



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Caracterización Hidrogeológica  
de la Zona Noreste y Meridional de la  
Delegación Iztapalapa, México, D.F.

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA

Alfonso Castañeda Lara

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alberto Arias Paz



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.

## DEDICATORIAS

A mis padres con todo mi amor y por haber forjado en mis sus principios de honestidad y trabajo.

A mis hermanos Eduardo, Rosa Maria y David, que han vivido y compartido conmigo momentos de alegría, retos y tristezas.

A mi abuela Ignacia que admire y ame, esperando su apoyo desde en el cielo donde se encuentra.

A la Familia Jiménez Lara, Jaime Lara y Lorena Hernández, que comparte momentos gratos siempre conmigo.

A mis amigos Enrique, Gustavo, Guillermo, Alfredo, Norberto, amigos Geólogos y Geofísicos que han compartido su amistad y conocimientos.

## AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater “Universidad Nacional Autónoma de México”

Al Ingeniero Alberto Arias Paz por su apoyo incondicional, orientación y ayuda

A la DGCOH e Ingenieros que colaboraron con información y actividades técnicas para la elaboración de este trabajo.

Al jurado por sus sugerencias que fueron de gran utilidad para la terminación de este trabajo.

A todos mis maestros que apoyaron en mi formación profesional.

ÍNDICE	PÁGINAS
CAPITULOS	
RESUMEN.....	I
1.-INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Actividades realizadas.....	2
1.4 Trabajos previos.....	3
2.-GENERALIDADES	
2.1 Localización.....	5
2.2 Clima.....	5
2.3 Precipitación.....	5
2.4 Vegetación y fauna.....	10
2.5 Vías de comunicación.....	10
2.6 Población y actividad económica.....	12
3.-GEOLOGÍA	
3.1 Fisiografía.....	13
3.2 Geomorfología.....	14
3.3 Geología regional.....	16
3.4 Geología histórica.....	27
3.5 Rasgos estructurales.....	28
3.6 Estudios de sísmica.....	31
3.7 Correlación Litoestratigráfica.....	39
4.- HIDROGRAFÍA.....	46
5.-HIDROGEOLOGÍA	
5.1 Provincia hidrogeológica.....	52
5.2 Configuraciones de elevación al nivel del agua subterránea.....	54
5.3 Hidrógrafos.....	64
5.4 Hidrogeoquímica.....	68
5.5 Pruebas de bombeo.....	75
5.6 Propiedades hidráulicas.....	84
5.7 Balance de agua subterránea.....	93
5.8 Unidades hidrogeológicas.....	98
5.9 Modelo conceptual del funcionamiento del acuífero de la Cuenca de México.....	100
6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1 Conclusiones.....	104
6.2 Recomendaciones.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106

## RESUMEN

La zona de estudio se encuentra localizada en el área meridional de la cuenca de México, en la Delegación Iztapalapa, en la provincia hidrogeológica “Faja Volcánica Transmexicana; Geomorfológicamente es una amplia altiplanicie a más de 2,230 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la porción central- este de la planicie se encuentra varios picos, como el Cerro del Marqués, cerro de La Estrella y la Sierra de Santa Catarina.

La Cuenca de México es una cuenca endorreica de desagüe artificial que se formó al cerrarse el antiguo Valle de México como resultado de su obstrucción por la actividad andesítica basáltica que edificó la Sierra de Chichinautzin, al cerrarse la cuenca las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros.

De acuerdo a las condiciones geohidrológicas existentes el sistema acuífero consiste en un acuitardo en la parte superior constituido por depósitos arcillosos estratificados con capas de arenas finas de origen volcánico, subyaciendo el acuitardo arcilloso se encuentra el acuífero superior e inferior profundo, el superior actualmente explotado constituido por material granular y fisurado, el acuífero inferior se encuentra a 2 000 y 3 900 m de profundidad, formado por rocas carbonatadas del Cretácico, permeables por fracturamiento y disolución, la principal recarga al acuífero corresponde a la infiltración por lluvia que se genera sobre los flancos de las elevaciones topográficas, debido a la alta permeabilidad de las rocas, existe otro tipo de recarga y comprende casos de agua residual tratada y no tratada, además de agua de canales y/o fugas de drenaje y de la red de distribución.

El objetivo de este estudio fue determinar las características hidráulicas del acuífero para una explotación racional y la definición de políticas de extracción de agua, así como los efectos colaterales ocasionados por el bombeo de agua subterránea, principalmente los hundimientos del terreno y migración de contaminantes, las actividades realizadas para lograr los objetivos propuestos en este trabajo fue realizar una compilación y análisis de la bibliografía asociada con el tema y un trabajo de campo realizado en los aforos programados por la DGCOH para la terminación de construcción de las reposiciones de pozos.

La realización de secciones geológicas para caracterizar la estratigrafía de la zona de estudio se hizo en base a cortes litológicos de pozos de agua por la DGCOH y por tendidos sísmicos realizados por la C.F.E. (1988) y Chávez Pérez (1993) y para conocer el comportamiento geohidrológico histórico se elaboraron e interpretaron planos de elevación del nivel estático para el periodo 1985-2001 a partir de los registros piezométricos de pozos que ha llevado a cabo en forma anual la DGCOH e hidrógrafos que muestran la evolución del nivel estático para el período entre 1985-2001.

El análisis hidrogeoquímicos realizado con base a los contenidos iónicos en muestras de pozos dentro del área de estudio y realizado el balance de cargas en los pozos seleccionados se interpreto que el agua en los pozos son del tipo sódico aunque en forma puntual caen en otros tipos de aguas y los más mineralizados están situados en las inmediaciones sur del Cerro la Estrella y Santa Catarina, los contenidos de NaCl pueden asociarse a influencia antrópica o a la aportación de las arcillas

Para el balance del subsistema acuífero Ciudad de México se calcularon las entradas y salidas de agua subterránea del subsistema, así como el diferencial entre entradas y salidas, que corresponde al cambio de almacenamiento y se obtuvo que el subsistema acuífero de la Ciudad de México se encuentre sobreexplotado en un 25%.

Se espera que el presente trabajo se utilice para planeación de extracción del agua subterránea y localización de futuros pozos de inyección a partir del conocimiento del modelo del acuífero y sus características físicas y geoquímicas; también para aplicaciones directas en diseño de pozos de futuras reposiciones y mejoramiento de logística al momento de realizar aforos.

## 1.-INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes.

La Cuenca de México es una cuenca endorreica de desagüe artificial que se formó al cerrarse el antiguo Valle de México como resultado de su obstrucción por la actividad andesítica basáltica que edificó la Sierra de Chichinautzin, al cerrarse la cuenca las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros. La zona de estudio se localiza dentro del área meridional de la cuenca de México, en la Delegación Iztapalapa.

En tiempos prehispánicos una parte de la zona de estudio fue un islote del lago de Texcoco, en lo que ahora es el Peñón del Marqués, Actualmente también se le llama Cerro del Peñón Viejo.

En la Cuenca de México, hacia el siglo VII de nuestra era, fundaron su capital, los pobladores de Culhuacán, al pie del Cerro de la Estrella, la que denominaron Culhuacán. Contaban con una economía basada principalmente en la agricultura de chinampas.

El Cerro de la Estrella, llamado por los antiguos Huizachtépetl, fue para los aztecas el escenario de la ceremonia del "Fuego Nuevo". Para esta tribu la terminación de un ciclo de 52 años se solemnizaba con la extinción total del fuego y el impresionante acto de volver a encenderlo en la cumbre del cerro.

En vísperas de la conquista española, Culhuacán ya no era una localidad preeminente en el sur del Valle. En sus proximidades se había desarrollado Iztapalapa, también a la orilla del lago y al pie del Cerro de la Estrella, aunque del lado norte de esa montaña, fue una de las villas reales que rodeaban Tenochtitlan a la cual abastecían de víveres y a la vez protegían, dada su situación geográfica, la convertía en la primera línea de defensa.

Dos vías fluviales eran los canales que partían de Chalco y Xochimilco, se unían para formar el Canal Nacional. A través de este canal se transportaban los productos agropecuarios de los pueblos de la región de Iztapalapa y del campo que recorría el canal, en general la capital era abastecida de lo que se producía en los poblados aledaños. Muchos pueblos del sur del Valle continuaban empleando el sistema de chinampas como en la época colonial. La agricultura era el soporte económico básico, y además permitía satisfacer las necesidades locales de maíz, frijol y numerosos vegetales.

Desde el siglo XIX, se iniciaron obras para el drenaje de la ciudad lo cual aceleró el secado de los lagos. En los años 40's del siglo XX, el requerimiento de agua para la Ciudad de México fue satisfecho mediante la perforación de pozos, los cuales se fueron incrementando en número hacia las décadas de los 50's y 60's, provocando a su vez el abatimiento del nivel del agua subterránea También la urbanización de la delegación inició su expansión hasta confundir su mancha urbana con las colonias de las delegaciones vecinas. Durante esos años fue entubado el Canal de la Viga, que pasó a ser un drenaje cubierto (1955). Convertido junto con el camino Real

de Calzada de la Viga, Las últimas chinampas de Culhuacán y Mexicaltzingo, que colindaban con el canal, desaparecieron paulatinamente.

La necesidad de agua potable para las diferentes actividades de la población hoy en día también se logra mediante el aprovechamiento de cientos de pozos perforados en la Cuenca de México a distintas profundidades, ubicados principalmente en la planicie y algunos en las faldas del piedemonte; esos pozos aprovechan el agua del subsuelo en material granular y fisurado y parcialmente del acuitardo y provee aproximadamente, el 70% del total de agua que consume la población de la zona metropolitana de la ciudad de México ( $60.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ; AIC, 1995). La delegación actualmente cuenta con 56 pozos de los cuales se encuentran operando 52 con un gasto total de 2 698 l/s, además existen 8 pozos particulares a cargo de la CNA (Comisión Nacional del Agua.) que entregan un caudal de 945 l/s.

De ahí la importancia de determinar las características hidráulicas del acuífero para una explotación racional y definir políticas de extracción de agua, así como los efectos colaterales ocasionados por el bombeo de agua subterránea, principalmente los hundimientos del terreno y migración de contaminantes.

## 1.2 Objetivos.

1.-Determinar el modelo hidrodinámico de la Zona Norte y Meridional de la Delegación Iztapalapa.

2.-Caracterizar al acuífero a través valores de transmisibilidad hidráulica y coeficiente de almacenamiento con la información disponible.

## 1.3 Actividades realizadas.

En primera instancia se recopiló y analizó la bibliografía asociada con el tema desarrollado, se investigó el mayor número posible de artículos científicos, técnicos e históricos. Una parte de datos geohidrológicos y geológicos fue aportado por la DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica) por medio de la Dirección Técnica y la Unidad Departamental de Pozos y Bombeo.

El trabajo de campo se realizó en los aforos programados por la DGCOH para la terminación de construcción de las reposiciones de los pozos Peñón N° 5 y Peñón N° 6. El trabajo de gabinete fue la interpretación de los datos obtenidos en campo y el análisis de pruebas de bombeo antes realizadas en diferentes pozos de la zona.

Se describió brevemente las formaciones geológicas presentes dentro de la Cuenca, para caracterizar la estratigrafía de la zona de Iztapalapa.

Se realizaron secciones geológicas en base a cortes litológicos de pozos de agua por la DGCOH y por tendidos sísmicos realizados por la C.F.E. (1988) y Chávez Pérez (1993) e historia geológica.,

Con los registros piezométricos que ha llevado a cabo en forma anual la DGCOH, se elaboraron e interpretaron planos de elevación del nivel estático para el periodo 1985-2001. También se realizaron hidrógrafos que muestran la evolución del nivel estático en cada uno de los pozos para el período entre 1985-2001.

Con base a los cortes litológicos, de datos obtenidos en campo, realización, análisis y reinterpretación de datos existentes, se caracterizo y se obtuvo el modelo hidrodinámico del acuífero de la Cuenca de México, en la zona norte y meridional de la Delegación Iztapalapa.

#### 1.4 Trabajos previos

Existe un amplio acervo bibliográfico sobre la Cuenca de México. Entre los históricos y los enfocados a los objetivos del presente se encuentran los siguientes:

- Época precolonial.       .-En el Códice Mendocino fueron relatados algunos de los problemas hidrológicos.
- Durante la Colonial.     .-Francisco Javier Clavijero compiló datos de las inundaciones sucedidas en la Cuenca de México.  
                                  .-Una de las primeras exploraciones “geológicas” fue la de Diego de Ordaz, soldado de Cortés que exploró el Popocatépetl en busca de azufre.
- Humboldt (1808).       .-Hizo una descripción geológica del Valle de México.
- Duport (1843).         .-Realizó una de las primeras descripciones de algunas rocas clásticas del Valle de México.
- Del Castillo (1879).   .-Refirió algunos datos geológicos y paleontológicos de la cuenca de México.
- Aguilera y Ordóñez (1895).   .-Estudian petrográficamente al Popocatépetl.
- García-Cubas (1906).   .-Definen en detalle los límites geográficos del Valle de México.
- Marín y Zamacona (1937).   .-Estudian temas hidrológicos y descripciones geográficas de las obras de desagüe de la Cuenca de México.
- De la O -Carreño (1954).   .-Realizan el croquis geológico petrográfico.
- Bryan (1948).         .-Describe y fecha los sedimentos del pie de monte que denomino Formación Tarango.
- Arellano (1946, 1948, 1951, 1953).   .-Estudia la estratigrafía de la cuenca.
- Schlaepfer (1968).    .-Describe la secuencia estratigráfica, volcánica y sedimentaria ubicándola en el tiempo y espacio.
- Nabor Carrillo (1969).   .-Estudia los problemas del hundimiento de la ciudad de México.
- Neugendank (1972).    .-Estudia la petrografía de las rocas volcánicas de la cuenca de

- México.
- Demant (1976). .-Estudia el Sistema Volcánico Mexicano geoquímica e isotópicamente, explicando su origen.
- Cantagrel y colaboradores (1984). .-Estudian la actividad volcánica del Popocatepetl.
- DDF, PEMEX y CFE (1986). .-El sismo de 1985, despertó la necesidad de conocer con más detalle el relleno de la cuenca, es así, como el Departamento del Distrito Federal (DDF), a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Petróleos Mexicanos (PEMEX), efectúan estudios de sísmica de refracción y cinco perforaciones profundas cuyas profundidades son; entre 2,200 y 3,200 m.
- Lugo-Hubp (1984) , Galindo y Morales (1987). .-Estudian Geomorfológicamente, las partes meridional y occidental de la cuenca.
- Cserna y colaboradores (1987). .-Aportan información geológico-estratigráfica de la cuenca.
- Mooser (1956-1988), Nixon et al. (1987). .-Estudian a detalle y edades parte de la Sierra Nevada, y aportan información geológico-estratigráfica de la cuenca.
- Aguayo et al. (1989). .-Relacionan los sistemas de fracturas definidos con fracturamiento regional activo que afecta toda la república.
- Sánchez- Díaz (1989). .-Trabaja sobre las características geológicas de los acuíferos de la ciudad de México.
- Mooser y Molina (1993), Herrera et al (1989). .-Estudios relacionados con el agua subterránea que describen algunas de las características del flujo subterráneo.
- Carrillo-Rivera, et al. (1998). .-Aborda el aspecto de la calidad del agua subterránea desde el punto de vista hidrogeoquímico.
- (1998-2001). .-Existen diversos estudios hidrológicos expuestos en congresos y estudios internos elaborados para la DGCOH, también existen tesis de licenciatura recientes referentes a estratigrafía y riesgos geológicos de la Cuenca de México.

Por todo lo anterior se desprende que existe una gran cantidad de documentos y una parte de ellos se consulto e integró para fundamentar el presente.

## 2.- GENERALIDADES

### 2.1 Localización.

El área de estudio se encuentra localizada en la parte meridional de la cuenca de México al norte y centro de la Delegación Iztapalapa, situada en la región oriente del Distrito Federal (Fig.1).

La delegación Iztapalapa cuenta con una superficie aproximada de 117 kilómetros cuadrados cuyos límites son: al norte con la Delegación Iztacalco y el municipio de Nezahualcóyotl del Estado de México, al noreste y oriente con los municipios de La Paz e Iztapaluca del Estado de México, al sur con las delegaciones Tláhuac y Xochimilco, al poniente con la Delegación Coyoacán y al noroeste con la Delegación Benito Juárez.

### 2.2 Clima.

Dentro de la Cuenca de México el 57% presenta clima templado, 33% climas semifríos y 10% clima semiseco (García, 1988). De acuerdo al sistema de clasificación climática de Köppen, adecuado por Enriqueta García, en la parte meridional de la cuenca y zona de estudio, el tipo de clima se define como templado subhúmedo con régimen de lluvia en verano C(w) con lluvias en verano: Asimismo el clima templado subhúmedo con lluvias en verano y de humedad media (C(w1)), tiene una precipitación promedio de 700 mm anual, pudiendo alcanzar hasta 1 150 mm en las temporadas de mayor precipitación, presenta una temperatura de 17 °C media anual.

### 2.3 Precipitación.

Uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico es la precipitación, es un factor esencial pues constituye la materia prima de la recarga al acuífero. La precipitación ocurre como resultado de la condensación del vapor de agua de la atmósfera.

Por su posición geográfica, la Cuenca de México se encuentra afectado por sistemas de circulación atmosférica que definen claramente la época húmeda de la seca, asimismo determinan la precipitación que cae en el transcurso del año.

La época húmeda en la Cuenca de México se inicia cada año cuando, debido al desplazamiento de la zona intertropical de convergencia hacia el norte del ecuador geográfico, se restablece, en la mayor parte del territorio mexicano, el flujo de los vientos alisios que, procedentes del mar, introducen humedad al país y, por tanto, a la cuenca. Esto sucede comúnmente en el mes de junio; sin embargo, las primeras lluvias de esta época se presentan desde mayo y en algunas ocasiones desde abril.



Figura 1.- Localización de la zona de estudio.

Las precipitaciones producidas por la entrada de los vientos alisios se intensifican durante los meses de julio, agosto y septiembre y se prolongan hasta octubre por la influencia de las ondas del este y de los ciclones tropicales que afectan las costas mexicanas tanto del Golfo de México como del Océano Pacífico a fines del verano y principios del otoño, por lo que provocan fuertes e importantes lluvias en la mayor parte del país.

Durante los meses de invierno, imperan condiciones de sequía; sin embargo, por el predominio de los vientos del oeste, el territorio mexicano queda expuesto al influjo de las perturbaciones propias de las latitudes medias, así como a la invasión de masas de aire polar, situaciones que dan lugar a precipitaciones en la cuenca; no obstante, en la mayor parte de la región éstas no llegan a constituir el 5% del total anual.

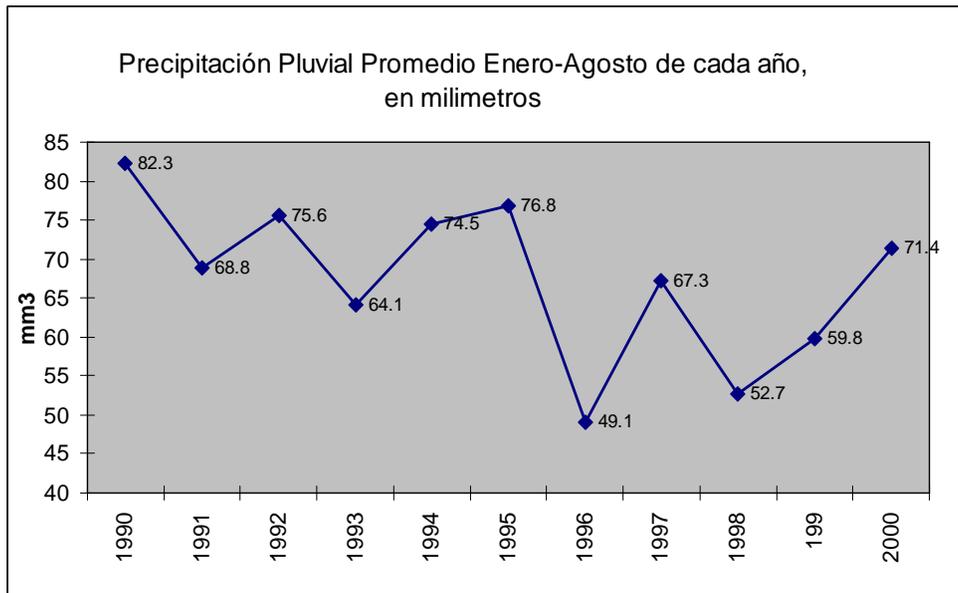
De esta manera se puede asentar que la época húmeda comprende seis meses, de mayo a octubre; es decir, todo el verano y principios del otoño.

En cuanto al carácter de la precipitación, se presentan los tipos orográfico, convectivo y frontal. El relieve montañoso y accidentado de la cuenca motiva que las precipitaciones que ocurren en ella sean de índole eminentemente orográfica. Esta se acentúa notablemente en la estación de verano y principios de la de otoño cuando el ascenso de temperatura en la cuenca propicia el fenómeno de convección, el cual adquiere mayor importancia frente a las barreras montañosas circundantes que actúan como un mecanismo disparador de las masas de aire húmedo provenientes del Golfo de México y del Océano Pacífico, ocasionando una nubosidad de gran desarrollo vertical que da lugar a fuertes y cuantiosas precipitaciones. Así, durante la época húmeda las precipitaciones son de tipo orográfico y convectivo.

En el invierno la poca precipitación que se produce es de tipo frontal, dado que tiene su origen precisamente en los frentes que afectan al país en esa época. Estos son causados por el desplazamiento de masas de aire polar hacia el sur, donde se encuentran con masas de aire de características diferentes. Desde luego, el factor orográfico es importante también en esta estación, especialmente por la forma de la precipitación que se produce.

Las precipitaciones de la Cuenca de México generalmente se presentan en forma de lluvia; pero en la época húmeda, verano y principios de otoño, por el gran calentamiento que se experimenta, la velocidad de la convección de las masas de aire húmedo origina gigantescos cúmulos nimbos, nubes de profundo desarrollo vertical que provocan intensos aguaceros acompañados, en ocasiones, de fuertes granizadas. En la estación fría del año, las lluvias son menos intensas pero más pertinaces y, aunque no periódicamente, se llegan a presentar nevadas, en especial en las sierras que limitan a la cuenca. En virtud de que entre mayo y octubre cae del 80 al 94% de la precipitación anual, la cantidad total anual refleja, las particularidades de la época húmeda del año (Maderey R.,1981).

La grafica de precipitación pluvial promedio mensual para la Zona Metropolitana de la Cuenca de México (ZMCM) para el periodo 1990-2000, se muestra en la figura 2, En la tabla 1 se tiene la precipitación histórica mensual y anual en Iztapalapa para el periodo (1982-2000) y en la figura 3 se muestra la precipitación pluvial promedio anual en el periodo mensual Enero-Agosto en Iztapalapa.



\*Fuente- Secretaria del Medio Ambiente con datos de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno del Distrito Federal 2000.

Fig. 2.-Precipitación pluvial promedio anual Enero-Agosto en la ZMCM.

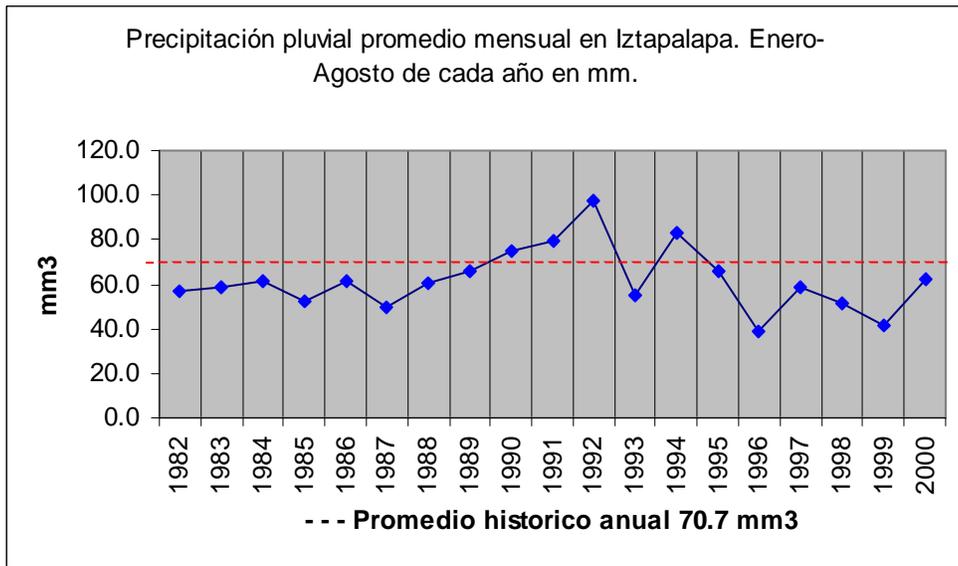


Fig. 3.- Precipitación pluvial promedio anual Enero-Agosto en Iztapalapa.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Promedio
														Ene-Ago
1982	0.0	6.6	5.1	14.0	60.5	107.3	122.9	73.6	33.1	29.3	0.0	0.5	452.9	56.6
1983	11.7	3.4	3.7	0.0	11.9	55.6	181.8	80.5	89.1	33.9	6.4	1.4	479.4	59.0
1984	6.1	3.5	1.4	0.1	41.6	59.8	141.4	90.3	107.2	42.2	1.6	4.5	499.7	61.7
1985	3.6	1.1	1.5	41.0	39.2	96.3	73.3	87.1	60.9	11.6	1.3	0.3	417.2	52.0
1986	0.0	0.1	0.0	16.3	75.8	165.9	60.9	99.2	43.1	30.4	2.6	0.1	494.4	61.5
1987	0.0	0.8	2.6	4.2	24.8	106.1	121.7	99.3	39.1	0.0	6.3	0.0	404.9	49.8
1988	0.3	5.3	23.4	6.3	43.4	110.0	114.2	74.3	97.7	10.8	0.2	0.0	485.9	60.7
1989	4.4	0.7	1.7	14.4	54.4	147.0	107.1	96.7	89.9	10.3	1.7	10.3	538.6	65.8
1990	16.2	5.6	5.9	53.7	74.9	61.4	149.5	94.8	106.2	33.7	0.4	0.5	602.8	75.2
1991	5.9	1.2	0.4	6.3	48.8	166.6	159.1	52.0	83.3	113.2	2.9	5.7	645.4	79.6
1992	26.1	14.5	11.9	16.6	84.9	69.4	174.3	164.2	144.7	73.8	60.1	0.8	841.3	97.6
1993	9.2	2.8	4.7	21.0	15.2	100.9	115.8	67.9	90.9	9.7	11.5	0.0	449.6	54.8
1994	14.9	0.0	2.8	22.0	20.7	112.7	161.0	139.6	128.9	62.7	12.4	1.4	679.1	83.2
1995	22.2	3.5	10.0	9.8	41.4	115.1	84.0	147.6	62.9	32.4	40.7	51.1	620.7	66.1
1996	0.0	0.0	0.5	18.3	9.2	57.5	70.5	66.7	69.5	19.1	0.0	17.6	328.9	38.9
1997	0.0	0.2	22.9	49.9	29.2	76.4	132.3	73.0	56.1	30.2	6.9	7.1	484.1	58.8
1998	3.8	0.0	0.0	1.9	0.4	38.2	60.4	218.8	84.2	3.7	0.0	126.9	538.1	51.4
1999	0.0	0.2	3.3	14.0	12.6	24.5	87.3	76.5	110.1	0.3	0.2	110.1	374.2	41.1
2000	0.0	0.0	5.6	4.4	87.2	129.1	124.0	149.0	--	--	--	--	226.3	62.4
<b>Promedio</b>	<b>7.1</b>	<b>3.2</b>	<b>6.4</b>	<b>17.3</b>	<b>41.4</b>	<b>113.9</b>	<b>123.6</b>	<b>112.7</b>	<b>102.7</b>	<b>37.5</b>	<b>9.8</b>	<b>23.1</b>	<b>518.7</b>	<b>70.7</b>

Tabla.1.- Precipitación histórica mensual y anual en Iztapalapa, Periodo Enero-Diciembre (1982-2000) en mm. Dirección Técnica DGCOH, GDF. 2000.

## 2.4 Vegetación y fauna.

Debido a la actividad minera y al crecimiento incontrolado de la población, las extensiones de tierra se han urbanizado dañando el ecosistema y también, afectando gravemente a la vegetación y a la especie animal.

En calles, avenidas y en las zonas no habitadas, existe una cubierta vegetal de características semisecas como arbustos, existen árboles de especies como: ahuejote o huejote sauce (*salix bonplandiana*); pirul (*schinus molle linn*); colorín (*erythrina coralloides*); eucalipto (*eucalyptus camaldulensis dehn*); fresno blanco (*fraxinus uhdei*); jacaranda (*jacaranda mimosaeifolia*); trueno (*ligustrum lucidum ait*); álamo (*populus alba linn*); encino (*quercus rugosa née*); sauce llorón (*salix babylonica linn*); tamarix (*tamarix aff. gallica*); araucaria o pino estrella (araucaria heterophylla); Ahuehuete (*taxodium mucronatum ten*); pino ocote (*pinus ayacahuite ehr*); palmera o palma de abanico (*phoenix canariensis chabaud*); yuca o palma izote (*yucca elephantipes regens*); tepozán o axixcuáhuítl (*buddleia cordata*) y otros más.

Existen variedades pequeñas de fauna silvestre como lo son: zorrillos, tejones, murciélagos, chapulines, mariposas, quijotillos y abejas. Se puede observar al vuelo aves como palomas, pájaros chillones, pájaros negros, golondrinas y colibríes. En los hogares, las familias tienen canarios, pericos, perros o gatos.

## 2.5 Vías de comunicación.

Sus principales vías de comunicación son la Calzada Ignacio Zaragoza, Avenida Tláhuac, Eje 6 y 8 Sur, Periférico Oriente, Churubusco, Canal de Chalco, Canal Nacional, Avenida de las Torres, Calzada Benito Juárez y Plutarco E. Calles, observadas en la figura 4.

Las líneas del metro que transitan por la Delegación son dos: La línea de Garibaldi-Iztapalapa, y la línea 1 sobre la Calzada Ignacio Zaragoza que llega a Pantitlán. Los trazos de estas líneas, cruzan el centro y el extremo poniente de la Delegación y se alimentan de varias rutas de autobuses y principalmente de microbuses, con recorridos que cubren la totalidad de la superficie de la Delegación. Asimismo, sobre la calzada de Zaragoza, circula el tren ligero, que inicia su recorrido en conexión con la ruta del metro y llega hasta el Municipio de los Reyes La Paz, en el Estado de México.



## 2.6 Población y actividad económica.

La Delegación Iztapalapa tiene una población de 1 490 499 habitantes, de los cuales 51% corresponde a mujeres y 49% a hombres (INEGI, 2002). Iztapalapa es asiento de numerosas familias que abandonaron las delegaciones centrales, y también destino de familias procedentes de otras entidades federativas. Ésta es la delegación más densamente poblada de la ciudad, con alrededor de 13 000 habitantes por kilómetro cuadrado, con población mayoritariamente joven.

El 1.69% de la población local habla alguna lengua indígena, principalmente las tradicionales como la náhuatl, otomí, mixteco y zapoteco. La religión predominante es la católica, pues 92.1% de la población la profesa. En la delegación 94.3% de la población es alfabeta. En esta delegación se tienen los siguientes planteles escolares oficiales: 77 planteles de educación preescolar, 328 primarias, 55 secundarias, 5 planteles de educación media superior y 2 de educación superior (uno de ellos el Plantel Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana).

Con respecto a la actividad económica, 29.9% de la población es económicamente activa; del total de ella, 97.3% está ocupada, es decir, tiene empleo (obreros o artesanos, comerciantes o dependientes del comercio y oficinistas). La población económicamente inactiva corresponde a estudiantes, amas de casa, jubilados, etcétera.

### 3.- GEOLOGÍA

#### 3.1 Fisiografía.

El área de estudio se encuentra comprendida dentro de la Cuenca de México, la cual se ubica en la parte central de la provincia geológica conocida como el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT).

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) o bien La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) se extiende de E al W en México, iniciando en la costa oriental de México pero terminando antes de llegar a la costa occidental, separada de esta por la Sierra Madre Occidental como por el macizo granítico de Jalisco (Venegas et al., 1985).

La FVTM es el arco volcánico que se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco, constituye unos de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica (Ferrari, 1984-92). Está constituida principalmente por rocas volcánicas de composición andesítica a dacítica de tipo calciocalcino cuyas edades varían desde Mioceno hasta el presente. La FVTM incluye diversos elementos estructurales: arcos volcánicos, zonas de fracturas, grabenes en echelón y elementos circulares. Dentro del conjunto de la FVTM es posible diferenciar también agrupamientos de fosas y pilares que mantienen una secuencia escalonada. Su arreglo sugiere un cizalleo a la izquierda ejercido desde la Trinchera de Acapulco sobre la corteza rígida delgada de la zona volcánica (Mooser et al., 1987).

En la FVTM las estructuras lineales (Ramírez, 1999) son la manifestación en superficie de la actividad vulcano tectónica ascendente y de los esfuerzos tectónicos horizontales ejercidos desde la Trinchera de Acapulco. Estos rasgos lineales o lineamientos morfoestructurales de acuerdo a su orientación se dividen en tres grupos: 1.-Dirección general W-E: Relacionado con la actividad de subducción de la Placa de Cocos, especialmente en lo que se refiere al cizalleo, ya que todos guardan un arreglo en echelón, 2.-Dirección general NW-SE y N-S: Lineamiento morfoestructural Querétaro. La dirección general de éste sugiere una relación genética con una subducción anterior, la de la Placa Farallón que creó grabenes al NW en el Paleoceno, y 3.-Dirección general NE: Este grupo lo constituye una serie de lineamientos oblicuos de la FVTM, Se detectan en el Valle de Toluca, en la Cuenca de México, en la de Puebla-Oriental y en la elevada Sierra del Pico de Orizaba y del Cofre de Perote. Su estilo sugiere que deban su origen a un cizalleo lateral-izquierdo que sería la respuesta de la corteza rígida superior al empuje oblicuo de la Placa de Cocos en subducción (Mooser et al., 1987).

La FVTM tiene rasgos característicos como lo son: a) Diferencias significativas en lo que respecta al tipo de volcanismo y su composición química, b) La presencia de un volcanismo alcalino de tipo intraplaca y c) La oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera.

### 3.2 Geomorfología.

La Cuenca de México es una amplia altiplanicie a más de 2,230 metros sobre el nivel del mar (msnm), rodeada por montañas volcánicas, y sobre la cual se asientan algunos grupos de elevaciones de diversa magnitud en metros (Zamorano-Orozco et. al., 2002). En la porción central- este de la planicie se encuentra varios picos aislados, como el Cerro del Marqués, de La Estrella y la Sierra de Santa Catarina, situados en la zona de estudio en la Delegación Iztapalapa. Las características más importantes de menor a mayor elevación son:

El cerro Peñón del Marqués, con una elevación máxima de 2 370 msnm y su cima tiene 130 m sobre el nivel de la planicie. Su topografía es de laderas cortas y muy inclinadas, no presenta modelado fluvial. Este volcán ha sido aprovechado como banco de material para construcción y por lo tanto alterado de su forma original por actividades antrópicas.

De acuerdo con el estudio de Tapia-Varela y López-Blanco (2002) para diferenciar unidades morfogénicas (UM) los aspectos fundamentales del relieve que muestra el área del Peñón Marqués contiene 2 unidades morfogénicas las cuales son:

La UM de Piedemonte (Pi44), en donde los valores de pendientes media son de 0-6°, con un rango de altitud de 2,300-2,370 msnm y registra una altura relativa de 132 m.

La UM de Lomerío (Lo36), donde el rango de valores media va de 0-10°, con un rango de altitud de 2,260-2,300 msnm y una altitud relativa de 60 m.

El Cerro de la Estrella, tiene una elevación de 2,450 msnm, su cima se encuentra a 214 m sobre la planicie. Este relieve, tiene una topografía relativamente suave pues sus laderas son poco inclinadas y están parcialmente cubiertas por una carpeta vegetal de árboles (pirúl) y pastos, su modelado fluvial es relieve incipiente.

De acuerdo con el estudio de Tapia-Varela y López-Blanco (2002), los aspectos fundamentales del relieve que muestra el cerro de La Estrella contiene 3 unidades morfogénicas las cuales son:

La UM de Laderas Montañosas (Lm 11), en donde los valores de pendientes media son de 4-14°, con un rango de altitud de 2,270-2,450 msnm y registra una altura relativa de 214 m.

La UM de Piedemonte (Pi44), en donde los valores de pendientes media son de 0-6°, con un rango de altitud de 2,250-2,270 msnm y registra un intervalo de altura relativa de 20 m.

La UM de Planicie Aluvial (Pla 59), en donde los valores de pendientes media son de 0-4°, con un rango de altitud de 2,240-2,250 msnm y registra un intervalo de altura relativa de 10 m.

El relieve más sobresaliente en la zona de estudio es la Sierra Santa Catarina con una orientación W-E, es una elevación de 2,750 msnm, su cima está a 510 m sobre la planicie, definida por un conjunto de siete volcanes principales, que inicia con el Yahualixqui y culmina con el doble cráter de explosión la Caldera. Estos conos forman una franja de hasta 6 Km de

anchura, con alturas relativas de 60 a 310 m, de los cuales destaca el volcán Guadalupe por ser él más alto y más reciente de todos por otro lado se tiene que la topografía de la Sierra Santa Catarina es muy irregular y de suaves pendientes y presenta rasgos de modelado fluvial poco importante.

Actualmente el relieve de la Sierra de Santa Catarina ha sido afectada por la actividad humana, como son las canteras para extracción de material, como es el caso del volcán Yahualixqui, y prácticamente toda la ladera occidental ha sido modificada por actividad antrópica.

De acuerdo con el estudio de Tapia-Varela y López-Blanco (2002), los aspectos fundamentales del relieve que muestra la Sierra Santa Catarina contiene 4 unidades morfogénicas las cuales son:

La UM de Laderas Montañas (Lm 11), en donde los valores de pendientes media son de 4-14°, con un rango de altitud de 2,270-2,350 msnm y registra una altura relativa de 510 m.

La UM de Piedemonte (Pi44), en donde los valores de pendientes media son de 0-6°, con un rango de altitud de 2,300-2,500 msnm y registra un intervalo de altura relativa de 200 m.

La UM de Lomerío (Lo 36), en donde los valores de pendientes media son de 0-10°, con un rango de altitud de 2,300-2,400 msnm y registra un intervalo de altura relativa de 100 m.

La UM de Planicie Aluvial (Pla 59), en donde los valores de pendientes media son de 0-4°, con un rango de altitud de 2,240-2,300 msnm y registra un intervalo de altura relativa de 60 m.

Respecto a la zona de planicie del resto de la zona de estudio y de acuerdo con el estudio de Tapia-Varela y López-Blanco (La UM de Planicie Lacustre, P1161), donde los valores de pendientes son los más bajos, con una pendiente de 0-2°. Esta UM se localiza en las partes más bajas del área de estudio, con un rango de altitud de 2,240-2,260 msnm y un intervalo de altura relativa de 20 m.





### Formación Morelos.

La Formación Morelos definida por Fries (1960), aflora al sur de la Sierra Chichinautzin, en la porción suroccidental de la Cuenca de México, descansa discordantemente encima de la Formación Xochicalco y está cubierta por discordancia erosional por las Formaciones Cuautla y Mexcala, y en discordancia angular por unidades más recientes. Litológicamente constituye una interestratificación de capas gruesas de calizas y dolomías diagenéticas. En los pozos exploratorios Mixhuca 1 y Tulyehualco (Pemex op. cit.), se reconoció a profundidades mayores de 2,000 m con espesores de hasta 650 m, la identificación estuvo basada en la presencia de *Nummuloculina heimi* y *Dicyclina schlumbergeri*. La Formación Morelos se depositó durante el Albiano medio Cenomaniano en un ambiente de plataforma marina (Fries, 1960). Se sabe también de la existencia de un miembro evaporítico, yeso y/o anhidrita (Fries, 1960; de Cserna et al., 1987).

### Formación Cuautla.

La Formación Cuautla definida por Fries (1960) ha sido reconocida al sur de la Sierra de Tepoztlán y al norte de Zumpango (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), fue reconocida a 1,575 m de profundidad en el pozo Mixhuca 1 y 2, a 100 m de profundidad en el pozo Tulyehualco (Pemex op. cit.), el criterio para diferenciar esta unidad consistió en la identificación de las especies *Dicyclina* y *Valvulina*. Litológicamente consta de calizas masivas, que incluyen nódulos y lentes de pedernal, con abundantes biostromas y rudistas. Los espesores varían entre 200 y 750 m (Fries, 1960). Es concordante con la Formación Mexcala suprayacente y está cubierta discordantemente en algunos lugares por el grupo Balsas y por rocas volcánicas del Cenozoico. La Formación Cuautla se depositó durante el Cenomaniano Tardío-Turoniano Tardío en un ambiente marino poco profundo (Fries, 1960).

### Formación Mexcala.

La Formación Mexcala definida por Fries (1960) aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y en el cerro La Paloma, en el noroeste del área estado de Hidalgo. En la perforación del pozo Mixhuca-1 se cortó de 1 720 m y 1 850 m; se reconoció esta unidad por el contenido de foraminíferos *Marginotruncana* sp y *Archeoglobigerina* sp (Pemex op. cit.). Estos microfósiles han sido considerados del Turoniano- Maastrichtiano (Leoblich y Tappan op. cit.). Litológicamente constituye una secuencia de flysch constituida de estratos de calizas arcillosas, limolitas y lutitas (Velasco-Tapia, 2001), la cual se depositó en aguas someras (De Cserna, 1988).

### Grupo Balsas.

El Grupo Balsas propuesto por Fries (1960), aflora en el Sur de la Cuenca de México y localmente al noreste de Apazco, Hgo (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Este grupo descansa discordantemente encima de las formaciones del Cretácico y la secuencia superior

aparentemente es concordante con la Riolita Tizapotla, sin embargo evidencias en el pozo Texcoco-1 (SHCP, op. cit.) sugieren que tanto la Riolita Tizapotla como las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Tardío, cubren discordantemente al Grupo Balsas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Litológicamente este grupo de rocas abarca una amplia variedad de tipos (De la Vega, 1992), incluye evaporitas, calizas de ambiente lacustre, conglomerados calcáreos y volcánicos, areniscas, brechas y tobas volcánicas con lavas (Fries, 1956, 1966; Schlaepfer, 1968; De Cserna y Fries, 1981; Rodríguez-Lara, 1997). Este grupo se depositó del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano (Fries, 1960), su distribución espacial y temporal del Grupo Balsas representa una molasa continental (De Cserna et. al., 1987).

## SUPERGRUPO PACHUCA.

El término "Supergrupo Pachuca" se propuso para elevar de rango al Grupo Pachuca, con objeto de designar a todas las rocas volcánicas y volcanoclásticas que yacen concordante o discordantemente sobre depósitos clásticos continentales del Paleógeno o discordantemente sobre rocas más antiguas, y están cubiertas por rocas volcánicas Pliocénicas y clásticas-continuales. Sus límites y espesores corresponden a los descritos para el Grupo Pachuca por Segerstrom (1961) y Geyne y colaboradores (1963), así como a la sucesión de rocas descritas por Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989): Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío- Mioceno Temprano (Riolita Tizapotla), Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (De la Vega, 1992).

### Grupo Pachuca.

El Grupo Pachuca (Segerstrom, 1961 y Geyne y colaboradores 1963), aflora únicamente en la parte nororiental en el área del Distrito Pachuca-Real del Monte y sus zonas adyacentes. Se le han definido 8 formaciones, tiene un espesor máximo de 3,700 m (Geyne et. al., 1963). Se incluyen rocas volcánicas correspondientes tanto al arco magmático de la parte superior de la Sierra Madre Occidental (SMO) como de la FVTM. Litológicamente consiste en una secuencia de material clástico en la base, brechas volcánicas piroclásticos, derrames lávicos y tobas intercaladas, separadas por discordancias erosivas. Las lavas varían en composición de basalto a riolita, pero predomina la andesita y la dacita (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Las dos formaciones inferiores (Santiago y Corteza) consisten en riolitas, dacitas y andesitas que por sus características texturales y posición estratigráfica se considera como correspondiente al arco magmático del Cenozoico Medio de la SMO. Las formaciones que constituyen la mayor parte del grupo y que tienen grandes afloramientos (Formaciones Pachuca, Real del Monte, Santa Gerbiudis y Vizcaina), consiste en sucesiones de derrames lávicos de composición andesítica y dacítica, interestratificadas con brechas volcánicas y tobas, separadas por paleosuelos que podrían indicar diferentes secuencias volcánicas correlacionables en edad con las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío. Las formaciones superiores del Grupo Pachuca (Cerezo y Tezuantla) consisten en brechas volcánicas, lavas y depósitos piroclásticos de composición que varía de dacita a riolita. Es un grupo volcánico que representa la actividad volcánica desde el Oligoceno Medio-Tardío al Plioceno Temprano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### Riolita Tilzapotla (Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano).

La Riolita Tilzapotla (Fries, 1960) aflora en el extremo suroccidental de la Cuenca de México y localmente a 8 Km del poblado de Tilzapotla, del cual toma su nombre. Las perforaciones profundas (PEMEX, 1986 y SHCP op. cit.) atravesaron estas rocas, la composición varía de andesítica a riolacítica, aunque en los pozos Copilco-1, Mixhuca-1 y Roma-1, se describen derrames lávicos basálticos (PEMEX, 1986). La Riolita Tilzapotla tiene un espesor máximo de 250 m y está constituida principalmente por ignimbritas, pero localmente se presentan derrames lávicos y brechas de flujo (Fries, 1968). Estas rocas volcánicas cubren localmente en forma discordante a unidades cretácicas, discordantes al Grupo Balsas subyacente; también se encuentran cubiertas discordantemente por rocas volcánicas del Mioceno Medio y Tardío y localmente por formaciones del Pilo-Cuaternario. Fechamientos radiométricos sugieren su formación en varios períodos magmáticos durante el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Estas rocas se pueden relacionar a la actividad del arco magmático del Terciario Medio (Damon op.cit.).

### Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío.

En la porción sur de la cuenca se encuentra principalmente en los cerros: El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra Guadalupe, la base de la Sierra de Las Cruces, el Cerro de Palachique y en algunos otros afloramientos en el norte de Texcoco, hacia el norte de la Cuenca se encuentran ampliamente distribuidas en pequeños afloramientos, entre los que destacan la base de la Sierra de Tepoztlán (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), se incluyen también los depósitos de la Formación Tepoztlán y la Andesita Jalpan (Fries, 1960). Se le encontró en el pozo Texcoco-1 a profundidades entre 814 m y 920 m, en el pozo Roma-1 a profundidades entre 633 m y 60 m, en el pozo Mixhuca-1 a profundidades desde 880 m hasta los 1190 m, en el pozo Tulyehualco a profundidades entre 930 y 1740 m y en el pozo Copilco-1 a profundidades entre 1180 y 1580 m (PEMEX, 1986). Litológicamente están constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas. Se le asigna un rango de edad del Mioceno Medio al Mioceno Tardío. Estas rocas cubren con discordancia a las rocas volcánicas del Grupo Pachuca y Riolita Tilzapotla, en lugares donde no se encuentran estas rocas, cubren al Grupo Balsas y a las rocas cretácicas. Por su parte se encuentran cubiertas por las unidades Pliocénicas con discordancia y en ocasiones por unidades del Cuaternario (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Las características antes mencionadas, indican que este conjunto de rocas extrusivas representan el inicio de la actividad magmática de la FVTM (Damon et al, op. cit.).

### GRUPO ANÁHUAC.

El "Grupo Anáhuac" se agrupa a todas las rocas lávicas y piroclásticas que estratigráficamente yacen sobre las rocas del Supergrupo Pachuca y que sean cronológicamente anteriores al Grupo Taranguense. El Grupo Anáhuac, propuesto agrupa a las Formaciones descritas y cartografiadas por Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989): Depósitos volcánicos

del Plioceno temprano, Formación Otomí y rocas máficas del Plioceno Tardío. En la literatura geológica de la cuenca, frecuentemente se hace referencia a unidades volcánicas que, aunque distantes, puedan tener implicaciones o similitudes con sus similares de la cuenca de México (De la Vega, 1992).

#### Depósitos Volcánicos del Plioceno Temprano.

Al conjunto de rocas extrusivas que representan un segundo periodo magmático de la FVTM, afloran en los flancos de las Sierras Las Cruces Zempoala y Río Frío, y en cerros aislados en el resto de la cuenca; también coronan las sierras de Guadalupe y Tepetzotlán, Los pozos Roma-1 y Copilco-1 (PEMEX, 1986) cortaron esta unidad a profundidades comprendidas desde 315 a 648 m y 550 a 1150 m respectivamente; con espesores del orden de 650 m. Sobreyacen por discordancia erosional a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y están cubiertas de la misma forma por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario. Litológicamente su composición varía de andesítica a dacítica; las secuencias piroclásticas observadas generalmente no están consolidadas, constituyen tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas, las cuales se encuentran cubiertas por intercalaciones de derrames lávicos. Las relaciones estratigráficas sugieren una edad tentativa del Plioceno Temprano para este grupo de rocas volcánicas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### Formación Otomí.

La Formación Otomí agrupa a los productos volcánicos emitidos durante la parte más temprana del Plioceno Tardío, que se encuentra aflorando al occidente de la Cuenca de México, en lo que se conoce como la Sierra de Monte Alto, otro afloramiento es el que se localiza cercano al Centro Ceremonial Otomí, la cual se ubica en la parte alta de la sierra hasta el Valle de Toluca. Litológicamente se caracteriza por la presencia de brechas volcánicas y depósitos piroclásticos que se presentan como flujos lobulados, en secuencias de surges de cristales, seguidos por flujos piroclásticos de ceniza ya sea cristalina o vítrea, las lavas de esta unidad solamente se encuentran aflorando en las regiones altas de la Sierra de Monte Alto, en las que son características las intercalaciones de brecha volcánica y coladas de lava, la composición varía de andesita a dacita. El espesor máximo que se le estima a esta unidad es de 1,300 m en el Cerro de La Paloma, esta unidad cubre discordantemente a las rocas volcánicas del Plioceno Temprano y se encuentran cubiertas discordantemente por la Formación las Cruces, con base a sus relaciones estratigráficas, se le considera una edad Plioceno Tardío (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío.

Se encuentran ampliamente distribuidos en la región septentrional, formando mesetas de lava y conos aislados. Litológicamente están constituidos por derrames de lavas interestratificadas, en ocasiones, con capas de poco espesor de brechas volcánicas y/o con piroclastos pertenecientes a los depósitos piroclásticos y clastos aluviales del Plioceno; su

composición varía de basáltica a andesítica (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Dichas rocas máficas yacen discordantemente sobre formaciones Cenozoicas anteriores y en algunos sitios cubren a las rocas mesozoicas con marcada discordancia angular (Frías, op.cit). El espesor máximo medido en la región de Pachuca no sobrepasa a los 300 m (Geyne et al., op.cit.). A esta unidad se le ha asignado una edad del Plioceno Tardío a la parte más Temprana del Pleistoceno (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### Formación Las Cruces.

La Formación Las Cruces, se distribuye en el límite suroccidental de la Cuenca de México, en donde una cadena de estratovolcánes, junto con sus depósitos piroclásticos; se orientan de NNW a SSE, y dividen las Cuencas de México y del Río Lerma. La localidad tipo se encuentra en la parte superior del Río Magdalena, al poniente de Contreras, también se observan en el tramo Desierto de los Leones - La Marquesa, carretera Naucalpan-Jiquipilco, Naucalpan-Cuajimalpa. Litológicamente esta unidad consiste en pómez pliniana, secuencias de “surges” planares y /o masivos, cristalinos, vítreos, cubiertas por flujos piroclásticos generalmente no soldados de cenizas, las lavas observadas se encuentran intercaladas con brechas en las partes altas de la Sierra de Las Cruces; en algunos casos culminadas con domos. Se identificó también una brecha lítica andesítica originada por un flujo piroclástico. El espesor de esta unidad es variable, aunque se le estimó un espesor máximo en el Cerro de San Miguel de 990 m. Esta formación cubre con discordancia erosional a rocas extrusivas del Mioceno Medio - Tardío y las rocas volcánicas del Plioceno Temprano y se encuentra cubierta a su vez por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario, así como por derrames lávicos y piroclásticos de la Formación Chichinautzin y El Pino. Su edad de acuerdo a fechamientos isotópicos corresponde al Plioceno Tardío (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### Formación Zempoala.

La Formación Zempoala es el conjunto de productos volcánicos de dos centros eruptivos alineados en dirección norte-sur, que se encuentran en la parte suroccidental; son posiblemente contemporáneos con el vulcanismo de la Formación Las Cruces. Esta formación, en la parte norte corresponde con una secuencia de lavas andesíticas y depósitos piroclásticos, entre los que se han identificado flujos de ceniza y brechas volcánicas. En la parte sur las lavas son muy escasas, únicamente en el cerro Zempoala y sus alrededores es posible encontrar lavas y domos poco extensos en lo que se considera el centro de la erupción meridional de esta unidad. La formación Zempoala cubre discordantemente los depósitos volcánicos del Plioceno, a las rocas extrusivas del Mioceno Medio al Mioceno Tardío, también en discordancia se encuentra sobreyacida por la Formación Chichinautzin e interdigitada con los productos piroclásticos y clásticos del Plioceno en la región del Valle de Cuernavaca. El espesor aflorante máximo que se le estima es de 1 000 m en el Cerro Zempoala. Se considera que su edad corresponde al Plioceno Tardío (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### Riolita Navajas.

La Riolita Navajas edifica la Sierra Navajas en la parte nororiental de la Cuenca de México, descansa discordantemente sobre el Grupo Pachuca y rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, aparentemente se interdigita con rocas máficas y con piroclásticos y clásticos del Plioceno, esta cubierta discordantemente con la formación El Pino. El espesor probable de la formación es de 500 m. Litológicamente consiste de una secuencia riolítica de derrames lávicos, estas lavas tiene intercalaciones de brechas soldadas y no soldadas de flujos de ceniza vítreas, con fragmentos líticos y pumíticos. Se le asigna una edad del Plioceno Tardío (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### GRUPO TARANGUENSE.

El "Grupo Taranguense" designa a todas las rocas posteriores en edad al Grupo Anáhuac y anteriores a los Grupos Popocatepetl y Chichinautzin y al Alogrupo Tenochtitlán (De la Vega, 1992). Se incluye en este grupo a las formaciones Llano Grande y El Pino, de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), y a las formaciones Tlálloc e Iztaccíhuatl, de Schlaepfer (1968), y a la Formación Tarango, de Bryan (1948). Esta última unidad estratigráfica ha sido ampliamente utilizada por investigadores como Arellano (1953), Segerstrom (1961), Schlaepfer (1968), Mooser, Nairn y Negendank (1974) y de Cserna y colaboradores (1987). También puede incluirse en este grupo los materiales tobáceos y pumíticos derivados de lluvias de ceniza en la región de Tequixquiac, Nochistongo y Tula, así como las tobas lacustres y bentoníticas de las series informales Nochistongo y Requena. Se considera que la edad del Grupo Taranguense es del Plioceno-Cuaternario; abarca aproximadamente de 2.5 Ma al intervalo de 0.6 a 0.08 Ma; que corresponde a la edad isotópica de la Formación Iztaccíhuatl (De la Vega 1992).

### Formación Llano Grande.

Como formación Llano Grande se designa a las rocas eruptivas de composición variable de andesítica a riadacítica que forman el volcán del mismo nombre, el cual es ancestro del volcán Iztaccíhuatl. (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Aflora en la base noroccidental de la Sierra Nevada. Las secuencias reconocidas constan de capas delgadas de lapilli pumítico y lítico de caída, "surges" laminares y flujos de cenizas vítreas. Los flujos lávicos observados son de andesita de piroxeno y anfíbol. Esta unidad está cubierta discordantemente por las Formaciones Telapón e Iztaccíhuatl y sobreyacen de la misma forma a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno. Con fechamiento isotópico se le asigna a esta formación una edad del Pleistoceno Temprano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### Formación El Pino.

Se agrupan con este nombre a las rocas volcánicas principalmente máficas que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla, Gordo y otros cerros

aislados, así como los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba; la expresión geomorfológica es de conos cineríticos terminales, de volcanes escudo y de amplias coladas lávicas principalmente en bloques. Los espesores máximos son del orden de 750 m. Litológicamente constituyen una secuencia de flujos lávicos con intercalaciones delgadas de tefra no consolidada de caída, formada por cenizas cristalinas y vítreas lapillís líticas y escoria; los derrames lávicos reconocidos son de andesita-basáltica de olivino y los andesíticos de anfíbol. Esta formación cubre discordantemente a unidades volcánicas del Oligoceno, Mioceno y Plioceno y a la Formación Llano Grande, está cubierta de igual forma por las formaciones Chichinautzin y Telapón (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Se le ha asignado una edad entre 0.9 a 0.7 m.a. (Mooser, op. cit.).

#### Formación Tlálloc.

Se designa Formación Tlálloc a las coladas lávicas que forman parte de la Sierra de Río Frío, caracterizada por flujos piroclásticos lobulados en forma de mesetas inclinadas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). El espesor aflorante en el centro de la sierra es de aproximadamente 1,800 m y se acuña hacia los alrededores. Litológicamente la composición es andesítica y dacítica consta de varias secuencias caracterizadas en su base por pómez y líticas de tamaño lapilli con gradación inversa, "surges" con cristales, pómez, en capas no consolidadas. La Formación Tlálloc cubre discordantemente a rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y del Plioceno Temprano, a las Formaciones El Pino y Llano Grande; está sobreyacida aparentemente con discordancia por las formaciones Chichinautzin e Iztaccíhuatl, Se le asigna una edad entre 0.6 a 0.7 m.a. (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### Formación Iztaccíhuatl.

La Formación Iztaccíhuatl fue establecida para referirse a las rocas volcánicas de los volcanes, Iztaccíhuatl y Nexpayantla (White, 1956) antecesor del volcán Popocatepetl. En el volcán Iztaccíhuatl exponen un espesor máximo aproximado de 2 500 m. Litológicamente está constituida por varias secuencias principalmente efusivas cuya composición varía de andesita basáltica a dacítica las secuencias se inician con derrames lávicos y finalizan con extrusiones dómicas. La Formación Iztaccíhuatl descansa con ligera discordancia encima de las formaciones Llano Grande y Tlálloc mientras que es suprayacida con ligera discordancia por las formaciones Chichinautzin y Popocatepetl. La edad de esta formaciones encuentra dentro del intervalo de 0.6 a 0.08 m.a. (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### Formación Tarango.

Este grupo aflora al pie de las sierras que circundan a la Cuenca de México, se identifica como depósitos de abanicos aluviales, lahares, tobas, aglomerados, intercalados con capas de pómez, cenizas en la parte superior, suelos tobáceos y pumíticos derivados de lluvias de cenizas, gravas y arenas de origen fluvial en la parte inferior. Se reconoce su localidad tipo al suroeste de la Ciudad de México (Bryan, 1948, Sánchez Díaz, 1989).

## GRUPO POPOCATÉPETL.

El Grupo Popocatepetl se agrupa a las rocas provenientes del volcán Popocatepetl, que cubren discordantemente a la Formación Iztaccíhuatl y que probablemente se interdigitan con las rocas del Grupo Chichinautzin ya que son contemporáneos, así como con depósitos clásticos de origen fluvial hacia las llanuras aluviales de Cuautla y Amecameca. En estudios recientes (Carrasco-Núñez, 1985; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989) reconocen cuatro secuencias eruptivas e infiere un espesor de unos 3 500 m. Las relaciones estratigráficas sugieren una edad del Pleistoceno Tardío-Holoceno para este grupo (De la Vega, 1992).

## GRUPO CHICHINAUTZIN.

El Grupo Chichinautzin agrupa un campo volcánico basáltico compuesto por domos, conos volcánicos y apilamientos subhorizontales de derrames de lava emplazados entre los 38,500 y 2,260 años. Los afloramientos de esta formación se encuentran ampliamente distribuidos en toda la región, los mas significativos se localizan en la porción meridional del área, en donde alcanzan los mayores espesores, así como también en la parte nororiental del área, esta unidad se ha encontrado en el subsuelo del Valle de México, en numerosos pozos para extraer agua, en perforaciones para piezómetros y en sondeos geofísicos (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Este grupo sobreyacen en discordancia a depósitos clásticos y volcánicos del Peleogeno-Neogeno. Las rocas de este grupo se interdigitan con rocas del Grupo Popocatepetl y del Alogrupo Tenochtitlan (De la Vega, 1992). Su cima es generalmente una superficie de erosión que forma un campo volcánico probablemente monogenético; constituye más de cien conos volcánicos, depósitos cineríticos y derrames de lava en un área de varias decenas de kilómetros cuadrados. Litológicamente consta de andesitas basálticas, basaltos y dacitas, el espesor máximo reconocido hasta la fecha es de 1,800 m (Fríes, 1969). Las determinaciones isotópicas obtenidas para las rocas del Grupo Chichinautzin son: 690 000 años (Mooser, Nairn y Negendank, 1974); 38,500 años (Bloomfield, 1975); 2,400 años (Arnold y Libby, 1951) y 2 260 años (Valastro, comunicación escrita, 13/3/1980). Éstas sugieren un intervalo de tiempo de emplazamiento volcánico amplio (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

## ALGRUPO TENOCHTITLÁN.

El Alogrupo Tenochtitlan, agrupa formalmente a todas las unidades cuaternarias posteriores al Grupo Taranguense, que formal o informalmente han sido nombradas y utilizadas para reconstruir la estratigrafía de la planicie y los bordes de la Cuenca de México. Estas unidades sobreyacen concordante o discordantemente a rocas pertenecientes al Grupo Taranguense. Las partes superiores de este alogrupo solamente están expuestas en zonas aún no urbanizadas (De la Vega, 1992). Estas unidades, en orden cronológico de antiguo a moderno, comprenden a la Formación Tacubaya y la Formación Gran Canal, los caliches Morales y Lomas, la Formación Tequixquiac, la Formación Becerra, el Horizonte Armenta, la Formación Totolcingo, los aluviones Remedios y Río Hondo y la Formación Nochebuena, así como las

facies lacustres aluviales y eólicas, algunas de ellas incluidas en la Formación Becerra. De las partes adyacentes a las depresiones lacustres, pueden ser parte del alogrupo las zonas lacustres y de transición, así como los depósitos de inundación y abanicos de deyección. Conviene mencionar que el intervalo estratigráfico que abarca el Alogrupo Tenochtitlan comprende una amplia variedad de tipos litológicos consignados pero no ubicados cronológicamente, como algunos horizontes diatomáceos, de turba y arcillas; también se ha descrito brechas de pómez, arenas, limos y arcillas bentoníticas, además de las sales y evaporitas en los antiguos vasos del lago de Texcoco. En general, la edad del Alogrupo Tenochtitlan comprende del Pleistoceno Tardío al Holoceno; las unidades que comprenden este alogrupo son los siguientes:

#### Depósitos Aluviales.

Se agrupan en esta unidad el material clástico fluvial acumulado penecontemporáneamente con sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del cuaternario. Se encuentran aflorando formando llanuras aluviales al norte y sur de la región; en la porción meridional, se encuentran extensamente distribuidos rellenando amplios valles socavados en depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno, así como depresiones tectónicas como el Graben de Chalco, los espesores máximos son de alrededor de 500 m, se encuentran al centro de las depresiones y se adelgazan hacia las márgenes de la llanura. En las zonas norte y sur se incluye material poco consolidado, compuesto por fragmentos de tamaño de grava, arena, limo y arcilla, además de turba, loess y travertino. Estos depósitos descansan ampliamente con discordancia, sobre los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y localmente en la misma forma sobre las secuencias volcánicas más antiguas y sedimentarias del Cretácico. Probablemente debido a su edad cuaternaria se interdigitan con las formaciones volcánicas de la misma edad, siendo su contacto concordante e interdigitado con los sedimentos lacustres. La acumulación de grandes espesores de aluvión se puede explicar debido a un bloqueo del desagüe, causado por el emplazamiento de derrames lávicos y/o por fallamiento normal de edad Cuaternaria (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### Depósitos Lacustres.

Se agrupan en esta unidad los sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del estrato volcán Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre. Estos depósitos formaron una gran altiplanicie lacustre extendida, desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta El Cerro de Chapultepec. Los espesores varían entre 30 y 300 m, los mayores se presentan en los centros de las planicies de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco, disminuyendo hacia las márgenes de las planicies. Su tiempo de formación fue durante el Pleistoceno Tardío al Holoceno. El origen de los depósitos lacustres esta íntimamente relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra Chichinautzin. Por otro lado, la presencia de paleo-suelos, sedimentos evaporíticos y tobas consolidadas sugieren climas húmedos y áridos (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### 3.4 Geología histórica.

En la Cuenca de México las rocas basales más antiguas registradas son las rocas marinas de Cretácico. En el Aptiano-Cenomaniano Temprano ocurrió sedimentación calcárea en cuencas marinas profundas (Cserna et al., 1987) que conforma la Formación Xochicalco, seguida, de la Formación Morelos (Frías, 1960) en un ambiente de plataforma marina. Un período de levantamiento y erosión precedió al intervalo de tiempo Albiano Medio-Cenomaniano Temprano (Cserna et al., 1987) después de este periodo se inicia una depósito calcáreo de la Formación Cuatla en un ambiente marino poco profundo (Fries, 1960). La sedimentación calcárea cambió a tipo flysch durante el Coniaciano-Campaniano Temprano conformado por la Formación Mexcala, como posible consecuencia del levantamiento y erosión del Arco Magmático Cretácico del poniente, Todas estas secuencias marinas sufrieron plegamiento hacia el final del Cretácico (orogenia Laramídica), que fue seguido por un periodo de erosión (Cserna et al., 1987).

En el transcurso del Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano y posterior a la Orogenia Laramide, comenzó la sedimentación clástica continental tipo molasa del Grupo Balsas (De Cserna et. al., 1987), que indica la presencia de depresiones locales endorreicas, producto del fallamiento en bloques distensivos de la secuencia calcárea Cretácica, durante el Eoceno.

A medida que el depósito del Grupo Balsas cesó, comenzó el vulcanismo calci-alcalino de composición variable de andesítico a riolítico del Oligoceno-Mioceno Temprano conformado por el Grupo Pachuca y la Riolita Tilzapotla (Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano) relacionadas a la actividad del arco magmático del Cenozoico Medio, seguido por la extrusión de secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas, para formar el grupo de rocas extrusivas del Mioceno, indicando este conjunto de rocas extrusivas el inicio de la actividad magmática del la FVTM.

En el Plioceno nuevamente existió una fuerte reactivación tectónica, con la formación de sistemas de fallas y fracturas, formando fosas y pilares. La actividad volcánica se manifestó en toda la Cuenca con la emisión de andesitas y dacitas porfídicas en la Sierra de Monte Alto, Río Frío, Sierra de las Cruces, Sierra Navajas y Zempoala. Conformado todo este grupo de rocas lávicas y piroclásticas por el Grupo Anáhuac, Siguió el emplazamiento de derrames lávicos basálticos alcalinos, calcialcalinos y una gran sedimentación clástica aluvial del Pilo-Cuaternario en la Cuenca de México, conformada por el Grupo Taranguense, Grupo Popocatépetl y Grupo Chichinautzin.

El régimen endorreico total de la Cuenca de México y consecuente la sedimentación lacustre del Pleistoceno-Holoceno, fue originado por la intensa actividad volcánica que formó la Sierra Chichinautzin. Al pie de las sierras que circundan a la Cuenca de México se depositaron sedimentos lacustres, abanicos aluviales, así como los depósitos de inundación y abanicos de deyección, horizontes de turba, arcillas, brechas de pómez, arenas, limos, además de las sales y evaporitas en los antiguos vasos del lago de Texcoco, intercalados con capas de pómez, cenizas, suelos, gravas y arenas; a todo este complejo volcánico sedimentario, se le conoce como Alogrupo Tenochtitlán del Pleistoceno- Holoceno que agrupa a todas las unidades cuaternarias posteriores al Grupo Taranguense. A finales del Holoceno al quedar cerrada la Cuenca de

México, las aguas pluviales ya no tuvieron salida y comenzaron a formar los lagos de México, como los de Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal y otros más pequeños (Martínez Rodríguez E., 1987).

### 3.5 Rasgos Estructurales.

A continuación se describen los rasgos estructurales de la Cuenca de México y de la zona de estudio en particular, tomando en cuenta el tiempo en el que se formaron, y considerando todos los eventos tectónicos que la modificaron.

A fines del Cretácico y en el Paleogeno, los estratos marinos del Mesozoico se plegaron por esfuerzos comprensivos, y posteriormente se fallaron por extensión durante la emersión del la FVTM. Durante el Eoceno y el Oligoceno Inferior, la secuencia estratigráfica estuvo expuesta y sujeta a erosión, depositándose localmente los conglomerados continentales.

Durante el Mioceno Inferior y Medio, en la Cuenca nuevamente hubo reactivaciones tectónicas, con el consecuente fracturamiento y fallamiento de la misma. Los sistemas estructurales son conjugados NE-SW y NW-SE, probablemente generados por los esfuerzos compresivos de la placa de Cocos (Mooser, 1975; Aguayo y Marín, 1987). El fracturamiento suroeste-noreste está representado por la falla Apan-Tlaloc que incide en el extremo sur del Tepozteco. El otro sistema estructural sureste-noroeste corresponde a los alineamientos Popocatepetl-Cerro de los Pitos-Cerro de Chimalhuacan y Sierra de Guadalupe. El desarrollo de fracturas y fallas está asociado con actividad volcánica de diversa composición, desde andesitas, riocácitas hasta andesitas básicas y dacítas.

En el Plioceno nuevamente existió una fuerte reactivación tectónica, con la formación de sistemas de fallas normales y de fracturamientos conjugados NW-SE y NE -SW, formando fosas y pilares. El primer fracturamiento incide en la Sierra de Salazar, mientras que el segundo afecta a la Sierra las Palmas en el poniente de la Cuenca, lo cual es visible en la barranca de Contreras.

Durante el Plioceno tardío y el Cuaternario temprano continuó la actividad volcánica en las zonas de las Grandes Sierras, formando comúnmente domos andesíticos, riocácíticos y dacítas. La cuenca presentó una nueva reactivación tectónica, en la que los sistemas oeste-este fueron dominantes en la zona de la Malinche, al norte de Puebla, y en el Nevado de Toluca. Los nuevos sistemas estructurales tuvieron flexiones con dirección oeste-suroeste y este-noreste; uno de estos sistemas está representado por la Sierra del Ajusco, así como por los pequeños conos alineados que con forman la Sierra de Santa Catarina y la Sierra del Chichinutzin. La actividad tectónica dio origen a efusiones de andesitas y sucesivamente, andesitas basálticas en el Cuaternario tardío. Este edificio de rocas volcánicas sirvió de umbral, creándose la Cuenca de México. a demás del alineamiento de los conos de escoria que representan los cerros La Estrella, Peñón del Marqués y Chimalhuacán (Aguayo y Marín, 1987), los cuales se alinean en la superficie con la falla inferida de Contreras; siguiendo el alineamiento al sur de Topilejo de conos cineríticos y rasgos de efusiones fisurales, como el cono de escoria del Cerro Tehutli. La Cuenca de México, además de la actividad volcánica y el drenaje fluvial y aluvial, también estuvo afectada por períodos glaciales e interglaciales en los últimos 100,000 años, además de la

precipitación pluvial; estos fenómenos meteorológicos formaron grandes lagos que frecuentemente se comunicaban entre sí (Aguayo et al., 1989).

Mediante el análisis sísmico Pérez-Cruz (1988), identificaron tres tipos de fallas geológico-estructurales, considerando que todas son de origen son producto de extensión:

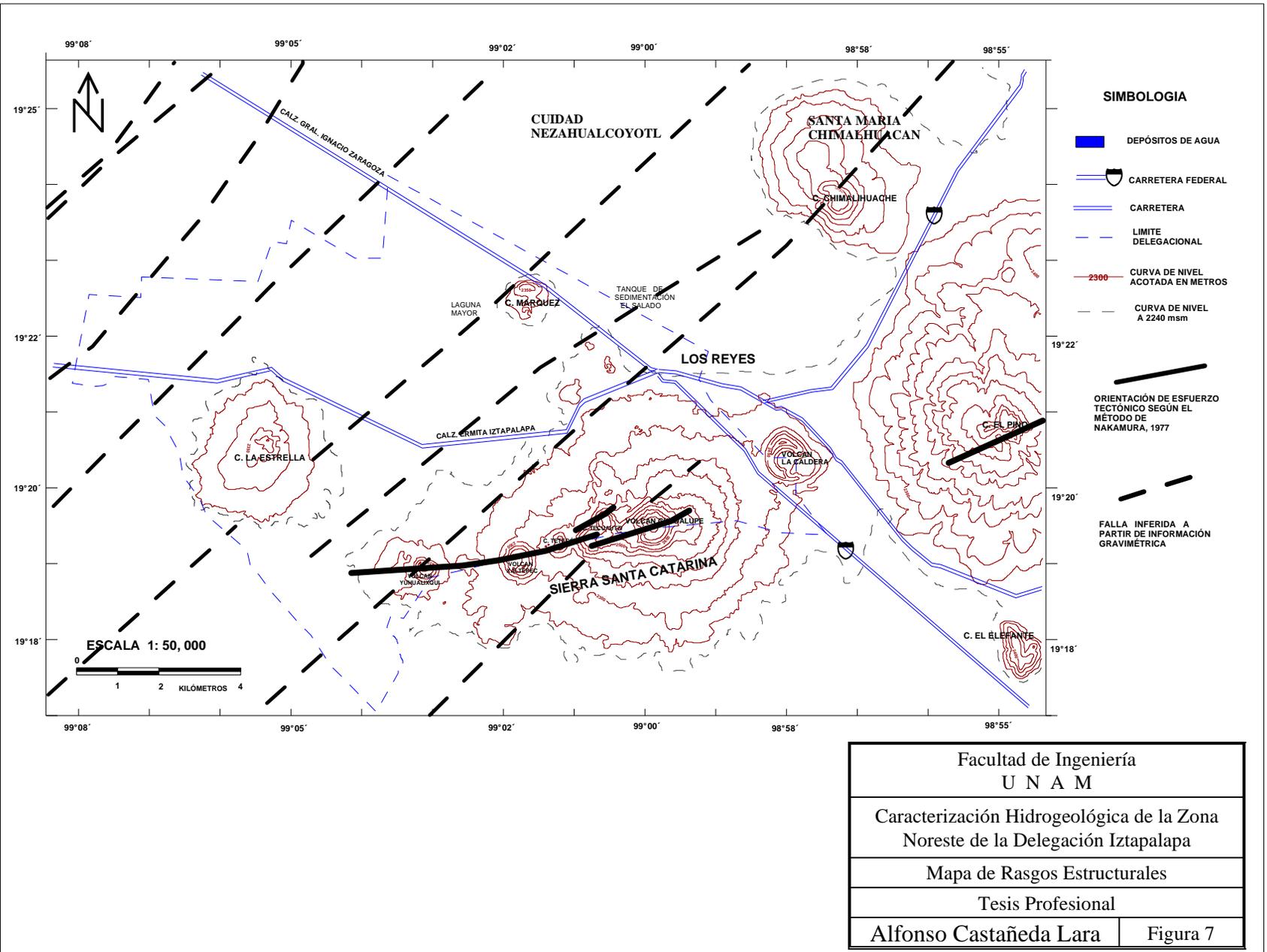
1.- Fallas profundas que solo afectan la parte inferior de la columna estratigráfica, y que de acuerdo a la interpretación de Pérez-Cruz (1988), se desactivaron desde el Mioceno (p.ej., Falla Mixhuca, con orientación NW-SE, cuyo salto hacia el poniente varía entre 1 650 a 2 050 metros; Graben Copilco, con orientación N-S, y salto promedio de 130 m de corta extensión; Dos fallas de corta longitud, N-S y salto de unos 30 m, formando un graben en la colonia Narvarte.

2.- Fallas locales causadas por desplazamientos superficiales en zonas de inestabilidad de los flancos de promontorios estructurales (p. ejem, Falla Aeropuerto de corta longitud, N-S con salto de unos 20 m al oriente, presente en la Calzada Ignacio Zaragoza, al sur del aeropuerto; dos fallas de corta longitud N-S y salto de 30 m, formando el graben al oriente del Peñón del Marqués; Graben de Tenochtitlán, que se extiende N-S desde el Viaducto Piedad hasta la Colonia Morelos, en la depresión del antiguo lago de la Ciudad de México.

3.- Fallas locales alrededor del Cerro de la Estrella y el Peñón de los Baños, que deben su origen a movimientos verticales por deslizamiento de los estratos volcánicos y sedimentos superficiales y por la extracción de agua del subsuelo.

Los sistemas de fallamientos locales en la ciudad, están controlados por sistemas estructurales regionales y que inciden afectando al Cinturón Volcánico Transmexicano (Mooser, 1975), y también a todo el sector de la República Mexicana, desde el Pacífico hasta el Golfo de México (Aguayo y Marín, 1987). Estos dos últimos autores reconocieron 16 fallas principales que inciden en el interior de la Cuenca de México, todas normales y con rumbo  $NE-45^{\circ}-55^{\circ} SW$ , delimitando a 15 bloques estructurales mayores. La separación promedio entre fallas es de unos 6 Km. y se manifiestan afectando a los sistemas Norte-Sur y Oriente-Poniente, así como a las estructuras NW-SE del Mioceno y a los estratos del Pilo-Cuaternario (Aguayo et al., 1989).

De los 20 conos volcánicos monogenéticos cuaternarios de la parte meridional de la cuenca de México, el Peñón del Marqués que corresponde al área estudiada se ubica netamente sobre la traza de una falla inferida a partir de datos gravimétricos de orientación  $N50^{\circ}E$  (figura 7), asociados a una actividad reciente, por lo que se le considera una falla activa (Cserna et al., 1988). Este tipo de cono volcánico es indicador de una zona tensional (Nakamura, 1977), en superficie se alinea con la falla inferida en Contreras (Vázquez-Sánchez, Jaimes-Palomera, 1989).



### 3.6 Estudios Sísmicos.

Los estudios sísmicos de la C.F.E (1988) y de Chávez Pérez (1993), se tomaron en cuenta para conocer las unidades estratigráficas inferiores que no se observaron en los cortes litológicos y las unidades superiores se correlacionaron con los cortes litológicos de pozos (DGCOH, inéditos). También los estudios de sísmica, cortes litológicos, pruebas de bombeo e historia geológica sirvieron de base para definir las unidades geohidrológicas. A continuación se describen brevemente los resultados de estos estudios sísmicos.

Las secciones XX' e YY' se utilizaron para el modelado sísmico hipotéticos para el análisis de la Cuenca de México con diferencias finitas utilizando una formulación de rejilla alternada Chávez Pérez. S. (1993). Su ubicación se muestra en la Figura 8.

En estos modelos, la "unidad de arcilla" representa la secuencia lacustre del subsuelo y su velocidad media ( $V_p = 1.2$  km/s) corresponde bien con el límite inferior de la velocidad en sedimentos de arcilla no consolidados. Las unidades volcánicas superior e inferior (compuesta principalmente por conglomerados, basaltos, tobas y brechas volcánicas) se representan en sentido amplio, con velocidades medias de  $V_p = 3.0$  y  $4.4$  km/s, respectivamente. El basamento cretácico (compuesto por calizas) se representa con una velocidad típica ( $V_p = 6.0$  km/s) de corteza superior (Fig. 9).

Del estudio de sísmica realizado por la C.F.E. (1988), para el área metropolitana, se utilizaron 6 (T-10, T-11, T-13, T-14, T-15 y T-20) de 27 tendidos sísmicos mostrados en la figura 8), su interpretación gráfica, simbología y significado de velocidades de las secciones se muestran en la figura 10, 11, 12, y 13.

La interpretación de dichos tendidos en la zona metropolitana por zonas, es la siguiente:

#### A).- Zona de Lomas I

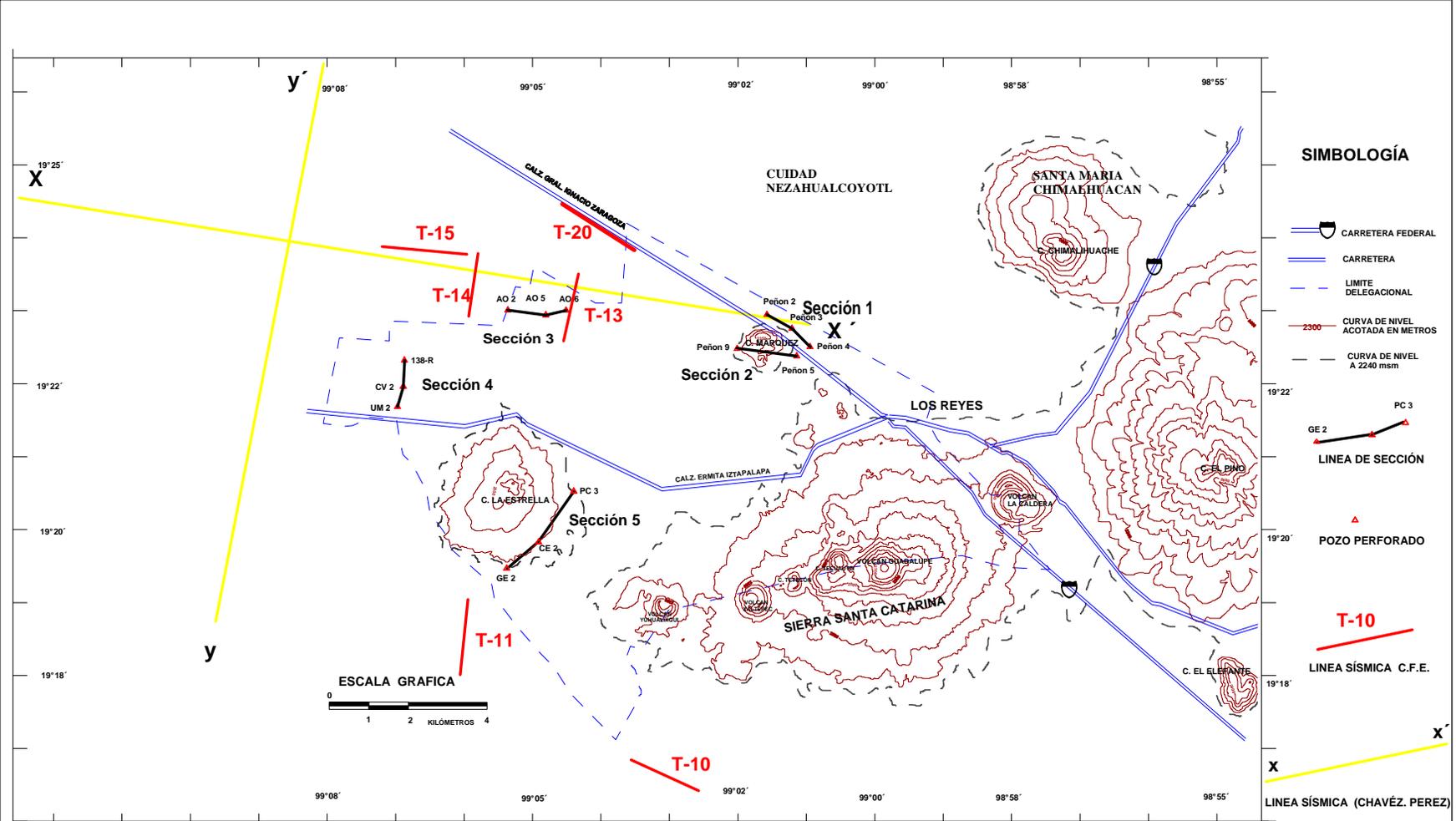
En esta zona se realizaron únicamente 3 tendidos. Los 2 primeros se localizan en las cercanías del Bosque de Chapultepec y el tercero dentro de Ciudad Universitaria. Esta zona no corresponde al área de estudio.

#### B).- Zona de Transición II

La exploración de esta zona se realizó a través de seis tendidos ubicados en la región Occidente de la ciudad. Al igual que en la zona anterior, se detectaron 3 horizontes:

El primero y más superficial, con velocidad de propagación de 800 a 1 200 m/s, está formado por depósitos tobáceos de composición areno-limosa que constituyen la capa de alteración por intemperismo de la Formación Tarango y alcanza un espesor promedio de 25 m.

Subyaciendo a esta cubierta se encuentra un segundo horizonte formado por arenas y tobas compactas cuyas velocidades oscilan de 1 200 a 1 800 m/s y alcanzan una profundidad de alrededor de 60 m.



Facultad de Ingeniería U N A M	
Caracterización Hidrogeológica de la Zona Noreste de la Delegación Iztapalapa	
Tendidos Sísmicos y Secciones Litoestratigráficas en la Zona de Estudio	
Tesis Profesional	
Alfonso Castañeda Lara	Figura 8

El tercer horizonte, con velocidad mayor a 1 800 m/s, se correlaciona con tobas compactas en las cuales el grado de consolidación es acorde con el aumento en velocidad. Las velocidades mayores a 2 000 m/s, pueden indicar materiales algo cementados.

### C)- Zona de Lago III

La interpretación conjunta de 18 tendidos sísmicos ubicados en esta zona, determinó 3 horizontes principales:

El primer horizonte, que es a la vez el superior, está constituido por depósitos recientes de origen aluvio-lacustre con espesor promedio de 25 m y velocidad de propagación menor a 900 m/s, lo cual indica baja compactación.

El segundo horizonte, con velocidad comprendida entre 900 y 1 700 m/s, subyace al anterior y está formado también por depósitos aluvio-lacustres aunque con mayor edad y compactación, Este horizonte se inclina hacia el Lago de Texcoco, alcanzando hasta 250 m de profundidad al Oriente de la ciudad.

De acuerdo con el orden de profundidad esperado y su posición estratigráfica se encuentra la primera capa dura intercalada entre los dos primeros horizontes, sobre todo en la parte central de la zona lacustre.

El tercer horizonte, con velocidad que varía de 1 700 a 2 600 m/s, está formado por depósitos aluviales, gravas, arenas y limos de origen piroclástico y/o por derrames y brechas basálticas en los extremos del lacustre. El grado de compactación de estos materiales va en relación directa con sus valores de velocidad.

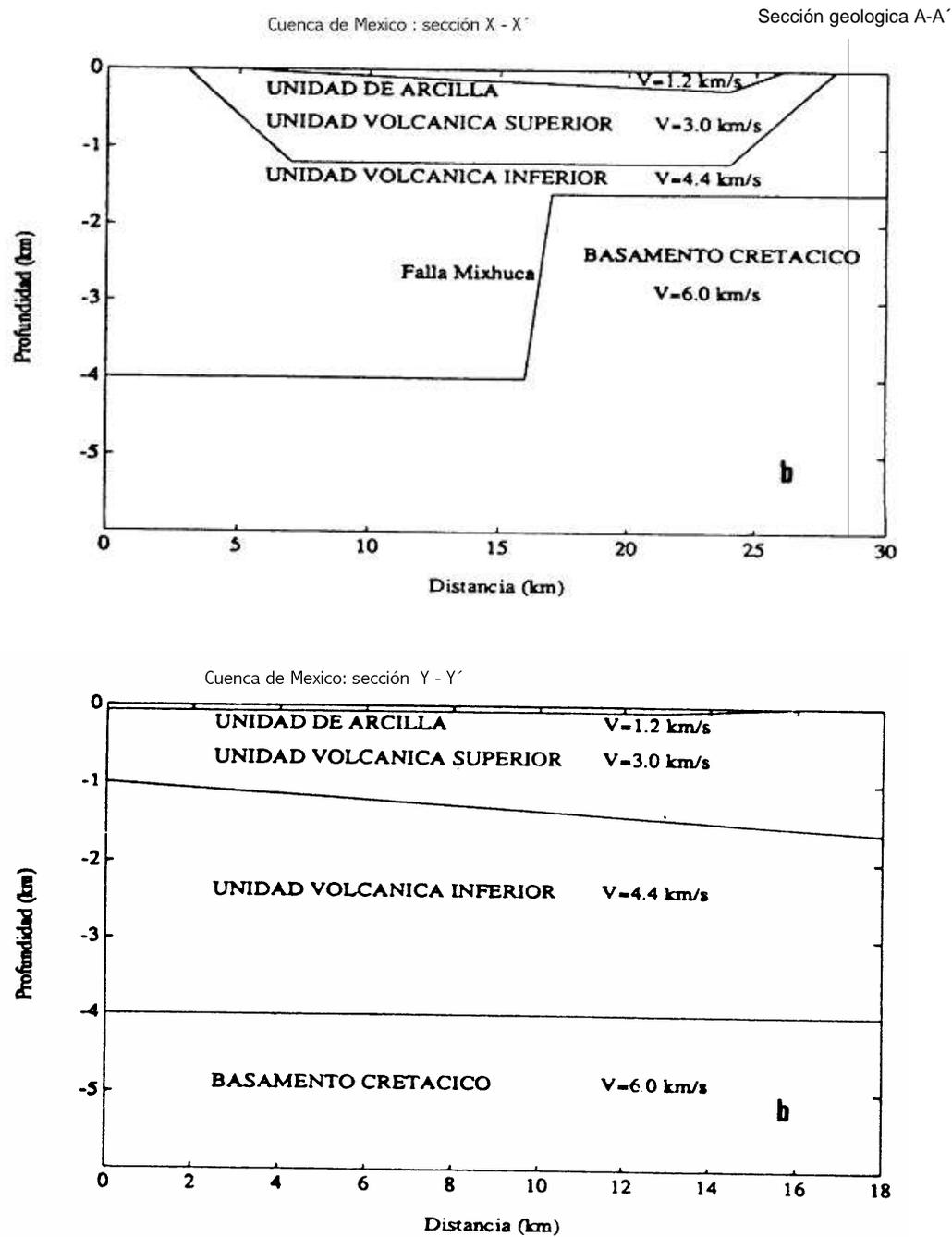


Fig 9.- Secciones sísmicas X-X' e Y-Y', para fines de modelado de la Cuenca de México, en la sección X-X', incluye confinamiento de la unidad de arcilla y confinamiento de la unidad volcánica superior.

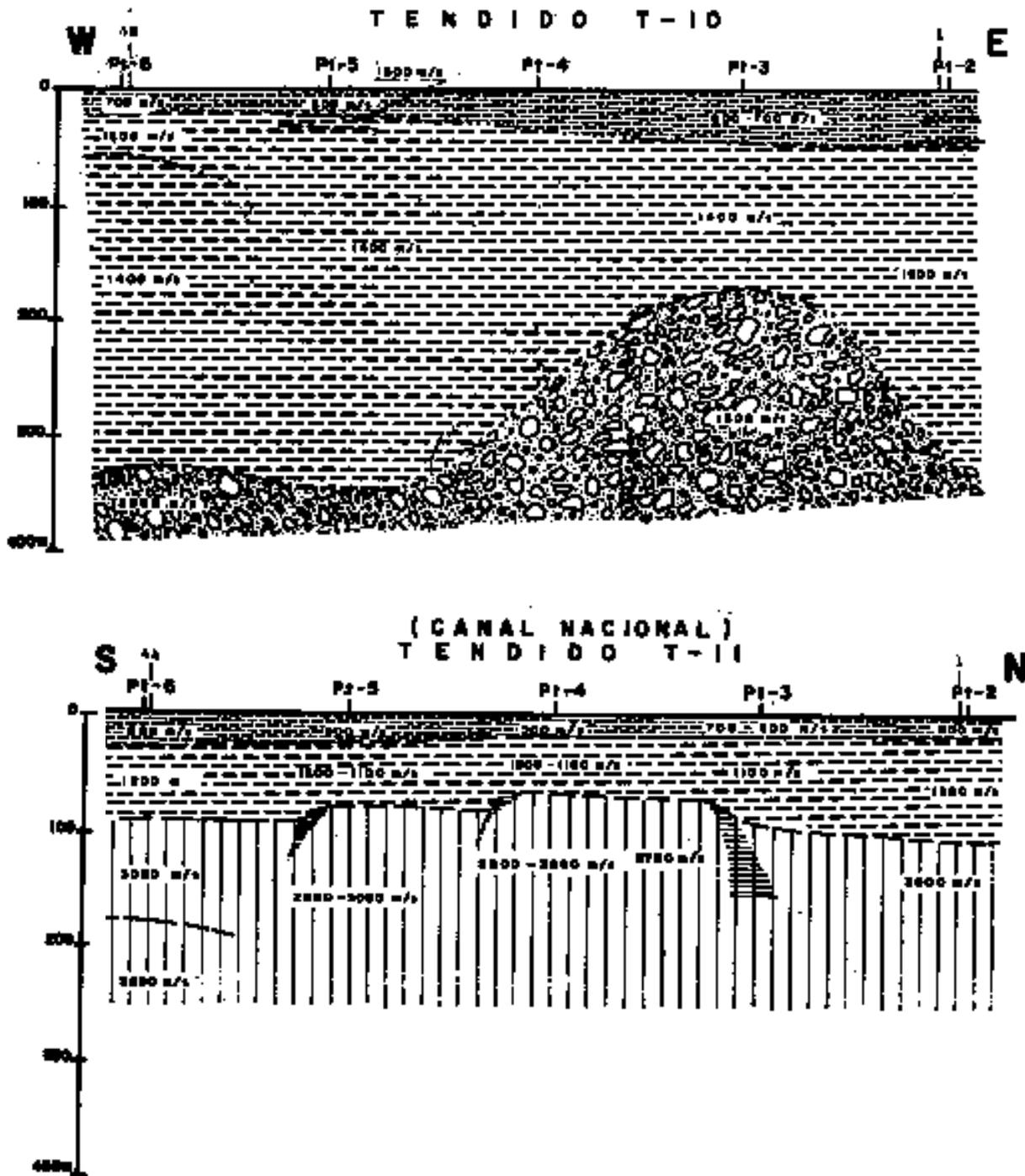


Fig. 10.- Interpretación sísmica en el área Metropolitana. Comisión Federal de Electricidad, Estudios geofísicos del Valle de México, 1988.

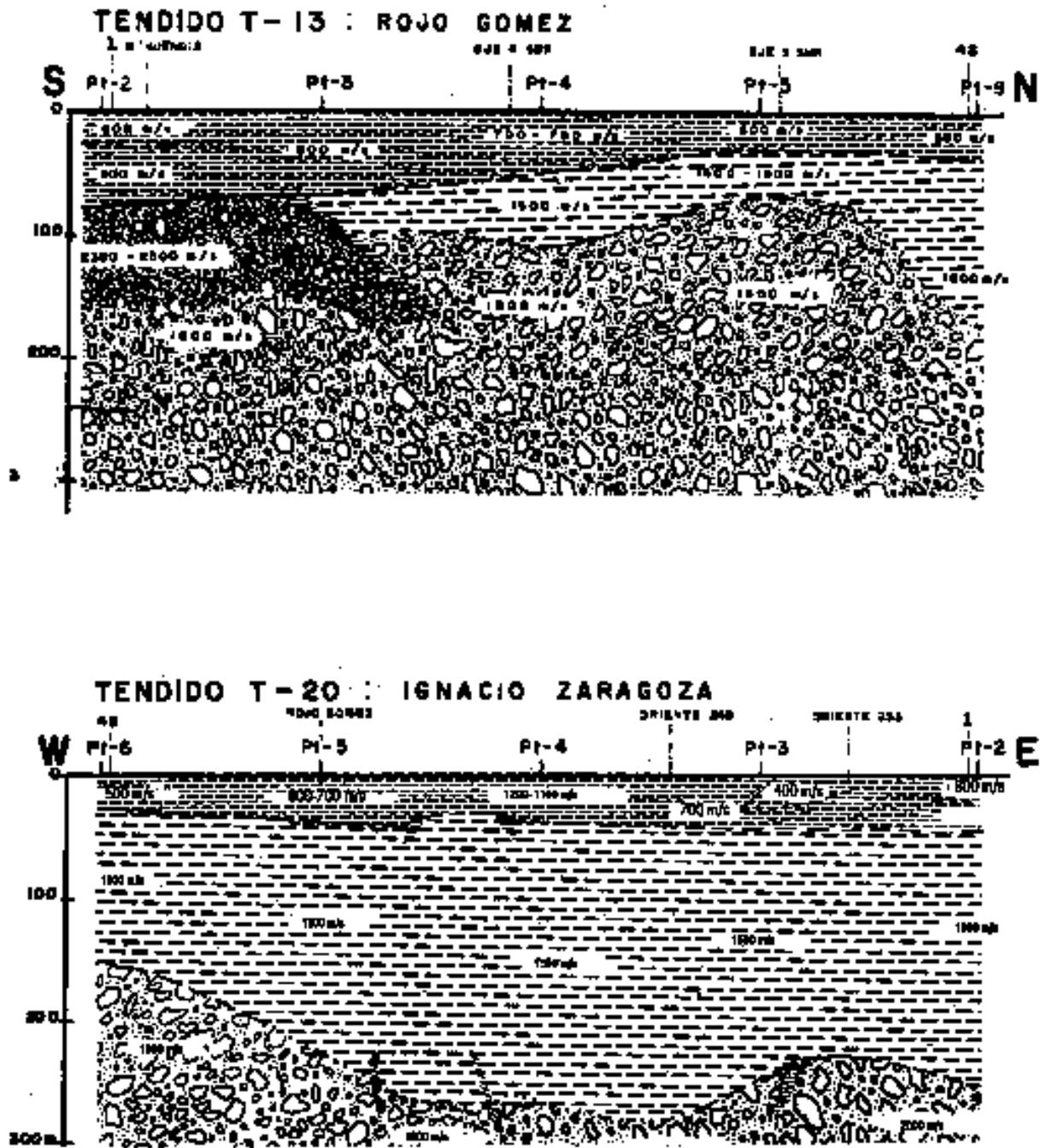


Fig. 11.- Interpretación sísmica en el área Metropolitana. Comisión Federal de Electricidad, Estudios geofísicos del Valle de México, 1988

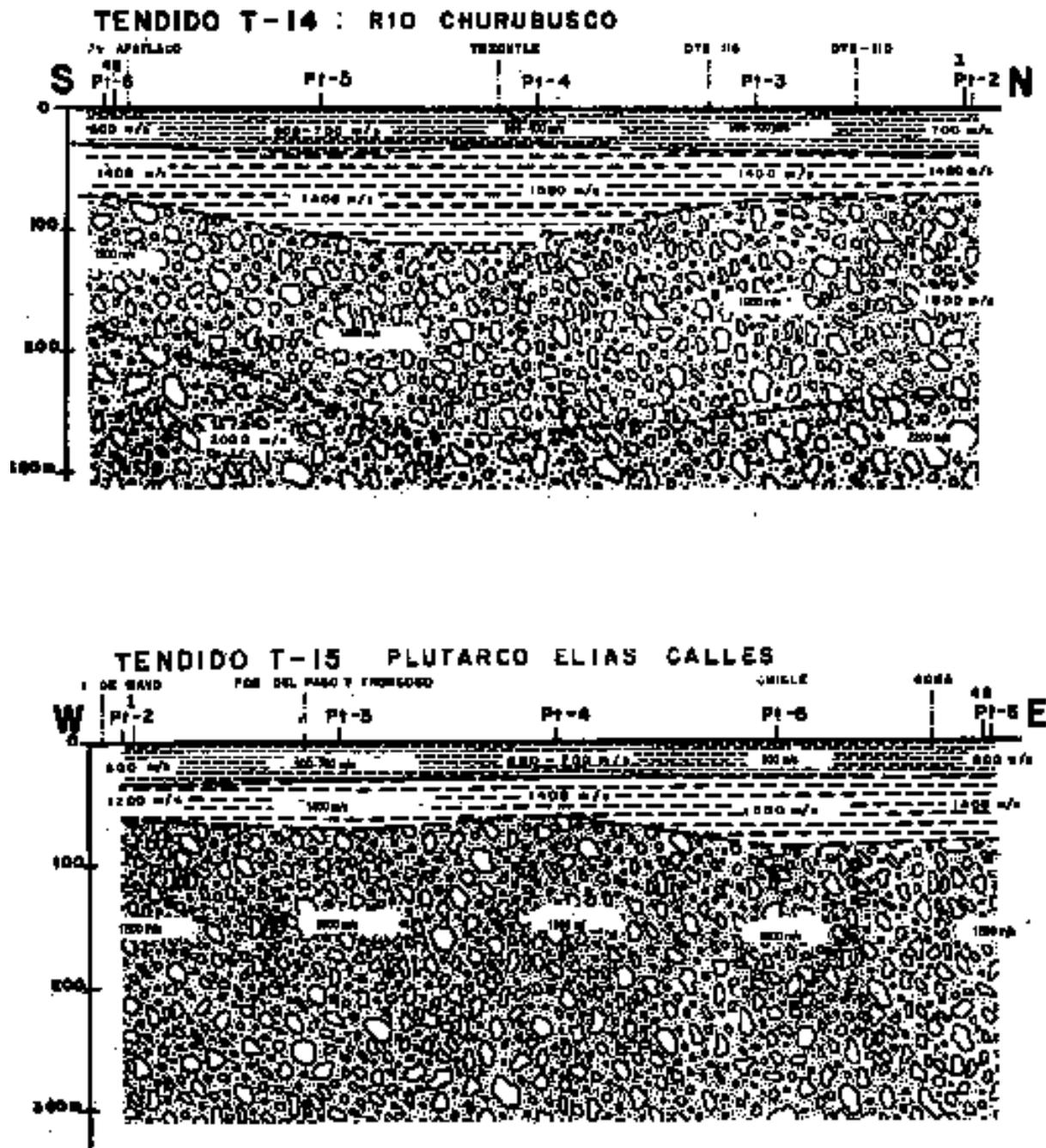


Fig. 12.- Interpretación sísmica en el área Metropolitana. Comisión Federal de Electricidad, Estudios geofísicos del Valle de México, 1988

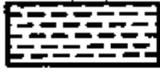
	250 y 900 m/s	Velocidades sísmicas longitudinales ( $V_p$ ) comprendidos entre 250 y 900 m/s. Representan generalmente materiales blandos lacustres de tipo arcillo-limoso en su mayoría. El espesor interesado para estos materiales es del orden de 38-35 m en promedio.
	1000 y 1600 m/s	Velocidades sísmicas longitudinales ( $V_p$ ) comprendidos entre 1000 y 1600 m/s. Se asocian con materiales blandos (lacustre) más antiguos que los anteriores. Su espesor, generalmente importante, Están constituidas por secuencias de materiales areno limo - arcillosos de compactación variable.
	1700-1900 m/s	Velocidades sísmicas longitudinales ( $V_p$ ) comprendidos entre 1700-1900 m/s y 2200 m/s. Se tratan de depósitos aluviales (gravas, arenas, arcillas y limos) de origen piroclástico. Su compactación no acorde con el aumento de velocidad. Los valores mayores pueden reflejar materiales algo cementados o algunos restos de coladas Basálticas.
	2200 m/s	
	2500 y 3400 m/s	Velocidades sísmicas longitudinales ( $V_p$ ) comprendidas entre 2500 y 3400 m/s. Representan formaciones rocosas de tipo basáltica asociadas al Cerro de la Estrella para las Tendidos T-II (canal nacional).

Fig. 13.- Simbología y significado de velocidades de las secciones sísmicas, realizado por la C.F.E. (1988).

### 3.7 Correlación Litoestratigráfica

Se construyeron 5 secciones litoestratigráficas tomando como base para cada caso los cortes litológicos de los pozos mostrados en la tabla N° 6 y Figura 8.

Para su interpretación se tomaron en cuenta los propios cortes litológicos de las perforaciones de pozos de agua, proporcionados por la DGCOH (inéditos), estudios de sísmica (C.F.E., 1988 y Chávez Pérez, 1993) e historia geológica.

La descripción de cada sección se comienza de la base de los cortes litológicos hacia su cima.

Secciones litoestratigráficas	Pozos incluidos para cada sección
A-A´	Pozos Peñón N°1 Peñón N°3 y Peñón N°4.
B-B´	Pozos Peñón N°9 y Peñón N°5.
C-C´	Pozos Agrícola Oriental N°2, Agrícola Oriental N°5 y Agrícola Oriental N°6.
D-D´	Pozos Unidad Modelo N°2, Calzada la Viga N°2 y San Juanico Iztapalapa 138-R.
E-E´	Pozos Granjas Estrella N°2, Cerro de la Estrella N°2 y Panteón Civil N°3.

Tabla N°6. Cortes litológicos de pozos de agua tomados para la interpretación litoestratigráfica para cada sección (DGCOH).

Sección litoestratigráfica A-A´ (Fig. 14).

En el pozo Peñón 5 se observa una secuencia de arenas y gravas de origen fluvial y arcillas lacustre, correlacionables con la velocidad media ( $V_p = 1.2$  km/s) del estudio sísmico de Chávez Pérez (1993), probablemente anteriores en edad a la formación del Peñón de Marqués. Sobreyaciendo este paquete de sedimentos se encuentran varias emisiones intercaladas de cenizas, piroclastos, tezontle y derrames de lava, resultado de la nueva reactivación volcánica, que dio lugar a la formación del volcán Peñón del Marqués perteneciente al Grupo Taranguense de la Formación el Pino, correspondientes a la unidad superior del estudio sísmico (Chávez Pérez, 1993). Cubriendo a los eventos volcánicos mencionados, se encuentra un horizonte potente de material lacustre y aluvial, con espesores de 78 a 145 m del Alogrupo Tenochtitlan.

Sección litoestratigráfica B-B´ (Fig. 15).

Se interpreta secuencias interdigitadas con derrames de lava, tezontle y ceniza, en espesores variables, correspondientes a la actividad que originó al peñón del Marqués, perteneciendo a la unidad volcánica superior del estudio sísmico (Chávez Pérez, 1993) con velocidades de 3.0 Km/s. Sobreyaciendo esta secuencia volcánica, la intercalación de material fluvio-lacustre, constituido principalmente por arenas, arena arcillosa y arcilla lacustre (velocidades de 1.2 Km/s) del Alogrupo Tenochtitlan, en dirección al este de la sección se

observa un mayor aporte de sedimentos, esto es debido a la cercanía y al gran aporte de sedimentos de la Sierra Santa Catarina.

#### Sección litoestratigráfica C-C' (Fig. 16).

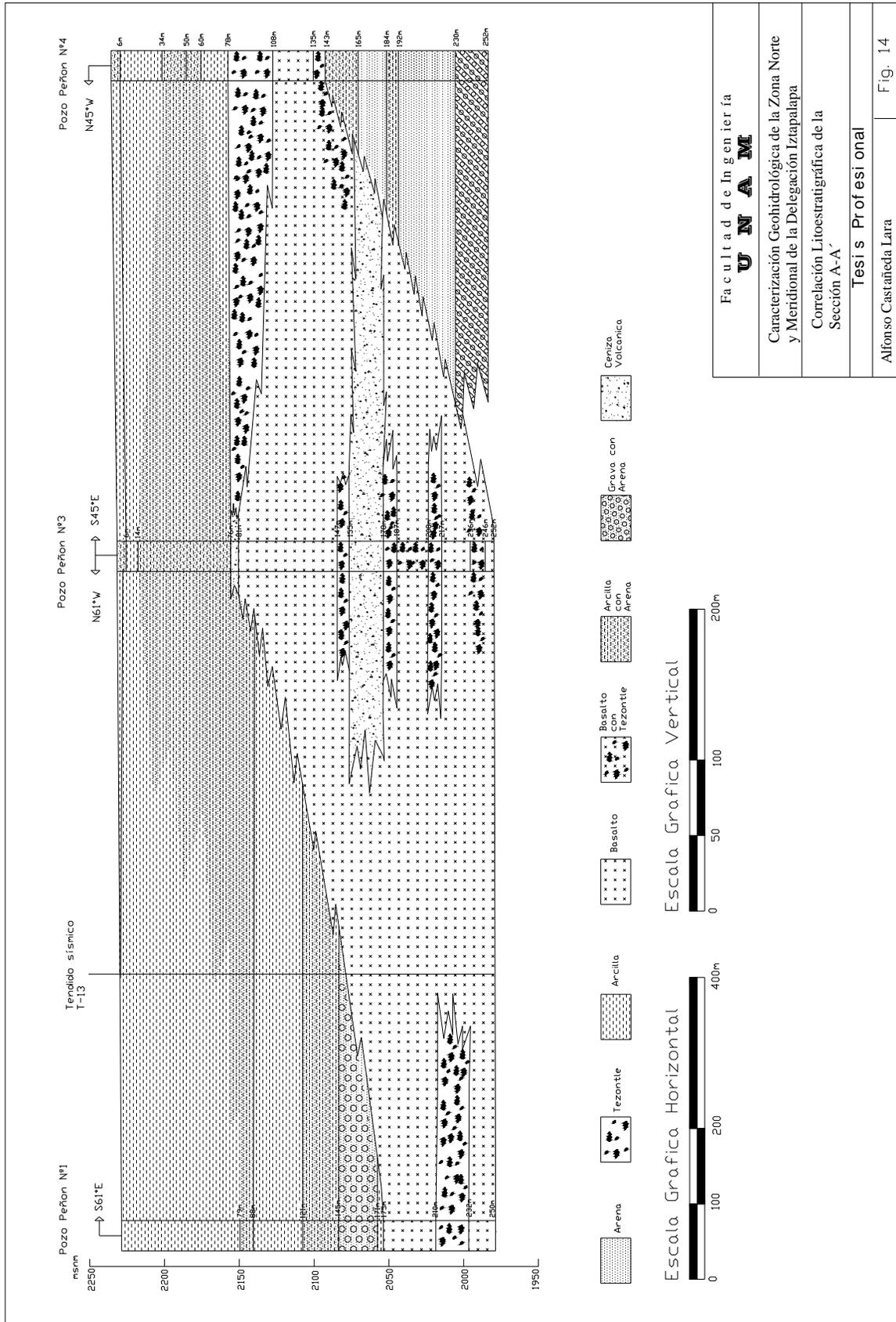
Se interpreta en la base un espesor considerable de sedimentos interdigitados de arcilla, arena y arena arcillosa de origen fluvio-lacustre, se trata de las partes distales de los abanicos aluviales, los cuales se acumularon directamente en las planicies de inundación, pertenecientes al Grupo Taranguense, Cubriendo a estos sedimentos se observa una capa delgada de tezontle, ceniza y lava, correspondientes a la actividad volcánica que originó el Cerro de la Estrella, estas dos unidades de acuerdo a los tendidos sísmicos T-13, T- 14, y X-X', le corresponden velocidades de 1 800-2 200 m/s pertenecientes a depósitos aluviales de origen piroclástico con resto de algunas coladas basálticas y con profundidad de hasta 1.5 Km. Sobreyaciendo el material volcánico, se observan horizontes areno arcillosos, gravas y arcillas del Alogrupo Tenochtitlan, lo cual representa espacialmente el centro de la zona lacustre, con velocidades comprendidas entre 500-1 500 m/s, correspondientes a materiales blandos de tipo arcilloso y areno limoso de compactación variable.

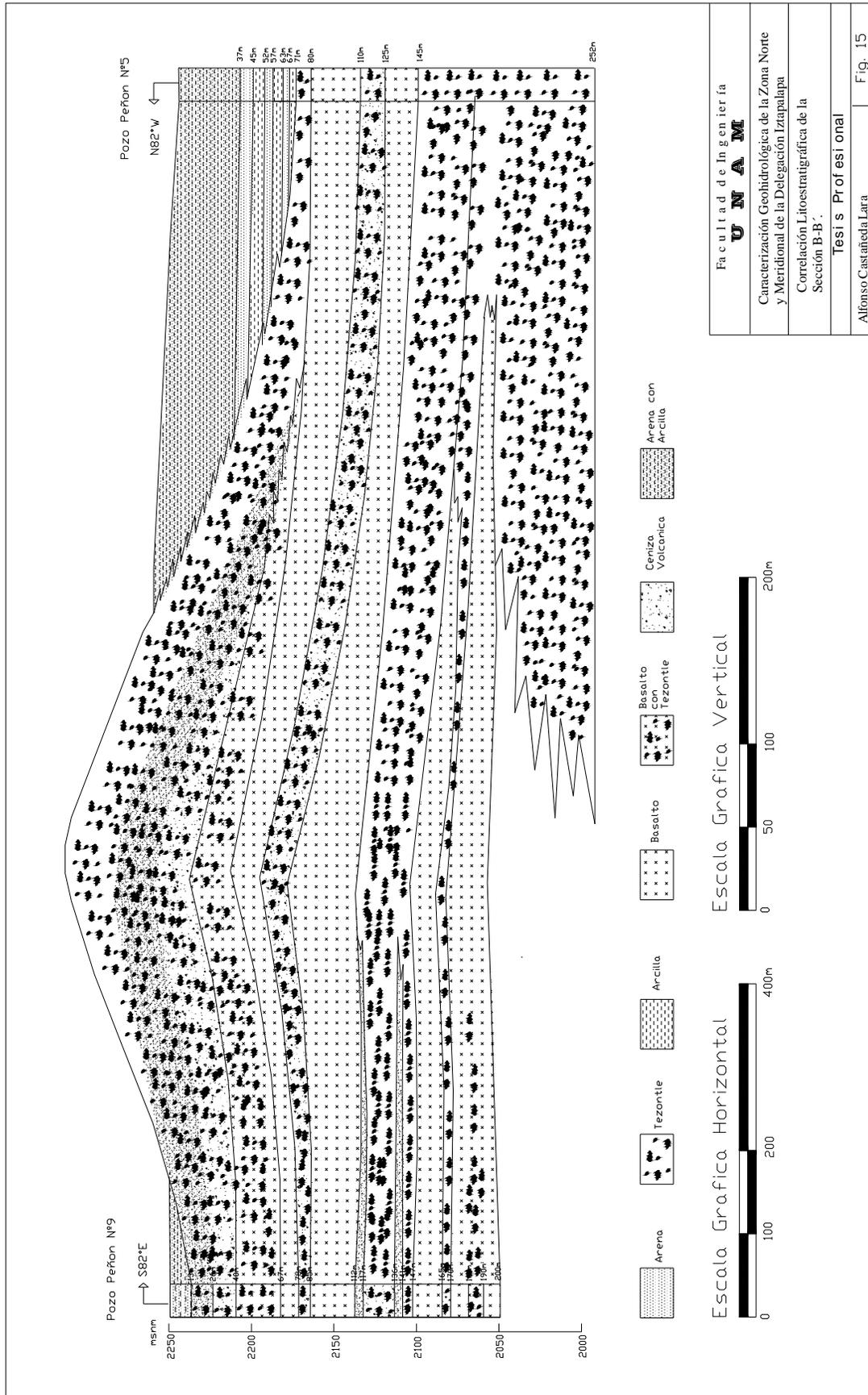
#### Sección litoestratigráfica D-D' (Fig. 17).

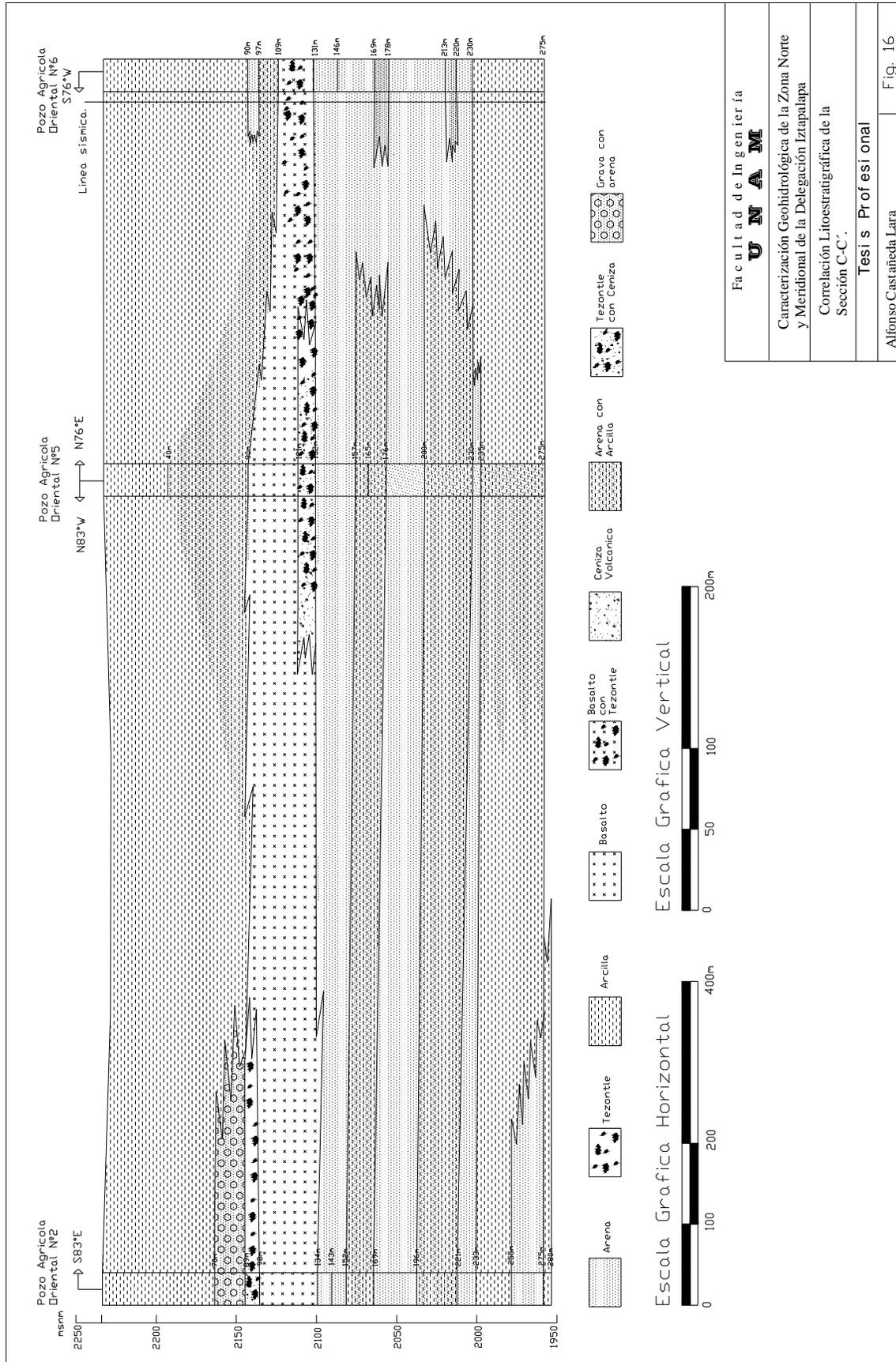
Se interpreta al inicio un potente espesor de interdigitaciones de depósitos de abanicos aluviales, suelos, gravas y arenas e incluso arcillas, correspondientes al Grupo Taranguense. Esta deposición se debió al intemperismo y a la erosión fluvial de La Sierra de las Cruces, de acuerdo al tendido sísmico T-14 y Y-Y' tiene velocidades que van de 2 000-1 800 m/s, correspondientes a depósitos aluviales (gravas, arenas, arcillas y limos) de origen piroclástico, y con una profundidad de hasta 1.2 Km. Cubriendo a estos depósitos se tiene la mezcla e interdigitación de tezontle, ceniza y flujo de lava, correspondiente al material emitido durante la formación del Cerro de la Estrella. Sobreyaciendo a la secuencia anterior, se tiene la presencia de sedimentos arenosos y arcilla, que corresponden al acarreo fluvial de sedimentos del Alogrupo Tenochtitlan, con velocidades (250-700 m/s) pertenecientes a materiales blandos de tipo arcilloso a arcillo limoso.

#### Sección Litoestratigráfica E-E' (Fig. 18).

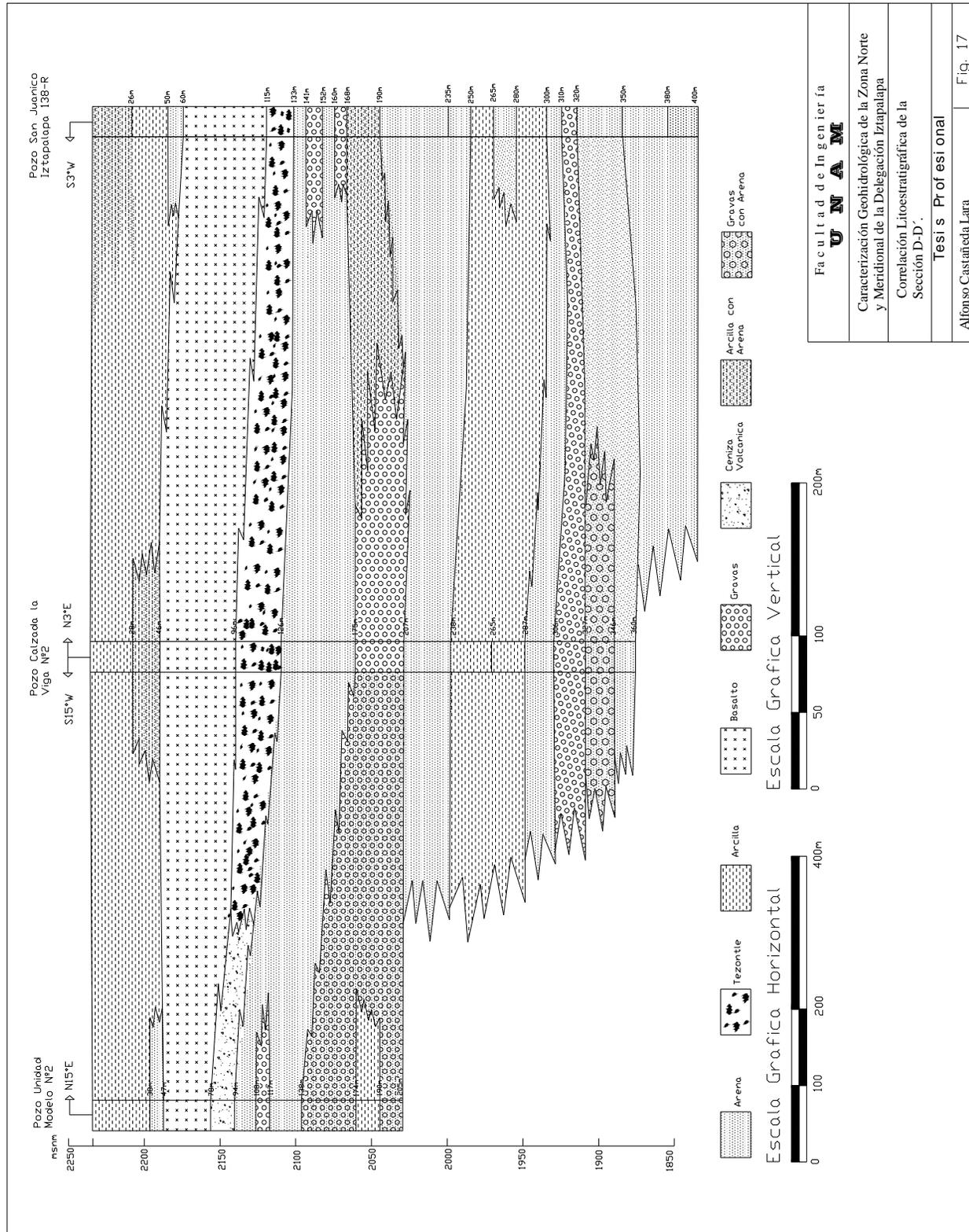
Se interpreto en la sección que antes de formarse la expresión volcánica del Cerro de la Estrella de edad cuaternaria se encuentran depósitos de abanicos aluviales y aglomerados del grupo Taranguense. Cubriendo a estos sedimentos se identifican lavas basálticas cubiertas e intercaladas con material tobáceo y escoráceo correspondientes a la actividad volcánica de la cual se originó el Cerro de la Estrella de la Formación el Pino. Estos mismos depósitos se encuentran cubriendo los alrededores, interdigitandose con otras secuencias volcánicas, correspondientes con el material emitido durante la formación de la Sierra Santa Catarina, todos estos depósitos según el tendido sísmico T-11 con velocidades de 2700-3400 m/s, pertenecientes a formaciones rocosas de tipo basáltica. Sobreyaciendo a estos depósitos se tiene una capa delgada (5 m) de material arcilloso, de origen reciente perteneciente al Alogrupo Tenochtitlan.

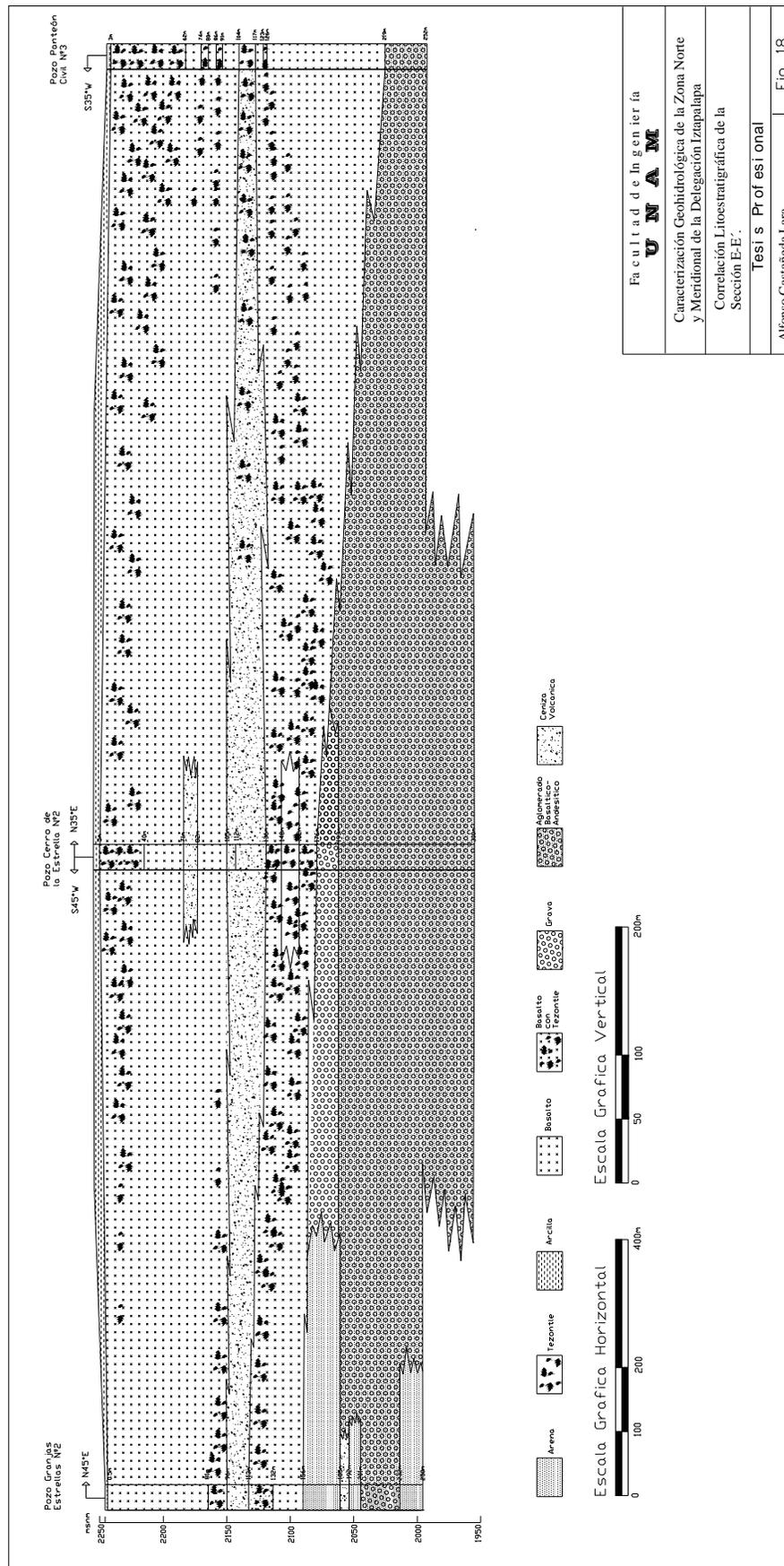






Facultad de Ingeniería	
<b>U N A M</b>	
Caracterización Geohidrológica de la Zona Norte y Meridional de la Delegación Iztapalapa	
Correlación Litoestratigráfica de la Sección C-C'	
Tesis Profesional	Fig. 16
Alfonso Castañeda Lara	





Fa c u l t a d e I n g e n i e r í a  
**U N A M**  
Caracterización Geohidrológica de la Zona Norte y Meridional de la Delegación Iztapalapa  
Correlación Litoestratigráfica de la Sección E-E'.  
T e s i s P r o f e s i o n a l  
Alfonso Castañeda Lara Fig. 18

#### 4.- HIDROGRAFÍA

Lo que hoy forma la Cuenca de México con desagüe artificial, antiguamente drenaba de manera natural hacia el sur. Las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por la salida de productos volcánicos a través de conos volcánicos que dieron origen a la Sierra del Chichinautzin, dejando al área del Valle de México sin drenaje al exterior, originando así una cuenca endorreica (cerrada), lo que determinó la existencia de lagos.

La historia de la Ciudad de México indica que inició su construcción dentro de un islote en la parte central de un lago que cubría una extensa área y que se continuaba hacia el noreste hasta Texcoco y al sur hasta Xochimilco. Los Aztecas ganaron terreno al lago construyendo chinampas, sitios donde realizaban sus cultivos. Los Aztecas separaron los lagos Texcoco y Tenochtitlan (Cd de México) mediante el Albaradón de Netzahualcoyotl, para evitar inundaciones y la mezcla de agua salobre del lago de Texcoco.

En el siglo XIX parte del agua de lluvia se infiltraba y recargaba al acuífero, mientras que otra parte escurría en forma superficial para acumularse sobre la parte central de la cuenca. En temporadas de lluvias abundantes, se llegaban a producir inundaciones en el centro de la ciudad y, para evitarlas se construyeron canales de desagüe para sacar las aguas hacia el norte. convirtiéndolo a la Cuenca de México, en una cuenca abierta artificialmente.

En la actualidad, el sistema de drenes artificiales lo componen 4 sistemas generales: Sistema Poniente, Sistema Gran Canal del Desagüe, Sistema Sur y Sistema de Drenaje Profundo (Tabla. 7). Dentro de la Delegación Iztapalapa se tiene a: El de Chalco, Nacional y el de Río Churubusco.

Por las variaciones notables de características hidrológicas de un área a otra dentro de la Cuenca de México, se dividió a la cuenca en once zonas hidrológicas (Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1963), para facilitar y ordenar el estudio, integrando grupos de corrientes con la mayor homogeneidad hidrológica posible (Fig. 19 y Tabla. 8). En la tabla 9 se muestra las principales corrientes naturales de la Cuenca de México por zonas hidrológicas; Algunos de estos ríos y arroyos han sido entubados, los escurrimientos en las partes topográficas altas corren durante la época de lluvias y se secan en la temporada de estiaje. En la Delegación Iztapalapa es cruzado por el río Churubusco uniéndose con el río de la Piedad, ambos actualmente entubados, formaban el río Unido. También le cruzaba el Canal Nacional, actualmente Calzada de la Viga, donde recogían las aguas de los canales de Chalco, de Tezontle, Del Moral y el de Garay; que finalmente desembocaban sobre los terrenos que antiguamente formaban parte del lago de Texcoco.

Los depósitos lacustres dentro de la cuenca, tienen como función almacenar y regular las aguas, de todas las corrientes superficiales, para después evaporarlas en casi su totalidad; todavía se aprovechan algunas de ellas como vasos reguladores cuando ocurren aportaciones de las corrientes en temporada de lluvias. Los principales depósitos fueron identificados por la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1963), y mostrados en la tabla 10, También existen dos lagos artificiales los de: Chapultepec y el de San Juan de Aragón.

Se sabe por informaciones históricas, que antiguamente existían en la Cuenca de México un gran número de manantiales, los cuales mantenían el escurrimiento perenne de las corrientes,



Fig. 19.- Zonas Hidrológicas de la Cuenca de México (Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1963).

En la actualidad la mayoría de estos veneros ya no existen como tales o han disminuido sus caudales, debido a la disminución de su recarga natural y al abatimiento de niveles por la extracción de agua por pozos, para diferentes usos.

Las presas que se construyeron en las zonas de mayor relieve tienen como finalidad regular los caudales de los ríos; se ubican en zonas estratégicas dentro de la Cuenca, principalmente al sur y oriente de la ciudad de México (Tabla. 11).

#### Abastecimiento de agua en la Delegación Iztapalapa

Actualmente en la Delegación Iztapalapa el abastecimiento del agua cuenta con fuentes externas e internas.

Las fuentes externas de que sirve la delegación son los acueductos Chalco-Xochimilco, que entregan agua a los tanques Cerro de la Estrella, y al tanque Xaltepec a través de la planta de bombeo Quetzalcoátl y al acueducto Netzahualcóyotl que entrega al tanque La Caldera.

Las correspondientes a las fuentes internas de abastecimiento son los 56 pozos, de los cuales se encuentran operando 52 con un gasto total de 2 698 lps, de estos solo los pozos Peñón, entregan una parte de su caudal fuera de la delegación, el resto lo hacen dentro de la misma, ya sea directamente a la red, a tanques de rebombeo o a plantas potabilizadoras, además existen 8 pozos particulares a cargo de la CNA (Comisión Nacional del Agua) que entregan un caudal de 945 lps.

Los principales campos de extracción del acuífero se encuentran en los siguiente lugares:

- a).-Alrededor del cerro del Peñón del Marqués perteneciente a la zona de estudio, donde existen 9 pozos.
- b).-En el nor-poniente, los pozos Agrícola Oriental (2, 4, 5, 6 y 7).
- c).-Al poniente 13 pozos dispersos con diferentes nombre que aportan su caudal directo a la red.
- d).-Al centro, 11 pozos entre los que están el Purísima e Iztapalapa.
- e).-Al oriente hay cinco pozos denominados; Santa María Aztahuacan, Deportivo San Sebastián, Santa Cruz Meyehualco, 1, 2 y Luis Méndez.
- f).-Al sur, 14 pozos entre los que destacan los denominados Tlahuac-Neza, Panteón Civil, en el suroeste y los que forman parte del ramal Santa Catarina.

Sistema	Descripción
Sistema Poniente	Drena los escurrimientos de los ríos localizados en las porciones poniente y nor-poniente de la ciudad. Se integra por un conjunto de presas y sus túneles de interconexión, y del Interceptor y Emisor del Poniente.
Sistema Gran Canal del Desagüe	Se encarga del desalojo de las aguas pluviales y residuales de las zonas centro, oriente y nor-oriente de la ciudad. Se integra por los conductos localizados en los antiguos cauces que cruzan la ciudad de poniente a oriente, además de los vasos de regulación existentes localizados en terrenos de lo que fue el Lago de Texcoco y el propio Gran Canal del Desagüe, que sirve como conducto fundamental de Desalojo
Sistema Sur- Oriente	Cubre totalmente la zona sur y parte de la zona oriente de la ciudad. Se conforma por las Ciénagas Chica y Grande, además de otros vasos y lagunas de regulación, los Canales Chalco y Nacional, y el río San Buenaventura, principalmente.
Sistema de Drenaje Profundo	Su objetivo principal es evitar las inundaciones en la zona centro de la ciudad. Cuenta con algunas estructuras que permiten aliviar a los conductos principales que drenan al resto de las zonas, en casos de presentarse tormentas de alta intensidad y muy localizadas.

Tabla. 7.- Descripción general de los 4 sistemas de Drenes principales

Zona Núm	Denominación
I	Xochimilco
II	Churubusco
III	Cd. de México
IV	Cuautitlán
V	Pachuca
VI	Teotihuacan
VII	Texcoco
VIII	Chalco
IX	Apan
X	Tochac
XI	Tecocomulco

Tabla. 8.- Zonas Hidrológicas de la Cuenca de México (Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1963).

Zona Núm	Denominación	Corrientes
I	Xochimilco	R. San Gregorio R. San Lucas R. Santiago R. San Buenaventura
II	Churubusco	R. Magdalena R. Texcalatlaco R. Mixcoac R. Churubusco R. Becerra R. Eslava
III	Cd. de México	R. Tacubaya R. de la Piedad R. Hondo R. Los Cuartos R. Totolica R. Tlanepantla R. San Javier R. San Mateo R. Chico de los Remedios R. de los Remedios R. Tepatlaxco Desviación Combinada
IV	Cuatitlán	R. Cuatitlán Canal Aurora R. Tepotzotlán Canal Santo Tomás Gran Canal
V	Pachuca	R. de las Avenidas de Pachuca
VI	Teotihuacan	R. San Juan Teotihuacan
VII	Texcoco	R. Papalotla R. Xalapango R. Coxacoaco R. San Lorenzo R. Chapingo R. Santa Mónica R. San Bernardino R. Texcoco R. Coatepec
VIII	Chalco	R. Amecameca R. San Francisco R. de la Compañía R. Milpa Alta
IX	Apan	R. Capulalpan R. Tizar
X	Tochac	R. San José Corrientes alimentadoras Laguna Las Animas
XI	Tecocomulco	Corrientes alimentadoras Laguna de Tecocomulco R. El Canal R. Coalatlaco y alimentadoras Laguna Puerco

Tabla. 9.- Principales corrientes de la Cuenca de México por zonas hidrológicas (Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1963).

Zona Num	Vasos de almacenamiento y presas derivadoras	Corrientes alimentadoras
II	Anzalde	Río Magdalena
II	San Jerónlmo	Río San Jerónimo
II	Coyotes	Bca. Coyotes
II	Texcalatlaco	Río Texcalatlaco
II	Olivar de las Flores	Bca. Tetelpa o Bca. Olivar de las Flores
II	Tetelpa	Bca. de Guadalupe o Bca. de los Frailes
II	Los Pilares	Bca. los Pilares
II	Tarango	Bca de Muerto
II	Mixcoac	Río Mixcoac
III	Becerra	Bca. de Becerra
III	Tacubaya	Río Tacubaya
III	Tecamachalco	Río Tecamachalco
III	El Capulín	Río San Joaquín
III	San Joaquín	Río San Joaquín
III	El Tornillo	Bca. El Tornillo
III	Hondo	Río Hondo
III	Sordo	Río Sordo
III	Los Cuartos	Bca. Los Cuartos
III	Dos Rios	Río Totolica
III	Las Julianas	Río Chico de los Remedios
III	Los Arcos o Tenantongo	Río Chico de los Remedios
III	El Colorado	Río Colorado
III	Lo Colorada	Río San Mateo
III	Madín	Río Tlanepantla
III	San Juan	Río San Javier
III	las Ruinas	Río San Javier
IV	Guadalupe	Río Cuautitlán
IV	Concepción	Río Tepozotlán

Tabla. 10.- Principales Vasos de almacenamiento y presas derivadoras (Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1963).

Lago	Características principales
Texcoco	La curva de embalse es la elevación 2237.49 m; al poniente y al Sur lo limitan los bordos de construcción denominados Poniente y Xochiaca; abarca una superficie aproximada de 176 Km <sup>2</sup> . Este lago regula los caudales de los siguientes ríos: Papalotla, Xolapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec, San Francisco, de la Compañia, Churubusco, Amecameca y parte de los ríos del poniente de la Cuenca, que desagüan por el sistema denominado Desviación Combinado.
Zumpango	Los últimos bordos construidos en 1951 redujeron la superficie que cubría y, por lo tanto, la capacidad de almacenamiento. Las aguas que fluyen hacia la laguna son, las del río las Avenidas de Pachuca, parte del río Cuautitlán y de los ríos al poniente, de la cuenca, encauzadas por el interceptor del poniente y el canal de Santo Tomas.
Xochimilco	Actualmente este lago se ha reducido a una serie de canales con aguas libres que circundan a las chinampas, a terrenos de cultivo y un área urbana, que cubre una superficie aproximada de 18 Km <sup>2</sup> . A este lago le alimentan los Rios de San Gregorio, San Lucas, Santiago, San Buenaventura, el Río Churubusco y la planta de tratamiento Xochimilco
Apan	Localizada al noreste de la cuenca, los aprovechamientos se hacen para uso agrícola de la zona.
Tochac	Localizada al noreste de la cuenca, Los aprovechamientos se hacen para uso agrícola de la zona
Tecomulco	Localizada a 18 kilómetros del Municipio de Tepeapulco, está formada por acumulación de agua, producto de lluvias de temporal, Los aprovechamientos de estas aguas se hacen para uso agrícola.

Tabla. 11.- Áreas lacustres de la Cuenca de México (Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1963).

## 5.-HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Provincia hidrogeológica

La división de la República Mexicana en 11 provincias hidrogeológicas es la forma de identificar regionalmente a ciertas áreas que se singularizan por su fisiografía y homogeneidad geológico estructural, así como por ciertas características hidráulicas como la porosidad, permeabilidad y transmsividad de las rocas (Velásquez y Ordaz, 1992).

La zona de estudio se encuentra localizada en la provincia hidrogeológica “Faja Volcánica Transmexicana” (Fig. 20), la cual presenta las siguientes características generales:

La región hidrogeológica conocida como Faja Volcánica Transmexicana coincide aproximadamente con la provincia fisiográfica y geológica del mismo nombre; se localiza en el centro del país, cubre un área de casi 130 000 Km<sup>2</sup> y se extiende parcial o totalmente sobre algunos estados de la República Mexicana, incluido el Distrito Federal. Esta región que se ubica en la porción central tiene forma irregular, con una longitud aproximada de 950 Km. En dirección este-oeste y una anchura promedio de 110 Km (Velásquez y Ordaz, 1992).

Tiene una gran variedad de condiciones climáticas debida a su topografía montañosa y a su amplio rango de elevaciones. Los climas dominantes son: Tropical y húmedo templado en la porción oeste, Subhúmedo árido templado en la mesa central y Frío, húmedo a árido en las áreas montañosas de la porción noreste. La precipitación pluvial oscila entre 300 y 4,000 mm/año.

Los derrames basálticos y la mayoría de las rocas que se extienden en todo el Eje Neovolcánico se caracteriza por una alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento y la intercalación de material escoráceo.

En el subsuelo de los valles, las rocas consolidadas y no fracturadas bajo del nivel regional de saturación forman barreras para el flujo de agua subterránea, como los derrames andesíticos o rocas calcáreas que funcionan como basamento geohidroológico.

En las partes más bajas de las cuencas, los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de menor permeabilidad, por lo que son acuíferos confinados o semiconfinados y se caracterizan por un coeficiente de almacenamiento bajo, debido a su virtual incompresibilidad.

Los piroclástos tienen una alta porosidad, aunque su permeabilidad sea baja en la zona de saturación funcionan como acuitardos, los cuales en escala regional pueden producir o transmitir grandes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes.

El agua circula preferencialmente a través de los estratos más permeables, los cuales presentan menos resistencia al flujo del agua subterránea y tienden a cruzar los estratos menos permeables por la ruta más corta. Cuando estos estratos se encuentran en la parte superior de la secuencia estratigráfica, la mayoría de las aguas infiltradas se incorpora al sistema local, caso muy frecuente en la FVTM. Los flujos de lava basáltica y los gruesos paquetes de piroclástos,

producen excelentes áreas de recarga y rápidamente transmiten el agua a profundidad, alimentando al acuífero (Velásquez y Ordaz, 1992).



Fig. 20.- Provincias hidrogeológicas de México (Velásquez y Ordaz, 1992). La zona de estudio se encuentra localizada dentro de la provincia “Faja Volcánica Transmexicana”.

## 5.2 Configuraciones de elevación al nivel del agua subterránea.

### Piezometría.

La DGCOH inició en el año de 1984, un programa para contar con datos sobre la variación del nivel estático respecto al tiempo. Los valores anuales registrados del nivel estático respecto al tiempo. De 1985 al 2001, se presentan la tabla 12. La forma de representar a un acuífero consiste en la configuración de la elevación del nivel estático referida a un nivel base, para lo cual se toma como referencia al nivel del mar. Los pozos tomados en consideración para el presente, cuentan con cota del brocal referida al nivel del mar con precisión al milímetro (DGCOH, 2001); la localización de pozos en la zona de estudio se muestra en la figura 21.

Las configuraciones de elevación del nivel del agua subterránea se realizaron para los años 1985, 1990, 1993 y 2001, por ser estos años los más representativos y los que disponen de una mayor densidad de información y suficiente para mostrar la variación espacial y temporal del nivel del agua subterránea. En la tabla 13 se muestran los valores de elevación del nivel estático de cada pozo para el periodo 1985-2001.

### Configuración de elevación al nivel del agua subterránea año 1985.

La configuración de elevación del nivel del agua subterránea para el año 1985 se muestra en la figura 22, observándose que las cotas más altas de 2 215 msnm se encontraban rodeando las faldas de la Sierra Santa Catarina, y las de menor cota de 2 190 msnm hacía el oeste de la Delegación Iztapalapa, en la zona cercana al Cerro de la Estrella. Las isolíneas indican que los valores son mayores de E a W; es decir, la profundidad del nivel estático se incrementa de la Sierra Santa Catarina hacia el centro de la planicie y Cerro de la Estrella. Se observa un cono de abatimiento al centro de la planicie de la delegación con una cota de 2 195 msm originado principalmente por la gran extracción del pozo Iztapalapa 8 y pozos aledaños.

### Configuración de elevación del nivel del agua subterránea año 1990.

La configuración de elevación del nivel del agua subterránea para el año 1990 se muestra en la figura 23, y se observa en general un decremento en la elevación del nivel estático de este a oeste, con un abatimiento promedio de 1.3 m por año en un periodo de 5 años, estos grandes abatimientos se deben a la gran extracción de caudales para esos años. Las isolíneas muestran los mayores abatimientos que fue objeto el acuífero en la zona noroeste de la delegación, incluyendo el Cerro de la Estrella. El pequeño cono de abatimiento formado al centro de la delegación para el año de 1985, se observa que se extiende al noroeste.

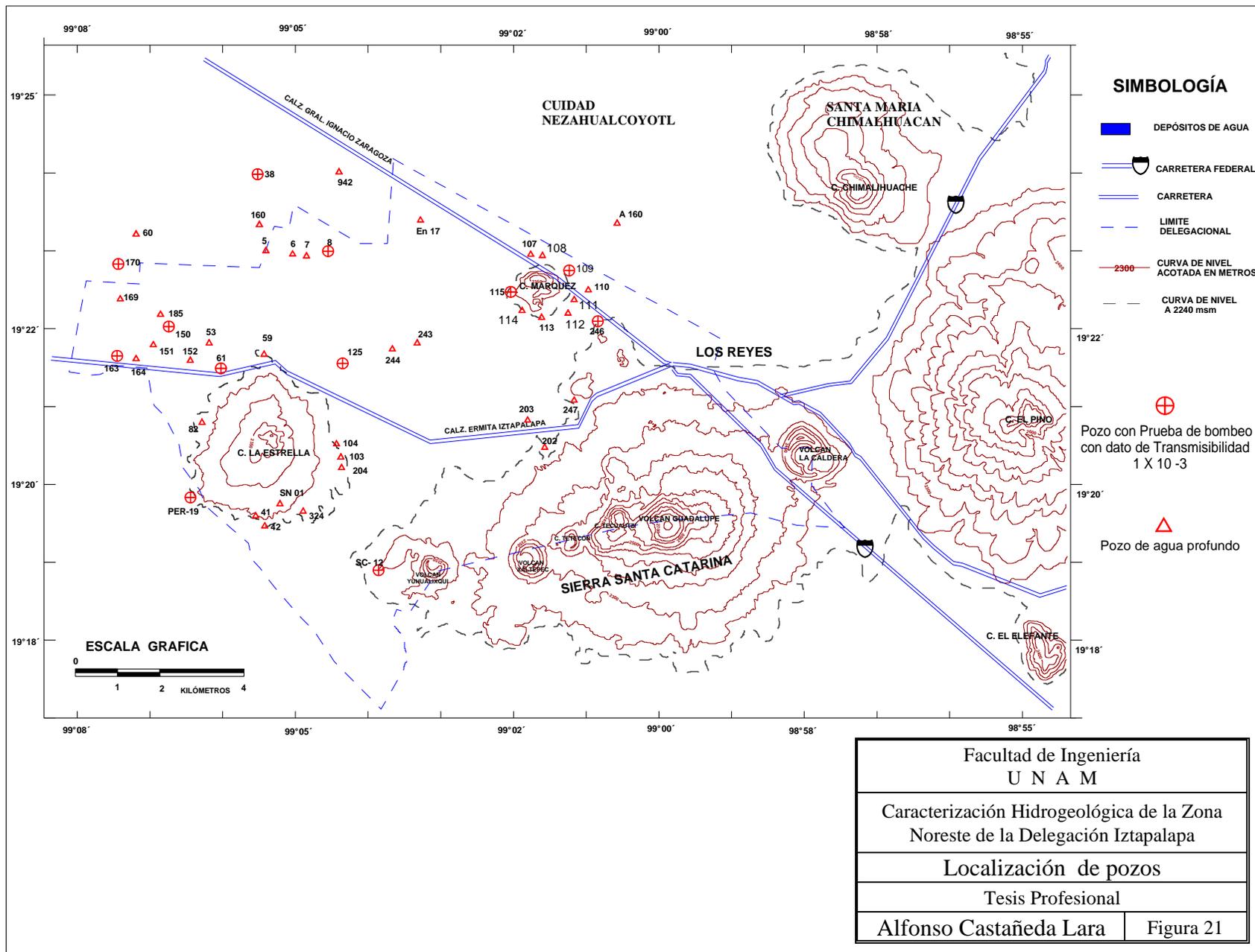
Numero de Pozo	Nombre del Aprovechamiento	Elevación	Prof N.E.															
		Brocal	Sep-85	Sep-86	Jul-87	Jul-88	Jul-90	Jul-91	Jul-92	Jul-93	Sep-94	Jul-95	Jul-96	Jul-97	Ago-98	Ago-99	Ago-00	Ago-01
5	Agrícola Oriental 2	2234.182		40.12	42.83	42.47	46.1	43.15	39.51	40		53.2	53.58	52.96		53.63	55.32	
6	Agrícola Oriental 4	2233.478		39.53	41.39	47.79						52.13	52.35	52.35		53.57	54.07	54.38
7	Agrícola Oriental 5	2233.854		39.75	41.24	43.9	41.96	43.96	45.03	45.71	50.57	52.31	52.5	52.96		54.77	55.11	
8	Agrícola Oriental 6	2233.409		39.55	41.06	43.38	45.62	48.76	48.16	48.33		51.6	51.81			53.9	55.05	
38	Cd. Deportiva 2	2232.44								44.38	43.73	43.44	43.67	41.44		44.35	45.57	46.38
41	Granjas Estrella 1	2244.999	54.39		48.34	50.31		57.53	62.24	64.84		67.51		67.93	70.04	71.35	72.85	
42	Granjas Estrella 2	2244.999								62.15	64.02	65.03	64.99	65.67	66.5	67.78	69.68	69.73
59	Iztapalapa 2	2242.936		37.13	37.7	37.78	56.33	56.42	57.71	58.79	60.6	62.16		60.17	61.34	62.74	63.29	
60	Iztacalco	2232.526								45.5	46.49							
61	Iztapalapa 1	2240.992	45.3	46.81	47.88							59.92	60.18		61.13	62.21	65.83	
82	Los Reyes Iztaapalapa	2246.173	53.42		50.63	50.99	53.5	51.48	54.3	60.45	66.6	67.56	67.93	68.08	69.01		71.14	72.73
103	Panteón Civil Iztaapalapa 1	2242.687	46.64			52.84				59.7	61.08							52.41
104	Panteón Civil Iztaapalapa 2	2243.437	48.15	46.25	47.15	50.6	56.95	57.56	59.01	59.87	62.87	62.47	63.35	62.82	63.97	64.67	65.78	67.79
107	EN-270 Peñon 1	2229.675								28.78		27.28						
110	Peñon 4	2236.682			25.27	24.55	29.74	31.93	32.45	33.04		35.75	37.97	37.51	39.79		41.76	
113	Peñon 7	2239.064		24.3	27.08	27.68												
115	EN-282 Peñon	2249.669	38.15	38.78	40.69	41.16	45.63	45.49	46.16	46.93	51.64	51.13	53.95	53.79	54.5	55.84	56.13	
125	Purísima Iztaapalapa 3	2236.171	34.34	42.06	34.92	35.73	49.03	49.62	49.05			53.44	54.12	55.23	56.74	57.65	58.71	59.16
150	Sector Popular 1	2235.501	41.46	43.23	41.43	43.41	47.36	47.79	48.72	49.86	51.61	48.65		50.12		55.42	56.96	54.03
151	Sector Popular 2	2234.278	39.76	41.43	41.82	43.41	47.54	47.92	48.55	49.36	49.72	50.83	50.88	50.78		53.55	55.04	55.43
160	Tlacotal	2233.075				33.42		47.35	48.71	49.47	51.38	51.85	51.29	48.16	51.02	52.61	53.3	
164	Unidad Modelo 3	2233.505								50.8		53	53.23	53.34	54.67	55.37		54.94
169	Viga 3	2232.964								48.76	49.42							
170	Viga 4	2234.367								45.16	49.21	50.01	49.6	50.27	50.14	52.68	53.7	
190	Cd. Deportiva 1	2232.626										43.2	43.48	45.11	45.07	45.16	46	
202	S Cruz Meyehualco1	2245.346	32.65	19.97	20.25					27.91	29.19						32.16	
203	S Cruz Meyehualco 2	2238.213	19.53	35.93	36.46	21.77	28.91	29.46	31.69	31.94	29.45	22.9	22.77	22.64		30.87	22.92	
243	Iztapalapa 6	2233.963	30.37	32.23	33.31	43.94	46.96	47.31	49.15	50.12		52.61						
244	Iztapalapa 8	2234.662	40.86	31.36	34.07	45.6	48.21	48.72	50.03	50.78		53.01		53.27	54.49		56.23	58.19
246	Dep San Sebastian	2237.776	19.22	19	24.68	19.7	18.8	20.01	20.06	20.09	19.78	21.18	22.56	22.77	23.1	21.08	22	

247	Mdo. Astahuacan	2240.39	21.21	21.81	21.34	21.91	22.77	22.95	22.99	23.46		23.34	24.77	24.39	25.01	24.58	25	
942		2233.83	33.15	34.87	31.17	35.15	35.87					48.85	46.51	46.71	46.5	46.69	48.38	49.33
A 160	Nezahualcoyotl	2236.324			23.94	24.18	25	25.43	27.81	29.05		30.26	32.41	34.65		40.18	38.27	
SC-12	Santa Catarina 12	2250.37					32.9	33.18	32.86	32.95		33.1	33.97	33.18	33.28	34.96	34.52	35.17
2221	EN 17 ENBUTMAYOROW	2233.04								42.05	42.92	45.3						

Tabla 12.-Piezometría de los pozos ubicados en la zona de estudio. Los valores anuales registrados del nivel estático respecto al tiempo se presentan para el periodo del año 1985 al 2001 (DGCOH, 2001).

Numero de Pozo	Nombre del Aprovechamiento	Elevación	Elevación N.E. msnm															
		Brocal	Sep-85	Sep-86	Jul-87	Jul-88	Jul-90	Jul-91	Jul-92	Jul-93	Sep-94	Jul-95	Jul-96	Jul-97	Ago-98	Ago-99	Ago-00	Ago-01
5	Agrícola Oriental 2	2234.182		2194.062	2191.352	2191.712	2188.082	2191.032	2194.672	2194.182		2180.982	2180.602	2181.222		2180.552	2178.862	
6	Agrícola Oriental 4	2233.478		2193.948	2192.088	2185.688						2181.348	2181.128	2181.128		2179.908	2179.408	2179.098
7	Agrícola Oriental 5	2233.854	2209.734	2194.104	2192.614	2189.954	2191.894	2189.894	2188.824	2188.144	2183.284	2181.544	2181.354	2180.894		2179.084	2178.744	
8	Agrícola Oriental 6	2233.409		2193.859	2192.349	2190.029	2187.789	2184.649	2185.249	2185.079		2181.809	2181.599			2179.509	2178.359	
38	Cd. Deportiva 2	2232.44								2188.06	2188.71	2189	2188.77	2191		2188.09	2186.87	2186.06
41	Granjas Estrella 1	2244.999	2190.609		2196.659	2194.689		2187.469	2182.759	2180.159		2177.489		2177.069	2174.959	2173.649	2172.149	
42	Granjas Estrella 2	2244.999								2182.849	2180.979	2179.969	2180.009	2179.329	2178.499	2177.219	2175.319	2175.269
59	Iztapalapa 2	2242.936		2205.806	2205.236	2205.156	2186.606	2186.516	2185.226	2184.146	2182.336	2180.776		2182.766	2181.596	2180.196	2179.646	
60	Iztacalco	2232.526								2187.026	2186.036							
61	Iztapalapa 1	2240.992	2195.692	2194.182	2193.112							2181.072	2180.812		2179.862	2178.782	2175.162	
82	Los Reyes Iztaapalapa	2246.173	2192.753		2195.543	2195.183	2192.673	2194.693	2191.873	2185.723	2179.573	2178.613	2178.243	2178.093	2177.163		2175.033	2173.443
103	Panteón civil Iztaapalapa 1	2242.687	2196.047			2189.847				2182.987	2181.607							2190.277
104	Panteón civil Iztaapalapa 2	2243.437	2195.287	2197.187	2196.287	2192.837	2186.487	2185.877	2184.427	2183.567	2180.567	2180.967	2180.087	2180.617	2179.467	2178.767	2177.657	2175.647
107	EN-270 Peñon 1	2229.675								2200.895		2202.395						
110	Peñon 4	2236.682			2211.412	2212.132	2206.942	2204.752	2204.232	2203.642		2200.932	2198.712	2199.172	2196.892		2194.922	
113	Peñon 7	2239.064		2214.764	2211.984	2211.384												
115	EN-282 Peñon	2249.669	2211.519	2210.889	2208.979	2208.509	2204.039	2204.179	2203.509	2202.739	2198.029	2198.539	2195.719	2195.879	2195.169	2193.829	2193.539	
125	Purísima Iztaapalapa 3	2236.171	2201.831	2194.111	2201.251	2200.441	2187.141	2186.551	2187.121			2182.731	2182.051	2180.941	2179.431	2178.521	2177.461	2177.011
150	Sector Popular 1	2235.501	2194.041	2192.271	2194.071	2192.091	2188.141	2187.711	2186.781	2185.641	2183.891	2186.851		2185.381		2180.081	2178.541	2181.471
151	Sector Popular 2	2234.278	2194.518	2192.848	2192.458	2190.868	2186.738	2186.358	2185.728	2184.918	2184.558	2183.448	2183.398	2183.498		2180.728	2179.238	2178.848
160	Tlacotal	2233.075				2199.655		2185.725	2184.365	2183.605	2181.695	2181.225	2181.785	2184.915	2182.055	2180.465	2179.775	
164	Unidad Modelo 3	2233.505								2182.705		2180.505	2180.275	2180.165	2178.835	2178.135		2178.565
169	Viga 3	2232.964								2184.204	2183.544							
170	Viga 4	2234.367								2189.207	2185.157	2184.357	2184.767	2184.097	2184.227	2181.687	2180.667	
202	S Cruz Meyehualco1	2245.346	2212.696	2225.376	2225.096					2217.436	2216.156						2213.186	
203	S Cruz Meyehualco 2	2238.213	2218.683	2202.283	2201.753	2216.443	2209.303	2208.753	2206.523	2206.273	2208.763	2215.313	2215.443	2215.573		2207.343	2215.293	
243	Iztapalapa 6	2233.963	2203.593	2201.733	2200.653	2190.023	2187.003	2186.653	2184.813	2183.843		2181.353						
244	Iztapalapa 8	2234.662	2193.802	2203.302	2200.592	2189.062	2186.452	2185.942	2184.632	2183.882		2181.652		2181.392	2180.172		2178.432	2176.472
246	Dep San Sebastian	2237.776	2218.556	2218.776	2213.096	2218.076	2218.976	2217.766	2217.716	2217.686	2217.996	2216.596	2215.216	2215.006	2214.676	2216.696	2215.776	
247	Mdo. Astahuacan	2240.39	2219.18	2218.58	2219.05	2218.48	2217.62	2217.44	2217.4	2216.93		2217.05	2215.62	2216	2215.38	2215.81	2215.39	
942		2233.83	2200.68	2198.96	2202.66	2198.68	2197.96					2184.98	2187.32	2187.12	2187.33	2187.14	2185.45	2184.5
A 160	Nezahualcoyotl	2236.324			2212.384	2212.144	2211.324	2210.894	2208.514	2207.274		2206.064	2203.914	2201.674		2196.144	2198.054	
SC-12	Santa Catarina 12	2250.37					2217.47	2217.19	2217.51	2217.42		2217.27	2216.4	2217.19	2217.09	2215.41	2215.85	2215.2
2221	EN 17 ENBUTMAYOROW	2233.04								2190.99	2190.12	2187.74						

Tabla 13.- Valores anuales registrados de la elevación del nivel estático con cota del brocal referida al nivel del mar con precisión al milímetro para el periodo del año 1985 al 2001 (DGCOH, 200).



### Configuración de elevación del nivel del agua subterránea año 1993.

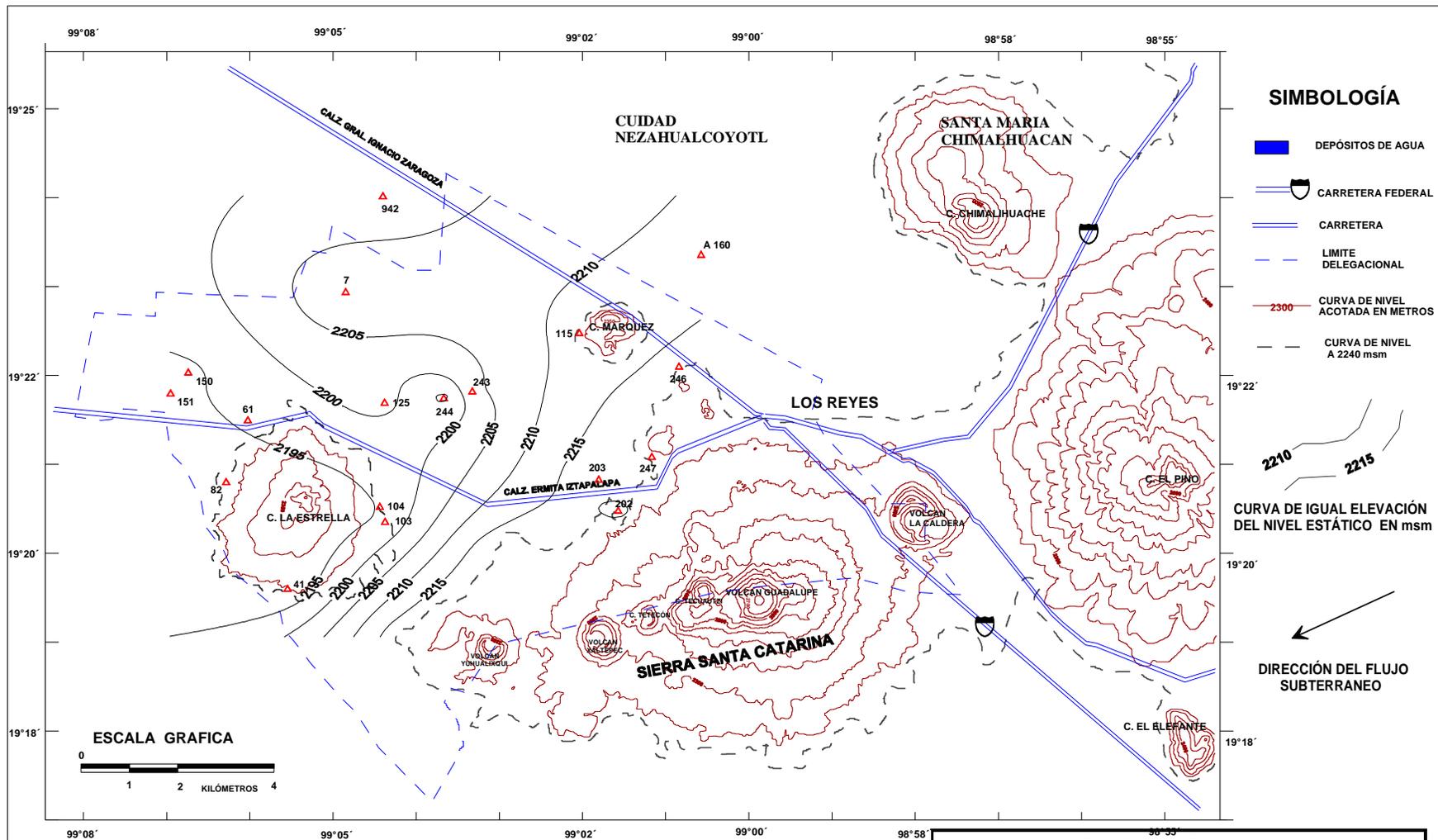
La configuración de elevación del nivel del agua subterránea para el año 1993 se muestra en la figura 24, Se observa que las cotas más altas de 2 215 y 2 210 msnm, localizadas a las faldas de la Sierra Santa Catarina, se mantiene relativamente constantes con respecto a la configuración del año de 1990, pero después de estas cotas la profundidad del nivel estático aumenta drásticamente con orientación de este a oeste, siguiendo la misma tendencia que las dos configuraciones anteriores, llegando hasta la cota de 2 185 msnm, Se observa también un pequeño cono de abatimiento en la zona noroeste de la delegación, producto de la gran extracción de agua. La mayor zona de abatimiento se observa en el área del Cerro de la Estrella y parte central de la planicie de la delegación. En general se tiene un abatimiento promedio del nivel estático entre el año de 1990 y el año de 1993 de 0.75 m por año en un periodo de 3 años, siendo este periodo donde se observa un descenso menor de niveles estáticos.

### Configuración de elevación del nivel del agua subterránea año 2001

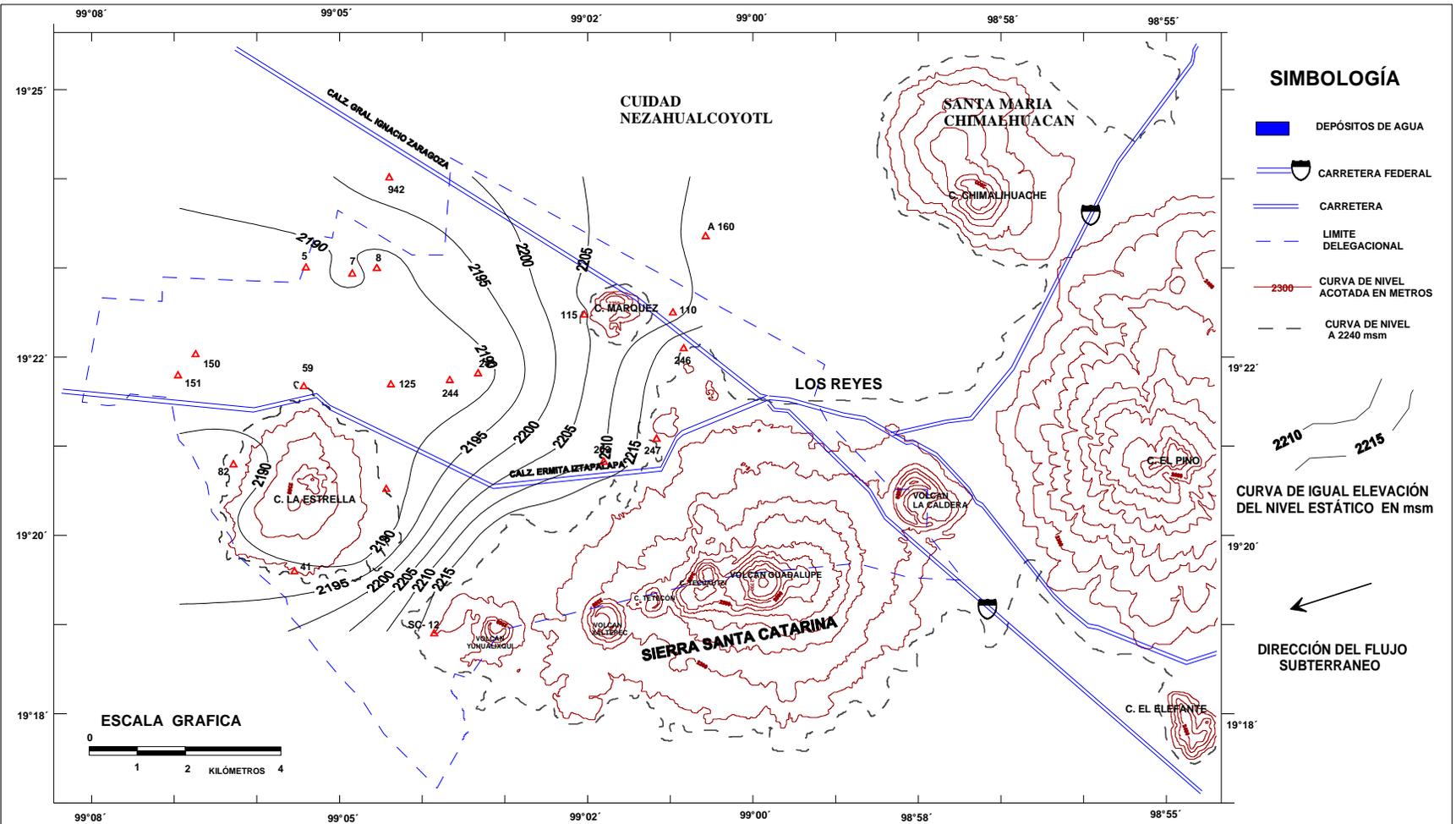
La configuración de elevación del nivel del agua subterránea para el año 1993 se muestra en la figura 25, El acuífero presenta variaciones en su elevación siguiendo en general el mismo patrón de descenso de niveles de este a oeste, ocasionado la formación de un cono piezométrico que a evolucionado desde el año de 1985, localizado en la zona del Cerro de la Estrella y en el centro de la planicie de la delegación, con una cota de 2 180 msnm, ocasionado por la extracción de agua subterránea. Se observa un abatimiento promedio entre el año de 1993 y el año del 2001 de 0.8 m, por año para un periodo de 8 años.

### Configuración de la evolución del nivel estático respecto al tiempo para el periodo 1985-2001

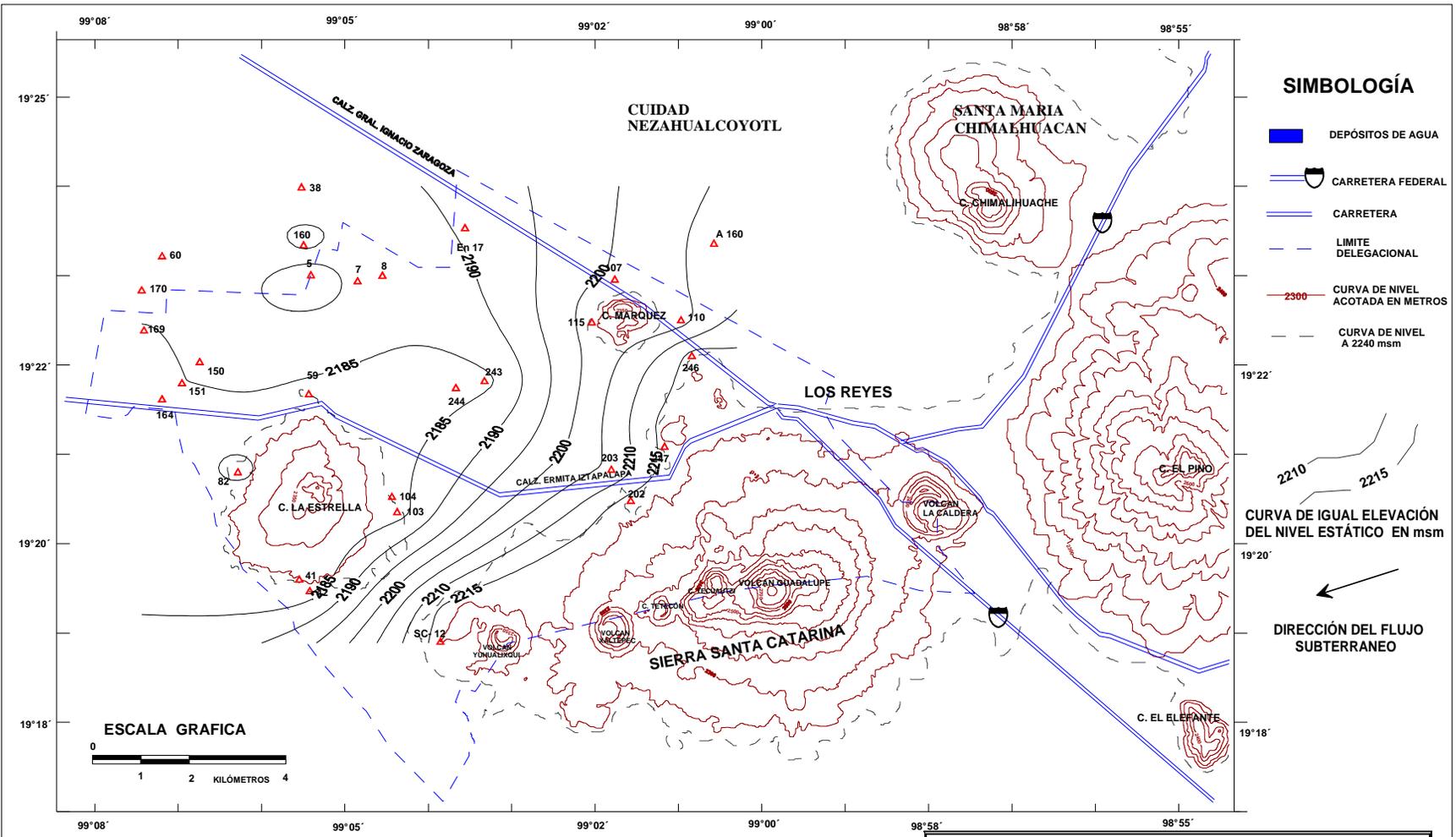
La configuración de la evolución del nivel del agua subterránea para el período 1985-2000, se observó evoluciones negativas o abatimientos de hasta 25 metros, la evolución del nivel del agua subterránea presenta en promedio 1.3 metros de abatimiento por año, siendo el descenso del nivel estático promedio en el periodo 1885-2001 de 18.4 metros. Los principales abatimientos se localizan en las zonas de la planicie de la delegación y en el área del cerro de la estrella, debidos a la gran extracción de agua de los pozos.



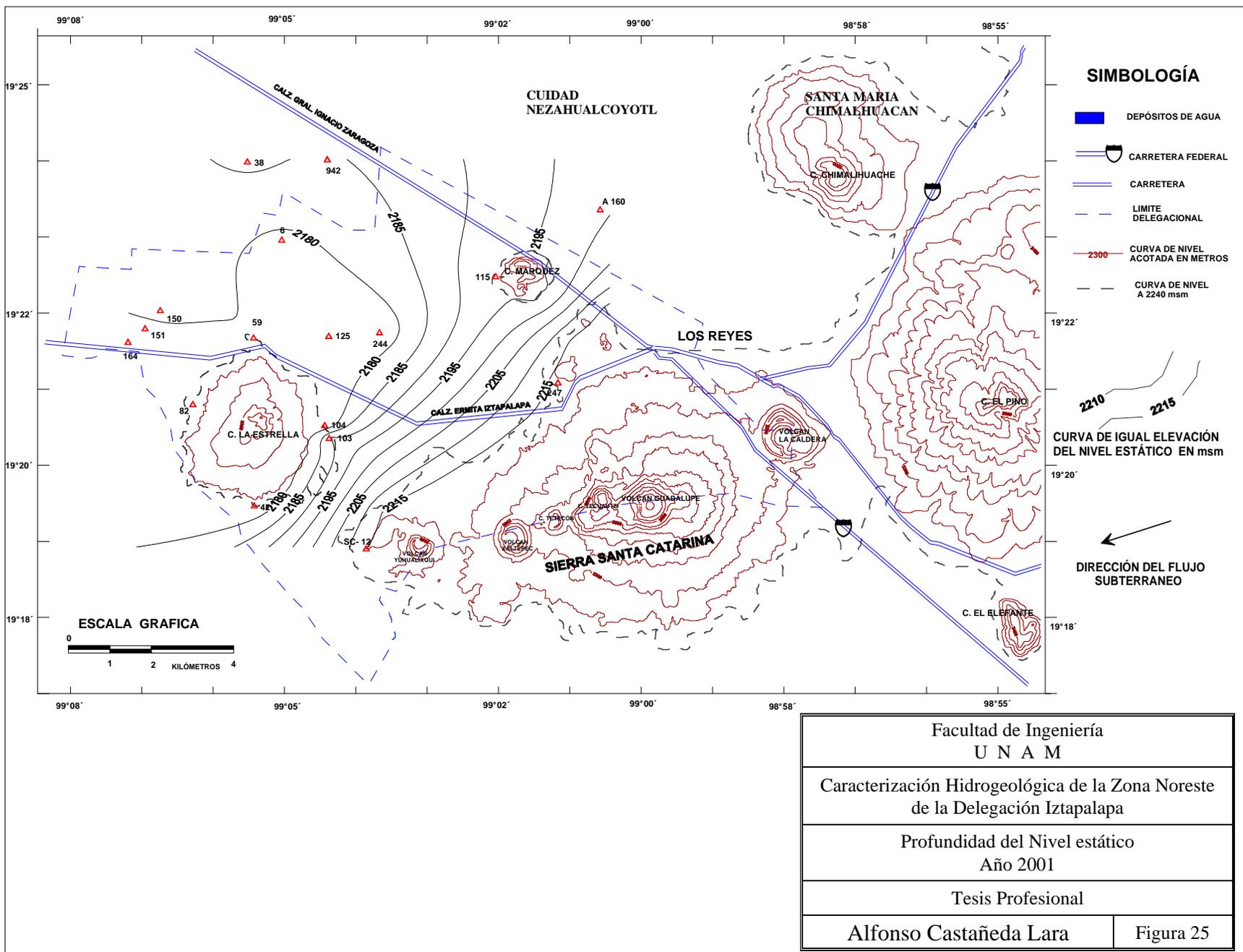
Facultad de Ingeniería U N A M	
Caracterización Hidrogeológica de la Zona Noreste de la Delegación Iztapalapa	
Profundidad del Nivel estático Año 1985	
Tesis Profesional	
Alfonso Castañeda Lara	Figura 22



Facultad de Ingeniería U N A M	
Caracterización Hidrogeológica de la Zona Noreste de la Delegación Iztapalapa	
Profundidad del Nivel estático Año 1990	
Tesis Profesional	
Alfonso Castañeda Lara	Figura 23



Facultad de Ingeniería U N A M	
Caracterización Hidrogeológica de la Zona Noreste de la Delegación Iztapalapa	
Profundidad del Nivel estático Año 1993	
Tesis Profesional	
Alfonso Castañeda Lara	Figura 24



### 5.3 Hidrógrafos (variación del nivel estático respecto al tiempo).

Debido a una intensa extracción de agua subterránea en el área, ha ocasionado un paulatino pero constante abatimiento del nivel del agua, por esa razón se analizó la variación del nivel estático respecto al tiempo (Hidrógrafos) para calcular la cantidad de abatimiento y comportamiento. Se dividió el área en 6 diferentes zonas para su análisis más detallado, se graficó las variaciones de profundidad para el periodo 1985-2001 (Figura 26 y 27), teniéndose las siguientes observaciones:

#### Zona A

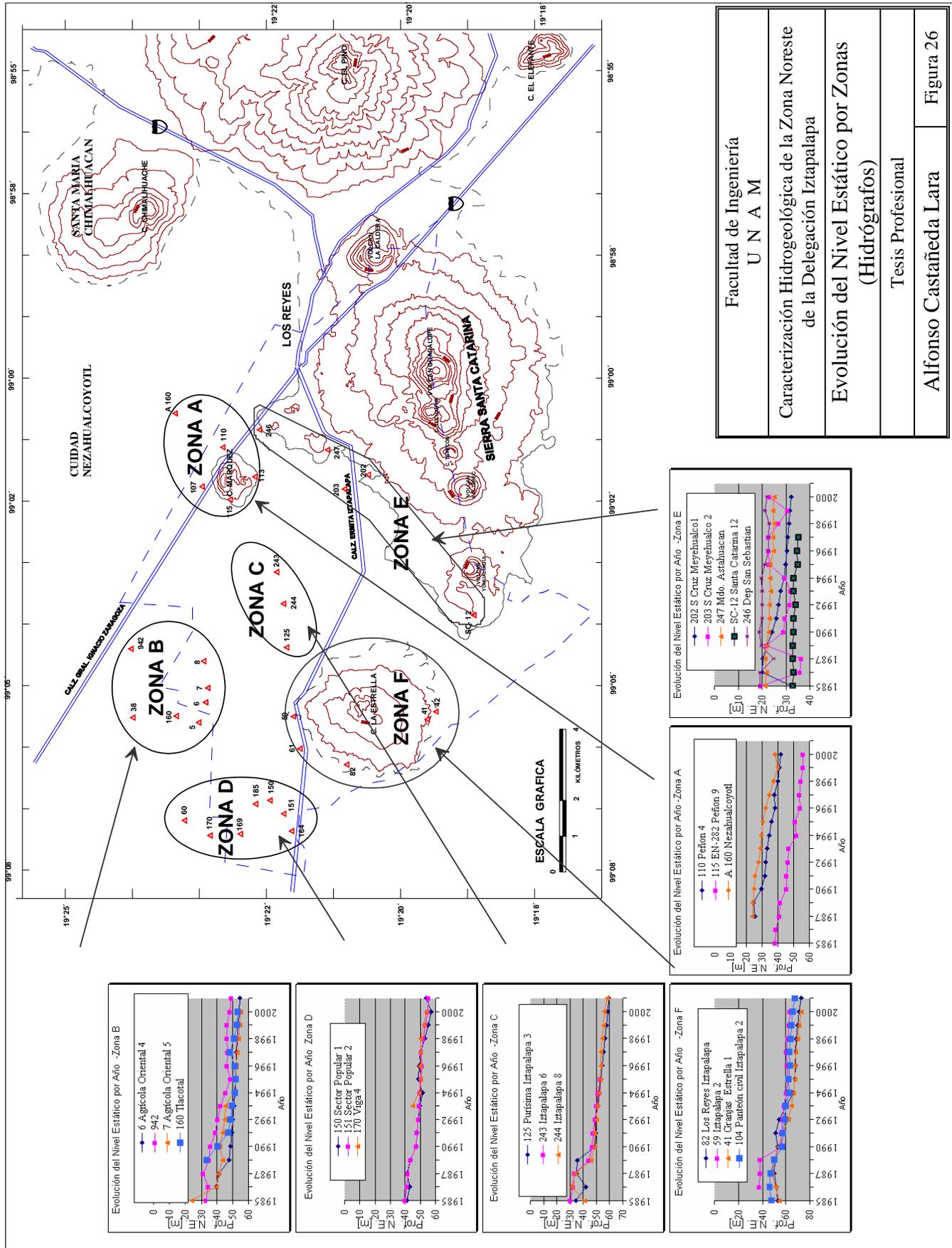
En la zona del Peñón del Márquez y sus alrededores, los pozos se caracterizan por presentar un abatimiento gradual relativamente fuerte del orden de 1.3 metros por año, en un período variable de 13 a 15 años, el nivel estático a descendido 16 metros en este periodo. Esto, es debido a la intensificación de la extracción del agua subterránea en esta zona. De acuerdo a los hidrógrafos, la variación de la profundidad del nivel estático es debido a la elevación topográfica del Peñón del Márquez. El comportamiento gradual y constante esta dado por su permeabilidad con porosidad granular y por fracturas.

#### Zona B y C

Estas dos zonas, de acuerdo a los hidrógrafos presentan comportamientos muy similares. En el periodo de 1985-1991 tienden a un fuerte abatimiento, y después a este periodo al 2001, se muestra gradual pero constante. El abatimiento general es del orden de 1.4 metros por año, estas zonas son las de mayor abatimiento. Esto se puede ser debido a las intercalaciones arcillosas de baja permeabilidad granular, que no permiten que se recargue el acuífero tan rápidamente, existe una permeabilidad secundaria por fracturamiento en las secuencias lávicas existentes en esta zona.

#### Zona D

De acuerdo a los hidrógrafos de esta zona la elevación del nivel estático es la misma en todos los pozos, el comportamiento gradual y constante abatimiento en todos los pozos es muy similar, del orden de 1 metros por año, para un periodo de 15 años, teniéndose así un abatimiento de 15 metros en este periodo. Este comportamiento puede deberse a los depósitos aluviales y a la mezcla e interdigitación de tezontle y ceniza, que proporcionan una permeabilidad regular con porosidad granular, aunque existen flujos de lava de gran permeabilidad con porosidad por fracturas.



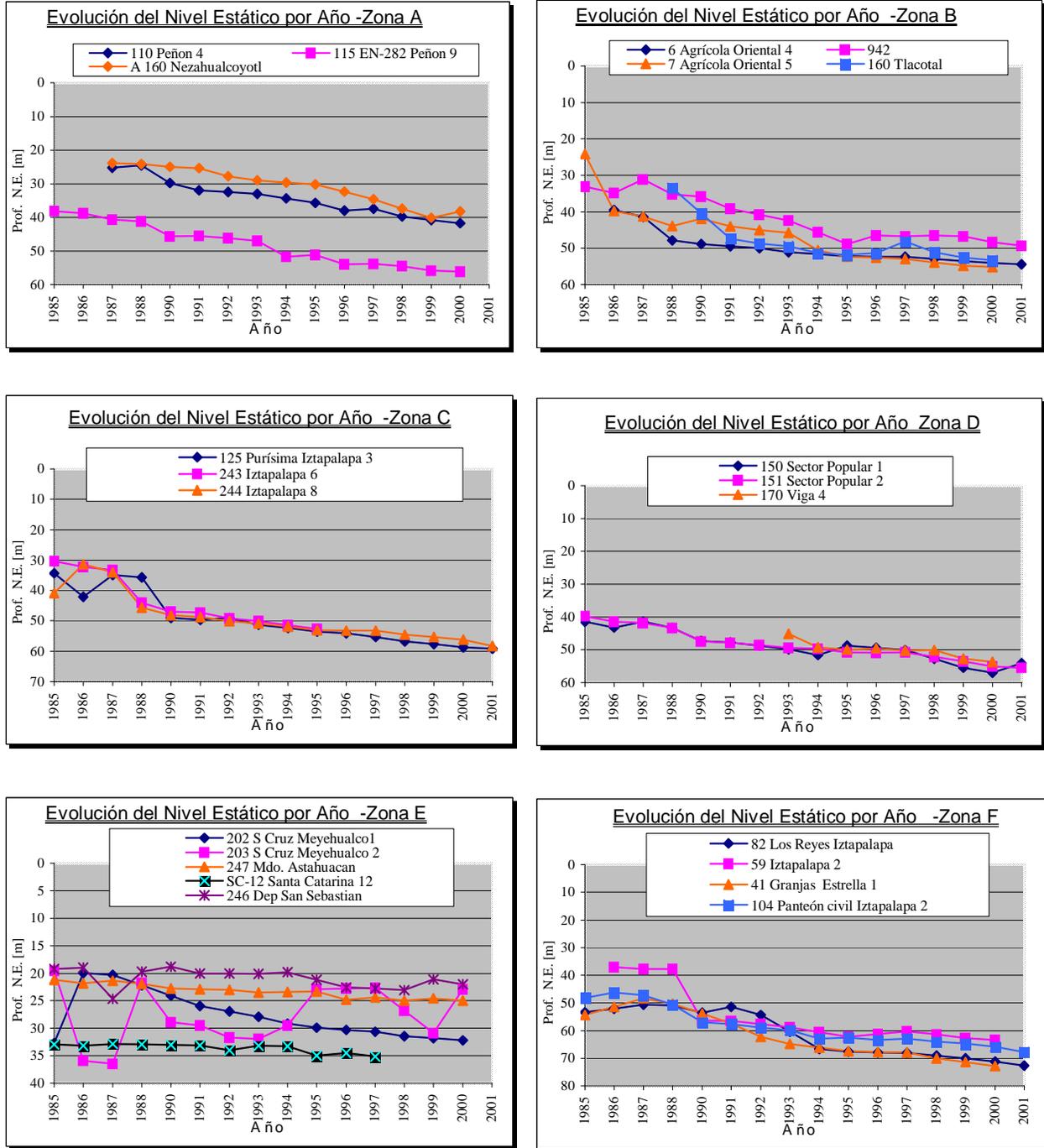


Fig. 27.-Se muestran los hidrógrafos con pozos representativos por zonas. La evolución del nivel estático por año (1985-2001).

## Zona E

Esta zona esta localizada en las faldas de la Sierra Santa Catarina, de acuerdo a los hidrógrafos es la zona más irregular en su comportamiento ya que presenta abatimientos drásticos y recuperación de sus niveles de igual forma, esto pudo ser debido a errores de medición de niveles estáticos, o también debido que se encuentra cerca de zona de infiltración, y en época de lluvia su recarga hacia el acuífero es buena por sus características litológicas de alta permeabilidad de doble porosidad principalmente por las fracturas de sus secuencias de derrames lávicos y en menor medida su porosidad granular por sus depósitos piroclásticos, permitiendo una recuperación indirecta de niveles. El abatimiento promedio es del orden de 0.2 metros por año, También el grado de explotación del acuífero en esta zona, es menor debido a que el agua natural presenta mala calidad.

## Zona F

En la zona del Cerro de la Estrella, existe un abatimiento continuo, del orden de 1 metro por año, en un periodo de 15 años, descendiendo en promedio 14 metros el nivel estático. Probablemente este comportamiento de abatimiento gradual y no de grandes fluctuaciones se deba a su permeabilidad dado por su doble porosidad por fracturas y granular.

## Observaciones generales

Se midió la evolución del nivel del agua subterránea, por medio de hidrógrafos, para el período 1985-2000, mostrados en las figuras 26 y 27. Observándose evoluciones negativas o abatimientos en toda la zona de estudio, de hasta 24.8 y 22 metros específicamente en la zona C. En general el área de estudio presenta en promedio 1.3 metros de abatimiento por año, siendo el descenso del nivel estático promedio en el periodo 1885-2001 de 18.4 metros.

Una de las razones del descenso del nivel estático podría explicarse con un descenso en la precipitación pluvial, ya que es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico, y es un factor esencial pues constituye la materia prima de la recarga al acuífero, de acuerdo a las mediciones pluviales promedio para la ZMVM (Fig. 2) y a las mediciones pluviales anuales promedio Enero-Agosto en Iztapalapa (Fig. 3), se observa que para el año 1992 existe un ascenso en la precipitación, reflejándose en general en los hidrógrafos sin grandes abatimientos manteniendo niveles estáticos, también se observan un ascenso importante en las precipitaciones promedio anual en el año 1994 y 1997 reflejado en el ascenso general de niveles en los hidrógrafos para el año 1995 y 1997-98 respectivamente.

Aunque existe también una disminución en las precipitaciones después del año 1994, el descenso general del nivel estático en la zona de estudio, se atribuye principalmente a la intensa

extracción de agua subterránea en el área, ocasionado un paulatino pero constante abatimiento del nivel del agua.

En la zona E, localizada en las faldas de la Sierra Santa Catarina, se observa un comportamiento con grandes variaciones en los hidrógrafos, su comportamiento diferente a toda la zona de estudio, como se mencionó antes, puede deberse a errores de medición, o bien a variaciones de precipitación pluvial anuales, esto es congruente con la comparación de gráficas de los hidrógrafos de la zona E con las fluctuaciones anuales de las precipitaciones promedio Enero-Agosto en Iztapalapa (Fig. 3). Estas variaciones drásticas de niveles estáticos puede deberse al tipo de material constituido por la Sierra de Santa Catarina de alta permeabilidad de doble porosidad principalmente por las fracturas y en menor medida su porosidad granular, que infiltra agua al acuífero en la época de lluvia, y lo refleja inmediatamente en los niveles estáticos de esta zona.

#### 5.4 Hidrógeoquímica.

En el presente trabajo, se recopiló la información del funcionamiento de la variación química del agua subterránea en la región de Iztapalapa, de estudios hidrogeoquímicos realizados por la DGCOH y del estudio realizado por Huizar (1999). Para un mayor detalle de la información obtenida, se recomienda su consulta.

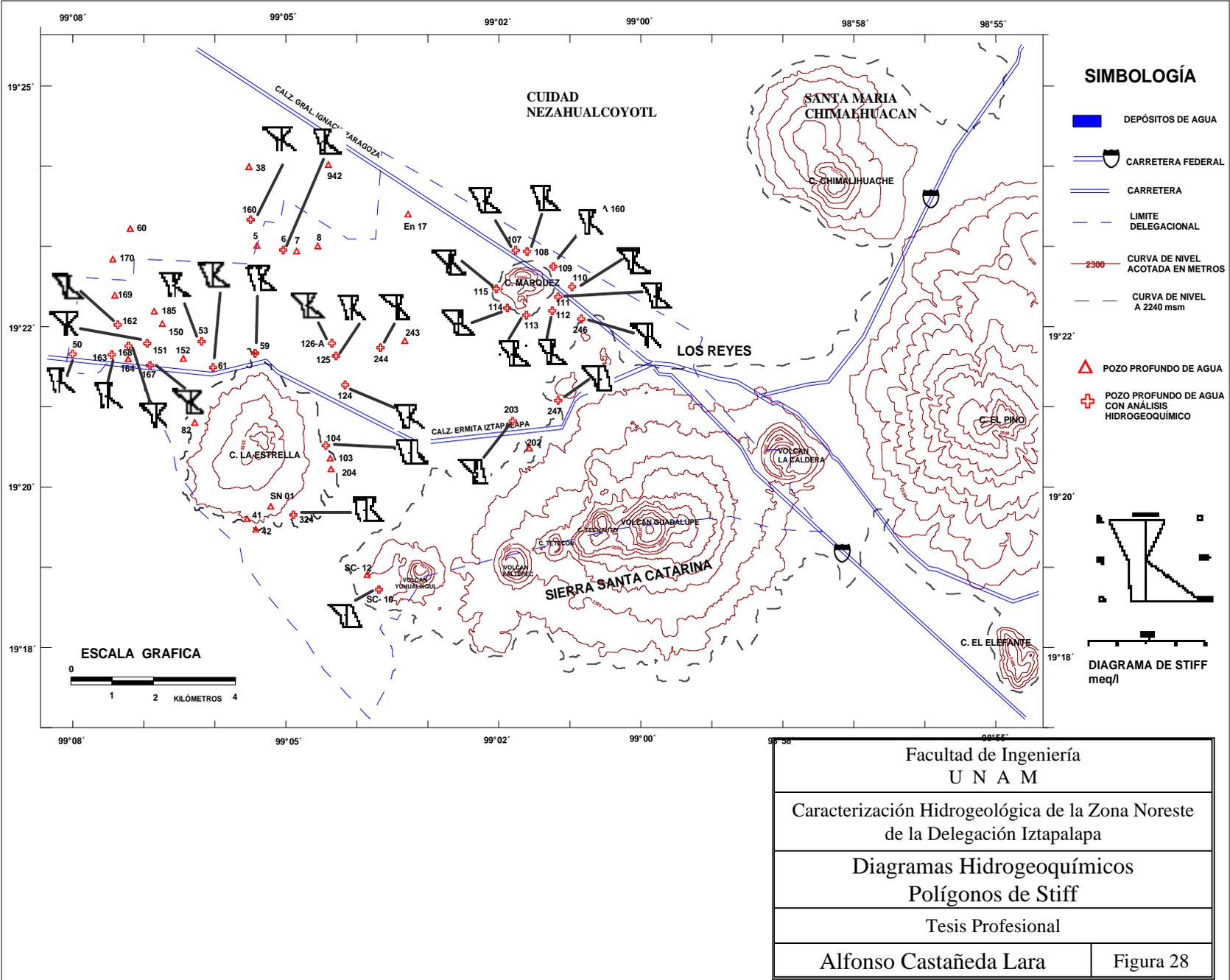
En la tabla 14 se muestra los contenidos iónicos correspondientes a los análisis químicos hechos por la DGCOH, en muestras de pozos dentro del área de estudio, también se muestra el balance de cargas en los pozos seleccionados.

La realización de diagramas en el mapa hidrogeoquímico de los polígonos de Stiff, para determinar la variación espacial del agua subterránea, que se presentan en la figura 28, se observa que los diagramas se agrupan en regiones específicas, y por lo mismo existe una distribución marcada de acuerdo con el tipo de agua. La figura muestra que los pozos más mineralizados, están situados en las inmediaciones sur del Cerro la Estrella y Santa Catarina. Algunos pozos de la parte interior de la planicie también están incrementando su mineralización, lo cual puede manifestar circulación a través de zonas preferenciales. Parte de los contenidos de NaCl pueden asociarse a influencia antrópica o a la aportación de las arcillas.

El diagrama triangular de Piper mostrado en la figura 29, en el triángulo de los cationes se tuvo una tendencia lineal hacia el vértice que representa el 100% de Na+K, es decir del tipo de agua sódico. En el diagrama triangular de los aniones, se tuvieron dos direcciones preferenciales en la disposición de las muestras, una que indica incremento de la concentración de los cloruros del tipo clorurada y otra que señala aumento de los valores de bicarbonatos del tipo bicarbonatada. La tendencia de las muestras en el diagrama triangular sugiere que representan una mezcla de aguas, en diferentes proporciones. En general la tendencia de las aguas cae dentro del tipo de agua bicarbonatada sódicas, aunque en forma puntual caen en otros tipos de aguas (Fig.29).

N-Pozo	Nombre del Aprovechamiento	Fecha		Sol.T.	Alc	D.Tot	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	PH	Cond	rHCO <sub>3</sub>	rSO <sub>4</sub>	rCl	rNa	rK	rNa+rK	rCa	rMg	% Balance
		M	A																						
				mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
324	Estrella 2	7	96	752	346.7	351	105	10	55	50	0.3	121.8	81.12	422.73	7.8	1151	6.93	1.69	3.44	4.565	0.256	4.822	2.5	4.52	0.96
244	Iztapalapa 8	3	94	1740	1000	53	600	40	8	10	0.3	287	84.46	1219.39	8.6	2574	19.99	1.76	8.1	26.087	1.026	27.113	0.5	0.66	2.73
107	Peñón 1	9	96	368	190.4	107	72	15	20	15	0.1	52.8	21.16	232.41	7.6	533	3.81	0.44	1.49	3.130	0.385	3.515	0.75	1.65	1.44
108	Peñón 2	9	96	392	192	120	65	15	19	17	0.1	45.2	23.93	234.24	7.6	523	3.84	0.5	1.28	2.826	0.385	3.211	0.85	1.56	0.05
109	Peñón 3	9	96	388	213.8	116	72	14	18	17	0.1	50.4	11.94	260.47	7.7	544	4.27	0.25	1.42	3.130	0.359	3.489	0.85	1.48	1.11
110	Peñón 4	9	98	492	238.9	111	92	14	18	15	0.1	66.7	2.48	291.58	7.9	628	4.78	0.05	1.88	4.000	0.359	4.359	0.75	1.48	0.94
111	Peñón 5	9	96	412	279.6	146	102	16	22	22	0.1	71.6	15.63	340.99	7.9	722	5.59	0.33	2.02	4.435	0.410	4.845	1.1	1.81	1.19
112	Peñón 6	9	96	440	193.9	88	66	13	14	12	0.1	34.8	11.94	236.68	8	460	3.88	0.25	0.98	2.870	0.333	3.203	0.6	1.15	1.57
113	Peñón 7	9	96	396	237.7	110	90	15	17	16	0.1	47.7	23.93	289.75	8.1	586	4.75	0.5	1.35	3.913	0.385	4.298	0.8	1.4	0.81
114	Peñón 8	9	96	344	231	97	96	16	15	14	0.1	29.1	39.8	281.82	8.5	544	4.62	0.83	0.82	4.174	0.410	4.584	0.7	1.23	1.91
115	Peñón 9	10	96	496	238.9	79	113	14	13	10	0.2	49.2	38.33	291.58	8.1	680	4.78	0.8	1.39	4.913	0.359	5.272	0.5	1.07	0.95
104	Panteón Civil Iztapalapa 2	9	96	616	233.5	207	90	8	32	30	0.4	64.7	81.66	284.87	7.7	816	4.67	1.7	1.83	3.913	0.205	4.118	1.5	2.63	0.21
204	Panteón Civil Iztapalapa 3	7	96	636	220	238	107	10	38	33	0.3	64.7	162.7	268.4	7.7	900	4.4	3.39	1.83	4.652	0.256	4.909	1.65	3.13	0.29
6	Agrícola Oriental 4	2	96	1052	616	381	190	29	50	70	0.1	152	3.24	751.52	7.4	1630	12.32	0.07	4.29	8.261	0.744	9.004	3.49	4.11	0.19
151	Sector Popular 2	7	94	808	213	85.8	154	25	12	15	0.1	163	11.58	259.86	7.9	918	4.26	0.24	4.6	6.696	0.641	7.337	0.75	0.99	0.16
167	Viga 1	10	96	464	174.6	99	100	15	13	18	0.1	99.9	11.87	212.89	7.4	659	3.49	0.25	2.82	4.348	0.385	4.732	0.9	1.07	1.05
168	Viga 2	10	96	484	161.5	86	100	14	12	15	0.1	102.6	11.43	197.03	7.3	701	3.23	0.24	2.89	4.348	0.359	4.707	0.75	0.99	0.6
162	Unidad Modelo 1	8	96	240	142.5	53	54	9	8	8	0.2	19.6	9.33	173.85	7.4	345	2.85	0.19	0.55	2.348	0.231	2.579	0.4	0.66	0.41
163	Unidad Modelo 2	8	96	354	184.4	113	57	8	16	19	0.1	32.1	15.87	225.09	7.4	471	3.69	0.33	0.91	2.478	0.205	2.683	0.95	1.32	0.21
125	Purísima Iztapalapa 3	9	96	684	353	233	127	12	36	34	0.2	113	16.24	430.66	7.8	963	7.06	0.34	3.19	5.522	0.308	5.829	1.7	2.96	0.5
53	Granjas San Antonio	9	96	848	474	318	173	20	48	48	0.1	165	2.36	578.28	7.7	1256	9.48	0.05	4.65	7.522	0.513	8.035	2.4	3.95	0.68
82	Los Reyes Iztapalapa	7	96	836	467.5	389	156	12	63	52	0.1	178	33.5	570.35	7.6	1256	9.35	0.7	5.02	6.783	0.308	7.090	2.59	5.18	0.67
41	Granjas Estrella 1	8	96	768	187.7	336	86	9	52	49	0.5	58.4	255.3	228.75	7.4	942	3.75	5.31	1.65	3.739	0.231	3.970	2.45	4.28	0.22
246	Dep San Sebastian	9	96	1492	718	253	415	32	42	32	0.5	185	199.3	875.96	8	2198	14.36	4.15	5.22	18.043	0.821	18.864	1.6	3.46	0.36
247	Mdo. Astahuacan	6	96	2092	696	499	470	32	86	58	1	219	529.6	849.12	7.8	2826	13.92	11.03	6.18	20.435	0.821	21.255	2.89	7.08	0.1
126-A	Purísima Iztapalapa 7	9	96	560	319	165	128	14	25	25	0.1	96.5	2.56	389.18	7.8	858	6.38	0.05	2.72	5.565	0.359	5.924	1.25	2.06	0.39
SC-10	Santa Catarina 10	10	93	1724	740	524	390	36	76	77	0.1	139	418	902.8	8	2462	14.8	8.7	3.92	16.957	0.923	17.880	3.84	6.25	1
61	Iztapalapa 1	10	96	1116	625.5	471	235	19	72	70	0.1	250	13.46	763.11	7.5	1674	12.51	0.28	7.05	10.217	0.487	10.705	3.49	5.92	0.07
160	Tlacotal	11	96	920	409	177	205	25	23	33	0.1	171	15.61	498.98	7.6	1256	8.18	0.33	4.82	8.913	0.641	9.554	1.65	1.89	0.89
203	S Cruz Meyehualco 2	9	96	1620	603.6	313	415	30	55	35	0.3	170	380.2	736.27	8.1	2302	12.07	7.92	4.8	18.043	0.769	18.813	1.75	4.52	0.59
169	Viga 3	9	95	916	249	177	210	24	26	28	0.1	269	22.68	303.78	7.7	1413	4.98	0.48	7.59	9.130	0.615	9.746	1.4	2.14	0.9
124	Purísima Iztapalapa 2	9	96	576	283.2	189	104	10	29	28	0.2	90	25.12	345.26	7.8	795	5.66	0.52	2.54	4.522	0.256	4.778	1.4	2.39	0.99
50	Banjidal	11	96	272	135.4	84	40	7	12	14	0.1	20.5	7.39	165.31	7.4	335	2.71	0.15	0.58	1.739	0.179	1.919	0.7	0.99	2.27
59	Iztapalapa 2	8	96	964	476.7	401	165	15	63	57	0.1	184.4	42.32	581.33	7.6	1361	9.53	0.88	5.2	7.174	0.385	7.559	2.84	5.18	0.1

Tabla. 14.- Balance de cargas en los pozos seleccionados y contenidos iónicos correspondientes a los análisis químicos hechos por la DGOH.



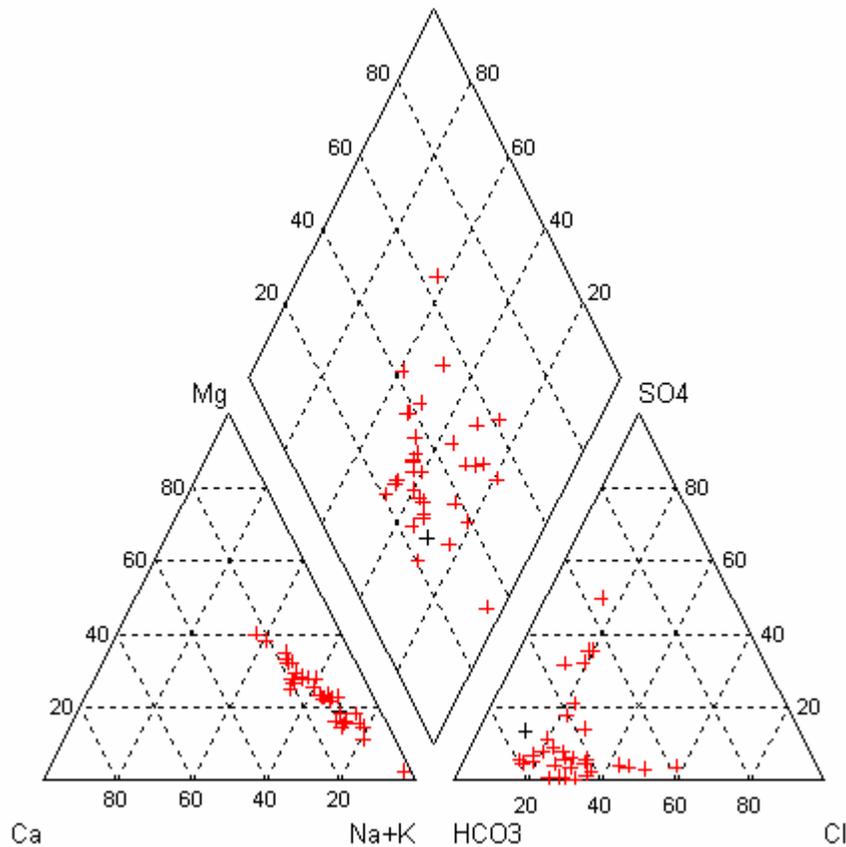


Fig. 29.- Diagrama triangular de Piper mostrando los valores de cationes y aniones en porcentaje, deduciendo el tipo de aguas de acuerdo a este diagrama.

#### Evolución temporal de la calidad del agua en pozos

La variación espacial de la calidad del agua (para ciertas áreas de Delegación Iztapalapa), se observa la zona de peor calidad definida con base en sólidos disueltos y alcalinidad, aparece en la planicie hacia la Sierra Santa Catarina, esto es asociado a la influencia de la extracción de agua y por efectos antrópicos dados por la presencia de fuentes contaminantes, y desde el punto de vista de sólidos totales disueltos la mejor calidad del agua extraída se encuentra hacia el noroeste de la Delegación, fuera de la influencia de los antiguos basureros principalmente. Por otro lado es necesario anotar la influencia que la extracción ejerce sobre el acuitardo induciendo agua de este hacia los pozos, esto tiene varios efectos; 1) entradas al pozo de agua con salinidad no adecuada, 2) consolidación y la generación de fracturas, y 3) la contaminación del agua y la matriz de las unidades hidrogeológicas

Fuentes principales de deterioro de la calidad del agua subterránea.

En lo que corresponde a las fuentes que alteran la calidad del agua subterránea producida por los pozos de Iztapalapa, estas son de dos tipos, natural y antrópica.

La primera está relacionada con la calidad de agua de saturación de los diferentes materiales geológicos que conforman el acuífero y el acuitardo; adicionalmente, se considera que los cambios en la calidad del agua se relacionan al manejo particular del agua subterránea a través de las diversas políticas de extracción a que son sujetos los pozos.

La segunda, la antrópica, corresponde a cambios en la calidad del agua subterránea extraída debido a sustancias contaminantes provenientes de lixiviados producto de la interacción agua de lluvia y la basura depositada en los tiraderos de Santa Cruz Meyehualco y San Lorenzo Tezonco; este efecto se torna principal en las aguas subterráneas de la planicie de la Sierra de Santa Catarina, un efecto similar es resultado de filtraciones de aguas residuales transportadas por medio de los antiguos cauces de ríos y diversos obras de drenaje existentes (Canal de Chalco, el río Churubusco y el Canal de Garay). A este tipo de fuente contaminante se le debe sumar las descargas directas de aguas residuales domésticas al subsuelo por falta de obras de drenaje; los efectos de estas fuentes contaminantes son mayormente las establecidas en las zonas habitacionales del Cerro de la Estrella y el Peñón del Marqués, en el pozo Iztapalapa 1 se detectó, una cantidad importante de materia orgánica en suspensión, así como un olor a ácido sulfhídrico (esto último confirma la naturaleza reductora del medio). Y se le relaciona con la influencia de aguas residuales. Por otro lado, varios de los pozos tienen concentraciones de plomo que se consideran en exceso, lo cual se considera como indicador de contaminación de fuentes industriales.

Análisis de la información hidrogeoquímica.

El análisis de la información hidrogeoquímica, señala la existencia de una variación espacial y temporal de la calidad del agua extraída en los pozos. Varios son los factores que pueden condicionar dicha evolución; se considera que la evolución de la composición química es producto de mezclas de agua inducidas por el extracción, en un acuífero heterogéneo en donde existe una variación vertical de la calidad del agua. De manera general los datos sugieren la presencia de al menos dos miembros extremos cuya composición química general es: 1) miembro extremo de baja salinidad, alcalinidad baja y valores mínimos de elementos traza (hierro y manganeso) y 2) agua de mayor salinidad (elevadas concentraciones de sulfato, cloruro y alcalinidad) con elevadas concentraciones de hierro y manganeso; esta agua puede ser de mayor temperatura que la del miembro extremo de baja salinidad.

Se observan ciertas diferencias en las mezclas de agua detectadas, situación que puede ser un reflejo de que los miembros extremos presentan una composición con ligeras variaciones, es indicar la composición de los miembros extremos no es constante dentro de la zona de estudio. De este modo, la calidad del agua extraída en los pozos representa una mezcla y por lo tanto existe la posibilidad que considerando las condiciones hidrogeológicas particulares y ajustando

factores como la profundidad del pozo, diseño constructivo, caudal de extracción y tiempo de operación, sea posible obtener agua de la calidad que se requiere para el consumo humano.

Respecto al funcionamiento de las aguas subterráneas de la Delegación, los contenidos de litio, manifiestan la existencia de agua ascendente de profundidad, mientras que a su vez los contenidos de sodio indican el aporte de agua somera.

El análisis muestra evidencia de que la calidad del agua subterránea en la Delegación Iztapalapa se deteriora conforme pasa el tiempo, principalmente hacia las partes centro y suroeste. En esa región las condiciones reductoras que se presentan en forma natural debido a la presencia de materia orgánica, movilizan elementos hierro y manganeso. La modelación hidrogeoquímica realizada sugiere que las concentraciones de estas especies en el agua subterránea, no manifiestan estar controladas por la solubilidad con relación a minerales carbonatados (siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) y rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$ )). De este modo, no es recomendable proponer el control de la presencia del hierro y manganeso con base en mecanismos que involucren equilibrio agua subterránea/carbonatos en el sistema analizado. Se considera que las condiciones de sobresaturación observadas, son ocasionadas por la presencia de compuestos que inhiben la precipitación expedita de siderita y rodocrosita.

Existen grandes concentraciones de carbono orgánico disuelto ( $>4\text{.mg}^*/\text{l}$ ) en el agua subterránea de la Delegación; su origen se relaciona con dos fuentes potenciales: 1) natural a partir de la desintegración de materia orgánica y 2) relacionado con la presencia de residuos sólidos municipales depositados en las inmediaciones de la zona de estudio. La presencia de estos compuestos orgánicos en el agua utilizada para el abastecimiento poblacional es indicativo de que existe posibilidad de la formación de compuestos organoclorados (trihalometanos) que se producen por efectos de la cloración del agua. De este modo, bajo ningún aspecto se deberá clorar el agua de abasto doméstico, se recomienda el uso de luz ultravioleta, opción que a la larga resulta más económica

La información generada, refleja que las condiciones redox que prevalecen en la zona de estudio tiene una importancia fundamental en la movilización de las especies que más problemas causan a la calidad del agua abastecida en la Delegación Iztapalapa.

De acuerdo con la hidrodinámica, se interpreta que las condiciones redox en las aguas del acuitardo y de la parte superior de las unidades acuíferas, manifiestan un ambiente anaerobio donde las reacciones de oxidación de materia orgánica producen valores del potencial Eh en el intervalo correspondiente a las reacciones de reducción de hidróxidos de Fe(III) y sulfatos.

En la profundidad ( $> 400\text{m}$ ) las condiciones redox no se han evaluado ya que la información disponible no lo permite. Sin embargo, la evidencia geológica señala que el medio fisurado de esta zona no contiene materia orgánica por lo que se espera que los valores sean menores a los del acuitardo, condición en la cual la movilidad del hierro y manganeso puede ser menor.

Las condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas (Los controles de solubilidad aparentemente no son resolutivos) determinadas, permiten proponer una técnica sencilla y simple

que puede funcionar para disminuir los valores de  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$  detectados. Existe una técnica que potencialmente puede colaborar en la disminución de las concentraciones de hierro y manganeso presentes en el agua extraída en los pozos existentes perforados en la porción granular del acuífero. Esta técnica, incluye la inyección de un volumen importante de agua saturada con oxígeno disuelto al ambiente reductor que existe en la unidad acuífera de interés. La entrada de agua con oxígeno disponible ocasionará la precipitación del  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$  en forma de óxidos e hidróxidos, que se depositarán en la superficie de las partículas granulares que componen el material acuífero. Las concentraciones de  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$  presentes en el agua subterránea en la zona, aunque elevadas si se consideran en relación con los estándares de calidad para agua potable, son bajas como para causar una disminución notable en la conductividad hidráulica y porosidad del acuífero por efecto de obturación de los espacios disponibles. En el mejor de los casos, esta técnica es equivalente a una planta de tratamiento natural, que además de disminuir sensible el  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$  tiene otros beneficios que se reflejarán en que: I) puede no ser necesario utilizar las plantas de tratamiento a pie de pozo y II) consecuente no será necesario manejar los lodos residuales de esas plantas.

En resumen, de acuerdo con la evolución de la calidad del agua en los pozos, se interpreta que la contaminación natural inducida del acuitardo se está dando en el centro y oriente de la planicie de Iztapalapa, con una dirección en ese mismo sentido (de centro a oriente).

También la calidad del agua se ha degradado en la planicie de la Sierra de Santa Catarina y Cerro de la Estrella, debido a las acciones directas de la población que se asienta en sus límites, así como por la infiltración de lixiviados de los basureros de Santa Cruz Meyehualco y San Lorenzo Tezonco y la inyección de agua residual tanto tratada, como sin tratamiento alguno.

El tipo de agua de acuerdo al diagrama de Piper las aguas caen generalmente dentro del tipo de agua bicarbonatada sódicas. En lo relativo a sitios futuros para perforar nuevos pozos dentro del área de la Delegación, se recomienda no perforar directamente en el material fisurado de una gran permeabilidad hidráulica que favorece la infiltración, como el de la Sierra de Santa Catarina y Cerro de la Estrella. Ahí, se ha degradado la calidad del agua debido a las acciones directas de la población que se asienta en su vecindad, y desde el punto de vista de sólidos totales disueltos la mejor calidad del agua que se puede obtener, se encuentra hacia el norte de la Delegación.

### 5.5.- Pruebas de bombeo.

Las pruebas de bombeo tienen dos objetivos principales. El primero es determinar las características hidráulicas de los acuíferos, como su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, existencia de barreras impermeables cercanas, así como de recarga y definir y confirmar el tipo de respuesta hidráulica del acuífero (C.N.A., 1996).

El segundo objetivo es proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o la relación caudal-abatimiento, para seleccionar el equipo de bombeo adecuado. Dicha definición deberá basarse además de los resultados de estas pruebas de bombeo (aforos) en las características físico-químicas de las aguas extraídas.

En las pruebas de bombeo de las reposiciones de los pozos Peñón N°5 y Peñón N°6, programados por la DGOH (2002), se pudo hacer la toma de datos, con el correspondiente permiso de la DGCOH. Las pruebas de bombeo se realizaron a cierto tiempo a caudal escalonado, midiendo la evolución del nivel piezométrico, estas mediciones se hicieron en el pozo bombeado y en sus pozos de observación respectivos (piezómetros).

Como paso previo a la realización de las pruebas de bombeo, se contó con la información geológica en cortes litológicos a fin de conocer las características previas del acuífero y sus límites horizontales y rocas que lo limitan.

Se midieron los tiempos de abatimientos de niveles piezométricos y recuperación, de acuerdo a los recomendados por la CNA (1996) tanto en los pozos bombeados como en los pozos de observación. Los instrumentos usados para medir el nivel del agua fueron 2 sondas eléctricas.

La determinación de caudal se realizó con el método de orificio calibrado, este es un método preciso y el más usado en los aforos de los pozos, esta basado en la aplicación del teorema de Bernoulli (Figura 30), que permite calcular el caudal en función de la presión, mediante la siguiente expresión.

$$Q = C' \sqrt{h}$$

donde

Q = Caudal en l/s

h = Altura del agua en el tubo transparente en cm

C' = Coeficiente que depende de:

-La velocidad del agua

-La carga h

-La rugosidad de las paredes de la tubería.

-La relación de los diámetros del orificio y la tubería.

Los valores de  $C'$  se han determinado experimentalmente en función de la relación entre los diámetros del orificio y la tubería de descarga (C.N.A.).

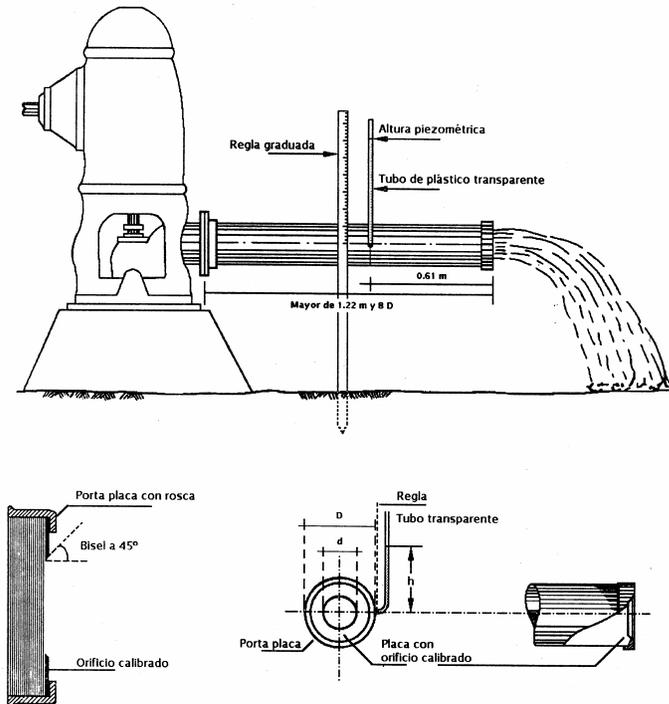


Fig. 30.- Esquema que muestra la determinación de caudal, con el método de orificio calibrado

Los datos obtenidos en las pruebas de bombeo tanto de abatimientos como de recuperación de niveles de los pozos Peñón 5 y Peñón 6, se presentan en las tablas 15 y 16.

La realización de la prueba de bombeo en el pozo Peñón 5, no cumplió con los objetivos trazados, ya que después de 12 horas de bombeo, el pozo que se utilizó como pozo de observación, previamente parado su operación 24 horas antes, inicio nuevamente su operación de abastecimiento de agua por la unidad departamental de operación, Esta unidad hecho andar este pozo debido a causas desconocidas. Por esta razón los datos obtenidos no fueron suficientes para una interpretación correcta. Se determino el fin de la toma de datos por la cercanía de este pozo de observación (10 m) y su correspondiente influencia hacia el pozo bombeado, y se desecho también los datos obtenidos en este pozo de observación por el abatimiento del bombeo.

La realización de la prueba de bombeo en el pozo Peñón 6 (Fotos 1-5) se desarrollo en forma normal programada por la DGCOH, se observó que durante la prueba existieron varios errores de operación, que repercutió en forma negativa en el análisis posterior de la prueba, uno de ellos fue que después de bombear 6 horas en el segundo escalón y en la s 13 horas de bombeo

en el tercer escalón, se paro el motor por situaciones mecánicas. Otros problemas de logística fueron observados, uno muy importante fue el no dejar que se obtuviera el máximo abatimiento para cada escalón, cambiando súbitamente a otro caudal (otro escalón) sin obtenerse el régimen permanente, otros errores como no contar con la capacidad del motor apropiado para obtener los caudales constantes deseados, también el equipo para la descarga del agua hacia el drenaje no fue la apropiada, realizada por un tubo de PVC y desecho de tinacos de asbesto (Foto 3 y 4). Por tales causas no fueron interpretables los datos obtenidos en campo.

Debido a estos acontecimientos se determinó recopilar pruebas de bombeo realizadas por la DGCOH (1996) para objetivos específicos para definir trasmisibilidades, también se consulto pruebas de bombeo realizados en la zona de estudio por investigadores de otras instituciones (Vázquez Sánchez E., 1995 y Maderey Laura, 2000).









Foto N° 1.- Se observa el armado de tubería de la bomba, con la ayuda de dos personas y un tripie, para el desarrollo y aforo del pozo Peñón N°6.



Foto N° 2 y 3.- Se observa el desarrollo de las pruebas de bombeo a caudal escalonado, la descarga del agua se condujo en forma no apropiada por un tubo de PVC y desecho de tinacos de asbesto, hacia el drenaje para evitar influencia de esta agua hacia el pozo.



Foto N° 4.- Se observa el desmontado del equipo utilizado para las pruebas de bombeo, El cabezal y el motor están unidos por una flecha para el movimiento de los tazones de la bomba.



Foto N° 5.- Pozo terminado y cegado temporalmente, listo para su equipamiento, El filtro utilizado para este pozo (Peñón N°6) es de cuarzo  $\phi$  1/16" .

## 5.6 Propiedades hidráulicas.

Las propiedades hidráulicas de las rocas y depósitos no consolidados determinan de manera importante la cantidad de agua que pueden almacenar, transmitir y ceder. Dichas propiedades dependen de diversos factores geológicos, tanto de índole genético como la granulometría y la composición mineralógica como posteriores a la génesis de las unidades geológicas, entre estos factores destacan la compactación, cementación, fracturamiento, erosión, intemperismo, entre otros (C.N.A., 1996)

Las propiedades hidráulicas obtenidas y recopiladas, en base a pruebas de bombeo son la conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y transmisividad o transmisibilidad. Sus definiciones son las siguientes:

### Transmisibilidad.

El concepto de transmisividad fue introducido por Theis en 1935, y se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada, es decir la capacidad de un medio para transmitir agua (Custodio. E., 1976).

La ley de Darcy ha sido expresada como:

$$Q = k A i.$$

Ahora bien si la sección A igual a la del acuífero tiene una longitud L y una altura b, tendremos

$$A = b \cdot L$$

y la ley de Darcy se puede escribir como:

$$Q = K \cdot b \cdot L \cdot i$$

Al producto  $K \cdot b$  se le llama transmisividad y se designa por T, ( $T = k \cdot b$ ) quedando la ley de Darcy en la forma:

$$Q = T \cdot L \cdot i$$

Sus dimensiones son las de una velocidad por una longitud, es decir

$$(T) = [L]^2 [T]^{-1}; \text{ expresándose en consecuencia en } m^2/\text{día o } cm^2/\text{seg.}$$

Ésta determina directamente el rendimiento del acuífero que atraviesa el aprovechamiento hidráulico. A través de ella se pueden calcular la cantidad de agua que puede proporcionar un acuífero en una sección de interés determinada o estimar el rendimiento

probable de una captación. Sin embargo esta propiedad no describe satisfactoriamente la velocidad real de movimiento del agua subterránea (C.N.A., 1996).

**Coefficiente de almacenamiento**

El coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) se define como la cantidad de agua que libera una columna del acuífero, de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende (o asciende) una unidad. Por lo anterior  $S$ , es un coeficiente adimensional (C.N.A., 1996).

Según la definición, en los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz, es decir, al volumen de agua gravífica extraído de una unidad de acuífero saturado, En cambio en los acuíferos confinados los únicos factores determinantes son los pequeñísimos efectos elásticos del agua y del acuífero, teniendo gran importancia el espesor de los acuíferos (Custodio. E., 1976).

El coeficiente de almacenamiento es un concepto que determina la capacidad que tiene un acuífero, para almacenar o ceder agua, misma que depende de manera directa, tanto de las características físicas de agua, como de las condiciones petrofísicas e hidráulicas del acuífero, así como de las presiones a las que se encuentra sometida el agua (presión intersticial o de poro) y las partículas granulares (presión intergranular o efectiva).

Así por ejemplo, si el nivel piezométrico desciende, la presión intersticial disminuye y la intergranular aumenta y las moléculas del agua se expanden, provocando que los materiales se compriman o compacten. Al contrario, si el nivel aumenta, la presión intersticial aumenta y la intergranular disminuye, provocando que los materiales se expandan. Por lo anterior, los materiales que forman un acuífero, ceden o retienen cierta cantidad de agua, según ascienda o descienda el nivel del agua subterránea (C.N.A., 1996).

Su definición está basada en que  $S$  representa el valor promedio de respuesta de la parte del acuífero afectada por el bombeo.

$$S = S_s b$$

donde:

$S$  = Coeficiente de almacenamiento promedio del acuífero confinado (adimensional)

$S_s$  = Coeficiente de almacenamiento específico del acuífero confinado ( $m^{-1}$ )

$b$  = Espesor saturado del acuífero confinado (m)

El coeficiente de almacenamiento específico ( $S_s$ ) se define como la cantidad de agua liberada retenida por un volumen unitario de material del acuífero confinado, cuando el nivel del agua subterránea desciende o asciende una unidad,  $S_s$  se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta)$$

donde:

- $S_s$  = Coeficiente de almacenamiento específico ( $m^{-1}$ )
- $\rho$  = Densidad del agua ( $kg/m^3$ )
- $g$  = Valor de la aceleración de la gravedad ( $=9.81 \text{ mis}^2$ )
- $\alpha$  = Compresibilidad del acuífero (Pascales<sup>-1</sup>)
- $n$  = Porosidad del acuífero (adimensional)
- $\beta$  = Compresibilidad del agua en el acuífero (Pascales<sup>-1</sup>)

Los valores del coeficiente de almacenamiento  $S$  son completamente distintos según se trate de uno u otro caso. Como idea de orden de magnitud, se puede recordar que varía de 0,05 a 0,30 en condiciones libres y caer en el campo de las milésimas a cienmilésimas en condiciones semiconfinadas o confinadas ( $10^{-5}$  a  $10^{-3}$ ).

### Conductividad Hidráulica

De acuerdo a la ley de Darcy, el flujo de un fluido a través de un medio poroso de área  $A$ , es directamente proporcional a la pérdida de carga hidráulica y a un coeficiente  $K$ , e inversamente proporcional al trayecto recorrido de tal forma que la ley de Darcy se expresa como:

$$Q = K i A$$

o bien

$$Q/A = Vd = K i$$

donde:

$Q$  = Gasto ( $m^3/\text{día}$ )

$K$  = Constante de proporcionalidad, conductividad hidráulica ( $m/\text{día}$ )

$i$  = Gradiente hidráulico (adimensional)

$A$  = Área transversal perpendicular al flujo ( $m^2$ )

$Vd$  = Velocidad aparente de flujo ( $m/\text{día}$ ), también conocida como "Velocidad de Darcy".

Se conoce como conductividad hidráulica ( $K$ ) a la cantidad de agua, que bajo condiciones físicas específicas, circula a través de una sección unitaria, perpendicular a la dirección de flujo, bajo un gradiente unitario

La conductividad hidráulica es una propiedad que depende de las características del fluido y de la permeabilidad del medio poroso a través del cual circula y de la fuerza de gravedad ( $g$ ).

La conductividad hidráulica se expresa por la siguiente fórmula:

$$K = k \rho g / \mu$$

donde:

- K = Conductividad hidráulica (mis)
- k = Permeabilidad intrínseca (darcys)
- $\rho$  = Densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  = Viscosidad dinámica del agua (cP)
- g = Aceleración de la gravedad ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ ).

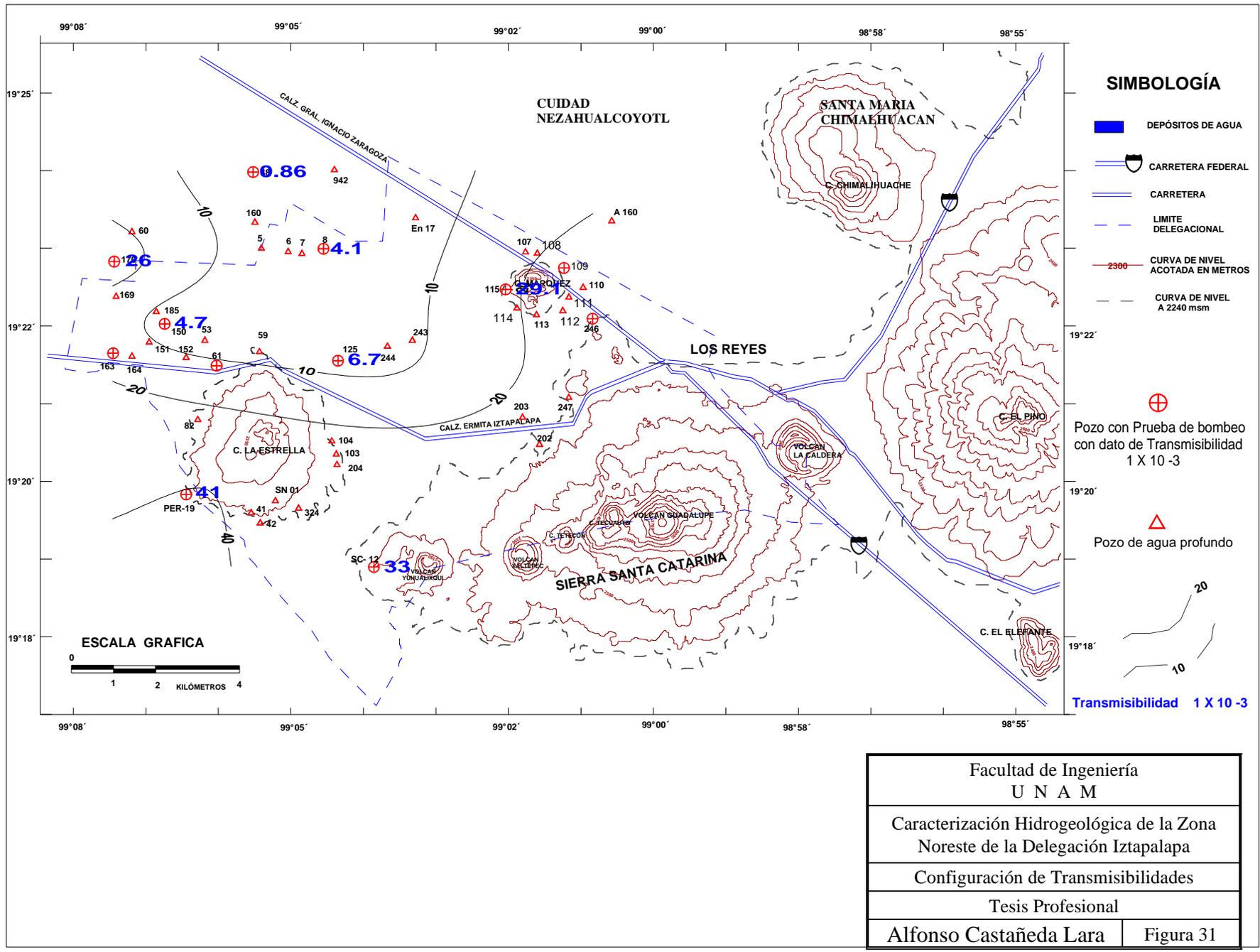
La conductividad hidráulica es uno de los principales parámetros que se obtienen del análisis de datos de pruebas de bombeo, también puede estimarse de pruebas con trazadores en el acuífero de interés o de ensayos de laboratorio con permeámetros. La Tabla N°. 17 muestra valores aproximados del orden de magnitud de la conductividad hidráulica en diversos materiales y rocas.

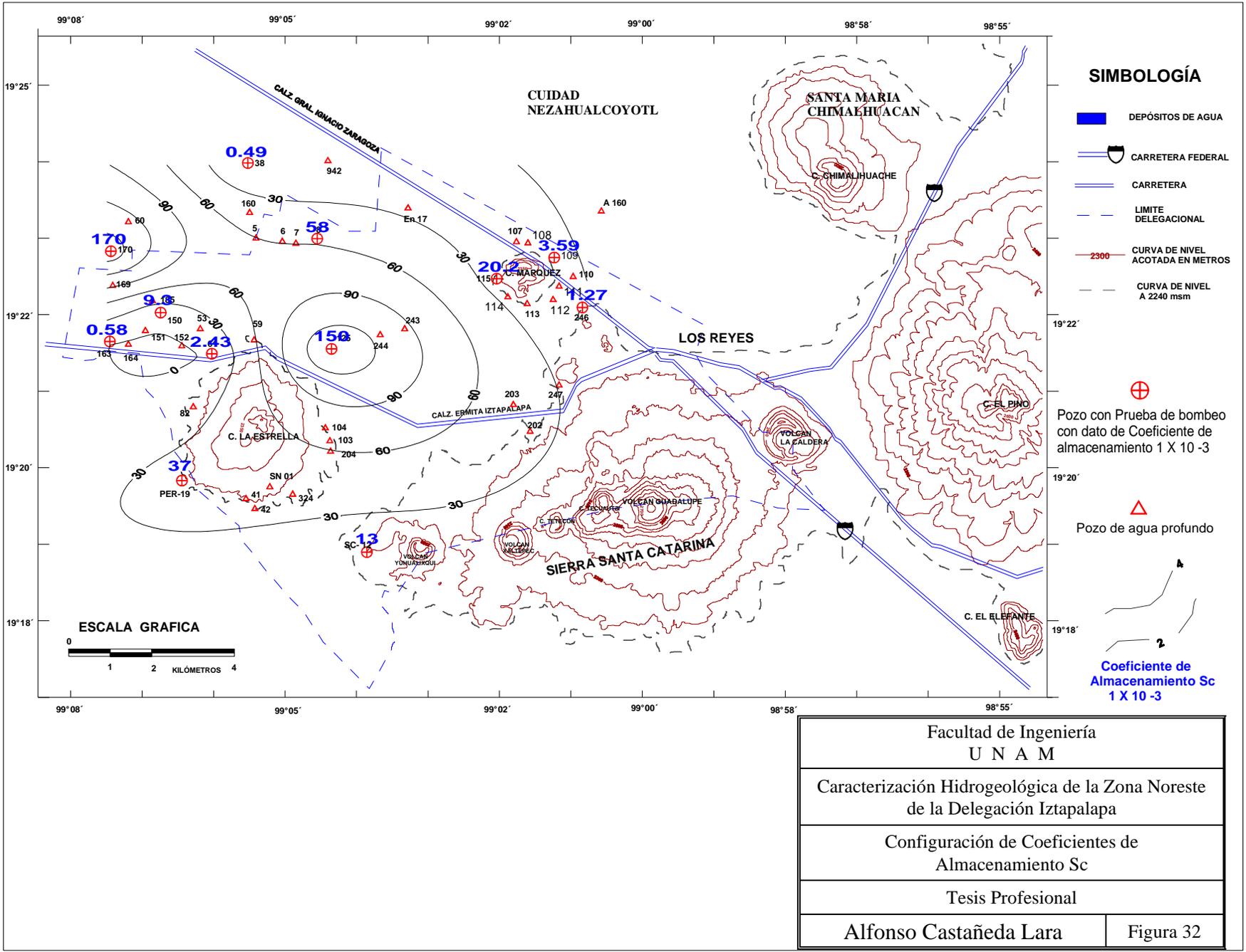
MATERIAL	K (m/día)
Materiales no consolidados	
Arcilla	$10^{-3} - 10^{-8}$
Arcilla débilmente arenosa	$10^{-1} - 10^{-2}$
Arcilla arenosa	$10^{-1} - 1$
Arena arcillosa	0.5 - 1.0
Arena de grano fino	1 - 5
Arena de grano medio	5 - 15
Arena de grano grueso	15 - 50
Arena con grava	5 - 100
Grava	100 - 200
Arcilla, arena y grava mezcladas	$10^{-3} - 10^{-4}$
Rocas	
Arenisca	$10^{-3} - 1$
Roca carbonatada con porosidad secundaria	$10^{-2} - 1$
Lutita	$10^{-7}$
Rocas sólidas	$<10^{-5}$
Rocas fracturadas	$3 \times 10^2$
Rocas volcánicas	$10^3$

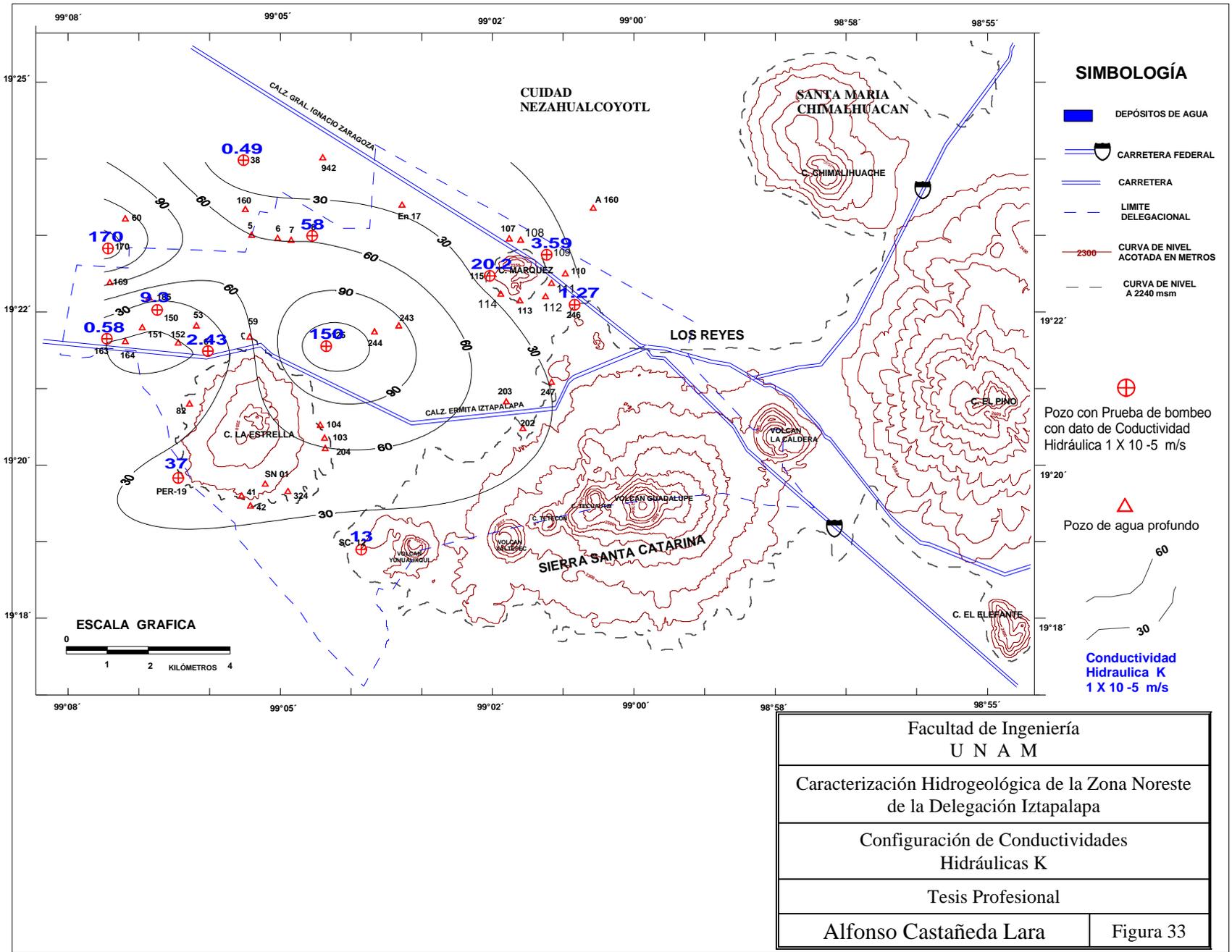
Tabla 17.- Conductividad hidráulica (K) de materiales diversos (Mijailov, 1990 y Kruseman and Ridder, 1990).

Por otro lado, debido a que no fue posible interpretar los datos obtenidos en campo, los valores de transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica, se recopiló esta información de pruebas de bombeo realizadas por la DGCOH (1996) para definir transmisibilidades, también se recopiló información de pruebas de bombeo realizados en la zona de estudio por investigadores de otras instituciones (Vázquez Sánchez E., 1995 y Maderey Laura, 2000) estos resultados se muestran en la tabla 18.

Se realizaron configuraciones de acuerdo a valores de transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica, mostrados en las figuras 31, 32 y 33.







N° Pozo	Tipo acuífero	Autor	Unidad	Método	T	Tf	Tm	K Modelo Estandar	Khe Modelo Numerico	Kh	KV	Sy	Sc	B
					[m <sup>2</sup> /s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]				[m]
38 – Cd. Deportiva	Semiconfinado	Vázquez Sánchez E. 1995  DGCOH		Walton  Hantush	0.86 x 10 <sup>-3</sup>  2.4 x 10 <sup>-3</sup>			0.49 x 10 <sup>-5</sup>  1 x 10 <sup>-5</sup>	0.019 x 10 <sup>-5</sup>				0.9 x 10 <sup>-3</sup>	177  231.4
PER-19	Libre Doble porosidad	Vázquez Sánchez E. 1995	Qb-Tpal	Boulton y Streltsova  Rushton y Redshaw  Hantush	41 x 10 <sup>-3</sup>  86 x 10 <sup>-3</sup> 64 x 10 <sup>-3</sup> **	16 x 10 <sup>-3</sup>	65 x 10 <sup>-3</sup>	14 x 10 <sup>-5</sup>	Qb- 69 x 10 <sup>-5</sup> Tpal- 4.6 x 10 <sup>-5</sup>			0.08	0.5 x 10 <sup>-3</sup>	Qb- 296 Tpal 272  608
SC-12 – Santa Catarina 12	Libre Doble porosidad	Vázquez Sánchez E. 1995	Qb	Boulton y Streltsova  Rushton y Redshaw  Hantush	33 x 10 <sup>-3</sup>  19 x 10 <sup>-3</sup>	59 x 10 <sup>-3</sup>	5.9 x 10 <sup>-3</sup>	22 x 10 <sup>-5</sup>	13 x 10 <sup>-5</sup>			0.07		86
125 - Purísima Iztapalapa 3	Libre Doble porosidad	Vázquez Sánchez E. 1995  DGCOH	Qb	Boulton y Streltsova  Rushton y Redshaw  Hantush	6.7 x 10 <sup>-3</sup>  41.4 x 10 <sup>-3</sup>	7.4 x 10 <sup>-3</sup>	5.9 x 10 <sup>-3</sup>	82 x 10 <sup>-5</sup>	150 x 10 <sup>-5</sup>			0.08	0.8 x 10 <sup>-3</sup>	111  50
8 - Agrícola Oriental 6	Semiconfinado Doble porosidad	Vázquez Sánchez E. 1995  DGCOH	Qb-Qall	Boulton y Streltsova  Rushton y Redshaw  Hantush	4.1 x 10 <sup>-3</sup>  12.6 x 10 <sup>-3</sup> 8.4 x 10 <sup>-3</sup> **	1.7 x 10 <sup>-3</sup>	6.5 x 10 <sup>-3</sup>	6.4 x 10 <sup>-5</sup>	58 x 10 <sup>-5</sup>			0.08	3.3 x 10 <sup>-3</sup>	80  197
170 - Viga 4	Semiconfinado Doble porosidad	Vázquez Sánchez E. 1995  DGCOH	Qb-Qall	Boulton y Streltsova  Rushton y Redshaw  Hantush	26 x 10 <sup>-3</sup>  176 x 10 <sup>-3</sup>	26 x 10 <sup>-3</sup>		79 x 10 <sup>-5</sup>	170 x 10 <sup>-5</sup>				3 x 10 <sup>-3</sup>	183  222
150 - Sector Popular 1	Semiconfinado mediogranular	Vázquez Sánchez E. 1995	Qb-Qall	Walton  Rathod y Rushton  Hantush	4.70 x 10 <sup>-3</sup>			1.6 x 10 <sup>-5</sup>	9.3 x 10 <sup>-5</sup>				3.3 x 10 <sup>-3</sup>	298

		DGCOH			16 x 10 <sup>-3</sup>			4 x 10 <sup>-5</sup>					401	
109 - Peñón 3	Semiconfinado	Maderey. Laura 2000		Rushton y Redshaw	6.5 x 10 <sup>-3</sup> *					32 x 10 <sup>-5</sup>	3.59 x 10 <sup>-5</sup>		0.4 x 10 <sup>-3</sup>	202
61 - Iztapalapa 2	libre	Maderey. Laura 2000		Rushton y Redshaw	17.9 x 10 <sup>-3</sup> *					119 x 10 <sup>-5</sup>	2.43 x 10 <sup>-5</sup>		0.4 x 10 <sup>-3</sup>	150
163 - Unidad Modelo 2		Maderey. Laura 2000		Rushton y Redshaw	3.5 x 10 <sup>-3</sup> *					156 x 10 <sup>-5</sup>	0.58 x 10 <sup>-5</sup>		10 x 10 <sup>-3</sup>	215
246 - Depo. San Sebastián		Maderey. Laura 2000		Rushton y Redshaw	5.3 x 10 <sup>-3</sup> *					26.3 x 10 <sup>-5</sup>	1.27 x 10 <sup>-5</sup>		8 x 10 <sup>-3</sup>	202
115 - Peñón 9	Libre	DGCOH (1995)		Jacob	29.1 x 10 <sup>-3</sup>			20.2 x 10 <sup>-5</sup>						200
124 - Purísima Iztapalapa 2	Libre Doble porosidad	DGCOH		Hantush	22.3 x 10 <sup>-3</sup>			17 x 10 <sup>-5</sup> *						130
244 - Iztapalapa 8	Semiconfinado	DGCOH		Hantush	50.5 x 10 <sup>-3</sup>			27 x 10 <sup>-3</sup> *						185

Qb Rocas Basálticas, Cuaternario  
 Qall Sedimentos Aluvio-Lacustres, Cuaternario  
 Tpal Depósitos aluviales y piroclásticos, Plioceno Superior  
 T = Transmisividad  
 T<sub>f</sub> = Transmisividad de fracturas  
 T<sub>e</sub> = Transmisividad Equivalente

\* En los pozos con autor DGCOH  $K = T / b$  [m/s]  
 \* En los pozos con autor Maderey. L.  $T = K.b$  [m<sup>2</sup>/s]  
 \*\* Valores promedio

T<sub>m</sub> = Transmisividad de matriz  
 K = Conductividad Hidráulica  
 K<sub>h</sub> = Conductividad Hidráulica horizontal equivalente  
 S<sub>y</sub> = Rendimiento específico  
 S<sub>c</sub> = Coeficiente de almacenamiento  
 B = Profundidad explotación  
 29.1 x 10<sup>-3</sup> Datos usados para configuración

Tabla 18.- Resultados de pruebas de bombeo realizadas por la DGCOH (1996) y otros autores: Vázquez Sánchez E., 1995 y Maderey Laura, 2000, para definir con diferentes métodos, parámetros hidráulicos del acuífero.

### 5.7.- BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA.

El balance del subsistema acuífero Ciudad de México de la Cuenca de México, perteneciente a la zona de estudio, lo realizó la DGCOH (2000) por medio de un estudio asignado al contratista Lesser y Asociados.

Para el balance se calcularon las entradas y salidas de agua subterránea del subsistema, así como el diferencial entre entradas y salidas, que corresponde al cambio de almacenamiento.

Ecuación de balance.

Se estableció la ecuación general de balance de agua subterránea, en donde se establece que las entradas de agua al sistema son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} - \text{Cambio de almacenamiento} \dots\dots\dots(1)$$

Las Entradas son:

- Entrada por flujo subterráneo (Es)
- Recarga por drenado vertical de las arcillas superiores (Iv)

Las salidas son:

- Extracción por bombeo (Ext.)

El Cambio de Almacenamiento:

- Es el abatimiento producido por la sobre Explotación (As)

Por lo tanto la ecuación (1) queda como sigue:

$$\text{Es} + \text{Iv} = \text{Ext} + \text{As} \dots\dots\dots(2)$$

Entradas.

Las entradas de agua al sistema corresponden al aporte por flujo subterráneo o entrada subterránea proveniente de las infiltraciones que se generan en las estribaciones del acuífero. hacia la parte plana de la cuenca no existe infiltración vertical de agua de lluvia debido, por una parte, a la existencia de la mancha urbana y por otra, a la presencia de arcillas lacustres que corresponden al sedimento de los antiguos lagos de México. Sin embargo, dichas arcillas lacustres forman un acuitardo que se encuentra saturado y presenta un drenado vertical que alimenta al acuífero en forma indirecta.

### Cálculo de entradas por flujo subterráneo.

El flujo subterráneo se calculó utilizando la Ley de Darcy, en donde se establece que el caudal que pasa a través de una sección de terreno es igual a la transmisibilidad del material por la longitud del área considerada multiplicada a su vez por el gradiente hidráulico (Fig.-34). Al pie de las sierras que limitan a los valles, se trazaron celdas para el cálculo de la entrada de agua subterránea. Cada celda corresponde al área delimitada entre dos curvas equipotenciales y dos líneas de corriente. La suma del flujo que pasa a través de las celdas y que corresponden a la entrada por flujo subterráneo hacia la Ciudad de México, asciende a 296.61 Mm<sup>3</sup>/año.

#### 6. Celdas para el cálculo del flujo subterráneo

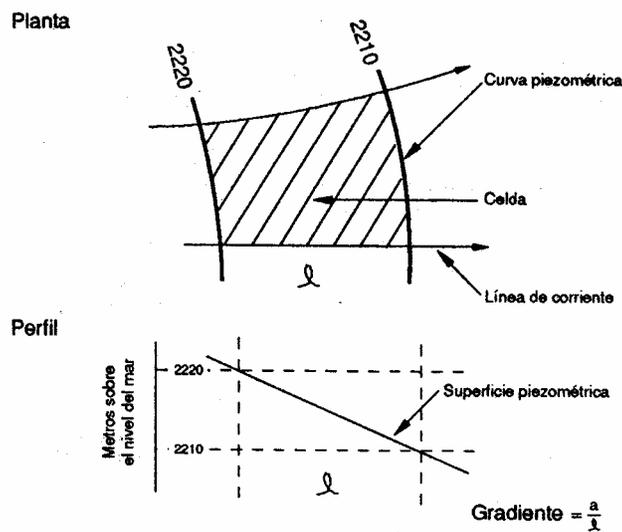


Fig. 34.- Esquema que muestra como se calcula las entradas de agua por flujo subterráneo.

### Salidas de agua (extracción por bombeo).

La salida más importante de agua en todos y cada uno de los subsistemas acuíferos de la Cuenca de México, corresponde a la extracción por bombeo. Se obtuvo un volumen de extracción anual (que corresponde a la salida de agua subterránea del sistema), de 370 Mm<sup>3</sup>/año para la Ciudad de México, lo que equivale a 11.73 m<sup>3</sup>/seg.

### Cambio de almacenamiento.

El diferencial entre la entrada de agua subterránea del subsistema acuíferos y su salida se refleja en el cambio en el nivel estático. Esta variación corresponde al cambio de almacenamiento. Se calculó el cambio de almacenamiento de la evolución sufrida en el período 1997-2000, la cual se obtuvo multiplicando el área entre las curvas del plano de evolución, por el

abatimiento registrado. La suma de ellas (áreas multiplicadas por evolución), dio un volumen de la variación del nivel estático de 1997 a 2000. Dicho volumen se dividió entre 3 para obtener el volumen anual.

La variación de almacenamiento se calculó multiplicando el volumen de la evolución del nivel estático, por el coeficiente de almacenamiento, el cual resultó para la Ciudad de México de  $-17.3 \text{ Mm}^3/\text{año}$  equivalente a  $0.55 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

Ancho de las celdas.

El ancho de cada una de las celdas utilizadas para el cálculo del flujo subterráneo se obtuvo directamente del plano de la figura 35, donde se delimitan las celdas. Los anchos de cada una de ellas se incluye en la tabla 19.

Celda	Largo (L) Km	Ancho (b) Km	Gradiente Hidráulico (i) x E-03	Transmisibilidad (T) $\text{m}^2/\text{s}$	Caudal $Q=Tbi$ $\text{m}^3/\text{s}$	Volumen E+06 $\text{m}^3/\text{año}$
A-1	0.900	6.400	5.55	0.005	0.178	5.600
A-2	0.600	11.700	8.33	0.005	0.487	15.365
A-3	0.600	9.200	8.30	0.006	0.458	14.446
A-4	0.800	6.250	12.50	0.006	0.469	14.780
A-5	0.700	7.700	14.28	0.006	0.660	20.801
A-6	0.500	7.800	20.00	0.006	0.936	29.512
A-7	0.400	1.700	25.00	0.003	0.128	4.020
A-8	0.370	6.250	27.02	0.011	1.858	58.571
A-9	0.400	6.600	25.00	0.011	1.815	57.227
A-10	0.800	1.500	6.25	0.007	0.066	2.069
A-11	0.550	6.500	18.20	0.008	0.946	29.840
A-12	0.600	4.700	16.66	0.008	0.626	19.751
A-13	0.950	3.500	10.50	0.008	0.294	9.270
A-14	1.100	5.500	4.54	0.006	0.150	4.724
A-15	0.500	4.250	10.00	0.005	0.213	6.700
A-16	0.600	3.000	8.33	0.005	0.125	3.940
					Suma	296.615

Tabla 19.- Cálculo del flujo subterráneo subsistema Ciudad de México 2000.

### Balance de agua subterránea.

La ecuación de balance volumétrico en el subsuelo indica que las entradas (entrada por flujo subterráneo y drenado vertical de las arcillas) son iguales a las salidas (extracción por bombeo) menos el cambio de almacenamiento, Para el subsistema Ciudad de México. La entrada por flujo subterráneo fue de  $296.61 \text{ Mm}^3/\text{año}$  que equivale a  $9.41 \text{ m}^3/\text{seg}$ . La extracción por bombeo fue de  $370 \text{ Mm}^3/\text{año}$  que equivale a  $11.73 \text{ m}^3/\text{seg}$ . El cambio de almacenamiento calculado fue de  $17.3 \text{ Mm}^3/\text{año}$  que equivale a  $-0.55 \text{ m}^3/\text{seg}$ . De lo anterior se deduce un drenado vertical de la arcilla que asciende a  $56.09 \text{ Mm}^3/\text{año}$  que equivale a  $1.78 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

De la ecuación (2) sustituyendo los valores calculados se tiene:

$$296.61 \text{ Mm}^3/\text{año} + 56.09 \text{ Mm}^3/\text{año} = 370 \text{ Mm}^3/\text{año} - 17.3 \text{ Mm}^3/\text{año} \dots\dots\dots(3)$$

$$9.41 \text{ m}^3/\text{seg} + 1.78 \text{ m}^3/\text{seg} = 11.73 \text{ m}^3/\text{seg} - 0.55 \text{ m}^3/\text{seg} \dots\dots\dots(4)$$

Si consideramos que la sobreexplotación del acuífero corresponde al cambio de almacenamiento y al drenado de las arcillas, este volumen dividido entre la recarga por flujo subterráneo da el porcentaje de sobreexplotación a que se encuentra sujeto. De esta manera, se obtuvo que el subsistema acuífero de la Ciudad de México se encuentra sobreexplotado en un 25%.

### Interpretación de resultados

Transmisibilidad.- Se caracteriza por presentar valores del orden de 0.011 m<sup>2</sup>/seg para materiales piroclásticos y basálticos como por ejemplo los observados en la Sierra Santa Catarina, las transmisibilidades obtenidas a través de pruebas de bombeo varían alrededor de 0.005 a 0.008 m<sup>2</sup>/seg.

Gradiente hidráulico.- El gradiente hidráulico es igual a la diferencia entre las equipotenciales que limitan a cada celda dividida entre la longitud de la misma, Observándose que para el subsistema acuífero de la Ciudad de México variaron de 0.0045 a 0.027.

Permeabilidad.- La distribución de los valores de permeabilidades K promedio de  $10 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  a  $90 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  en la unidad piroclástica y basáltica predominan valores altos debido a las estructuras volcánicas permeables, también valores altos pueden indicar presencia de una alta heterogeneidad de piroclásticos y/o basaltos compactos pero con alto fracturamiento, no muestra una tendencia espacial sino mas bien indica una alta heterogeneidad con una tendencia a aumentar desde las margenes hacia el centro de la cuenca.

Medio poroso.- Determinado por miembros inferiores de la Formación Tláloc, secuencias de flujos piroclásticos y tobas.

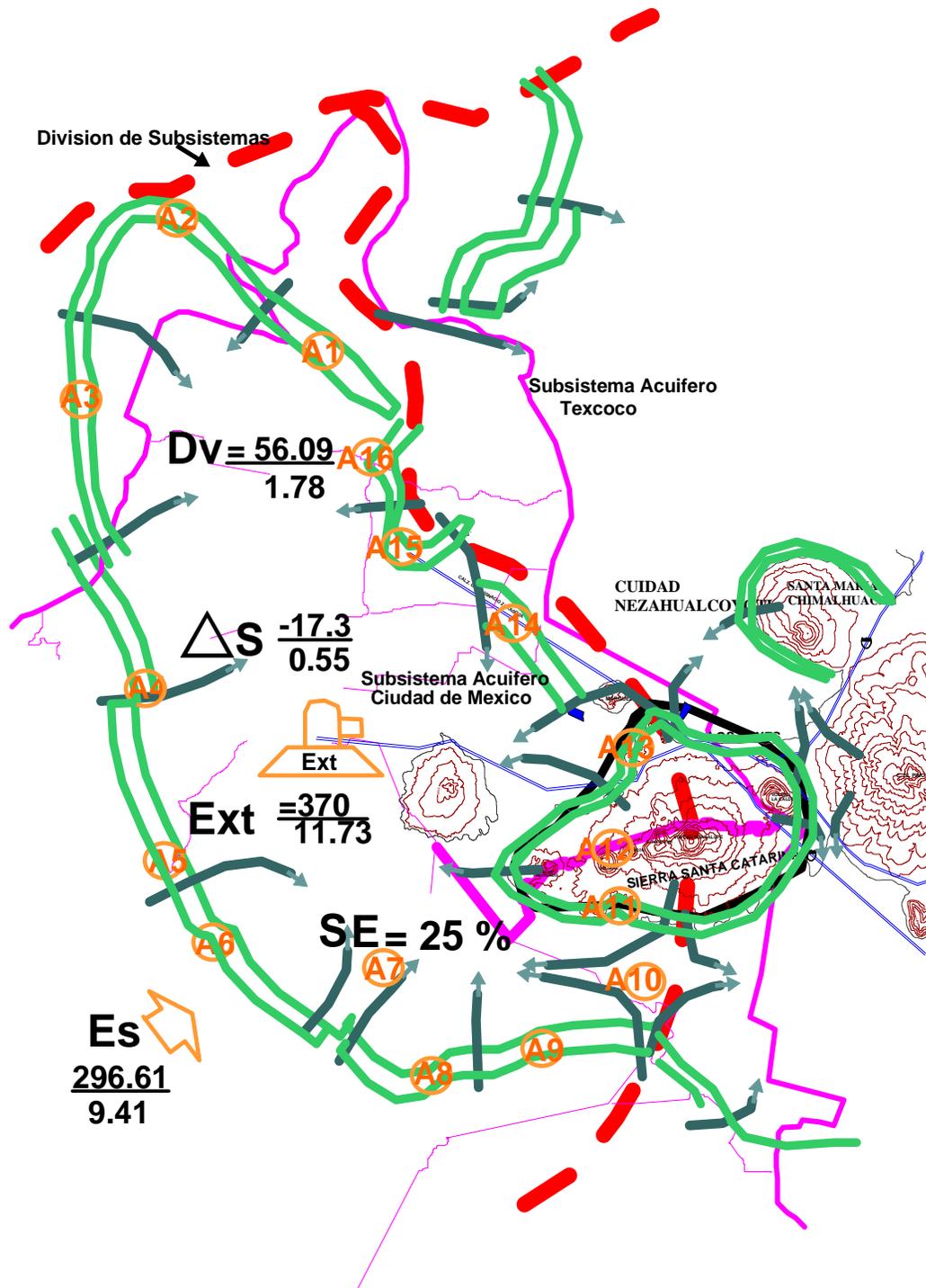


Figura 35.- Balance de agua subterránea del subsistema Ciudad de México 2000. Valores en  $(Mm^3/año) / (m^3/s)$ . Dv=Drenado vertical, Ext =Extracción por bombeo, As= Cambio de almacenamiento, Es=Entrada por flujo subterráneo y SE= Sobreexplotación; mediciones en  $Mm^3/año$  y  $m^3/seg$ .

Medio Fracturado- Determinado por rocas extrusivas del Mioceno medio y tardío, miembros superiores de la Formación Tlálloc, secuencias de brechas y lavas, representan la principal zona de recarga, estas secuencias sobreyacen a la unidades granulares inferiores.

Debido a la sobreexplotación, la relación de formación de grietas y fallas locales es del 11%, y el otro 89% son de origen tectónico (DGCOH, 1999), también son producidas por la extracción de material para la construcción como sucede en el cerro del Peñón del Marqués .

El general la trayectoria del flujo del agua subterránea, va de las zonas de recarga en las partes topográficamente elevadas hacia las secuencias aluvio-lacustre centrales de la subcuenca.. Los valores definidos de permeabilidad y porosidad se encuentran dentro de los rangos para acuíferos libres en materiales volcánicos fracturados.

Las rocas basálticas del cuaternario como son la Sierra Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués. Tienen alta permeabilidad primaria debido a que predominan derrames lávicos fracturados, aunque se encuentran intercaladas con cenizas, lapilli, tobas y brechas volcánicas de menor permeabilidad, por lo que estas zonas contienen doble porosidad por fracturas y materiales granulares, la explotación de los pozos en promedio da caudales de 120 lps.

El comportamiento del acuífero libre es de doble porosidad en las rocas basálticas, dado por su litología compuesta por derrames lávicos fracturados e intercalaciones de cenizas, lapilli y tobas, y por la unidad de sedimentos aluviales localizado en los alrededores de la Sierra Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués. El comportamiento del acuífero semiconfinado esta determinada por las arcillas lacustres.

## 5.8 Unidades Hidrogeológicas.

### Acuitardo superior:

Este acuitardo de extensión regional tiene espesor de 149 en la zona de estudio y 200 m en el pozo Mixihuca (Pérez Cruz, 1988), y disminuye hacia las altos topográficos como: la Sierra Santa Catarina, el cerro de La Estrella y Peñón del Marqués, este acuitardo esta compuesto principalmente de arcillas.

Los depósitos arcillosos se encuentran estratificados con capas de arenas finas de origen volcánico a las que se denomina “capas duras”, y de acuerdo a cortes litológicos con espesores de hasta 149 m en el área de estudio, definiéndose dos zonas lacustres principales; la primera ubicada en los primeros 20-25m, donde los valores de conductividad hidráulica tienen una media estadística de  $7 \times 10^{-8}$  m/s, y los valores de la segunda zona localizado a profundidades de entre 25- 145m con una media de  $3 \times 10^{-10}$  m/s, mostrando que la conductividad hidráulica disminuye a medida de que se incrementa la profundidad, los altos valores de conductividad hidráulica en los primeros 20-25 metros están asociados a la presencia de fracturas, ya que la infiltración del agua se facilita a través de los materiales que rellenan las fracturas y la profundidad del flujo

activo a través de las fracturas se extiende a 35m, otro factor de alta conductividad y en menor medida son los lentes de arena volcánica interestratificada con los estratos arcillosos.

El acuitardo presenta propiedades hidráulicas distintas a las del acuífero pero mantienen continuidad hidráulica entre ellos debido a que el acuitardo se encuentra saturado y deja pasar agua muy lentamente, ésta corresponde a un aporte al acuífero denominado “drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero”. La permeabilidad de las arcillas, hace que el flujo del drenado vertical sea lento sin embargo, multiplicado por la gran superficie que estos materiales abarcan, el volumen drenado alcanza cifras significativas.

El agua de poro del acuitardo, es salobre de dos a tres órdenes de magnitud mayor que la del agua del acuífero (Ortega et al, 1996). Los iones dominantes son  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  además de algunos elementos traza como hierro y manganeso, el origen del agua de poro del acuitardo es meteórico, esta agua de poro formaba parte del flujo ascendente del acuífero y de numerosos manantiales ubicados en las márgenes lacustres que fue sujeta a una progresiva evaporación con la consecuente concentración de sales e isótopos pesados, significando que el agua original del acuífero se evaporo 98.6 % del volumen original (Domínguez M, Ortega Guerrero, 1996).

Acuífero:

El acuífero esta constituido por dos diferentes acuíferos uno superior y otro inferior, el acuífero superior esta constituido por unidades intergranulares y fisuradas, y de acuerdo a sus relaciones estratigráficas, mantienen continuidad hidráulica, formando este acuífero los sedimentos aluvio-lacustre y rocas basálticas del Cuaternario, rocas andesíticas y depósitos piroclásticos andesíticos del Plio-Cuaternario, rocas andesíticas, depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior se integran como el acuífero superior con las siguientes características:

El límite inferior en la zona de las planicies lacustres, corresponde a la cima de los depósitos lacustres del Plioceno inferior, y en las zonas montañosas con la cima de las rocas andesíticas del Mioceno. La profundidad a su base, varía entre 400 y 750 m (Vázquez Sánchez E., 1995).

La mayor parte del bombeo de agua subterránea se realiza en la parte meridional de la cuenca y en su totalidad es del orden de  $60.3 \text{ m}^3/\text{s}$  (AIC, 1995). Se extrae de la parte superior del acuífero, específicamente de las unidades de los sedimentos aluvio-lacustres, rocas basálticas y depósitos piroclásticos y en la parte inferior del acuífero superior se extrae en los depósitos aluviales y piroclásticos, no se explota a gran escala.

Por el comportamiento del nivel estático en los algunos pozos, respecto a la base del acuitardo indica que el comportamiento hidráulico del acuífero en algunas zonas al pie de la Sierra Santa Catarina, Peñón de Marqués y cerro de La Estrella se comporta como libre al no existir el semiconfinante, y en el interior de la planicie lacustre es semiconfinado. También por la concentración del bombeo en la parte superior de este acuífero, ha provocado que su nivel piezométrico descienda por debajo de la base del acuitardo superior, causando de esta forma

condiciones de acuífero libre, en algunas zonas de las márgenes del oriente y poniente de las planicies lacustres donde existe un espesor del acuitardo no tan potente.

Dentro de este acuífero superior el espesor total de la unidad intergranular fue definido a partir de las perforaciones profundas (Pemex, 1987). Los valores de conductividad hidráulica calculados de las pruebas de extracción varían entre  $K_h$   $3 \times 10^{-5}$  y  $3 \times 10^{-3}$  m/s, la  $K_v$  entre  $3 \times 10^{-5}$  y  $3 \times 10^{-6}$  m/s, el coeficiente de almacenamiento (S) es entre  $1 \times 10^{-2}$  y  $4 \times 10^{-4}$  y dentro del acuífero superior la unidad hidrogeológica fisurada esta constituido por rocas volcánicas que constituyen derrames en estructura de bloque, derrames masivos, brecha volcánica, cuyas fisuras pueden ser de origen tectónicos o de enfriamiento. Estas condiciones estructurales proporcionan a esta unidad un alto valor de la conductividad hidráulica. Por esta razón los pozos que explotan esta unidad tiene caudales específicos mayores a 5 l/s/m, así se tiene  $K_h$ :  $1.1 \times 10^{-3}$  m/s,  $K_v$ :  $2.4 \times 10^{-5}$  m/s y  $S = 4 \times 10^{-4}$ . Los minerales de estas rocas, en particular los ferromagnesianos (hornblendas y piroxenos) aportan cantidades importantes de Fe y Mn.

El acuífero inferior es formado por rocas carbonatadas del Cretácico, las cuales son permeables por fracturamiento y disolución. Esta unidad se encuentra plegada y dislocada tectónicamente por una serie de fallas normales. La profundidad a su límite superior es controlado estructuralmente y su límite inferior se desconoce por falta de perforaciones más profundas. La profundidad a su cima varía entre 2 000 y 3 800 m.

#### Acuitardo Inferior

Esta unidad geohidrológica conformada por los depósitos lacustres y piroclásticos del Plioceno inferior, rocas andesíticas del Mioceno, rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno, Formación Balsas y Formación Mezcala, que se integran como un sólo acuitardo inferior. Esta unidad no se encuentra perforada en los pozos de este trabajo, pero se conoce su existencia y espesor de 830 m en el pozo Mixhuca-1 y máximo de 2590 en el pozo Roma.

Las razones por las cuales es un acuitardo son su baja permeabilidad. Sin embargo es probable que localmente existan zonas más permeables por fracturamiento, especialmente en las rocas volcánicas del Mioceno y Oligoceno.

### 5.9 Modelo conceptual del funcionamiento del acuífero de la Cuenca de México.

La Cuenca de México comprende una serie de subcuencas, formadas más o menos, independientemente las unas, de las otras y constituye un sistema acuífero complejo. De acuerdo a las condiciones geohidrológicas existentes el sistema acuífero consiste en un acuitardo en la parte superior constituido por depósitos arcillosos estratificados con capas de arenas finas de origen volcánico, subyaciendo el acuitardo arcilloso se encuentra el acuífero superior e inferior profundo, el superior actualmente explotado constituido por material granular y fisurado, que permiten la infiltración y circulación de agua subterránea dando origen a un acuífero heterogéneo y anisótropo de edad Plioceno Superior al Cuaternario, el acuífero inferior se encuentra a 2 000

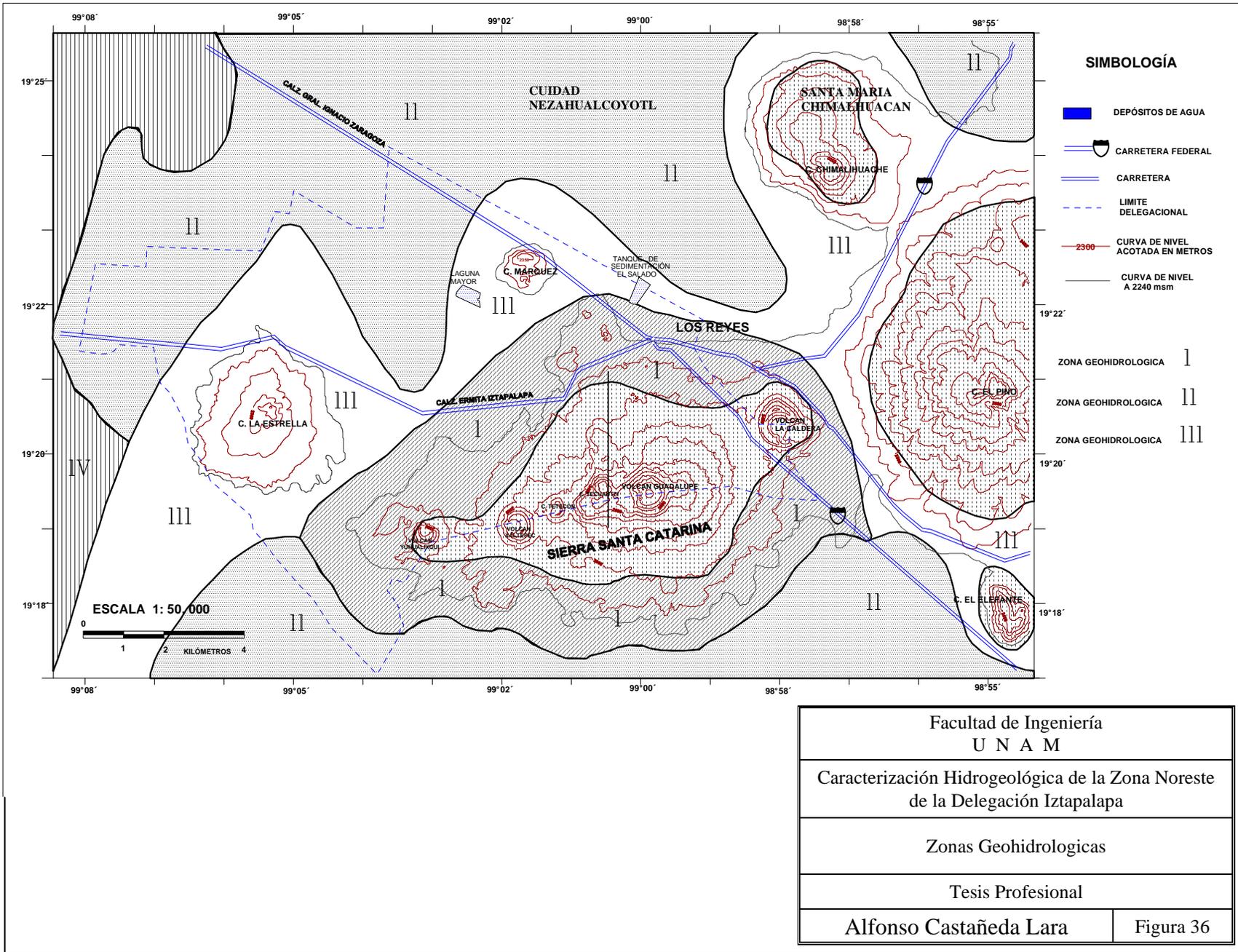
y 3 900 m de profundidad, formado por rocas carbonatadas del Cretácico, permeables por fracturamiento y disolución. La aplicación de geotermómetros al agua del sistema regional, propone una profundidad de circulación, de cuando menos de 2 500 metros (Carrillo-Rivera et al, 1996). Los dos acuíferos se encuentran separados hidráulicamente por un potente acuitardo inferior de 830 a 2600 m de espesor, formado por varias unidades volcánicas y sedimentarias de baja permeabilidad y de edad Cretácico Superior al Plioceno Inferior (Vázquez Sánchez E., 1995).

La principal recarga al acuífero corresponde a la infiltración por lluvia que se genera sobre los flancos de las elevaciones topográficas, debido a la alta permeabilidad de las rocas. Estas elevaciones topográficas como la Sierra de Santa Catarina, la Sierra Nevada al oriente y la Sierra de Chichinautzin al sur de la Cuenca, son áreas donde se infiltra el agua de lluvia donde se incorpora al acuífero, el agua subterránea circula en forma radial de las sierras hacia el centro de la Cuenca, existe otro tipo de recarga y comprende casos de agua residual tratada y no tratada, además de agua de canales y/o fugas de drenaje y de la red de distribución.

De acuerdo a las características geológicas, hidráulicas e hidrogeoquímicas, se diferenciaron 3 zonas geohidrológicas principales en la zona de estudio (Figura 36), teniendo cada una las siguientes características:

#### Zona Geohidrológica I

Formando la Santa Catarina, siendo las zonas de recarga de alta permeabilidad, los pozos emplazados en ella, con profundidades que van de 90 a 250 m, tienen sus niveles a profundidades que oscilan de 40 a 120 m; caudales de extracción de 50 a 140 lps. El agua de sus



acuíferos es de mala calidad, en la mayoría de los pozos se han contaminado por contaminación de desechos sólidos. La perforación de pozos en esta zona es de alto grado de dificultad, por la dureza y poca estabilidad de las rocas.

### Zona Geohidrológica II

El acuífero de esta zona se aloja en materiales granulares de baja a mediana permeabilidad intercaladas con derrames basálticos cubierto por un acuitardo alojado en las arcillas lacustres, que pueden tener hasta 110 m de espesor. Los pozos perforados en esta zona con profundidades de 200 a 400 m, tienen sus niveles estáticos a profundidades que varían de 10 m en sus centros y más de 85 m en sus periferias.

La calidad del agua es en general, deficiente hacia la porción oriente del distrito federal, debido a la contaminación por desechos sólidos y por el drenado del acuitardo constituido por arcillas lacustres. Al poniente de los 2 lagos, la calidad del agua es aceptable. La perforación de pozos en esta zona no ofrece dificultad alguna, excepto por algunos horizontes de coladas de lavas de espesor variable, en cuanto a la dureza de la roca.

### Zona Geohidrológica III

Localizada en las inmediaciones de la Sierra Santa Catarina, rocas basalto-andesíticas, entre los que se intercalan horizontes de granulares, en la zona del cerro la Estrella, exhibiendo permeabilidades, en general, medias a altas; siendo cubierto por el acuitardo arcilloso en la zona de la sierra de Santa Catarina. Los pozos en esta zona, con profundidades de 150 a 250 m, tienen sus niveles estáticos a profundidad entre 25 y 40m, extraen caudales de 70 a 140 lps, notándose que los caudales de extracción son menores cuando se intercalan unidades granulares entre los derrames, lo que sucede en las inmediaciones del cerro la Estrella, la calidad del agua de esta zona, es en general buena salvo que es ligeramente ácida en las inmediaciones de los cerros Peñón del Marqués, respecto a la perforación de pozos, la relativa dificultad estriba en la dureza de los derrames.

## 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

El área de estudio se caracteriza por presentar valores de transmisibilidad por presentar valores del orden de 0.011 m<sup>2</sup>/seg para materiales piroclásticos y basálticos como por ejemplo los observados en la Sierra Santa Catarina, las transmisibilidades obtenidas a través de pruebas de bombeo varían alrededor de 0.005 a 0.008 m<sup>2</sup>/seg.

El gradiente hidráulico es igual a la diferencia entre las equipotenciales que limitan a cada celda dividida entre la longitud de la misma, Observándose que para el subsistema acuífero de la Ciudad de México variaron de 0.0045 a 0.027.

El medio poroso de la cuenca en la zona de estudio esta compuesto por miembros inferiores de la Formación Tláloc, secuencias de flujos piroclásticos y tobas.

El medio fracturado esta compuesto por rocas extrusivas del Mioceno medio y tardío, miembros superiores de la Formación Tláloc, secuencias de brechas y lavas, representan la principal zona de recarga; estas secuencias sobreyacen a la unidades granulares inferiores.

Debido a la sobreexplotación , la relación de formación de grietas y fallas locales es del 11%, y el otro 89% son de origen tectónico (DGCOH, 1999), también son producidas por la extracción de material para la construcción como sucede en el cerro del Peñón del Marqués .

El general la trayectoria del flujo del agua subterránea, va de las zonas de recarga en las partes topográficamente elevadas hacia las secuencias aluvio-lacustre centrales de la subcuenca. Los valores definidos de permeabilidad y porosidad se encuentran dentro de los rangos para para acuíferos libres en materiales volcánicos fracturados.

Las rocas basálticas del cuaternario tales como son la Sierra Santa Catarina, Cerro de la Estrella y el Peñón del Marqués. Tienen alta permeabilidad primaria debido a que predominan derrames lávicos fracturados, aunque se encuentran intercaladas con cenizas, lapilli, tobas y brechas volcánicas de menor permeabilidad, por lo que estas zonas contienen doble porosidad por fracturas y materiales granulares, la explotación de los pozos en promedio dan caudales de 120 lps.

El comportamiento del acuífero es de doble porosidad en las rocas basálticas, dado por su litología compuesta por derrames lávicos fracturados e intercalaciones de cenizas, lapilli y tobas, y por la unidad de sedimentos aluviales localizado en los alrededores de la Sierra Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués.

La distribución de los valores de permeabilidades K promedio de  $10 \times 10^{-5}$  m/s a  $90 \times 10^{-5}$  m/s en la unidad piroclástica y basáltica indican presencia de una alta heterogeneidad de piroclásticos y/o basaltos compactos pero con alto fracturamiento, no muestra una tendencia espacial sino mas bien indica una alta heterogeneidad con una tendencia a aumentar desde las márgenes hacia el centro de la cuenca.

## 6.2 Recomendaciones

Para el equipamiento del pozo tanto de tubería como de filtro de grava debe tenerse en cuenta el tamaño de algunos componentes, ya que pueden provocar invasión de arena al pozo, como lo pueden ser las cenizas volcánicas. Por lo que deben tomarse providencias respecto al filtro de grava y aberturas de ranuras del cedazo. Estos horizontes arenosos o con grava, pueden formar oquedades durante la perforación, pueden no ser rellenadas por el filtro de grava y provocar serios problemas posteriores, por lo que debe tenerse en cuenta durante su perforación.

Es conveniente también, aislar con cementación el acuitardo y con ademe ciego los horizontes arcillosos, para aislar el acuitardo del acuífero y evitar una posible contaminación.

La toma de datos es importante para caracterizar un acuífero y por eso se recomienda al momento de realizar aforos se hagan de forma correcta, la CNA tiene una publicación en la cual explica los procedimientos al realizar estas pruebas, y no cometer errores de logística y procedimientos básicos en este tipo de pruebas, también la toma de registros geofísicos es importante para un adecuado diseño de pozos y también diferenciar las capas permeables de las impermeables.

## BIBLIOGRAFÍA

- Benhumea León. M. Y Vázquez Contreras. A., Estudios Geofísicos del Valle de México, Comisión Federal de Electricidad (C.F.E), Subdirección de Construcción Unidad de estudios de Ingeniería Civil, México, D.F., 1988. 60 Pág.
- Birkle Peter, Torres Vicente ,González Eduardo. Evaluación preliminar del potencial de acuíferos profundos en la cuenca del Valle de México, Ing.Hidraul.Mex, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2a. ep. X(3), 1995, Pág. 47-53.
- Carrillo Rivera J. J., Cardona A., Edmunds W. M. y Mooser F., Recarga vertical inducida ascendente: aguas subterráneas del Valle de México, 3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. San Luis Potosí, S.L.P. 1996. Pág.3/47-3/54.
- Chavéz Pérez. S., Modelado sísmico de la cuenca de la ciudad de México, Geofísica Internacional, 1993, Vol. 32, Num. 1, Pág.111-130.
- Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas. Pruebas de Bombeo. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 1996, México, Pág.151.
- Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Estudio de simulación hidrodinámica y diseño optimo de la red de observación de los acuíferos de Texcoco y Atlacomulco Ixtlahuca, Tomo I, 1997, México.
- Cserna Zoltan , de la Fuente Duch, Palacios Nieto Miguel, Triay, Leonardo Mitre Salazar, Luis Miguel, Mota Palomino y Reynaldo Mauricio, Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México, Boletín 104, Instituto de Geología UNAM , 1988, 71 Pág.
- Custodio Emilio y Llamas Manuel. Hidrología subterránea, Ediciones Omega, Barcelona, España, 1976.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Departamento del Distrito Federal, Secretaria General de Obras, Hidrología subterránea en el Valle de México, Revista Ingeniería Hidráulica Mexicana, 2a.ep., 7(1) Pág. 90-98. 1992.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Dirección Técnica, Subdirección de Programación, Unidad de Planes Maestros. Estudio geohidrológico de prospección geohidrológica en las zonas favorables de la porción suroriental de la Cuenca de México, 1993. México.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Dirección Técnica, Subdirección de Programación. Estudio mediante modelación para la evolución de la calidad de agua en el acuífero de la zona sur del Valle de México, 1999. México

- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Dirección Técnica, Subdirección de Programación, Unidad de Planes Maestros. Balance geohidrológico en el Distrito Federal y modelación de la explotación del acuífero, 2001. México.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras, Departamento del Distrito Federal, Hidrología subterránea en el Valle de México, 2000-2001.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras y Servicios, Gobierno del Distrito Federal, Plan de Acciones Hidráulicas 2001-2005 Delegación Iztapalapa. 2001. México.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras y Servicios, Gobierno del Distrito Federal, Estudio geológico, estructural y geomorfológico del Peñón del Marqués, Delegación Iztapalapa. Agosto 2002, México.
- Domínguez Mariani, E. y Ortega Guerrero, M. A., Origen del agua de poro y de la salinidad del acuitardo lacustre de la Ciudad de México. Modelación hidrogeoquímica, 3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. San Luis Potosí, S.L.P. 1996. Pág. 5/43-5/49.
- García Enriqueta. Modificaciones al sistema de Clasificación Climática de Koppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía UNAM, 1981, México, D. F.
- Guadalupe Tapia-Varela y Jorge López-Blanco, Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2002. Volumen 19 Número 1, Pág. 50-65.
- Herrera Ismael, El sistema acuífero de la Cuenca de México, Geofísica Internacional, Volumen 28 Número 2. 1989, Instituto de Geofísica, UNAM.
- Huizar Alvarez Rafael, Definición del control de la calidad del agua subterránea Extraída de la subcuenca de México Delegación Iztapalapa. Instituto de geología U.N.A.M.
- Laura Maderey. Impacto ambiental a la calidad del agua subterránea en la zona comprendida entre Santa Fe e Iztapalapa, Distrito Federal. Secretaría del medio ambiente, Gobierno del Distrito Federal. Proyectos del Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental, 2000, México.
- Leal Bautista R. M. Y Ortega Guerrero M. A., Migración de contaminantes orgánicos y metales traza derivados de aguas residuales a través del acuitardo lacustre hacia el acuífero subyacente de la ciudad de México, 3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. San Luis Potosí, S.L.P. 1996. Pág.5/61-5/69.

- Luca Ferrari, Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana., Tomo. LIII, Número 1 (2000). Pág. 84-92.
- Mooser F. Mapa geológico de la cuenca de México y zonas colindantes, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Escala 1 200,000, 1960. México.
- Mooser. F., Ramírez M.T., Faja Volcanica Transmexicana: Morfoestructura, Tectonica y Vulcanotectonica, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 1987, Tomo XIII, Num 2, México D.F.
- Ortiz Zamora D. y Ortega Guerrero, M. A., Migración de contaminantes derivados de las aguas residuales hacia el acuífero de la ciudad de México, 3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. San Luis Potosí, S.L.P. 1996. Pág.3/47-3/54.
- Ramírez Jiménez Honorio, Estratigrafía de la Cuenca de México. Sociedad Geológica Mexicana, 6a Convención Nacional, 1992, Pág.48-49.
- Rodríguez C. R., Ochoa A. C., Estudio geoelectrico del sistema acuífero de la Cuenca de México, Geofísica Internacional, Vol 28-2, 1989. Pág.191-205.
- Salvador Enciso-De la Vega, Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 1992, Vol. 10, Núm. 1, Pág. 26-36.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos , Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, Hidrología de la Cuenca del Valle de México, Tomo III, México D.F., 1963.
- Vargas Cabrera C. y Ortega Guerrero M. A., Distribución y variación de la permeabilidad en el acuitardo lacustre de la Cuenca de México, 3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. San Luis Potosí, S.L.P. 1996. Pág. 5/29-5/34.
- Vázquez Sánchez E., Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la cuenca de México. Tesis Maestría, Maestría en Geofísica (Aguas Subterráneas), UNAM, 1995, Pág.187.
- Vázquez-Sánchez E; Jaimes-Palomera R., Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, Volumen 28, Número 2, 1989, México. Pág.133-190.
- Velásquez Aguirre y Ordaz Ayala Anselmo, Provincias Hidrogeológicas de México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número 1-2 (1993-1994), Pág. 15-33.
- Página Web de la Comisión Nacional del Agua.  
<http://www.cna.gob.mx/portal/publica/cuenca/mapas/hidrlogi.htm>.
- Página Web del Gobierno del Distrito Federal, Delegación Iztapalapa.  
<http://www.iztapalapa.df.gob.mx>.

Página Web del Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Septiembre-2002.

<http://www.sma.df.gob.mx>.

Simposio Sobre Topicos Geologicos De La Cuenca Del Valle De México, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, México, 1990, Pág. 77.