



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA.

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA.

**“LA CAPA DURA Y SU EXTENSIÓN A LAS LOMAS
EN EL MARCO GEOLÓGICO DEL SW DE LA
CUENCA DE MÉXICO”.**

T E S I S

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

**PRESENTA:
ANGEL RAMÓN ZÚÑIGA ARISTA.**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

A MIS PADRES
(Marcela y Angel Ramón)

A MIS HERMANAS
(Paty y Sonia)

A MI ESPOSA E HIJOS
(Gloria, Diana y Andrés)

Agradezco

A la vida, por esta oportunidad

A las personas e instituciones que han contribuido con la culminación de
este trabajo

A todos mis maestros,
entre ellos, al de toda la vida Ramón Zúñiga Aguilar y de manera muy
especial a Federico Mooser

INDICE

Resumen	1
Introducción	2
I Objetivo del trabajo y metodología	4
II Antecedentes históricos y edad	5
III Zonificación Geotécnica	8
• Sondeos Geotécnicos	12
IV Marco geológico regional	16
V Estratigrafía	22
VI Geología histórica y Tectónica	33
VII Resultados	39
• Correlaciones	39
• Duración del ciclo eruptivo	47
VIII Conclusiones	48
Referencias bibliográficas	

Resumen

La Capa Dura es fundamental para la ingeniería de la construcción, pero poco se ha escrito de ella en cuanto a su origen y características geológicas; todo parece indicar que Leonardo Zeevaert fue el primero en usar dicho término en 1949 en su tesis doctoral; aunque físicamente esta capa ya había sido descubierta desde inicios del siglo pasado, cuando los ingenieros Gonzalo Garita y Miguel Gorozpe cimentaron la columna de la independencia; para mediados de siglo Raúl J. Marsal y Marcos Mazari la reportaban como capas de arenas limosas, arcillas arenosas y arenas cementadas muy compactas y de espesor variable en diferentes puntos de la ciudad.

En el presente trabajo se establece una correlación estratigráfica entre la Capa Dura dentro de la secuencia lacustre y su homólogo en las Lomas. La Capa Dura está formada por varios horizontes de pómez provenientes de erupciones del cerro de San Miguel ocurridas en un lapso relativamente corto que duró 10 a 15 mil años y tuvo lugar hace unos 130 000 años, en el marco del fin de un ciclo de intensa actividad volcánica que prevaleció para entonces en el SW de la Cuenca de México.

La Capa Dura presenta espesores variables a largo de la ciudad; en el Aeropuerto presenta tan sólo 1.70 m, en Buenavista tiene 5.2 m y en Las Lomas, en el sitio Lahar 3.7 m; esta irregularidad en su espesor se explica debido a que cada erupción pumítica que la conforma fue transportada en diferentes direcciones de acuerdo a la situación de los vientos prevalecientes; por otro lado la profundidad a la que se encuentra la Capa Dura varía de tal manera que es profunda en el Aeropuerto donde se encuentra a 37 m, en Chapultepec no alcanza los 20 m de profundidad y en las Lomas se encuentra apenas cubierta por delgadas capas de suelos y tobas meteorizadas.

Introducción

La Ciudad de México se localiza sobre una planicie de acumulación; en el subsuelo se encuentran hasta los 100 metros de profundidad en promedio, dos secuencias geológicas modernas: la lacustre y la aluvial, ambas coronan a una serie de vulcanitas con edades que abarcan desde el Oligoceno hasta el Cuaternario; dentro de la secuencia lacustre además de arcillas plásticas se encuentran también algunos horizontes de limos, cenizas, pómez y arenas.

La secuencia lacustre se encuentran a unos 30 m de profundidad en el poniente de la ciudad, alcanza los 50 metros de profundidad en el norte, llega hasta más de 100 metros en el sur y suroriente, de manera que se acuña hacia las elevaciones circundantes sobre la secuencia aluvial. Las arcillas que conforman la secuencia lacustre se formaron en extensos lagos someros desarrollados en el centro de una cuenca que fue cerrada en su región sur por la actividad volcánica que formó la Sierra del Chichinautzin hace unos 600 mil años; esta sierra formó una enorme barrera que permitió primeramente la acumulación de secuencias aluviales y finalmente de secuencias lacustres, el resultado una enorme planicie desde Zumpango hasta Chalco (figura 1).

Edificar algún edificio de más de dos niveles fue un reto desde que el hombre empezó a construir en esta zona. Esto ocurría con el majestuoso Teocali antes de la conquista y con los palacios y las altas iglesias después de ella. Además, si se abrían canales sus paredes colapsaban. Este gran problema de cimentación para la ciudad fue apremiante, aunque combatido por numerosas soluciones a medias hasta fines del siglo XIX -palos, estacas, pilotes- que transmitían las cargas superficiales a capas más profundas. Es apenas a principios del siglo XX, cuando se detectó a profundidades de 25 a 30 m debajo de la ciudad la presencia de arcillas más resistentes, evidenciadas por el aumento en el número de golpes registrados en sondeos exploratorios. Así a

partir de 1905 cuando la Columna de la Independencia quedó cimentada por medio de estacones de 25 metros de longitud hasta un estrato compacto granular, es que por fin se contó con un basamento firme en lo que parecía ser un extenso mar salado de arcillas blandas para los ingenieros dedicados a la construcción, pues los depósitos lacustres, en el subsuelo de la ciudad son blandos, compresibles e inestables. Sin embargo existe un horizonte resistente sobre el cual se apoyan las construcciones altas o pesadas desde mediados del siglo pasado, por medio de pilotes que van más allá de los depósitos arcillosos superficiales plásticos; este horizonte es conocido como Capa Dura.

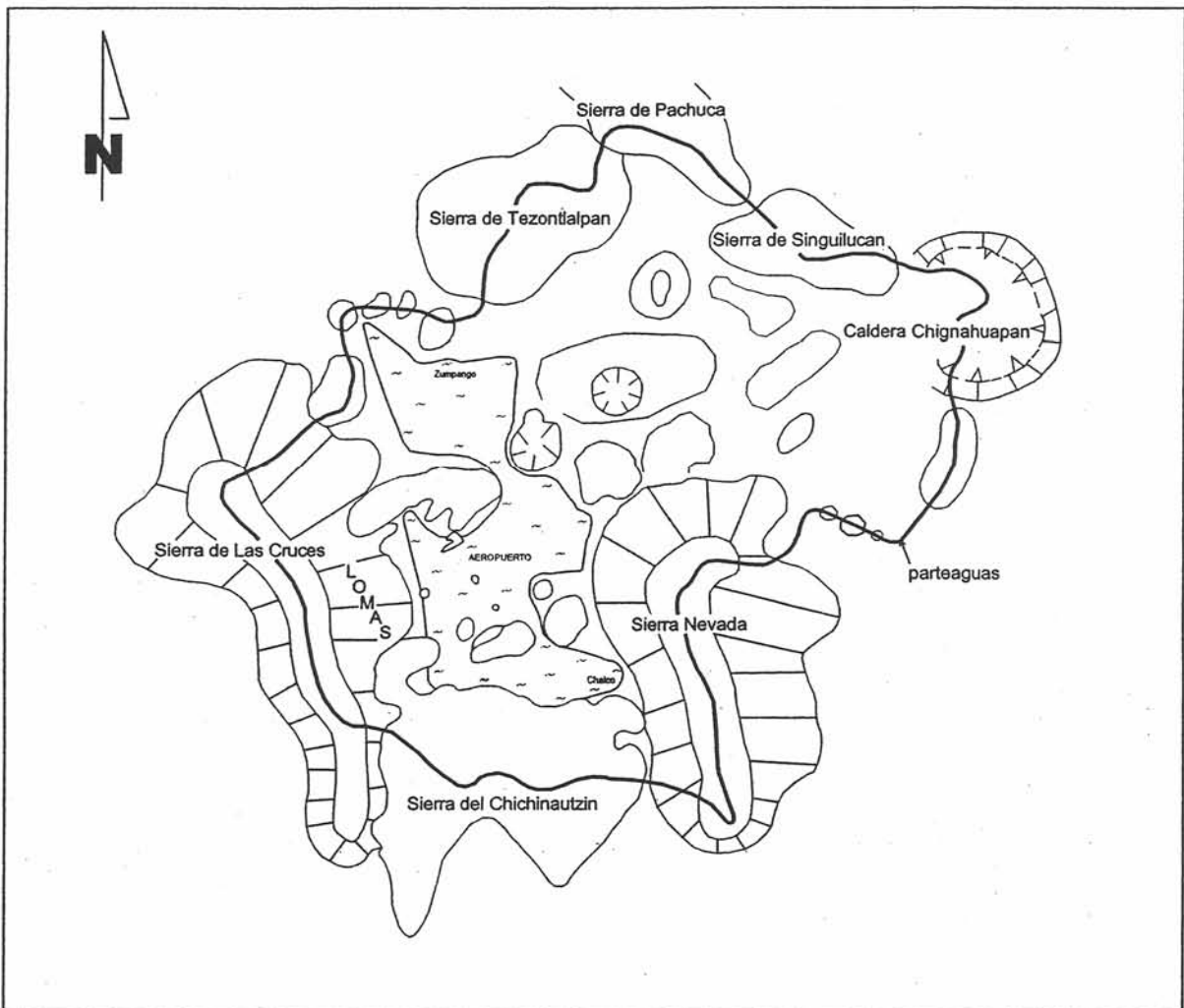


Fig. 1 La cuenca de México

I Objetivo del trabajo y metodología

El objetivo del presente trabajo es obtener la correlación estratigráfica entre la Capa Dura en el lago y las últimas erupciones en la región centro-sur de la Sierra de las Cruces, teniendo como marco la geología de la porción suroeste de la Cuenca de México, la cual se ubica a su vez en la región centro-oriental del Cinturón Volcánico Mexicano.

Para ello se tomaron tres sondeos geotécnicos representativos en puntos fundamentales de la ciudad (Aeropuerto, Buenavista y Chapultepec): un sondeo de penetración estándar SPT-1 (Standard Penetration Test), otro de cono eléctrico SCE-1 (Sondeo de Cono Eléctrico) y uno más de muestreo continuo SMC-3 (Sondeo de Muestreo Continuo); en ellos se habían reconocido dentro de la Capa Dura fragmentos de pómez o pómez muy fina cuya consistencia destacaba entre las suaves secuencias lacustres inferior y superior.

Se elaboraron 5 cortes estratigráficos levantados en otros tantos sitios en las Lomas, a lo largo de una línea más o menos paralela a la carretera México-Toluca; en ellos se reconoció la presencia de una capa singular formada por 3 a 7 erupciones pumíticas; esta capa destacaba por su consistencia y juventud entre las emisiones tobáceas más recientes observadas en los flancos del cerro San Miguel.

El mapa que sirvió como base para el marco geológico a nivel de la Cuenca de México y de la porción oriental del Cinturón Volcánico Mexicano es el publicado por Mooser et al 1996. Se utilizó también el mapa geológico de la República Mexicana publicado en 1992 por el Consejo de Recursos Minerales y la Universidad Nacional Autónoma de México y un modelo de elevación del terreno de la región SW de la Cuenca de México del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

II Antecedentes históricos y edad

Aparentemente el primero que usó el término de Capa Dura en la literatura fue Leonardo Zeevaert en 1949 en su tesis doctoral “Investigación de las propiedades mecánicas de la arcilla lacustre de la ciudad de México”, presentada en la Universidad de Illinois, USA; habló en ella de “first hard layer”. Sin embargo, aunque dicha tesis no se publicó, el término se arraigó en círculos ingenieriles. Es así, que a partir de 1950 todos hablan ya de la Primera Capa Dura y la mencionan en sus escritos. Con el paso del tiempo esta capa se consideró como un horizonte estratigráfico uniforme muy importante y de elevada dureza, que se halla a unos 30 m de profundidad debajo de la planicie urbana. La citada capa resultó caracterizarse por oponer una resistencia de 20 a 50 golpes a la penetración estandar (número de golpes para avanzar 30 cm en un sondeo), lo cual corresponde a una resistencia al esfuerzo cortante de 30-36°.

Los sondeos SPT que en los años 40 a 70 aún eran bastante primitivos en cuanto a su capacidad de recuperación de muestras, reportaban limos, arenas y gravas, además de grumos de arcilla endurecida, como constituyentes del aludido horizonte. Lo anterior condujo a que la Capa Dura se considerara como un aluvión que se extendía desde el pie de las Lomas hasta la zona del Peñón de los Baños, vestigio de una supuesta regresión del lago, que duró “poco tiempo” en términos geológicos. Esta hipótesis mantuvo su validez en los círculos de la Mecánica de Suelos hasta 1985, cuando un día perforistas de la compañía TGC (Técnica Geomecánica de la Construcción), lograron con un sondeo de muestreo continuo extraer al sur del cerro de Chapultepec muestras casi inalteradas de la Capa Dura: en este sondeo se reconoció que lo reportado antes como gravas, arenas y limos resultaron ser fragmentos de pómez, lapilli

y polvo pumítico fino de color blanco. Así se logró concluir que la Capa Dura representaba una acumulación excepcional de erupciones pumíticas.

A partir de esa fecha y considerando que su origen podía ser el complejo volcánico más joven de la Sierra de las Cruces, al poniente de la ciudad, se buscó la Capa Dura en las Lomas, las cuales se extienden al pie de la mencionada sierra. Teniendo en cuenta que en el lago esta capa acusa un espesor de 4 m, entonces en las Lomas debía tener un espesor igual o mayor y además debía encontrarse cerca de la cima de la formación Tarango, o sea inmediatamente arriba de las Arenas Azules, las cuales representan las erupciones explosivas más jóvenes del cerro de San Miguel.

Después de descubrir la naturaleza volcánica de la Capa Dura se llevó a cabo la construcción del túnel del Río San Javier por parte de la compañía COTRISA (Construcciones y Trituraciones Sociedad Anónima). Dicho túnel, con diámetro de 3 m, fue excavado en Tlalnepantla a través de capas pumíticas bastante resistentes a 16 m de profundidad. Esta pómez al ser fechada por Peter Schaaf y Lucía Capra del Instituto de Geología de la UNAM, arrojó una edad radiométrica de $60\ 000 \pm 5\ 000$ años. Considerando además el fechamiento por radio-carbón de la ceniza negra que se encuentra a los 9 metros de profundidad proveniente del cerro La Caldera que dio una edad de 27 000 años y extrapolando ambas fechas a una profundidad de 32 m, que es aquella en la que se encuentra la Capa Dura en el centro de la ciudad, pudo fijarse para ella una edad de 130 000 años, (figura 2).

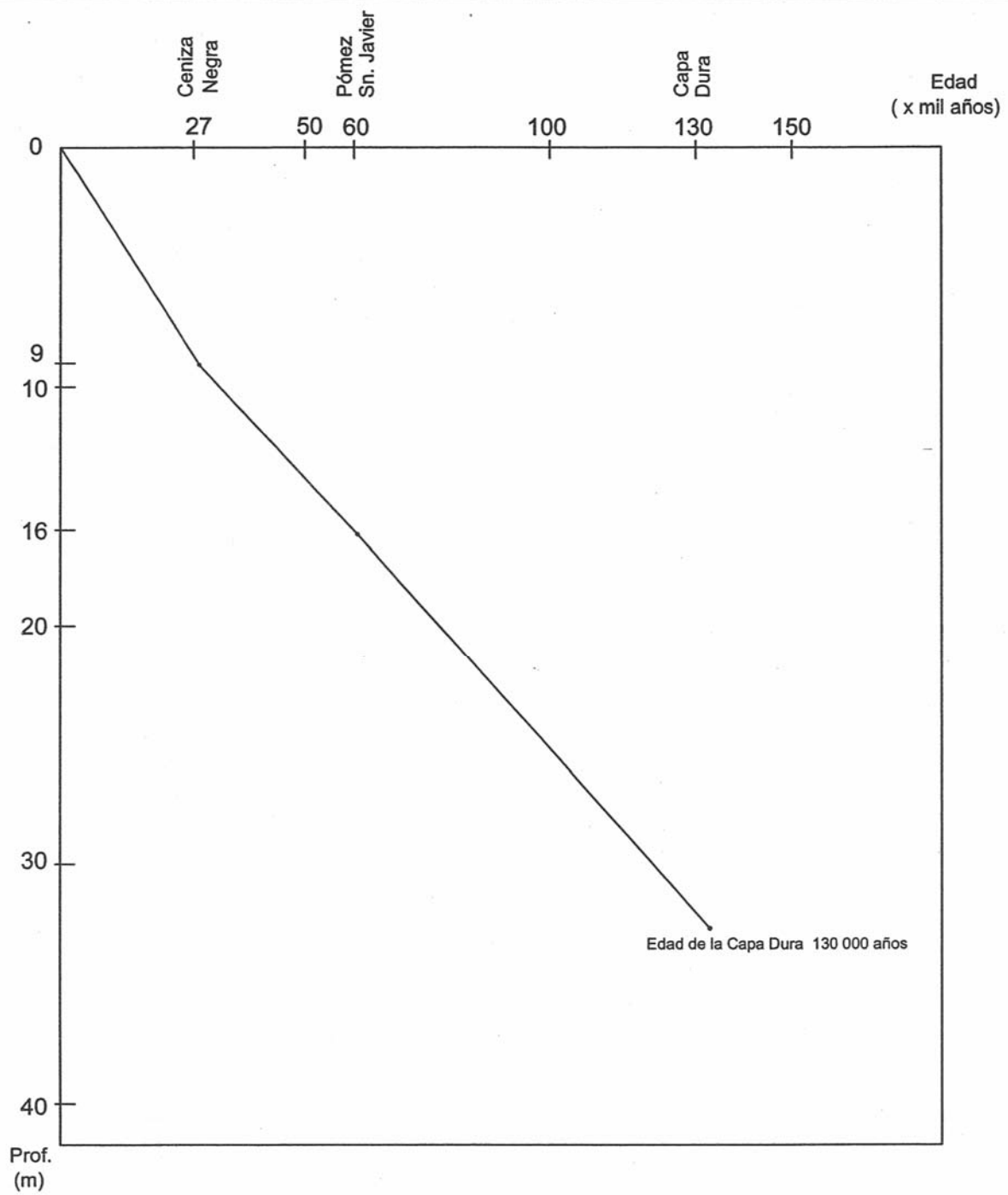


Fig. 2 Edad de la Capa Dura por extrapolación

III Zonificación Geotécnica

El área en la cual se encuentra la Ciudad de México puede dividirse de acuerdo a sus características geotécnicas en tres zonas (Fig 3); la división propuesta por (Marsal y Mazari, 1959) es la que más concuerda con la geología y a continuación se presenta:

Zona de Lomas.- Esta zona comprende las áreas de los flancos de la Sierra de las Cruces, formados por tobas y flujos piroclásticos; en esta zona se incluyen también los derrames de basalto del Pedregal y en general los flancos de las sierras que circundan a la cuenca. Esta constituida por terrenos compactos, arenosos con alto contenido de grava y por tobas pumíticas bien consolidadas, presenta una alta capacidad de carga y carece de capas de arcillas compresibles que puedan originar asentamientos diferenciales de gran magnitud. Dentro de esta zona se han propuesto varias subdivisiones clasificándolas en seis grupos, atendiendo a su naturaleza y a los problemas de cimentación que presentan cada una de ellas, estas subzonas se describen a continuación:

- Tobas estables aún bajo la acción erosiva del agua, están constituidas por mezclas de arena y grava en proporciones variables. En estas zonas se localizan cavernas que son vestigios de la explotación para obtener pómez o materiales de construcción y actualmente constituyen un riesgo para todo tipo de construcciones.
- Tobas inestables bajo la acción erosiva del agua. Estas tobas contienen importantes proporciones de material arcilloso de plasticidad media a alta y presentan débil cementación.
- Suelos pumíticos. Dentro de las formaciones características de la zona se encuentran capas de arena pumítica o polvo pumítico fino con

espesores variables que presentan leve inclinación hacia la planicie y con frecuencia se encuentran ligadas a erupciones de cenizas de caída libre.

- Arenas sueltas. Estas arenas y/o cenizas se acumularon por el viento o por corrientes fluviales, presentan espesores variables y pueden sufrir hundimientos bruscos bajo cargas dinámicas.
- Roca lávica. En una gran parte de la zona sur (flanco norte de la Sierra del Chichinautzin, así como en el Pedregal de San Angel y en las laderas de los cerros de la Estrella y de los peñones de los Baños y del Marques) se tienen derrames de lava con distintos grados de fracturamiento, en los cuales se pueden apreciar estructuras columnares, acordonadas y vesiculares.
- Rellenos. Debido al intenso crecimiento urbano, se ha tratado de aprovechar el máximo de superficie rellenando parcialmente barrancas con material tipo cascajo, muy heterogéneo y mal compactado.

Zona de Transición.- En esta zona es donde las condiciones estratigráficas del subsuelo varían en forma importante de un punto a otro. En la zona de transición se han reconocido tres condiciones típicas en sus contactos con las otras dos zonas adyacentes:

- Progresivo.- La zona de Lomas se encuentra cubierta por depósitos de origen aluvial, los que a su vez subyacen a capas de arcillas lacustres.
- Interestratificado.- Común de regiones en las que las fases aluvial y lacustre se suceden en forma alternada, dando lugar a la intercalación de mantos arcillosos blandos con otros mantos más duros y resistentes formados por gravas y arenas con alguna proporción de material fino.

- Abrupto.- Los depósitos lacustres cubren directamente a la zona de Lomas, la cual, si acaso, se encuentra cubierta por capas delgadas de suelos residuales.

Zona Lacustre. - Esta zona ocupa la porción centro-sur de la cuenca, comprendía los lagos de México, Texcoco, Xochimilco y Tlahuac, está constituida por arcillas lacustres blandas, compresibles y con altos contenidos de agua; en los dos primeros lagos se presentan espesores promedio de 50 a 60 m y en los últimos dos hasta más de 100 m; las arcillas lacustres se encuentran descansando sobre suelos más duros y rígidos, que corresponden a secuencias aluviales que se conocen como Depósitos Profundos.

Esta zona se puede clasificar en:

- Manto superficial. Compuesto por depósitos areno-arcillosos o limosos generalmente producto del secado y consolidación de las arcillas subyacentes, contiene abundancia de restos arqueológicos y rellenos artificiales, su espesor es variable.
- Unidad Arcillosa Superior. Secuencias de arcillas lacustres de alta compresibilidad y con espesores promedio de entre 30 y 50 m, pero que puede alcanzar los 100 m. Contiene algunos horizontes arenosos, areno-limosos y hasta pumíticos que acusan mayor resistencia; esto puede observarse en los sondeos de cono eléctrico.
- Capa Dura. Está constituida por capas compactas y rígidas de pómez granular o fina, la pómez está cementada, su espesor es de unos 3 a 5 metros.
- Unidad Arcillosa Inferior. Compuesta por arcillas lacustres desecadas y/o consolidadas, su espesor varía entre 5 y 15 m.

Sondeos Geotécnicos

Se estudiaron tres sondeos geotécnicos localizados en diferentes puntos de la ciudad; en ellos se pudo reconocer la Capa Dura: en el Aeropuerto y Buenavista a través de su respuesta mecánica y en el de Chapultepec en las muestras analizadas. En las figuras 4, 5 y 6 se muestran respectivamente los sondeos SCE-1, SPT-1 y SMC-3 de TGC; en ellos se pueden reconocer las 5 unidades geotécnicas arriba mencionadas; en la Unidad Arcillosa Superior se detectan 4 delgados horizontes los cuales se correlacionan con erupciones pumíticas esporádicas menores que destacan por resistir mayor número de golpes a la penetración estándar u oponer mayor resistencia al hincado del cono eléctrico que las arcillas en las que están inmersos. Debajo se encuentra la Capa Dura que presenta espesores entre 2 y 5 metros y resiste alrededor de 50 kg/cm^2 , mientras que la resistencia de las arcillas es obviamente muy baja. En cuanto al contenido de agua en la Formación Arcillosa Superior, alcanza entre 300 y 400%, mientras que en la Capa Dura se reduce hasta menos de 50% y en la Unidad Arcillosa Inferior se presentan porcentajes similares. En Chapultepec, la Capa Dura marca el inicio del predominio de capas de ceniza, arenas y vidrios volcánicos; la Unidad Arcillosa Inferior y los Depósitos Profundos contienen numerosas capas de cenizas y arenas que acusan durezas de más de 50 golpes; la abundancia de estas capas se debe a la cercanía de la fuente de origen de dichas erupciones, es decir del cerro de San Miguel.

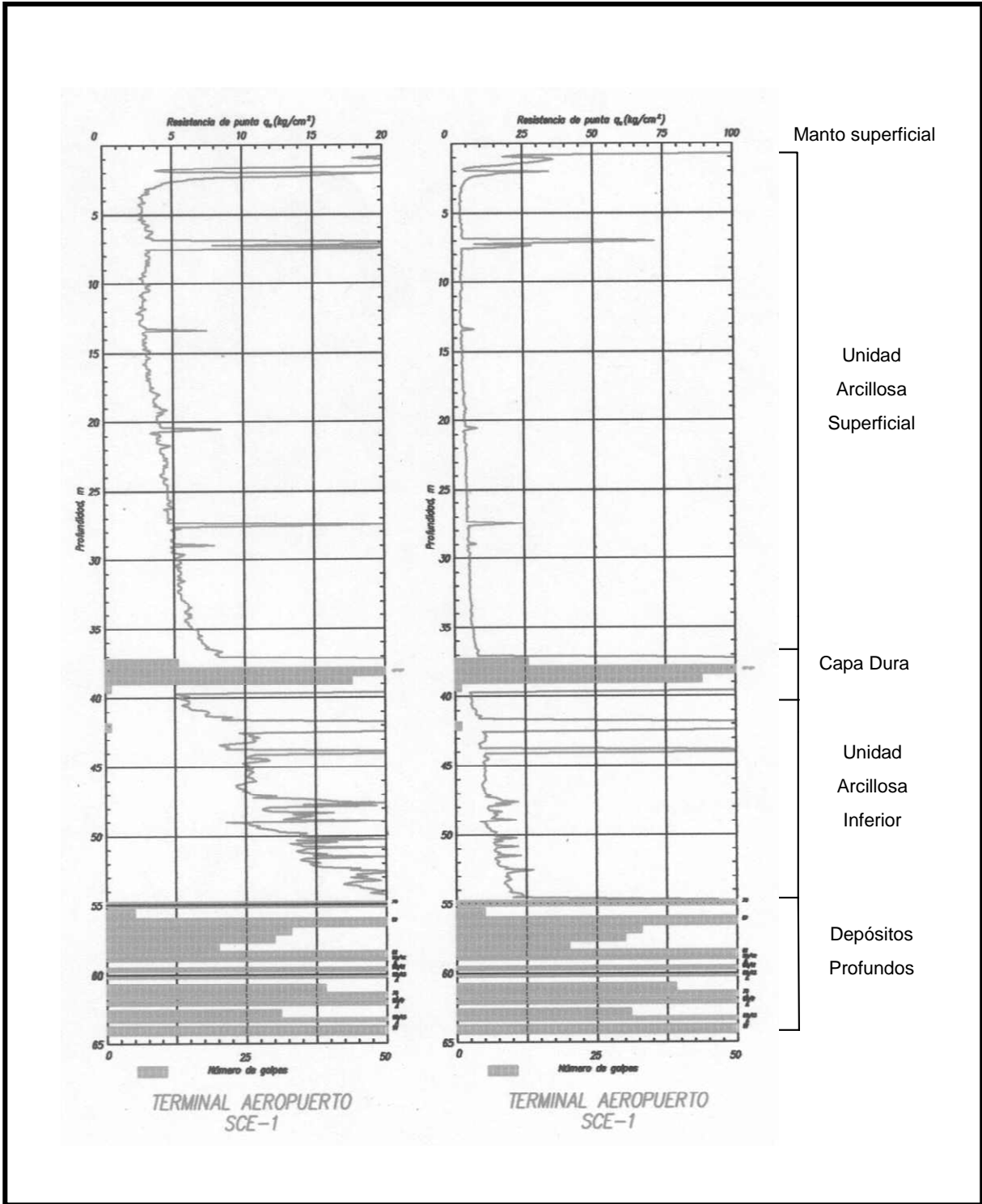


Fig. 4 Sondeo de Cono eléctrico 1 Aeropuerto

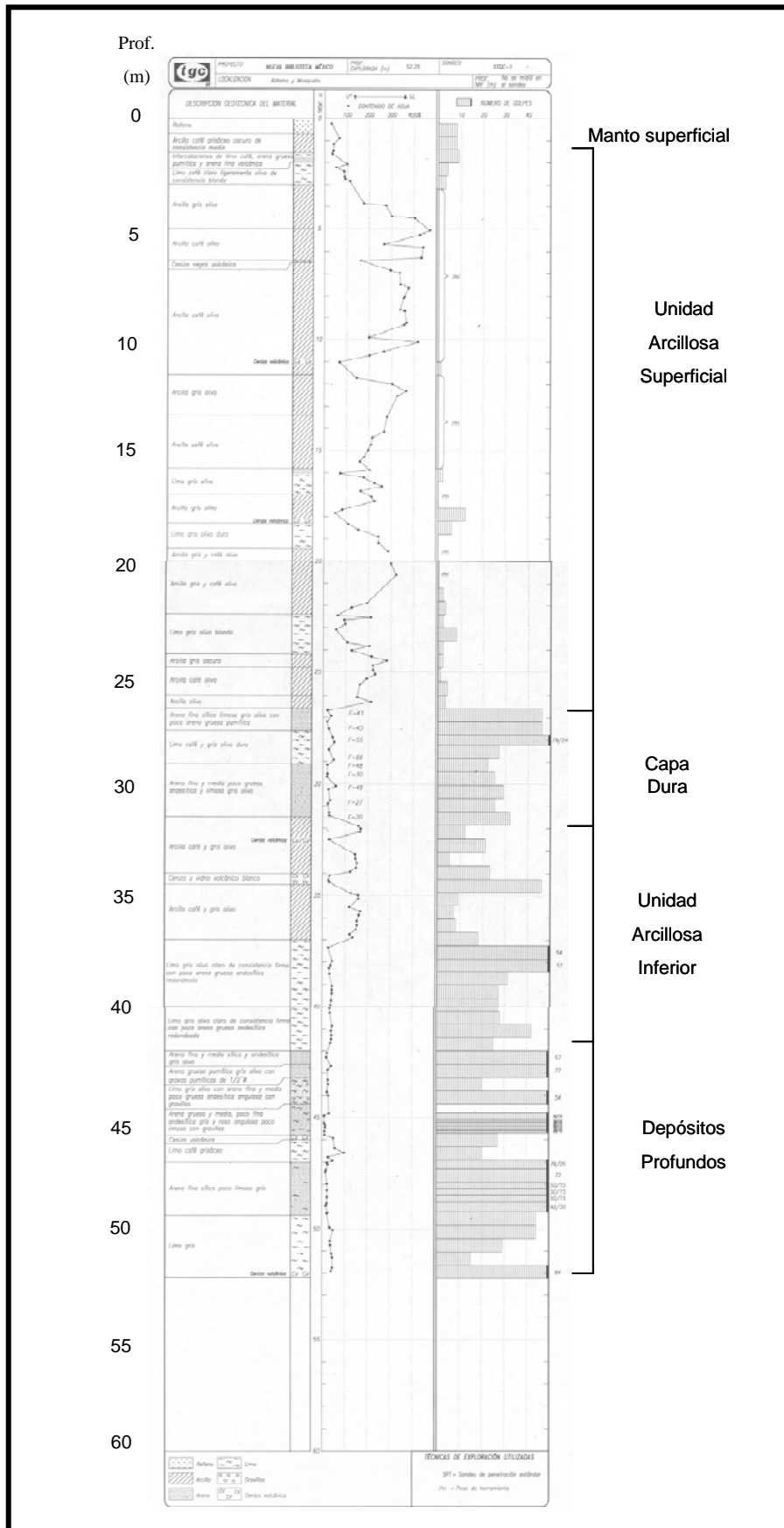


Fig. 5 Sondeo de Penetración Estándar 1 Buenavista

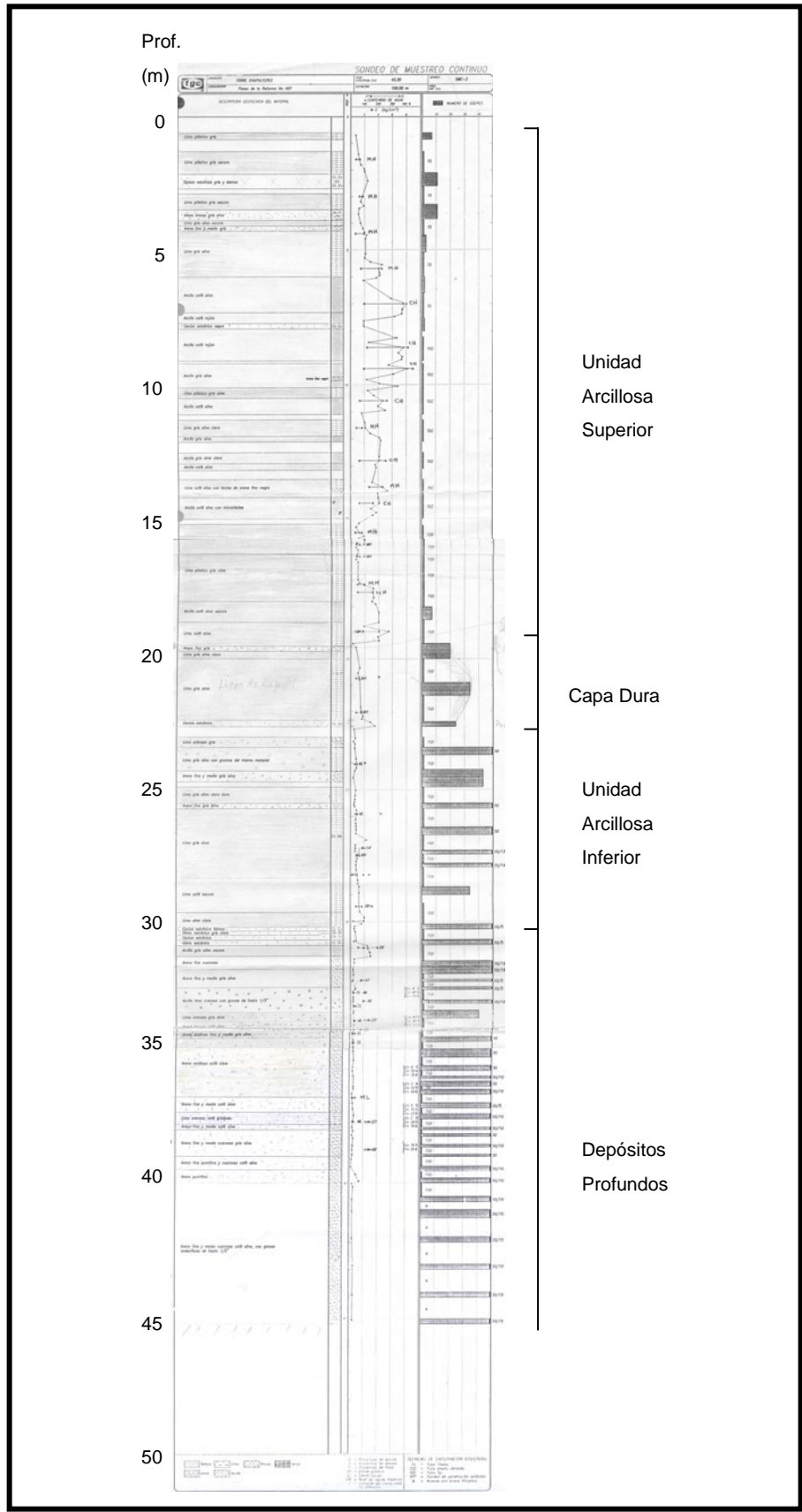


Fig. 6 Sondeo de Muestreo Continuo 1 Chapultepec

IV Marco geológico regional

La Cuenca de México se encuentra en la porción centro-oriental de lo que se conoce como Cinturón Volcánico Mexicano; este cinturón localizado en la región central de México, tiene una orientación casi W-E, comprende desde Nayarit hasta Veracruz y está asociado a la subducción de las placas Cocos y Rivera que tiene verificación a lo largo de la costa sur de México en la trinchera de Acapulco, (Fig.7).

Este cinturón de morfología irregular corresponde a un arco magmático continental alimentado por los fluidos producidos por la fusión de la placa oceánica que alcanza con este fenómeno profundidades en donde se funde y produce un flujo de calor ascendente que va asimilando rocas de la corteza superior; esto forma magmas andesíticos de afinidad calco-alcalina característicos de arcos magmáticos; en su ascenso estos magmas producen esfuerzos que originan empujes verticales y tensión a través de los cuales se genera el vulcanismo y finalmente le dan al cinturón su polémica traza en superficie; muchos autores han propuesto numerosos modelos que tratan de explicar su forma y su posición características.

El cinturón se ha estudiado entre otros por Mooser (1972), Demant (1976) y Ferrari L. (2000). En este trabajo se acepta una división del cinturón en tres tramos que se pueden correlacionar con flexiones y fracturas de la placa de Cocos; estos tramos se hunden a diferentes ángulos y a diferentes velocidades, lo que se traduce finalmente en diferencias en geometría y geoquímica. El primer tramo, el occidental, comprende desde Nayarit hasta la laguna de San Marcos, en este primer segmento la placa subducida acusa un ángulo bastante pronunciado; el extremo oriental de este segmento es cruzado hacia el sur por el graben de Colima, dando lugar a algo parecido a un Punto Triple; el vulcanismo aquí está representado tanto por estratovolcanes como por

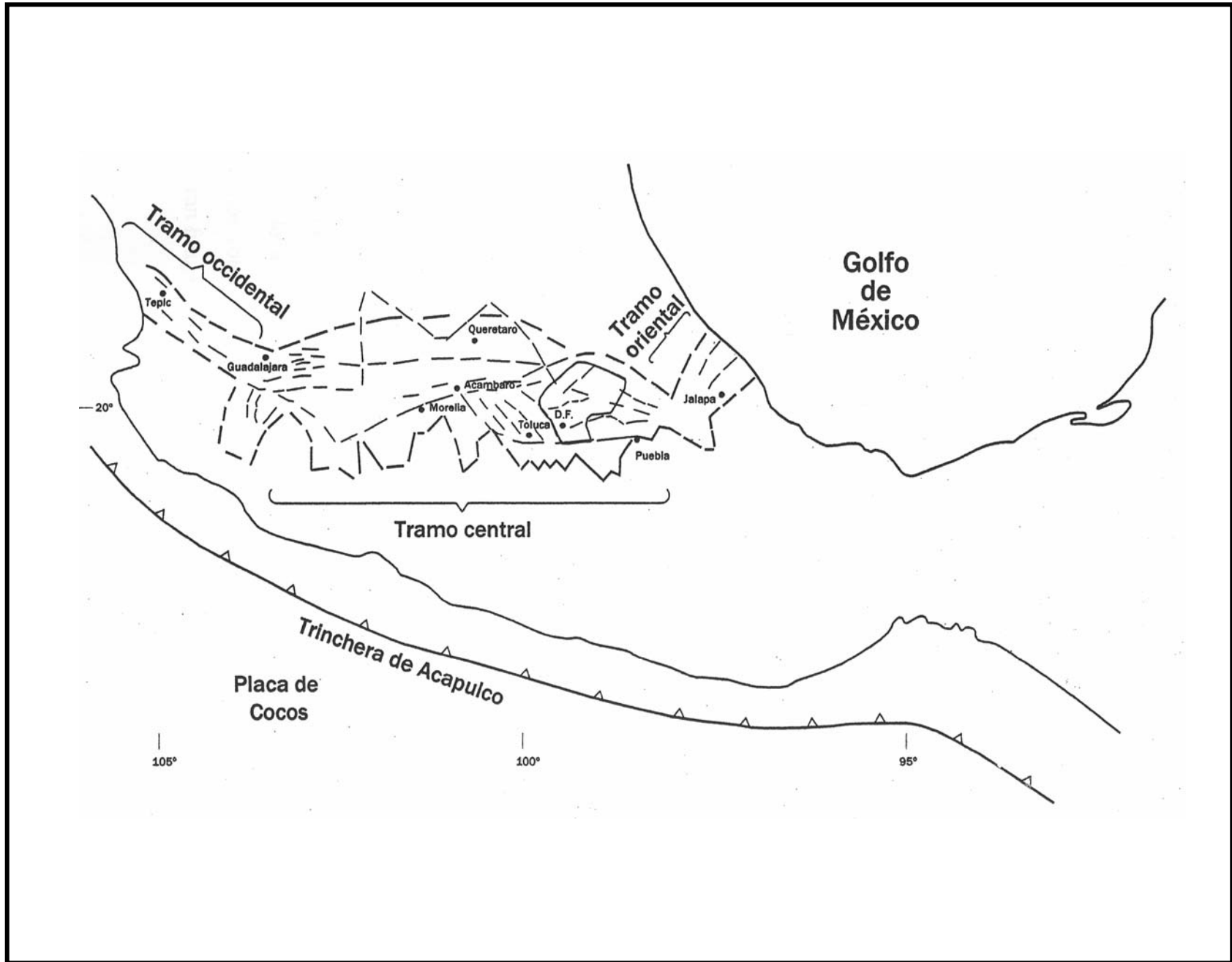


Fig. 7 Cinturón Volcánico Mexicano

volcanes monogenéticos. El segundo segmento, el central, comprende desde la laguna de Chapala hasta el volcán La Malinche, en este segmento queda incluido lo que Mooser llama el “Arco Tarasco”; el ángulo de la subducción en esta región central es bastante bajo, por lo que la placa se funde a una distancia mayor de la trinchera; este segundo segmento se puede subdividir a su vez en dos regiones cuya separación está marcada aproximadamente por el poblado de Acambaro; una sub-región occidental en donde queda incluido el campo volcánico Michoacán-Guanajuato formado por centros volcánicos monogenéticos y pequeños conos volcánicos de composición basáltico-andesíticos y una sub-región oriental en donde la mayor parte del vulcanismo está dado por grandes estratovolcanes y calderas de composición andesítica a riolítica y por campos volcánicos monogenéticos de composición basáltica; es en esta sub-región en donde se encuentra la Cuenca de México; finalmente el tercer segmento que abarca desde La Malinche hasta el Golfo de México, presenta un ángulo muy suave en la placa subducida y el magmatismo tiene lugar muy lejos de la trinchera.

En el área de la cuenca el cinturón se manifiesta complejamente pues se multiplica en fosas con diferentes orientaciones; estos rasgos definieron junto con el vulcanismo la morfología actual de la cuenca; las fosas siguen y concuerdan con los esfuerzos tectónicos dirigidos al norte y noroeste inducidos por la subducción del Pacífico y dan origen a numerosos cuerpos volcánicos que suelen alinearse y forman sierras alargadas como las de Las Cruces y Nevada o sierras aún más complejas como la del Chichinautzin cuyos conos volcánicos siguen las mismas orientaciones que las fosas y fallas en una gran franja alineada W-E, (Fig. 8).

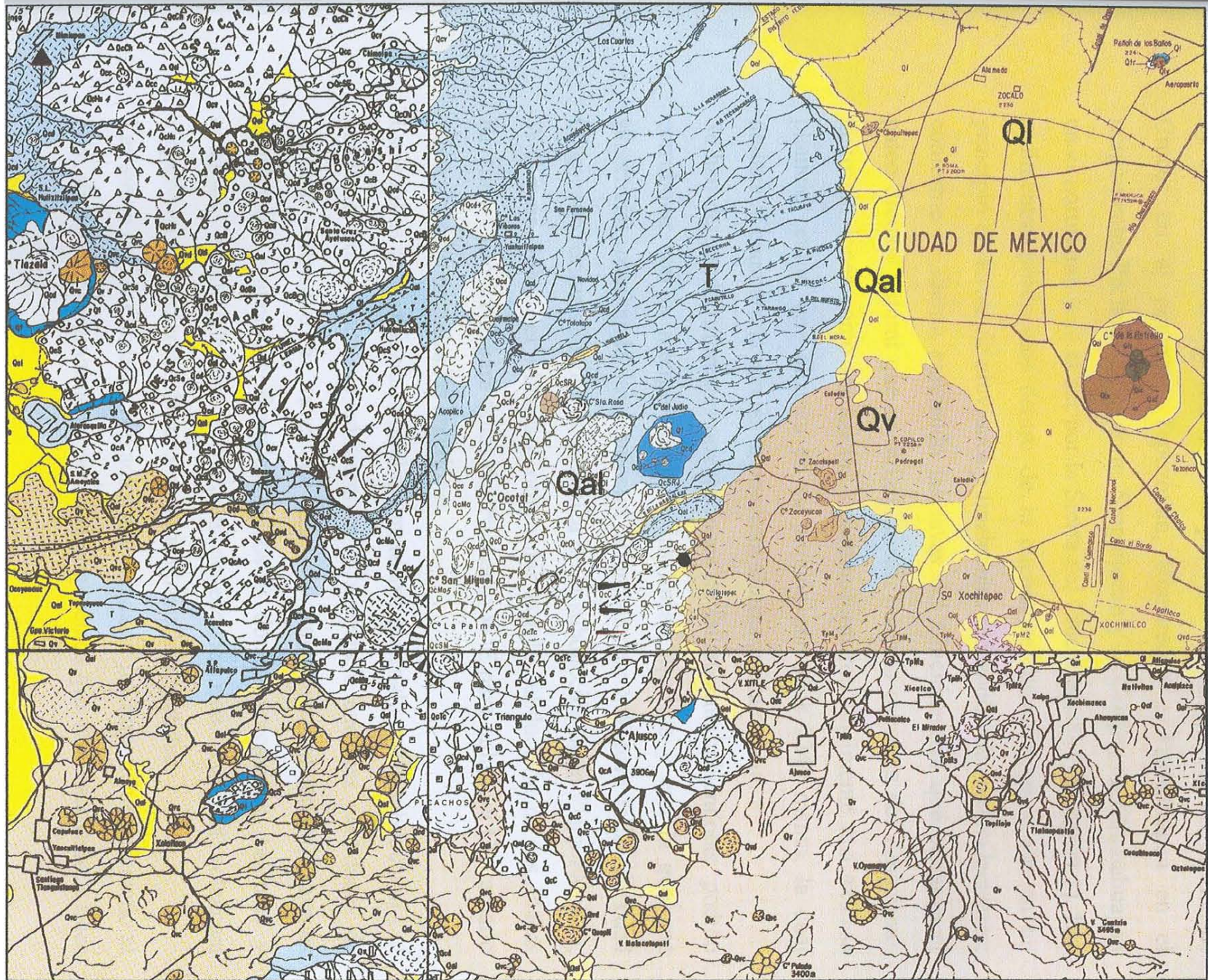


Fig. 8 Geología del SW de la Cuenca de México

La Cuenca de México está limitada por las sierras: Nevada en el oriente, Cruces en el poniente, Tepozotlan, Humaredas y Tezontlalpan en el norponiente, Pachuca en el norte, Singuilucan y la Caldera de Chignahuapan en el nororiente y en el sur por la Sierra del Chichinautzin (ver figura 1). Los sedimentos producidos dentro de la cuenca se fueron acumulando en un principio en forma de aluviones y finalmente secuencias de arcillas lacustres; conforme se fueron emitiendo las lavas del Chichinautzin que cerraron el paleo drenaje natural que se dirigía al sur, hacia la cabecera del Amacuzac, tanto aluviones como secuencias lacustres formaron finalmente una extensa planicie central que alcanza en su porción sur unos 2240 msnm, la cual destaca al compararla con las imponentes alturas que la rodean.

Se han detectado diferentes orientaciones de fallamiento habiéndolas podido corroborar con la interpretación de las líneas sísmicas y con la geología superficial, resultando las siguientes orientaciones: SW para fallas de edad Oligoceno, originadas por la dinámica de la subducción de la Placa Farallón; W-E para fallas del Mioceno, originadas por la subducción de las Placas Rivera y Cocos; NE para fallas del Plioceno; W-E para fallas del Cuaternario y reactivación de todas las anteriores.

Estas fallas son originadas por el magmatismo generado por la subducción y el conducto por el cual se emitieron a la superficie enormes cantidades de material extrusivo a través de cuerpos volcánicos alineados, campos volcánicos, erupciones fisurales, conos y domos volcánicos, calderas y colapsos, estratovolcanes y volcanes de escudo; esta actividad volcánica empezó en el Terciario inferior y continúa hasta la actualidad.

Las sierra de las Cruces y Nevada están ligadas a fracturamiento orientado al NW, al parecer originalmente de edad oligocénica que fue reactivado a fines

del Terciario y principios del Cuaternario dando lugar a grandes cuerpos volcánicos.

La Sierra del Chichinautzin al sur de la cuenca constituida por más de 200 volcanes se formó principalmente a través de fracturas WE, aunque parecen existir fracturas orientadas al NW y al NE. Una importante proporción del vulcanismo en la Sierra del Chichinautzin se dio a través de 5 cuerpos principales: Pelado, Cuatzin, Tlaloc, Tres Cruces, Chichinautzin, Ayaquememe y Zoyazal, los cuales alcanzan las mayores alturas en la sierra.

V Estratigrafía

Se han realizado diferentes divisiones estratigráficas en la Cuenca de México, sin embargo la mayoría de ellas generaliza en formaciones diferentes eventos, lo cual es impráctico en unidades volcánicas contemporáneas que no tienen ninguna relación genética directa. Resulta práctico agrupar a las unidades que se encuentran en el subsuelo de la ciudad en unidades cronoestratigráficas y en el caso de diferentes unidades volcánicas, reunir las bajo el nombre de los cuerpos que le dieron origen. Se consideran aquí las unidades descritas en El Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla de Mooser 1996.

CRETÁCICO.

Durante el Cretácico, en la región central de México, en lo que actualmente es la Cuenca de México, existieron ambientes marinos en los que se desarrollaron arrecifes y lagunas. Los restos de los organismos que vivieron en estos ambientes se acumularon y con el paso del tiempo formaron rocas calcáreas; unidades correlacionables con estas rocas afloran al norte y sur fuera de la cuenca; en Apasco al norte se encuentran las formaciones El Doctor (Kid) y Soyatal (Kss) del Cretácico inferior y superior respectivamente; al sur de Cuernavaca afloran las formaciones Morelos (Kim) y Mezcala (Ksm) de edades equivalentes. En los pozos profundos realizados por PEMEX (Mixhuca y Tulyehualco) se detectaron a 1573 y 2070 metros de profundidad respectivamente calizas mudstone y packstone con fauna de edades Cenomaniano-Santoniano a Albiano-Cenomaniano, correlacionables con aquellas aflorantes tanto al norte como al sur de la cuenca.

TERCIARIO

El fin del Cretácico marca el inicio de la orogenia Laramídica, manifestación del régimen compresivo y del levantamiento del territorio mexicano asociado al fenómeno de subducción de la Placa Farallón establecido desde mediados del Oligoceno en la costa Pacífica que dio origen a la Sierra Madre Occidental; en el Mioceno el proceso de subducción cambia radicalmente al extinguirse la Placa Farallón y comenzar la subducción de las placas de Cocos y Rivera en la Trinchera de Acapulco, a la cual se asocia el Cinturón Volcánico Mexicano activo hasta el Presente.

BALSAS (Teob)

El conglomerado Balsas es testigo y producto del fin de los procesos de levantamiento, tensión y vulcanismo que acontecieron entre el Eoceno Tardío y el Oligoceno temprano, se deposita preferentemente en fosas tectónicas y cuencas. Se trata de lechos rojos continentales que comprenden en su base, conglomerados polimícticos con clastos calcáreos de las formaciones Morelos y Mezcala, contiene también fragmentos de limonitas arenosas rojas con anhidrita y se llegan a presentar intercalaciones de horizontes de tobas, brechas volcánicas y lavas.

ROCAS VOLCANICAS DEL OLIGOCENO (Tov)

Rocas correlacionables con el vulcanismo que dio origen a la Sierra Madre Occidental y se encuentran dentro de la Cuenca de México, afloran en pocos sitios: en las bases de las sierras de Pachuca, Guadalupe y en las calderas del Tigre y Tlaixpan. En el subsuelo de la ciudad los 4 pozos profundos perforados por PEMEX (figura 8) cortaron secuencias volcánicas de esta edad: en el Pozo Roma se reportaron hasta 1 140 metros de espesor de rocas

correlacionables con esta edad; en el pozo Mixhuca se cortaron tan solo 503 m de estas rocas al ubicarse este en una región relativamente alta para el Oligoceno; en general se encuentran los mayores espesores en el área comprendida en una franja alineada NNW-SSE entre los cerros de Chapultepec y de la Estrella, franja asociada con la fosa Roma también de edad oligocénica, la cual permitió en su zona hundida la mayor acumulación de estas rocas; en dichos pozos se reportan basaltos y tobas como constituyentes principales de las rocas oligocénicas.

ROCAS VOLCANICAS DEL MIOCENO (Tmv).

Las rocas de esta edad tienen una mayor distribución que las anteriores, se encuentran en la porción media de las sierras de Pachuca, Tezontlalpan, Guadalupe y Patlachique; se encuentran también en afloramientos aislados en la sierra de Singuilucan, Tepatlaxco y Zempoala en el estado de Hidalgo. En el subsuelo de la ciudad de México los pozos profundos perforados por PEMEX reportaron espesores importantes de vulcanitas asociadas a esta edad, presentan espesores de 180 m en el pozo Mixhuca y 675 m en el pozo Copilco, reportadas en general como basaltos y tobas

ROCAS VOLCANICAS DEL PLIOCENO (Tpv).

Las rocas del Plioceno se encuentran en afloramientos menos restringidos, se encuentran en las sierras de Pachuca, Tezontlalpan, Tepozotlan, Patlachique, Xochitepec y en el cerro de las Pitayas. Fuera de estas sierras no parecen tener espesores importantes; fueron detectadas como delgadas capas de lavas andesíticas y basálticas en los pozos perforados por PEMEX.

DEPOSITOS LACUSTRES DEL PLIOCENO (T_{pl}).

La actividad volcánica miocénica dio origen a grandes sierras en cuyas porciones bajas se encontraban extensas cuencas; en el área cercana a la Cuenca de México comprendía las zonas de Taximay, Tlaxcala y Tlayacapan, su espesor es de 220 a 300 metros y fue detectada por los pozos de PEMEX. Está constituida por capas horizontales de arcillas lacustres y tobas arcillosas, contiene también horizontes de diatomitas y puede presentar algunas capas de lavas.

FORMACION TEPOZTECO (T_{ptz}).

Constituyen los abanicos volcánicos provenientes de tres grandes calderas localizadas entre Tenango y Amecameca; estos abanicos sufrieron erosión y transporte llegando a conformar importantes espesores de capas subhorizontales de material retrabajado intercalado con capas netamente fluviales y a veces con horizontes lacustres o capas de lavas basálticas. En las líneas sísmicas de reflexión profunda de la ciudad levantadas por PEMEX están representada por capas con reflectores paralelos, fuertes y continuos, presentando espesores variables que se acúñan hacia la Sierra de Guadalupe y que alcanzan sus espesores máximos (700m) en el sur de la ciudad.

CUATERNARIO.

En esta época la actividad volcánica se incrementó de manera importante, es precisamente con los inicios del Cuaternario cuando se empiezan a formar las grandes sierras al poniente y oriente de la ciudad formadas por alineamientos de grandes cuerpos volcánicos nutridos por cámaras magmáticas; estos volcanes han manifestado múltiples ciclos de actividad, frecuentemente explosiva, cuyos productos piroclásticos y tobas en general se depositan en sus

porciones bajas en forma de abanicos extensos; dicha actividad permitió la acumulación de vulcanitas que sobrepasan en algunos sitios los 5 000 msnm como es el caso del Popocatepetl y del Iztaccihuatl.

En forma más o menos paralela al inicio de la formación de las grandes sierras se forman también los cerros de la Estrella, el Pino, Chimalhuacan y Chiconautla, en el centro del valle de aquel entonces, son todos pequeños escudo-volcanes de composición basáltico-andesítica con intercalaciones de cenizas, lapilli y escoria; estos volcanes presentaron varios ciclos de actividad.

SIERRA DE LAS CRUCES.

Se trata de una gran sierra formada por la alineación de una docena de cuerpos volcánicos orientada al NW, desde el sur se encuentran los cerros: Zempoala, Tlalli, San Miguel, Salazar, Bobashi, Huitzitzilpan, Chimalpa, Mimiapan, Monte Alto, Jilotzingo, Navajas y Rehilete. Se trata de elevaciones volcánicas que alcanzan casi los 4 000 msnm, su composición es generalmente andesítica aunque se encuentran en menor proporción rocas basálticas y riolíticas; presentan extensos abanicos volcánicos que se formaron por erupciones explosivas las cuales dieron origen a nubes ardientes y flujos piroclásticos que alcanzaron las porciones bajas de la cuenca, en donde se encuentran cubiertas parcialmente por los sedimentos aluvio-lacustres más jóvenes.

CERRO DE SAN MIGUEL.

El cerro de San Miguel es un estrato-volcán que alcanza los 3 800 msnm, se ha formado por varios ciclos de actividad dentro de la que destacan de manera importante sus productos tobáceos emitidos por erupciones que formaron lo que se conoce como las Lomas de Chapultepec; presenta varios colapsos producto de vaciamientos originados por diferentes erupciones, las cuales

dieron origen a unos 70 km³ de material tobáceo. Mooser ha diferenciado la siguiente secuencia: Arenas Azules, Xolopo, Triple Pómez de Hank, Cuquita y Lahar Ciclópeo, además de varias emisiones pumíticas más jóvenes dentro de las que se encuentran las que formaron a la Capa Dura. Las Arenas Azules constituyen el flujo piroclástico más joven fechado en unos 270 000 años, mientras que el Lahar Ciclópeo es el más viejo. La Cuquita está constituida por un flujo piroclástico pumítico de color café amarillento con clastos andesíticos, se asocia a una de las primeras etapas volcánicas del cerro San Miguel. Encima de La Cuquita se encuentra una triple capa de pómez de color blanquecina a amarillenta de granulometría gruesa, se trata de la Triple Pómez de Hank; mientras que la Xolopo encima de estas últimas está constituida por un flujo piroclástico de composición dacítico-andesítico, su coloración es negri-blanca y se asocia a la erupción del domo de Totolapa que aflora en Santa Fe; finalmente las Arenas Azules se encuentran en la cima la secuencia volcánica explosiva del cerro San Miguel.

SIERRA DEL CHICHINAUTZIN.

Corresponde al extenso campo volcánico ubicado al sur de la ciudad de México está formado por unos 220 conos volcánicos, la mayoría de ellos monogéticos, destacan por sus dimensiones los cerros Tres Cruces, Cuatzin, Chichinautzin, Tlaloc, Ayequememe y Huipulco, cuya actividad repetida ha permitido la acumulación de vulcanitas que rebasan los 3 000 msnm; la composición de las vulcanitas que conforman la sierra es principalmente basáltico-andesítica, presenta intercalaciones de cenizas y tezontle, pero en general muy pocas capas de tobas; esta sierra cubre a unidades cretácicas y terciarias en su flanco sur y se interdigita con depósitos aluviales y lacustres en su flanco norte. Se calcula que la Sierra del Chichinautzin empezó su

actividad hace unos 600 a 700 mil años; presentó actividad importante hace unos 2 000 años que dio origen al Xitle. Considerando que la sierra cubre una extensión aproximada de 1500 km² (50x30 km) y que presenta espesores promedio de entre 1 000 y 1 500 metros, resulta que tiene un volumen aproximado de 1500 a 2000 km³.

SIERRA DE SANTA CATARINA.

Casi en forma paralela al vulcanismo de la Sierra del Chichinautzin se forma la sierra de Santa Catarina en la región centro-sur de la cuenca, está formada por la alineación WSW-ENE de 6 conos volcánicos monogenéticos: Yuhualixqui, Xaltepec, Tetecon, Mazatepec, Tecuatzin y Santa Catarina, sus altitudes aumentan de oeste a este y alcanzan en su porción más elevada 2750 msnm, mientras que su base se encuentra al nivel de la planicie lacustre, es decir a 2240 msnm. La composición de las vulcanitas que forman la Sierra de Santa Catarina es fundamentalmente basáltica y cubren un área de unos 50 km².

DEPOSITOS ALUVIALES (Qal).

La Sierra del Chichinautzin cerró la cuenca que comprende el área entre Pachuca y las sierras de Tezontlalpan-Cruces y Chignahuapan-Nevada; la cuenca se fue llenando paulatinamente con materiales fluvio-aluviales hasta formar una planicie que finalmente fue cubierta por secuencias lacustres modernas hasta alcanzar los 2240 msnm en la región que hoy ocupa la ciudad de México; las secuencias aluviales miden unos 700 m de espesor en el sur y se acuñan hacia la sierra de Guadalupe en el norte. Estos depósitos están constituidos por material clástico arrastrado desde las elevaciones circundantes que les dieron origen a través de la erosión, acumulándose

finalmente a los pies de estos elementos volcánicos; en el subsuelo los depósitos aluviales descansan sobre la Formación Tepozteco cuya superficie estructural está formada por valles y mesetas, aunque localmente pueden cubrir rocas volcánicas más antiguas.

DEPOSITOS LACUSTRES (Q1).

En la cima de la secuencia estratigráfica se encuentran los depósitos arcillosos formados en el centro de la cuenca; importantes precipitaciones pluviales y la falta de un drenaje que condujera el agua fuera de la cuenca permitieron el desarrollo de extensos lagos que podían ser interrumpidos por períodos de sequía, en los cuales no se formaban lagos; en cambio en las épocas lluviosas la mancha lacustre podía extenderse por todo el fondo de la cuenca desde Zumpango hasta Chalco.

Dentro de las secuencias arcillosas es frecuente encontrar horizontes de cenizas y pómez provenientes de erupciones de volcanes cercanos (Popocatepetl) y algunas veces lejanos (Nevado de Toluca), los lagos también presentan apogeos en los que abunda el desarrollo de organismos flotantes con conchas esféricas.

La formación de las arcillas se explica por caída de polvo pumítico fino en el lago, el cual se altera dando origen a arcilla en el ambiente alcalino del lago. Los espesores de la secuencia lacustre varían entre 30 y 50 metros en la porción norte de la ciudad, pero alcanzan los 100 metros en la región sur y se acuñan en donde la altura de las unidades subyacentes empieza a elevarse.

A continuación se indican las características más relevantes de los pozos profundos perforados por PEMEX en 1986; datos que también fueron utilizados para definir la estratigrafía.

POZO COPILCO 1

Localización: queda localizado en las inmediaciones de Ciudad Universitaria, delegación Coyoacan, en el Distrito Federal.

En las siguientes coordenadas (UTM):

X= 481,847.58 metros

Y= 2'135,571.98 metros

Elevación estimada del terreno 2266.62 msnm

Profundidad total 2258 metros

DIVISION LITOESTRATIGRAFICA

0-23 m	Basaltos
23-511	Tobas, brechas y arcillas
511-647	Basaltos y arcillas
674-1352	Tobas, arcillas y basaltos
1352-1580	Arcillas y tobas arenosas
1580-2258	Basaltos, tobas y arcillas

POZO MIXHUCA1

Localización: se localiza en las inmediaciones del Autódromo de la Magdalena Mixhuca, delegación Iztacalco en el Distrito Federal.

En las siguientes coordenadas (UTM):

X= 490,896.09 m

Y= 2'144,344.36 m

Elevación del terreno 2235.03 msnm

Profundidad total 2452 m

DIVISION LITOESTRATIGRAFICA

0-90 m	Sedimentos lacustres
90-160	Basaltos, arcillas y tobas
160-272	Conglomerados, arcillas y tobas
272-592	Tobas, andesitas y conglomerados
592-675	Brechas y basaltos

675-817	Tobas, basaltos y brechas
817-948	Tobas y basaltos
948-1573	Basaltos y tobas
1573-1736	Calizas de textura mudstone
1736-1812	Calizas de textura mudstone
1812-2452	Calizas de textura wackestone y packestone

POZO ROMA 1

Localización: se ubica en los terrenos del conjunto habitacional Benito Juárez, delegación Cuauhtemoc en el Distrito Federal.

En las siguientes coordenadas (UTM):

X= 483,496.18 m

Y= 2'146,137.50 m

Elevación del terreno 2232.33 msnm

Profundidad total 3200 m

DIVISION LITOESTRATIGRAFICA

0-8 m	Sedimentos lacustres
8-49	Tobas y conglomerados
49-556	Brechas de andesitas, basaltos y tobas
556-732	Tobas y limonitas
732-816	Brechas de andesitas y basaltos
816-908	Tobas riolíticas
908-1092	Brechas y basaltos
1092-1599	Tobas y basaltos
1599-1865	Basaltos y tobas
1865-2334	Tobas y basaltos
2334-2730	Brechas calcáreas
2730-3200	Tobas

POZO TULYEHUALCO 1

Localización: se encuentra localizado a 8592.061 metros del vértice de triangulación Xochiltepec, dentro del lote propiedad del Departamento del Distrito Federal, colonia Del Mar, delegación San Felipe Tlahuac, Distrito Federal.

En las siguientes coordenadas (UTM):

X= 493,653.779 m

Y= 2'131,778.089 m

Elevación del terreno 2240.91 msnm

Profundidad total 3000 m

DIVISION LITOESTRATIGRAFICA

0-94 m	Sedimentos lacustres
94-145	Rocas volcánicas
145-829	Arcillas y rocas volcánicas
829-2070	Basaltos y tobas
2070-2223	Bioimicrita
2223-3000	Sedimentos calcáreos del Cretácico medio

VI Geología histórica

Dentro de la cuenca se encuentran rocas que comprenden desde el Cretácico hasta el Reciente. El Cretácico está formado por sedimentos marinos constituidos por calizas, lutitas y areniscas que afloran en el área de Apasco y Cuernavaca; fue detectado en el subsuelo de la ciudad por los pozos Mixhuca a 1573 m de profundidad y por el Tulyehualco a 2070 m de profundidad, en ambos se cortó una cabalgadura evidenciada por la sobreposición del cretácico inferior sobre el superior; el área que ocupa la cuenca estuvo para este tiempo cubierta por mares que dieron origen a secuencias sedimentarias, las cuales posteriormente sufrieron fenómenos orogénicos como se puede observar en las unidades cretácicas equivalentes que afloran fuera de la cuenca.

Para fines del Cretácico e inicios del Terciario (hace unos 65 Ma.) estos mares se fueron retirando hacia el golfo de México debido al desarrollo de la orogenia Laramídica generada por el régimen compresivo y el levantamiento de la Placa Norteamericana a partir de la subducción de la Placa Farallón, fenómeno que dio origen a decollement, la cual junto con la compresión generaron los pliegues y cabalgaduras orientados al NNW de la Sierra Madre Oriental.

Testigo y producto de estos procesos orogénicos y de levantamiento que aceleraron los fenómenos erosivos son los conglomerados Balsas que se depositaron preferentemente en valles y fosas tectónicas.

Para el Terciario (entre 65 y 1.6 m.a.) la actividad volcánica asociada a la subducción de la Placa Farallón en el Pacífico, forma el arco volcánico que dio origen a la Sierra Madre Occidental, la cual representa el campo ignimbrítico más extenso del planeta. En la cuenca las manifestaciones de esta actividad formaron las calderas del Tigre y de Tlaixpan.

Para el Mioceno el vulcanismo se va generalizando aunque ahora asociado a la subducción de las placas Rivera y Cocos, dando origen al actual arco volcánico que forma el Cinturón Volcánico Mexicano. El vulcanismo en este tiempo formó en la cuenca las sierras de Pachuca, Tezontlale, Guadalupe y Patlachique.

Como resultado de la actividad volcánica miocénica y aunque continúa cierto vulcanismo en el Plioceno, se forman extensas cuencas lacustres intervolcánicas en las que se depositan importantes espesores de arcillas intercaladas con horizontes de tobas, cenizas y tobas silicificadas. Afloramientos correspondientes a esta época se encuentran en Tepeji del Río, Requena, Tequisquiac y Tlayacapan.

El vulcanismo prevaleció a mediados del Plioceno dando origen a algunas sierras como la de Tepozotlan, Apan y el cerro de las Pitayas; la actividad volcánica continuó en otras sierras en donde había iniciado desde el Oligoceno como las de Pachuca, Guadalupe y Patlachique.

Para el fin del Plioceno el vulcanismo se intensifica en el área comprendida entre Amecameca y Tenango, formándose 3 cuerpos volcánicos cuya actividad paroxismal formó grandes calderas y emitió enormes volúmenes de brechas volcánicas que posteriormente se erosionaron y redepusieron para formar lo que se conoce como Formación Tepozteco, cuyos vestigios se encuentran aflorando al sur de la Sierra del Chichinautzin, pero en la cuenca están sepultados, cubiertos por las vulcanitas y los depósitos aluvio-lacustres del Cuaternario.

Después de esto se desarrolló en el Tepozteco una red fluvial (Red de Valles del Plio-Cuaternario) que drenaba el valle que nacía a los pies de la Sierra de Pachuca y se desarrollaba hasta Cuernavaca ligado con la cuenca del Río Amacuzac.

En el inicio del Cuaternario el vulcanismo se intensifica de manera importante desarrollándose en los límites oriental y occidental de la cuenca dos enormes sierras formadas por alineaciones de grandes aparatos volcánicos: estratovolcanes, escudovolcanes y calderas forman así las sierras de las Cruces y Nevada. Gran parte del vulcanismo establecido en estas dos enormes sierras fue explosivo dando lugar a extensos abanicos volcánicos formados por los enormes volúmenes de material eyectado en forma de nubes ardientes y flujos piroclásticos que eventualmente formaron grandes colapsos.

El vulcanismo continuo durante el inicio y la primera mitad del Cuaternario, en ocasiones en las grandes sierras en donde algunos grandes estratovolcanes como el cerro de San Miguel, el Iztaccihuatl, el Popocatepetl o el Ajusco tenían erupciones esporádicas, pero hace unos 600 mil años inicio intenso vulcanismo en el área entre Popocatepetl-Iztaccihuatl en el oriente y Tlalli-Zempoala en el poniente, dando lugar a la emisión de enormes volúmenes de material basáltico-andesítico, a través de numerosos conos, domos y hasta por fisuras, en el área que anteriormente habían ocupado las enormes calderas que dieron origen al Tepozteco.

Esta enorme cantidad de vulcanitas cerró el drenaje dirigido al sur formándose así una enorme cuenca desde Pachuca hasta Xochimilco y desde las Sierra de las Cruces hasta la Sierra Nevada. El cierre originó que los importantes volúmenes de detritos producidos dentro de ella se fueran acumulando en el fondo hasta alcanzar una altura de 2240 msnm, siendo coronados por una importante secuencia lacustre que dominó desde el Pleistoceno superior hasta el Reciente, precisamente sobre esta planicie lacustre se encuentra ahora la ciudad y dentro de la secuencia lacustre a unos 30 m de profundidad encontramos la Capa Dura.

TECTÓNICA

Dentro de la Cuenca de México se encuentran fallamientos con orientaciones variadas que fueron determinados con base en la interpretación de las líneas sísmicas de reflexión profunda realizadas por PEMEX en 1986 (Mooser et al 1992) y por geología superficial; fallamientos cuyas edades abarcan desde el Oligoceno hasta el Reciente y están ligados a la subducción en el Pacífico bajo un régimen de compresión-tensión establecido por el juego entre la subducción y el vulcanismo acompañados por movimientos de cizalla ocasionados por la compresión entre las placas de Norteamérica y Cocos.

Se encontraron así los siguientes sistemas de fallas (figura 9):

FALLAS DEL OLIGOCENO

Como consecuencia de la subducción de la Placa Farallón se producen en el Oligoceno fallamientos orientados al NW; las calderas del Tigre y Tlaixpan están cortadas por fallas con esta dirección, en ambos casos las calderas solo conservan la mitad de su tamaño original; las mitades faltantes se encuentran sepultadas por las unidades más recientes.

FALLAS DEL MIOCENO

La extinción de la Placa Farallón y el inicio de la subducción de las Placas Rivera y Cocos, marcan un cambio en la dirección de la subducción, ahora se establece entre la costa sur de México entre Nayarit y Chiapas, acompañada por fallamiento orientado WNW-ESE.

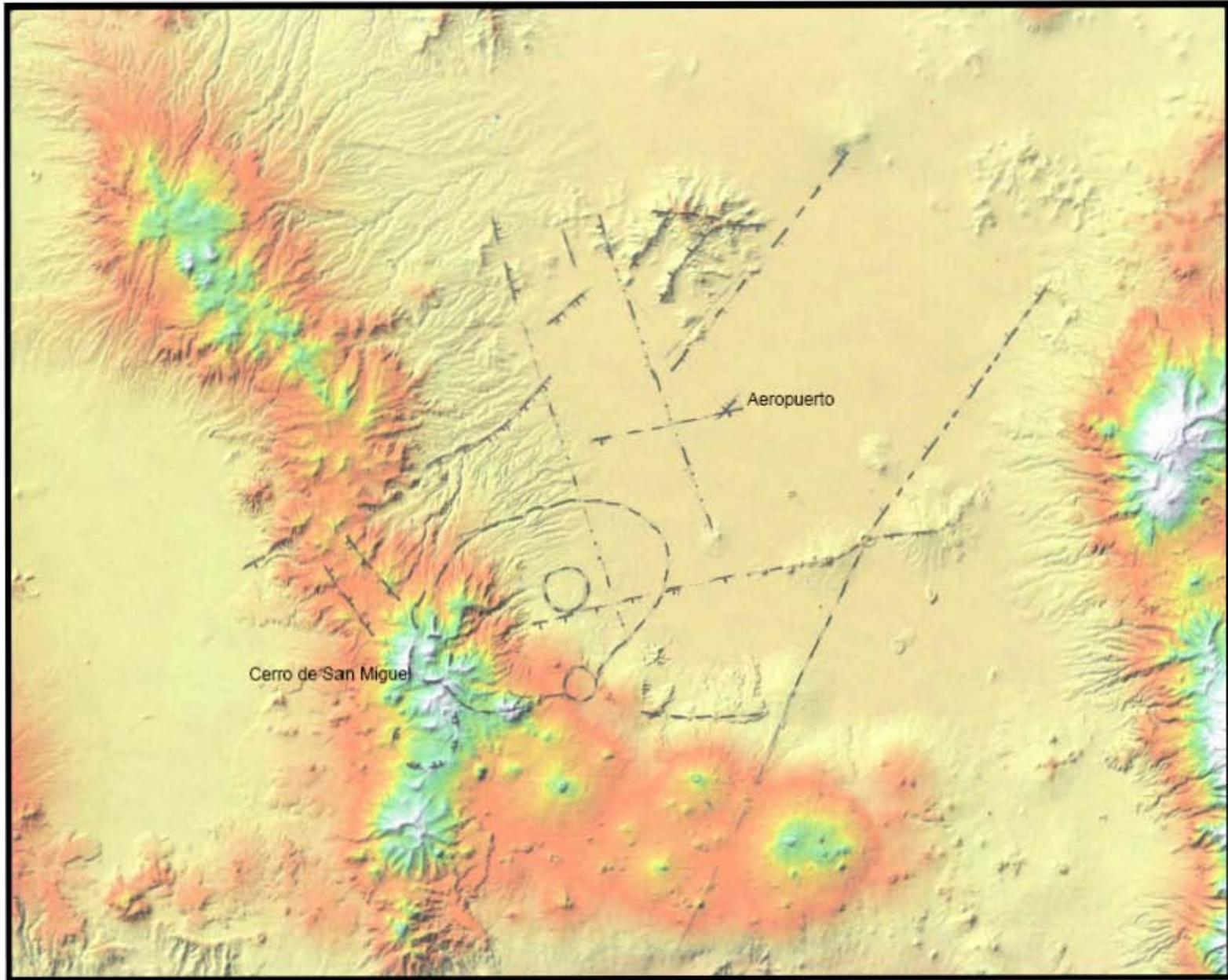


Fig. 9 Modelo de elevación del terreno con tectónica del sur de la Cuenca de México

FALLAS DEL PLIOCENO

Para el Plioceno el empuje de la subducción presenta una componente de compresión dirigida hacia el NE, sobre el territorio mexicano, lo que produce tensión en el sentido perpendicular, es decir en dirección NW-SE, esto sumado a los movimientos de cizalla permite la apertura de fracturas orientadas al NE.

FALLAS DEL PLIO-CUATERNARIO

En el Cuaternario el tectonismo asociado a la subducción de la placa de Cocos presenta una orientación W-E; las fallas oligocénicas, miocénicas y pliocénicas se reactivan con frecuencia bajo el campo de esfuerzos tectónicos que rige al Cinturón Volcánico Mexicano, en el contexto de la tectónica de placas; así fallas orientadas al NW y NE pueden ser reactivadas.

Las sierras de las Cruces y Nevada están ligadas a fracturamiento orientado al NW que se formó originalmente en el Oligoceno, pero que fue reactivado a fines del Terciario, esto permitió el nacimiento de grandes estrato y escudo volcanes cuyas cámaras magmáticas con frecuencia eran alcanzadas por aguas freáticas, produciéndose erupciones explosivas que culminaban con la formación de huecos en el subsuelo al ser evacuados grandes volúmenes de magma; los huecos finalmente cedían generando colapsos semicirculares. Las violentas erupciones originaban en ocasiones cráteres de explosión como el que se observa en la cima del cerro de San Miguel, el cual posteriormente fue parcialmente rellenado con un par de domos finales, de ellos el más alto es conocido como cerro de La Palma.

VII Resultados

Correlaciones

En la figura 10 se presentan las columnas estratigráficas para la Capa Dura en 8 sitios puntos a lo largo de 32 kilómetros, desde el cráter del cerro San Miguel hasta el aeropuerto; los puntos 1-3 se encuentran en el lago; y los puntos 4-8 en las Lomas.

Las correlaciones estratigráficas para las distintas columnas se establecen a partir de las secciones más completas, que son las de Contadero (7) Totolapa (6) y Puente Santa Fe (5) en las Lomas. En ellas cada elemento estratigráfico volcánico lleva un número, partiendo del 1 al 9, siendo el último el más joven. La columna del aeropuerto, es en donde la Capa Dura presenta su espesor más reducido (1.70 m), correspondiendo 1 m a pómez y 70 cm a arcillas; la Capa Dura aquí está constituida por 4 erupciones pumíticas y 2 horizontes de arcillas lacustres endurecidas intercalados.

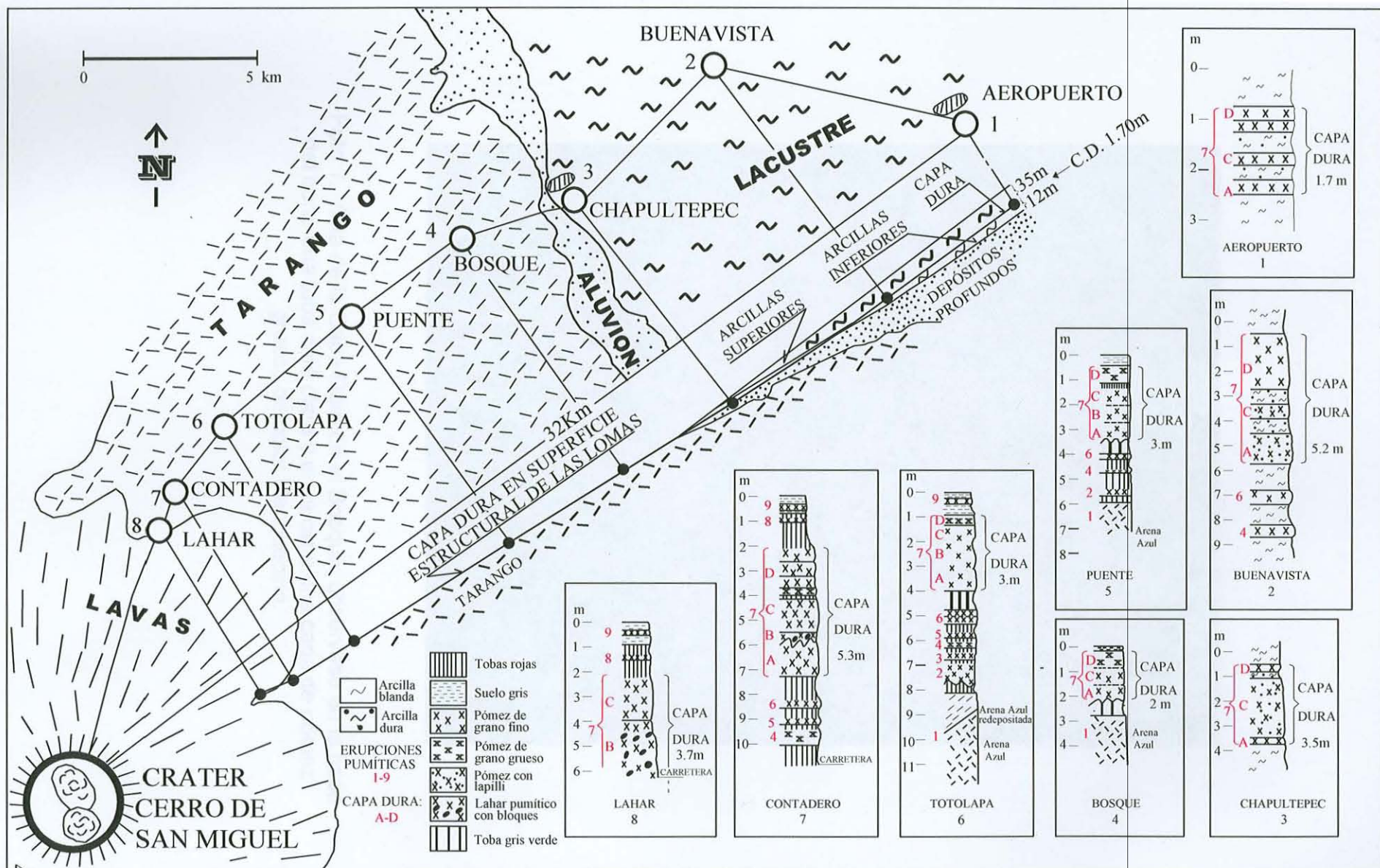
La columna más detallada en el lago corresponde al sitio Buenavista. Aquí la Capa Dura acusa un espesor de 5.20 m reconociéndose en ella 3 horizontes que corresponden a numerosas erupciones pumíticas, los cuales tienen un espesor total de 4 m; estos horizontes de pómez se encuentran separados por 2 capas de arcillas endurecidas con espesor total de 1.20 m. Es importante en esta columna la presencia de 2 erupciones de pómez fina anteriores a la Capa Dura, arreglo que se reconoce también en la columna del Puente Santa Fe, en donde aparece igualmente un par de horizontes de pómez fina debajo de la Capa Dura.

La Capa Dura en el Bosque y el Puente (fotos 1 y 2) presentan ambas el hábito constante de un solo estrato de pómez. Sin embargo al analizarlo cuidadosamente aparecen en él claras subdivisiones que prueban su origen a partir de varias erupciones individuales; se reconocen así 4 franjas de toba

amarilla en el Puente y 3 en el Bosque. La anterior subdivisión se acentúa en las columnas de Totolapa y Contadero (fotos 3 y 4), donde aparecen ya con gran claridad la totalidad de los elementos estratigráficos y eventos volcánicos. Es interesante el elemento final de la Capa Dura (D) en el Contadero: consiste este de 4 emisiones en una sola erupción, habiendo sido la primera de grano grueso. Su sello aparece claramente en las columnas 7, 6 y 5 y además en la de Chapultepec, a orillas del lago.

Una característica que resalta en las columnas Bosque, Puente y Totolapa es también la ondulación a la base de la Capa Dura. Este fenómeno es probablemente el producto de un proceso hidrológico y químico: los horizontes de pómez son excelentes conductores de agua, lo cual los somete a presión y a la vez se hidrata el polvo pumítico recién caído, químicamente activo.

La conexión final con el volcán del cerro San Miguel se da para las columnas analizadas a través del elemento estratigráfico B contenido en la Capa Dura, se trata de un lahar pumítico con bloques que bajó de su cráter y aflora en un corte que se encuentra a 200 m de distancia del cruce de la autopista a Toluca con el camino al Desierto de los Leones (foto 5).



147 Fig. 10 GEOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA DE LA CAPA DURA



Foto 1. Vista de la Capa Dura en el Bosque, obsérvese en la base del corte una toba café clara y en la cima una capa de pómez gruesa de color blanquecino.



Foto 2. Panorámica de un corte sobre la autopista México-Toluca, sitio Puente; se observa en la porción superior la Capa Dura de color grisáceo descansando sobre una toba de color gris que se erosiona con facilidad formando cavidades.



Foto 3. En esta fotografía se muestra la Capa Dura en el sitio Totolapa desde una vista alejada; se puede observar en la porción superior del corte, debajo de ella se aprecia un horizonte tobáceo irregular de color café grisáceo.



Foto 4. Vista de la Capa Dura en el sitio Contadero; se aprecia cubierta por una toba rojiza; en la porción superior de ella se puede ver, en color más claro, la característica erupción pumítica cuádruple (A,B,C,D).



Foto 5 Vista de la Capa Dura en el sitio Lahar, la cual se observa en la porción media del corte acusando una dureza elevada comparable con la del concreto lanzado que cubre las tobas rojizas encima de ella.

Duración del ciclo eruptivo

Las erupciones pumíticas duran poco tiempo; pocos minutos, cuando mucho un cuarto a media hora.

Por otro lado, entre grandes erupciones pueden pasar decenas de años, siglos o milenios. Las huellas de estos tiempos en las Lomas son los suelos y las tobas meteorizadas y en el lago las arcillas con sus espesores variables.

Podemos asignarle a las 4 erupciones que constituyen la Capa Dura un lapso de unos 10 a 15 mil años, a través del siguiente cálculo: como las arcillas blandas entre la superficie y la Capa Dura miden unos 30 m de espesor y el tiempo transcurrido es de unos 130 000 años, cada metro de arcillas blandas se debe haber formado en unos 4 300 años. Ahora bien, considerando que en la sección Buenavista hay 2 capas de arcillas que miden un total de 1.20 m, y que estas se encuentran deshidratadas y consolidadas posiblemente a la mitad o a un tercio de su espesor original, entonces resulta un lapso de unos 10 000 a 15 000 años para que se formaran estas capas de arcilla.

Ello sugiere que el volcán del cerro San Miguel terminó su vida dramáticamente hace unos 130 000 años con unas 4 erupciones, una cada 2500 a 3750 años. Es así como se produjo la Capa Dura. ¡Qué harían sin ella los edificios pesados de la ciudad y los mecánicos de suelos!

VIII Conclusiones

Queda comprobado que el material pumítico de la Capa Dura proviene de erupciones originadas en el volcán cerro San Miguel. Todos los horizontes aumentan de espesor en dirección a su cráter y hacen finalmente contacto con uno de sus lahares más recientes.

La correlación entre las erupciones volcánicas que componen a la Capa Dura dentro de la secuencia lacustre y sus elementos homólogos en las Lomas se da primero por su posición estratigráfica. En ambos sitios representan un conjunto de importantes erupciones pumíticas geológicamente muy jóvenes.

Tanto en el lago (Buenavista) como en las Lomas (Puente Santa Fe) anteceden a la Capa Dura dos erupciones pumíticas características.

Tanto en el lago como en las Lomas la Capa Dura se compone de varias erupciones pumíticas. Son reconocibles por lo menos 4 erupciones individuales.

En el lago los intervalos entre erupciones quedan representados por depósitos de arcillas lacustres. En las Lomas dichos intervalos están marcados por tobas meteorizadas, las cuales en las partes bajas adquieren color gris-verde o amarillo y en las partes altas color rojo.

La hipótesis de que la Capa Dura representaba un depósito de suelos entre dos transgresiones lacustres ya no puede aceptarse. Su edad de unos 130000 años tampoco corresponde al Tercer Interglacial que ocurrió hace 120000 años; no hay evidencias que permitan reconocer que el lago en ese tiempo se evaporó,

parece no haber ocurrido en la cuenca una sequía en ese tiempo. Prevaleció para entonces un ambiente lacustre con depósito de arcillas, no de suelos.

En vista de que la Capa Dura representa un conjunto de erupciones pumíticas de distintas energías, distribuidas a través de una decena de milenios, cada erupción fue transportada en la dirección del viento al momento de la emisión. Esto causa que la Capa Dura en el lago difiera en cuanto a sus características de una zona a otra, pues los vientos cambiaban de dirección.

La consistencia de la Capa Dura se puede explicar por dos procesos: primero a que cada erupción de pómez representa una capa delgada de material secante que extrae y absorbe el agua de los delgados horizontes de arcilla arriba y abajo de ella. De hecho las arcillas interpumíticas acusan bajo contenido de agua y elevada dureza; segundo a que toda pómez recién caída representa un vidrio químicamente muy activo que reacciona con las arcillas puzzolánicamente formando en ciertos casos concreciones.

La Capa Dura resultó ser una solución para la cimentación de altas y pesadas construcciones en la Ciudad de México; como el subsuelo está conformado por importantes espesores de arcillas lacustres altamente compresibles y que contienen elevadas proporciones de agua, resultaría complicado y costoso llevar a cabo dichas construcciones; así la Capa Dura constituye el sustrato resistente hasta el cual un importante número de edificaciones se han apoyado exitosamente por medio de pilotes.

REFERENCIAS

- Zeevaert, L. 1949. Tesis Doctoral de la Universidad de Illinois, USA. Obra inédita.
- Marsal R. L. Y Mazari M. 1959. El subsuelo de la Ciudad de México. Facultad de Ingeniería. UNAM. México D. F.
- Huber Gottlieb F. 1985. Sismología y Vulcanología. Nueva Orientación de las investigaciones. Construcción antisísmica. CRT Centro de Investigación de Tecnologías Aplicadas. Suiza.
- Mooser F., Tamez E., Holguín E., Gutierrez C., 1986. Características geológicas y geotécnicas del Valle de México. Comisión de vialidad y transporte urbano (Covitur) México D. F.
- Mooser F, Montiel A., Zúñiga A. 1992. Interpretación geológica de las líneas sísmicas de reflexión profunda realizadas en la ciudad de México por PEMEX. Centro de Investigación Sísmica. Fundación Javier Barros Sierra.
- Mooser F., Montiel A., Zúñiga A. 1996. Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. C.F. E. México D. F.
- Ortega Gutiérrez F., Mitre Salazar L. M. 1992. Carta Geológica de la Republica Mexicana. Consejo de Recursos Minerales-Instituto de Geología UNAM. México D. F.
- Ferrari L. 2000 Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana V. LIII Pp 84-92 México D.F.
- Santoyo E., Ovando Shelley E., Mooser F., León Plata E. 2005. Síntesis Geotécnica de la Cuenca de México. TGC Geotecnia S.A. de C. V. México D. F.

Nota: El fechamiento de la pómez del túnel San Javier, en Tlalnepantla, fue realizado por Lucía Capra y Peter Schaaf, ambos investigadores del Instituto de Geología de la UNAM.