenca de México  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México pp1-24

Aguayo Camargo J. Eduardo, Martín Córdova Salvador, Sánchez Díaz Felipe, 1989

Evolución Geológica de la Cuenca de México  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México pp25-41

Girault Pablo, 1964

Mineralogía de las arcillas del Valle de México  
Ingeniería, Órgano oficial de la Facultad de Ingeniería UNAM, pp511-518

Mooser Federico, Woffer José F., Rzedowski Jerzy, Halfftee Gonzalo y Reyes Castillo Pedro, 1975

Descripción de la Cuenca del Valle de México  
Departamento del Distrito Federal  
Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, pp7-38

León Portilla Miguel, Romero G. José Rubén, García Quintero Josefina, Gurría Lacroix Jorge y Lemoine Ernesto, 1975

Historia del desagüe de la Cuenca de México  
Departamento del Distrito Federal  
Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, pp41-78

Marsal Raúl J., 1978

La Estratigrafía y sus Implicaciones  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México  
pp1-8

Mooser Federico, 1978

Geología del Relleno Cuaternario de la Cuenca de México  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México  
pp9-14

Del Castillo Muris Rodolfo, 1978

Ciudad de México  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México  
pp15-50

Murillo F Rodrigo. Y García A. Gabriel, 1978

Ex-Lago de Texcoco  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México  
pp51-101



Simons Robinson Edwin, 1990  
Geología Física Básica  
Limusa Noriega, pp411-512

Zoltan de Cserna, De La Fuente Duch Mauricio, Palacios Nieto Miguel, Triay Leonardo, Mitre Salazar Luis Miguel y Mota Palomino Reynaldo, 1988  
Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México.  
Instituto de Geología, Boletín 104

Ortega Gutiérrez Fernando, 1999  
Carta geológica mexicana, escala 1:2'000,000  
UNAM & SEMIP

Delgado G. Hugo, Molinero Ricardo, Cervantes Pablo, Nieto Obregón Jorge, Lozano Santa Cruz Rufino, Macías González Héctor L., Mendoza Rosales Claudia y Silva Romo Gilberto, 1998  
Geology of Xitle volcano in southern México city-2000 year old monogenetic volcano in an urban area.  
Revista mexicana de Ciencias Geológicas, v 15, n 2, pp115-131

Ferreri L., Pasquare G. y Tibaldi A., 1990  
Pho-Quaternary tectonics of the central mexican volcanic belt and some constrasnts on its nifting mode  
Geofísica Internacional, vol 29, num 1, pp 5-18

Campos Enriquez Oscar, Delgado Rodríguez J. O., Chávez Segura O., Gómez Contreras R., Flores Márquez P., E. L. y F. S. Birch, 1997  
The subsurfse structure of the Chalco subbasin (México city) inferred geophysical data.  
Geophysics, vol 62, pp23-35

Lugo Hupp J., Pérez Vega A. y Rojas Salas M., 1991  
Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México  
Geofísica Internacional, vol 30, num 2, pp 87-95

Ortega Guerrero Adrián y Farvolden R. N., 1989  
Computer Análisis of Regional Groundwater Flow and Boundory Conditions in the Basin of Mexico  
Journal of Hydrology 110, pp 271 - 294

Lesser y Asociados S.A. de C.V., 1997  
Actualización de Mediciones Piezométricas de los Acuíferos Reactivados en 1996 en el Valle de México, (CNA-PROMMA) México

Castany G., 1971  
Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas  
Omega S.A. de C.V., pp 150-175

Murria Fredlund, 1995  
Finite Strain Conlidation  
Numerical Methods in geotechnical engineering, C. E. 898

Cherry John A., Ortega G A. y Rudolph David L., 1993  
Large scale aquitard consolidation near México city  
Waterloo Center for Groundwater Research, University of Watererloo, vol 31, num 5, pp708-718

Rudolph David L. y Cherry John A. y Ortega G. A., 1999  
Analysis of long term land subsidence near México city: fiel investigation and predictive modeling  
Waterloo Center for Groundwater Research, University of Waterloo, vol 35, num 11, pp3327-3341

Christian Vincent Pitre, 1994  
Analysis of induced recharge from a waste water canal through fractured clays in Mexico city  
Thesis presented to the University of Waterloo.

Michael Price, 2003  
Agua Subterránea,  
LIMUSA, Barcelona España.  
pp208-229

A. Sámano A., J. M. Rodríguez García, 1993  
Asentamientos diferenciales de estructuras provocadas por la desecación generada por la  
vegetación en el Valle de México  
Boletín Politécnico, México DF

Cruickshank García Gerardo, 1998  
Proyecto del Lago Texcoco, Rescate Hidroecológico 2º edición

Cruickshank García Gerardo, 1997  
Abastecimiento de agua a la zona metropolitana del Valle de México  
Informe preliminar para el Banco Internacional de Desarrollo (CNA)

Vieitez Utesa Luis, 1978  
Estratigrafía del Valle de México y sus implicaciones en el desarrollo urbano  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México  
pp146

Melgoza P. Carlos A., 1978  
Descripción, evolución y origen de los agrietamientos  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México  
pp165-181

Ellstein R. A., 1978  
Teoría Sobre el Mecanismo de Falla  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México  
pp177

Hernández C. T., Miranda M. S., E. Aubert X., 1994  
Estudio de mecánica de suelos del Conjunto Habitacional Oceanía  
Ingeniería y Procesamiento Electrónico S.A. de C.V.

Hernández C. T., Miranda M. S., E. Aubert X., 1999  
Estudio de mecánica de suelos para los edificios A21 UH El Rocío y B16 UH San Rafael, ubicados en  
Tultitlán y Coacalco Estado de México.  
Ingeniería y Procesamiento Electrónico S.A. de C.V.

Morozco Juan, Figueroa Vega Germán, 1991  
Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre agrietamiento de terrenos

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Grietas de Suelos pp1-111

Efraín Figueroa Vega Germán, 1991  
Grietas por explotación de acuíferos  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Grietas de Suelos pp33-35

Juárez Badillo Eulalio, 1991  
Grietas por fuerzas de filtración  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Grietas de Suelos pp39-45

Juárez Badillo Eulalio & Rico Rodríguez, 1991  
Flujo de Agua en Suelos, Tomo III  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Grietas de Suelos pp329-331

Moreno Pecero Gabriel, 1991  
Grietas en la zona de Naucalpan  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Grietas de Suelos pp75-77

Gutiérrez S. Carlos E., Cuevas R. Alberto Y Sánchez M. Bernardo, 1991  
Soluciones geotécnicas para el agrietamiento de suelos  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Simposio sobre Grietas de Suelos pp95-109

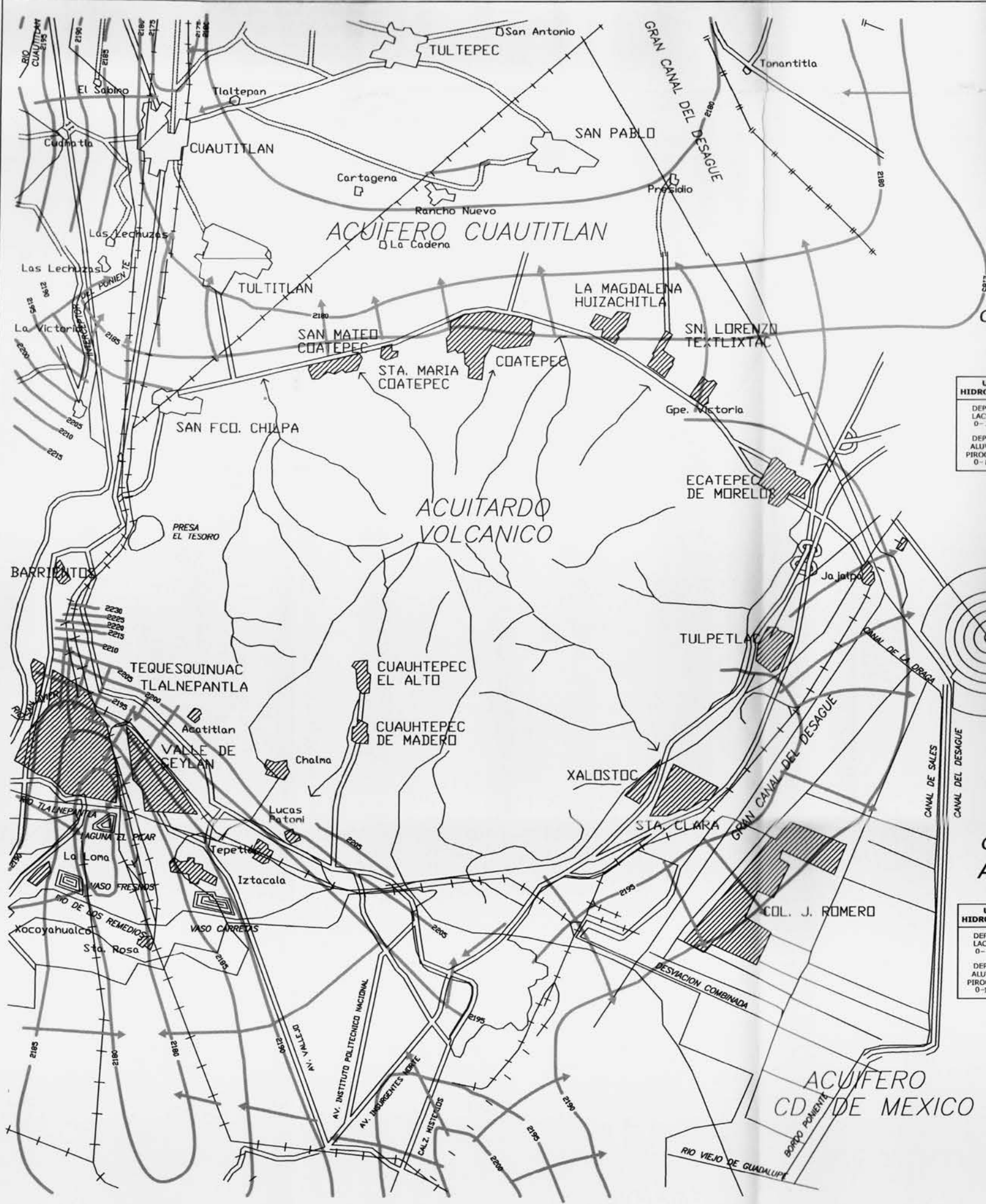
L. Berry Peter, Reid David, 1993  
Mecánica de Suelos  
M<sup>c</sup> Graw Hill, pp 48 - 129

B. Sowers George, F. Sower George, 1975  
Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones  
Limusa, pp321-390

Marsal Raúl J. y Mazari Marcos, 1987  
El subsuelo de la ciudad de México  
Series del Instituto de Ingeniería, Num. 505 pp15-123

Nabor Carrillo, 1969  
Influencia de los pozos artesianos en el hundimiento de la ciudad de México  
El hundimiento de la ciudad de México, proyecto Texcoco  
Secretaría de Hacienda y Crédito Público Fiduciaria: Nacional Financiera S.A., pp 7-14

Zeevaert Leonardo, 1983  
Foundatio engineering for difficult subsoild conditions  
Van Nostrand Reinhold Company, pp144-214



**CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS**  
**Acuífero Cuautitlán**

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	POROSIDAD n	TRANSMISIVIDAD 10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> /s	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
DEPÓSITOS LACUSTRES 0-350 m	$K_h = 10^{-4}$ a $10^{-3}$ m/s $K_v = 10^{-4}$ a $10^{-5}$ m/s	0.55		
DEPÓSITOS ALUVIALES Y PIROCLÁSTICOS 0-800 m	$K_h = 10^{-4}$ a $10^{-3}$ m/s $K_v = 10^{-4}$ a $10^{-5}$ m/s	0.20	3.11	1.2

**CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS**  
**Acuífero Cd. de México - Texcoco**

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	POROSIDAD n	TRANSMISIVIDAD 10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> /s	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
DEPÓSITOS LACUSTRES 0-400 m	$K_h = 10^{-4}$ a $10^{-3}$ m/s $K_v = 10^{-4}$ a $10^{-5}$ m/s	0.60		
DEPÓSITOS ALUVIALES Y PIROCLÁSTICOS 0-1000 m	$K_h = 10^{-4}$ a $10^{-3}$ m/s $K_v = 10^{-4}$ a $10^{-5}$ m/s	0.20	3.61	1.5



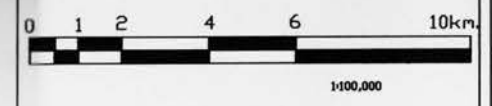
**SIGNOS CONVENCIONALES**

- Lindero de Estado
- Lindero del Distrito Federal
- Ferrocarril
- Canino Pavimentado
- Dreoducto
- Acueducto
- Canal
- Tunel
- Rio
- Presas y Lagunas
- Población

**CONFIGURACION DEL NIVEL DE AGUA**

- LÍNEA DE FLUJO EQUIPOTENCIAL
- LÍNEA DE FLUJO NIVEL ESTÁTICO

**ESCALA GRÁFICA**



**NOTAS**

Para la formación de este plano, se utilizó la Carta Hidrológica elaborada para la Gerencia de Aguas del Valle de México en 1993; el proyecto Lago de Texcoco Reacate Hidrogeológico realizado por Gerardo Cruz Hernández García (1998); e Informe de Abastecimiento de agua a la Zona Metropolitana del Valle de México de la Gerencia General del Valle de México, 1997.

La configuración de la red de flujo de agua se tomó de la "Actualización de Mediciones Piezométricas de los Acuíferos Reservados en 1996 en el Valle de México (CNA-PROGMA), 1997.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA  
CIENCIAS DE LA TIERRA

AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO  
ACUÍFERO EN EL ÁREA DE ESTUDIO



SITIO DE OBSERVACIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL AGRIETAMIENTO						
	Orientación	Intensidad	Abertura cm	Profundidad m	Tipo de relleno	Longitud aproximada m	Deformación promedio cm/año
Las Salinas	NE 72 SW	@ 1.5 m	6.0	no determinada	grava y arena	561	6.2
Aragón	NE 56 SW	@ 0.7 m	15.0	no determinada	arcillosa arenosa	400	14.5
Peñon de los Baños	NW 33 SE	@ 1.0 m	18.0	no determinada	grava y arena	545	12.2
Insurgentes	NE 68 SW	@ 2.0 m	8.0	no determinada	arcillosa arenosa	615	9.6
Molinos	NW 70 SW	@ 15.0 m	6.0	no determinada	arcillosa arenosa	466	5.0

ZONA DE RIESGO	RANGO DE DEFORMACIÓN cm/año	OCURENCIA
BAJO	0.0 a 3.0	POCA
MEDIO	3.1 a 9.4	REGULAR
ALTO	9.5 a 15.0	FRECUENTE

RIESGO	TIPO DE DEPÓSITO DOMINANTE
NULO	Afloramientos tobáceos y derrames volcánicos que no presentan ningún riesgo con respecto al agrietamiento, pero si presentan un riesgo potencial con respecto a desprendimientos de bloques inestables sobre las laderas.
BAJO	Depósitos de abanicos aluviales de variable espesor y extensión, caídos y rodados de bloques inestables y en menor proporción depósitos de grava y arena empacados en limos de color café claro, estos depósitos en conjunto frecuentemente llegan a alcanzar la planicie más próxima.
MEDIO	Depósitos aluviales y fluviales de variable espesor y extensión, constituidos por grava, arena, limos y arcillas, que varían conforme se profundiza a conglomerados y brechas con intercalaciones de arcillas, tobas e inclusive derrames lávicos basálticos y andesíticos, o bien, arenas, limos y arcillas con interestratificación de tobas de grano fino y lapillíticas intercalados con depósitos piroclásticos. Los suelos se caracterizan por una gran heterogeneidad en la granulometría y por espesores que se adelgazan hacia sus márgenes.
ALTO	Depósitos lacustres constituidos por sedimentos clásticos arcilloso, limoso, arenoso y vidrio volcánico.



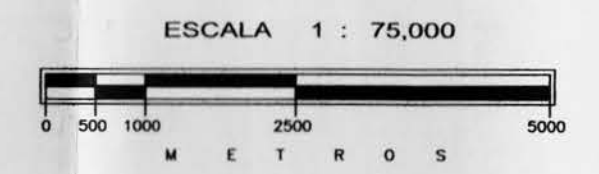
SIGNOS CONVENCIONALES

- Lindero de Estado
- Lindero del Distrito Federal
- Ferrocarril
- Carriño Pavimentado
- Dleoducto
- Acueducto
- Canal
- Tunel
- Rio
- Presas y Lagunas
- Población
- Límite de riesgo de agrietamiento

SISMBLOGÍA GEOLÓGICA

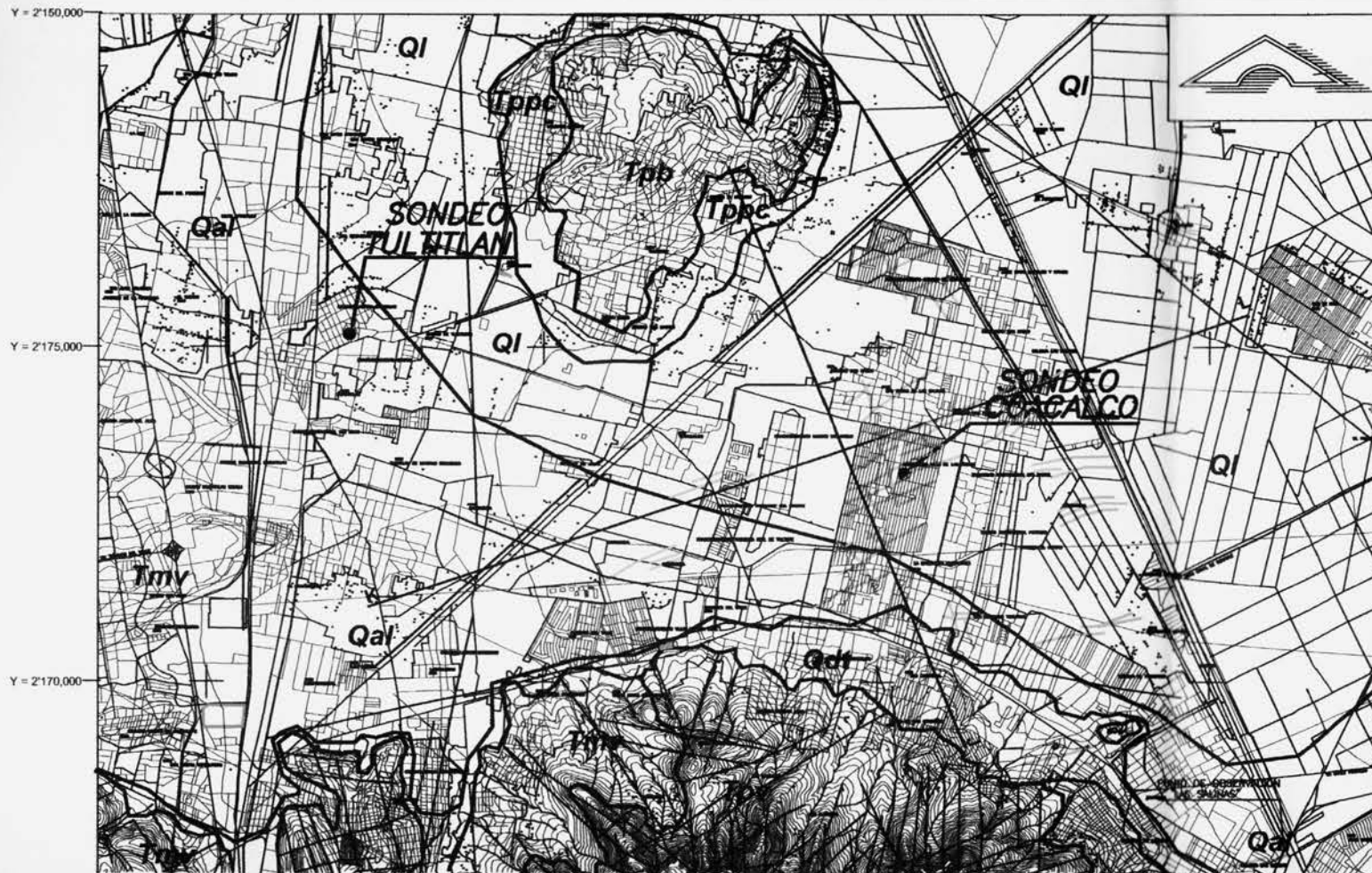
- Contacto litológico
- Fallas
- Fracturas
- Grietas
- Sección A-A

ESCALA GRAFICA



NOTAS

La simbología geológica corresponde a la definida en el plano No. 1. La cartografía se obtuvo a partir de: Fotografías aéreas de la Ciudad de México a escala 1:30,000 (L-6 F-008 a F-020, L-7 F-017 a F-029, L-8 F-007 a F-019), tomadas el 2 de diciembre de 1994. Cartas topográficas de INEGI a escala 1:50,000 (E14A29 y E14A39 edición 1998)



**SONEDO TULTITLÁN:**

ESPESOR PROMEDIO (m)	CARACTERÍSTICAS GENERALES	PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS
0.00 a 4.80	Limo arcilloso, color gris oscuro a gris verdoso, consistencia muy heterogénea de blanda a dura, de alta plasticidad y compresibilidad (MH) n = 1 a 46 golpes	A = 16% F = 84% w = 138% LL = 149% IP = 88% γ = 1.289 ton/m <sup>3</sup> c = 2.6 ton/m <sup>2</sup> φ = 3° m <sub>v</sub> = 0.099 cm <sup>3</sup> /kg
4.80 a 5.40	Arena arcillosa de color gris verdoso, compacta, de plasticidad mediana (SC) n = 33 a 38 golpes	A = 66% F = 34% w = 21% LL = 32% IP = 15%
5.40 a 7.20	Arena arcillosa de color gris verdoso, muy compacta, de plasticidad media (SC), varía a arcilla arenosa dura (CL) n = mayor a 50 golpes	A = 60% F = 40% w = 26% LL = 40% IP = 18%
7.20 a 7.80	Arcilla arenosa de color gris verdoso, de consistencia dura, de media plasticidad (CH) n = 37 golpes	A = 12% F = 88% w = 46% LL = 57% IP = 31%
7.80 a 9.00	Arcilla arenosa y limo arcilloso de color gris verdoso, de consistencia dura, de media a alta plasticidad (CH) n = mayor a 50 golpes	A = 10% F = 90% w = 37% LL = 54% IP = 30%
9.00 a 11.40	Limo arcilloso de color gris verdoso, de consistencia firme a dura y de media a alta plasticidad (MH) varía a arcilla arenosa (CL) n = 12 a 18 golpes	A = 9% F = 91% w = 54% LL = 71% IP = 35% γ = 1.473 ton/m <sup>3</sup> c = 6.8 ton/m <sup>2</sup> φ = 6° m <sub>v</sub> = 0.048 cm <sup>3</sup> /kg
11.40 a 12.60	Arcilla arenosa de color gris verdoso, de consistencia dura y de media plasticidad (CL) n = mayor a 50 golpes	A = 14% F = 86% w = 30% LL = 40% IP = 17%
12.60 a 16.00	Secuencia de capas de arena arcillosa, arcilla arenosa y limo arcilloso de color gris verdoso, muy compactos o duros, de media a alta plasticidad (SC, CL, MH) n = 23 a 18 golpes	A = 5% a 78% F = 95% a 22% w = 32% a 87% LL = 17% a 110% IP = 16% a 55%

No se detectó el nivel freático.

**SONEDO COACALCO:**

ESPESOR PROMEDIO (m)	CARACTERÍSTICAS GENERALES	PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS
0.00 a 5.10	Arcillas limosas, de color gris oscuro a gris verdoso, de consistencia muy heterogénea de blanda a medianamente firme (CH) n = 2 a 5 golpes. Se aprecian grietas de hasta 1.0 m con abertura del orden de 1.5 cm	A = 7% F = 93% w = 177% LL = 207% IP = 140% γ = 1.265 ton/m <sup>3</sup> c = 2.0 ton/m <sup>2</sup> φ = 5° m <sub>v</sub> = 0.116 cm <sup>3</sup> /kg
5.10 a 6.90	Limo arcilloso de color gris verdoso de consistencia blanda a firme, de alta plasticidad y compresibilidad (MH) n = 3 a 15 golpes	A = 17% F = 83% w = 28% a 82% LL = 67% a 130% IP = 15% a 27%
6.90 a 7.50	Limos arcillosos de color gris verdoso, de consistencia dura (MH) n = mayor de 50 golpes	A = 10% F = 90% w = 43% LL = 54% IP = 22%
7.50 a 8.70	Limo arcilloso, de color gris verdoso, de consistencia firme (MH) n = 12 golpes	A = 7% F = 93% w = 48% LL = 54% IP = 21%
8.70 a 10.50	Secuencia de capas de limo arcilloso y arcilla arenosa de color gris verdoso, de consistencia dura y mediana plasticidad (MH a CL) n = mayor de 50 golpes	A = 24% F = 76% w = 32% a 52% LL = 38% a 64% IP = 17% a 34%
10.50 a 11.70	Limo arcilloso de color gris verdoso, de consistencia muy firme (MH) n = 25 golpes	A = 9% F = 91% w = 42% LL = 60% IP = 25% γ = 1.498 ton/m <sup>3</sup> c = 4.8 ton/m <sup>2</sup> φ = 6° m <sub>v</sub> = 0.0586 cm <sup>3</sup> /kg
11.70 a 12.30	Arcillas limosas con poca arena fina, de color gris verdoso, de consistencia dura (CL) n = mayor de 50 golpes	A = 21% F = 80% w = 39% LL = 32% IP = 12%
12.30 a 14.50	Arcilla arenosa de color gris verdoso de consistencia muy firme (CH) n = 18 golpes	A = 9% F = 91% w = 86% LL = 86% IP = 51%
14.50 a 16.00	Secuencia de arenas limosas de color gris verdoso, muy compactas (MH) n = 25 golpes	A = 39% F = 61% w = 53% LL = 60% IP = 24%

No se detectó el nivel freático.

**SONEDO MOCTEZUMA:**

ESPESOR PROMEDIO (m)	CARACTERÍSTICAS GENERALES	PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS
0.00 a 2.00	Rolleno artificial, heterogéneo formado con tepetate conteniendo escombros y cascajo de antiguas demoliciones. En esta parte se tienen restos de cimentaciones de concreto	
2.00 a 2.50	Arena arcillosa color café grisáceo claro, de suelta a mediana compacidad (SC) n = 1 a 5 golpes	A = 70% F = 30% w = 25% LL = 35% IP = 15%
2.50 a 7.00	Limo gris verdoso con nódulos arcillosos grises y pequeñas concreciones blancuzcas, consistencia blanda a muy blanda y alta compresibilidad (MH) n = entre 2 y 8 golpes	A = 5% F = 95% w = 157% LL = 191% IP = 120% γ = 1.262 ton/m <sup>3</sup> c = 2.6 ton/m <sup>2</sup> φ = 1° m <sub>v</sub> = 0.06 cm <sup>3</sup> /kg
7.00 a 11.00	Limo café claro con nódulos arcillosos grises, consistencia muy blanda, a los 10.5 m de profundidad presenta un lente arcilloso negro (MH) n = nulo	A = 2% F = 98% w = 114% LL = 126% IP = 70%
11.00 a 13.00	Arcilla café rojizo con pequeños nódulos arcillosos grises, consistencia muy blanda y alta plasticidad (CH), n = 1 a 5 golpes	A = 1% F = 99% w = 140% LL = 201% IP = 139% γ = 1.329 ton/m <sup>3</sup> c = 1.5 ton/m <sup>2</sup> φ = 1.5° m <sub>v</sub> = 0.06 cm <sup>3</sup> /kg
13.00 a 15.00	Arcilla café verdosa con nódulos arcillosos grises, consistencia muy blanda y alta plasticidad (CH) n = nulo	A = 2% F = 98% w = 171% LL = 230% IP = 162%

Se detectó el nivel de agua freático a la profundidad de 2.60 m.



**SIGNOS CONVENCIONALES**

- Límetro de Estado
- Límetro del Distrito Federal
- Ferrocarril
- Carril Pavimentado
- Biodeucto
- Acueducto
- Canal
- Túnel
- Río
- Presas y Lagunas
- Población

**SIMBOLOGÍA GEOTÉCNICA**

- n = Número de golpes
- A = Contenido de arena
- F = Contenido de finos
- w = contenido natural de agua
- LL = Límite Líquido
- IP = Índice Plástico
- g = Peso volumétrico, c = Cohesión, φ = Ángulo de fricción interna
- m<sub>v</sub> = Coeficiente de variación volumétrica

**ESCALA NUMÉRICA**

ESCALA 1 : 100,000

**NOTAS**

La simbología geología corresponde a la definida en el plano No. 1. La cartografía se obtuvo a partir de: Fotografías aéreas de la Ciudad de México a escala 1:30,000 (L-6 F-008 a F-020, L-7 F-017 a F-029, L-8 F-007 a F-019), tomadas el 2 de diciembre de 1994. Cartas topográficas de INEGI a escala 1:50,000 (E14A29 y E14A39 edición 1998). Los datos geotécnicos se obtuvieron de los siguientes estudios: M. de S. del Conjunto Habitacional Oceania, INGEOPEC SA de CV, 1999. M. de S. para el edificio A21 U. H. El Rocio, ubicado en Tultitlán y Estación 861 U. H. San Rafael ubicado en Coacalco Edo de México, IPESA S.A. de C.V., 1999

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
INSTITUTO DE GEOLOGIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA  
AGUAS SUBTERRANEAS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO