

01/21  
34



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

## CONTRIBUCIÓN A LA ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL ÁREA PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

ERNESTO CHÁVEZ VEGA



DIRECTOR: DR. GABRIEL AUVINET G.

MÉXICO, D.F.

MAYO 2003

Autoregistrada en la Dirección General de  
UNAM a difundir en formato electrónico  
el contenido de esta publicación

NOMBRE Ernesto Chávez Vega  
FECHA 29/05/03  
FIRMA [Signature]

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/161/01

Señor  
**ERNESTO CHÁVEZ VEGA**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

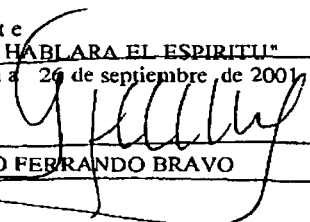
**"CONTRIBUCIÓN A LA ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL ÁREA  
PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO"**

- INTRODUCCION**
- I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA**
  - II. PROBLEMAS GEOTÉCNICOS**
  - III. INFORMACIÓN DISPONIBLE Y RECOPIADA**
  - IV. PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA**
  - V. CIMENTACIONES COMUNES EN LA ZONA**
  - VI. CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**  
**ANEXOS**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Cd. Universitaria a 26 de septiembre de 2001  
EL DIRECTOR

  
M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GER/GMP/mstg.

*A la memoria de mi padre*

## Agradecimientos

Deseo agradecer:

- A mi madre y a mi hermana, por haberme alentado y apoyado incondicionalmente durante todo este tiempo.
- A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación que me ha dado.
- Al Instituto de Ingeniería, por la oportunidad de realizar este trabajo y por los conocimientos adquiridos.
- Al Dr. Gabriel Auvinet, por su acertada dirección, su completo apoyo y el tiempo dedicado.
- A mis amigos: Alicia, Liz, Carolyn, Rubén, Alexis y tantos más, por el ánimo que me dieron para terminar y por los buenos momentos.
- A los ingenieros Javier González e Ignacio Azpeitia, por el apoyo y la información aportada.
- A mis compañeros en el Instituto: Miguel, Ricardo, Roger, Dolores, Fer, así como al Ing. Edgar Méndez y al M.I. Moises Juárez.

# Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Antecedentes</b> .....	3
<b>Objetivo</b> .....	4
<b>Metas</b> .....	4
<b>I Características generales de la zona</b> .....	5
I.1 Ubicación geográfica .....	5
I.2 Topografía .....	6
I.3 Hidrografía .....	7
I.4 Geología .....	10
I.5 Geomorfología .....	15
I.6 Geotecnia .....	17
<b>II Problemas geotécnicos</b> .....	19
II.1 Taludes .....	19
II.2 Minas .....	24
II.3 Cavernas .....	30
II.4 Rellenos .....	31
II.5 Hundimiento regional .....	32
<b>III Información disponible y recopilada</b> .....	36
III.1 Conceptos básicos de los Sistemas de Información Geográfica .....	36
III.2 Integración de la información disponible .....	49
III.3 Recopilación, organización y captura de la información geotécnica .....	55
III.4 Sistema de Información Geotécnica .....	59
<b>IV Propuesta de zonificación geotécnica</b> .....	66
IV.1 Metodología .....	66
IV.2 Interpretación de la información general disponible .....	69
IV.3 Evaluación de la información geotécnica recopilada .....	75
IV.4 Cortes estratigráficos .....	83
IV.5 Mapa de zonificación geotécnica propuesto .....	86

<b>V</b>	<b>Cimentaciones comunes en la zona</b> .....	<b>88</b>
	V.1 Zapatas aisladas y corridas .....	89
	V.2 Losas de cimentación .....	93
	V.3 Cajones de cimentación .....	94
	V.4 Pilotes .....	96
	V.5 Pilas .....	101
<b>VI</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>104</b>
	<b>Bibliografía</b> .....	<b>106</b>
	<b>Anexos</b> .....	<b>108</b>
	A. Evolución de la zonificación geotécnica de la Ciudad de México .....	108
	B. Lista de sondeos .....	120
	C. Cortes estratigráficos .....	130
	D. Planos .....	137

## Introducción

El subsuelo de la Ciudad de México tiene características particulares y muy variadas, que van desde los potentes estratos de arcilla altamente compresible de la zona centro, resultado del entorno lacustre que ahí privaba y que actualmente conlleva a problemas de hundimiento y amplificación de las ondas sísmicas, hasta los extensos pedregales de la zona sur, derivados de la actividad tectónica, relativamente reciente, que presentan problemas muy diferentes como lo son la presencia de cavernas, fracturas y oquedades.

Con la finalidad de facilitar y regular el estudio del subsuelo en la construcción de obras de ingeniería, desde 1952 se ha llevado a cabo una labor de gran relevancia, que es la zonificación geotécnica de la Ciudad de México, la cual, en su más reciente versión, distingue tres zonas: lomas, transición y lacustre, de acuerdo con las características estratigráficas del subsuelo. En el Anexo A se presenta de manera breve la evolución que ha tenido la zonificación geotécnica de la ciudad.

La zona poniente de la Ciudad de México, que en los últimos años ha presentado un explosivo desarrollo al desplazarse hacia ella la mancha urbana, despierta un interés y preocupación especiales en aquellos que pretenden o han llevado a cabo obras de ingeniería en ella, debido a las condiciones estratigráficas que presenta el subsuelo, que la ubican en la llamada zona de transición.

Sin embargo, aún cuando para la zona lacustre se ha logrado determinar una estratigrafía más o menos uniforme en toda su extensión, en el caso de la zona de transición la estratigrafía presenta una configuración más compleja y además, sumamente variable de un punto a otro, resultado de los procesos geológicos que a lo largo de miles de años se sucedieron en la zona.

Por las razones anteriores, se ve la necesidad de realizar una zonificación detallada que de una idea más precisa de la variación estratigráfica y las propiedades del subsuelo en esta zona.

Para esta zonificación se tomará en cuenta información de diversos tipos, como la topográfica, geológica, geomorfológica, geotécnica y otras, recurriendo a modernas herramientas de la computación, dentro de las que cabe destacar los Sistemas de Información Geográfica, las imágenes satelitales, los modelos digitales del terreno, etc.

En el primer capítulo de este trabajo se presentan las características generales de la zona en estudio, como su ubicación, la topografía, hidrografía, etc. Esta será la información básica que habrá de tomarse en cuenta para la zonificación.

El segundo capítulo trata de los riesgos geotécnicos presentes en el área, su conocimiento es clave al momento de diseñar una cimentación, ya que si no se les toma en



cuenta los resultados podrían ser de suma gravedad. Se menciona la presencia de minas, la inestabilidad de los taludes y el hundimiento regional entre otros.

La forma en que se recopila la información y se organiza para su empleo se trata en el capítulo tercero. Se presenta el concepto de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se describe la manera en que se utilizan para alcanzar los objetivos de este trabajo.

El propósito del cuarto capítulo es presentar una descripción detallada de la metodología adoptada para la elaboración de la propuesta de zonificación geotécnica, objeto de estudio en esta tesis, así como el resultado alcanzado, es decir, la zonificación geotécnica propuesta propiamente dicha.

En el quinto capítulo se mencionan los tipos de cimentaciones comúnmente empleados en la zona poniente de la Ciudad, comentándose sus ventajas y desventajas.

Finalmente, las conclusiones de este trabajo se exponen en el capítulo seis.

## Antecedentes

Los antecedentes en zonificación en la Ciudad de México se remontan al año de 1952, en el que el profesor Raúl J. Marsal, basándose en información geotécnica existente hasta entonces, elaboró la primera zonificación geotécnica de la Ciudad de México, que abarcaba el área urbanizada de aquella época y en la que se distinguían cuatro zonas de acuerdo a las características del subsuelo.

A partir de entonces la zonificación geotécnica de la Ciudad de México fue actualizándose y expandiéndose conforme la ciudad extendía sus límites y al tiempo que se obtenía mayor información del subsuelo, principalmente a raíz de grandes obras de ingeniería como la construcción del Sistema de Transporte Colectivo "Metro", hasta llegar a la actual, publicada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones en el año de 1995. Para mayor información sobre la evolución de esta zonificación véase el Anexo A.

En lo que respecta a la zona poniente de la Ciudad de México, la existencia de minas y explotaciones a cielo abierto, así como sus características estratigráficas han propiciado acciones y estudios para su mejor conocimiento, entre los que destacan los siguientes:

En 1974 el Departamento del Distrito Federal crea la Comisión de Zonas Minadas, con el propósito de investigar los terrenos minados susceptibles de ser destinados en un futuro para fines habitacionales y de investigar las consecuencias de antiguas minas debajo de zonas construidas.

En 1976 la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., llevó a cabo el simposio titulado "Cimentaciones en Zonas Minadas de la Ciudad de México", en el cual se obtuvieron interesantes consideraciones, que dieron una visión más actualizada de los conocimientos disponibles.

En 1980, la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR) consideró prioritario efectuar estudios para conocer las condiciones del subsuelo, en las cercanías al eje de trazo de la línea 7 del metro, como trabajos previos a su construcción. El objetivo principal fue localizar cavidades subterráneas, además de obtener información acerca de la estratigrafía, propiedades índice y mecánicas existentes en la zona.

En 1992 la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, llevó a cabo el Simposio titulado "Experiencias Geotécnicas en la Zona poniente del Valle de México", con la finalidad de dar a conocer las experiencias obtenidas hasta el momento en la zona.

## Objetivo

El objetivo del presente trabajo es elaborar una propuesta de zonificación geotécnica detallada para el área poniente de la Ciudad de México a partir de un estudio del subsuelo basado en información de diversos tipos y aplicando nuevas herramientas informáticas.

## Metas

Para alcanzar el objetivo se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Consulta de información bibliográfica sobre estudios del subsuelo.
2. Recopilación de información geotécnica (sondeos).
3. Elaboración de mapas digitales de la información disponible (cartografía urbana, geología, geomorfología, hidrografía, histórica, fotografías aéreas, imágenes de satélite, etc.).
4. Elaboración de un SIG para la zona.
5. Elaboración de cortes estratigráficos típicos.
6. Recorridos de campo.
7. Análisis e interpretación de la información disponible.
8. Elaboración de la propuesta de zonificación.
9. Discusión de los tipos de cimentación mejor adaptados a la zona.

## Capítulo I. Características Generales de la Zona

### I.1 Ubicación geográfica

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la Cuenca de México, con una superficie aproximada de 193 km<sup>2</sup>, correspondiente a seis cartas escala 1:10,000 editadas por el INEGI (con claves E14A39-12, E14A39-13, E14A39-22, E14A39-23, E14A39-32 y E14A39-33) que comprenden parte de las delegaciones Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa, Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo, en el Distrito Federal, así como parte de los municipios de Naucalpan de Juárez y Huixquilucan, en el Estado de México (Fig. I.1). Las coordenadas geográficas que limitan el área son los meridianos 99° 16' 40" y 99° 10' 00" Longitud Oeste y los paralelos 19° 21' 00" y 19° 30' 00" Latitud Norte.

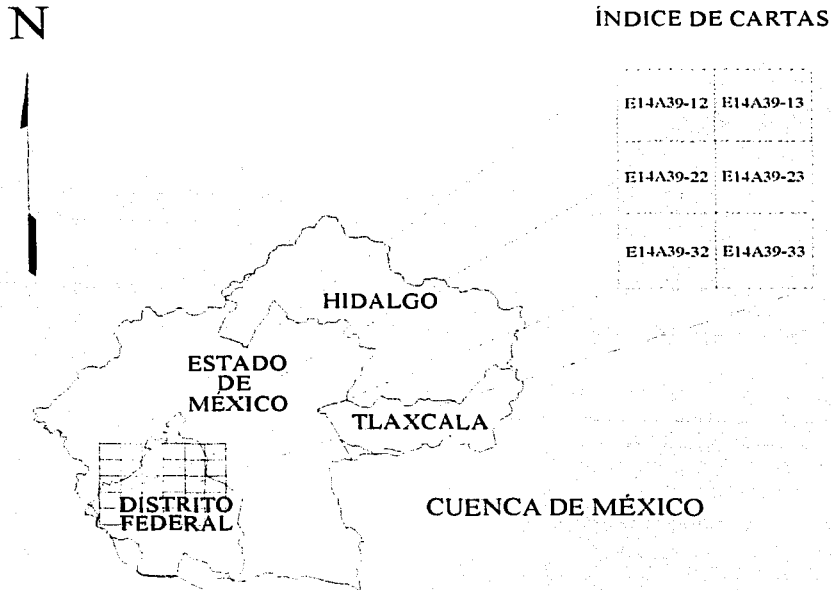


Figura I.1. Localización del área de estudio.

Las vialidades más importantes en esta zona son: el Anillo Periférico, la carretera México-Toluca, la calzada de las Armas, la Av. Marina Nacional, la Av. Constituyentes, la



variable, se tienen pequeños conos cineríticos, volcanes compuestos, domos, piroclastos dispuestos de diferente manera, depósitos epiclásticos (lahares), grandes barrancas y abanicos aluviales.

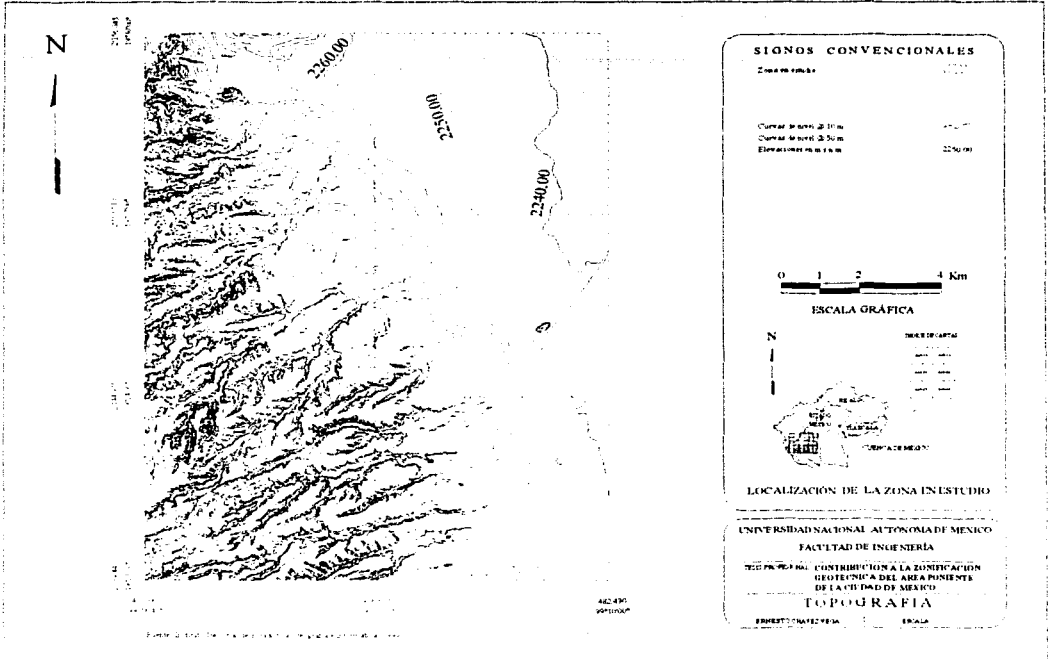


Figura 1.3. Topografía del área de estudio.

### 1.3 Hidrografía

La aparición de la Sierra de las Cruces interrumpió el drenaje que existía anteriormente y estableció una red de desagüe que corría hacia el sur y hacia el río Balsas; en ese tiempo en las laderas orientales de la misma sierra, hacia el valle de México, se fueron depositando lo que posteriormente sería la formación *Tarango*, debido a que en ese tiempo hubo precipitaciones que generaron caudales tan grandes en forma de avalanchas de lodo, al mismo tiempo que había erupciones, entre las que predominaron las explosivas, de algunos aparatos de la Sierra de Las Cruces, dando como consecuencia que los lahares se fueran alternando con clastos de hasta 2 m de espesor.









de Las Cruces contienen productos de esta misma edad. Midiendo en la escala absoluta de años, lo anterior abarca entre 10 y 5 millones de años antes del presente, en el Plioceno Inferior, dentro de un lapso de unos 5 millones de años.

En 1948 Bryan y Arellano consideraron que los citados lomeríos estaban constituidos por tres unidades estratigráficas, que denominaron de abajo hacia arriba, Tarango, Tacubaya, y Becerra, basándose en materiales que procedían de la barranca de Tarango al poniente de la Ciudad de México, donde existían las minas de arena azul en explotación.

Otros investigadores también han aportado conocimientos geológicos de la región: Carl Ehrenberg al estudiar lodos de diferentes profundidades del subsuelo sugirió que el relleno aluvio-lacustre se formó en una época geológica reciente. El primer mapa geológico del Valle de México fue realizado por Johannes Félix y Hans Lenk a fines del siglo XIX.

Ezequiel Ordóñez (1895) amplió las investigaciones realizadas, creando un mapa geológico más detallado del suroeste de la Cuenca de México e intentó establecer la estratigrafía de los depósitos volcánicos.

En 1956 C. Fries Jr, F. Mooser y K. Seegerstrom presentaron los primeros mapas geológicos detallados. Es a partir de 1956 que F. Mooser ha ido extendiendo el estudio geológico sobre toda el área de la Cuenca.

En 1961 la división del afloramiento típico en tres unidades estratigráficas fue modificada por Mooser, descartando la existencia de las formaciones Tacubaya y Becerra e interpretándolas como suelos producto de la meteorización de la formación Tarango, la cual se redefinió como un conjunto estratificado constituido por brechas andesíticas, arenas y limos.

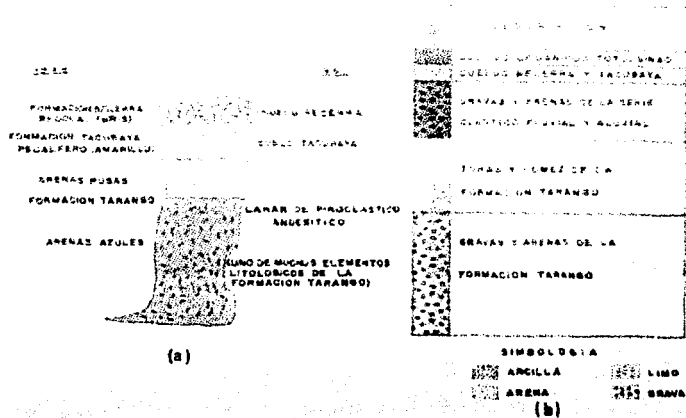


Figura 1.8. Estratigrafía del poniente (Mooser, 1961).

La Formación Tarango está interestratificada con las series lávicas de las sierras mayores (Sierra de Las Cruces) donde se originó. Sobreyace a los abanicos volcánicos del Terciario Medio (Formación Xochitepec) y del Mioceno Superior (Sierras Menores: Sierra de Guadalupe y Tepetzotlán) y subyace a los depósitos clásticos aluviales y fluviales del Cuaternario.



Figura 1.9. Interestratificación del puente (Mooser, 1961).

La formación Tarango está constituida principalmente por horizontes de cenizas volcánicas de muy distintas granulometrias, capas de erupciones pumíticas, lahares, ignimbritas, depósitos fluviales y suelos; todos estos elementos, con excepción de los suelos, son producto de erupciones por lo general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos estratificados.

La formación Tarango alcanza espesores de 300 a 400 m; al estudiar su estructura es posible reconocer que se compone de la superposición de varios abanicos volcánicos, cada abanico volcánico termina en una superficie estructural propia, que marca el fin de la actividad volcánica que la produjo. La formación Tarango se compone de numerosos abanicos volcánicos superpuestos o entrelazados, según la secuencia o contemporaneidad de las erupciones de distintos volcanes; el abanico de la formación Tarango se extiende desde San Angel al sur, hasta la Barranca de Río Hondo hacia el norte.

Según la actividad del aparato volcánico, las erupciones producen cenizas, pómez, brechas, avalanchas ardientes o lavas; las lavas descienden fluyendo lentamente por los flancos del cono; las brechas y cenizas producidas por explosiones violentas se dispersan a mayores distancias del cráter; la piedra pómez es producida por erupciones más violentas, depositándose a distancias muy lejanas del cráter, en forma de lluvia, en capas de gran uniformidad.

Las erupciones más espectaculares del cerro San Miguel dieron origen a las conocidas arenas azules, hará 170 000 años. El vapor producido por los piroclásticos sobre las superficies

glaciares generó lahares calientes que descendieron a grandes velocidades, hasta distancias de 20 km., terminando en las barrancas de Tarango, Tacubaya y San Angel.

También hubo ocasiones en que se produjeron lahares fríos (corrientes de lodo). Los lahares son acumulaciones caóticas de materiales piroclásticos arrastrados en corrientes lubricadas por agua. A la hora de las grandes erupciones al formarse importantes acumulaciones de material fragmentado al pie de un cono volcánico puede suceder que una lluvia torrencial impregne su masa con agua, induciendo y provocando así su movimiento lento como "corriente de lodo". Estos lahares arrastraban bloques de roca en una matriz arenolodosa, uno de los cuales se encuentra superpuesto a los depósitos de morrenas en Tacubaya y Tarango, este debe de haber descendido de la región de Cuajimalpa, antes de la erupción de las arenas azules.

Observando la superposición de los distintos elementos integrantes del abanico volcánico originado por el volcán complejo del cerro de San Miguel ha sido posible subdividir en dos la formación Tarango: La Tarango Inferior representa la acumulación de piroclásticos esencialmente cineríticos y pumíticos, aunque contiene también algunos lahares con fragmentos andesíticos. Subsecuentemente en un periodo final de actividad renovada, se produjeron magnas erupciones de pómez y piroclásticos de andesita. Las capas de pómez cubrieron una topografía ondulada sobre grandes distancias; los piroclásticos rellenaron las barrancas profundas con lahares potentes que hoy constituyen las minas de arenas azules. Estos depósitos finales se definieron como Tarango Superior.

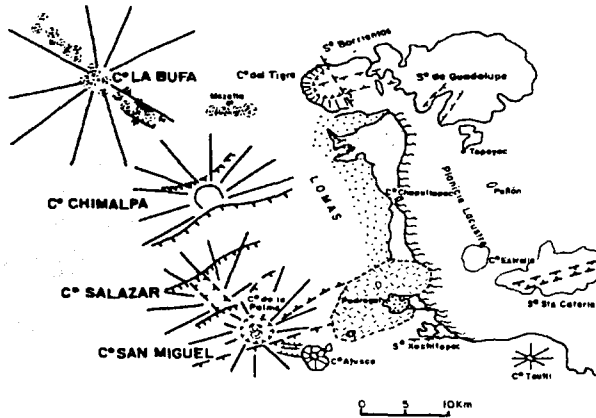


Figura 1.10. Elementos de la Sierra de las Cruces (Mooser, 1990).

Los detritos finos producto de las cenizas volcánicas eran levantados y transportados a grandes distancias. Si eran depositados en laderas durante periodos de clima frío, éstos se transformaban en suelos inmaduros, que posteriormente se convertían en tobas amarillas. Si se depositaban en un lago sus partículas se hidrataban transformándose en arcillas.

A finales de los glaciales se produjeron los deshielos, los cuales hicieron crecer arroyos y ríos caudalosos. Estos deshielos generaron potentes depósitos fluviales que actualmente se reconocen en varios sitios de las lomas, así como al pie de ellas en la transición a la planicie central, formándose así los abanicos aluviales.

En 1986, F. Mooser, Arturo Montiel y Angel Zúñiga interpretaron las líneas sísmicas de reflexión profunda, las cuales revelaron la estructura del subsuelo de la Ciudad de México, este estudio concluyó en 1990, año en el que se empezaron a preparar una serie de mapas que abarcan la zona central de la República Mexicana, delineada por el cinturón Neovolcánico.

El nuevo mapa abarca un área de 34 000 km<sup>2</sup>, donde se encuentran ubicadas las cuencas de Toluca, México y Puebla. En el sur, el mapa considera los volcanes de grandes dimensiones: el Zinacantanpetl, el Ajusco, el Popocatepetl, el Iztaccihuatl y la Malinche; en el norponiente el mapa parte del hundimiento geológico de Acambay y se extiende a la elevada sierra de Pachuca en el nororiente. (Ref. 4)

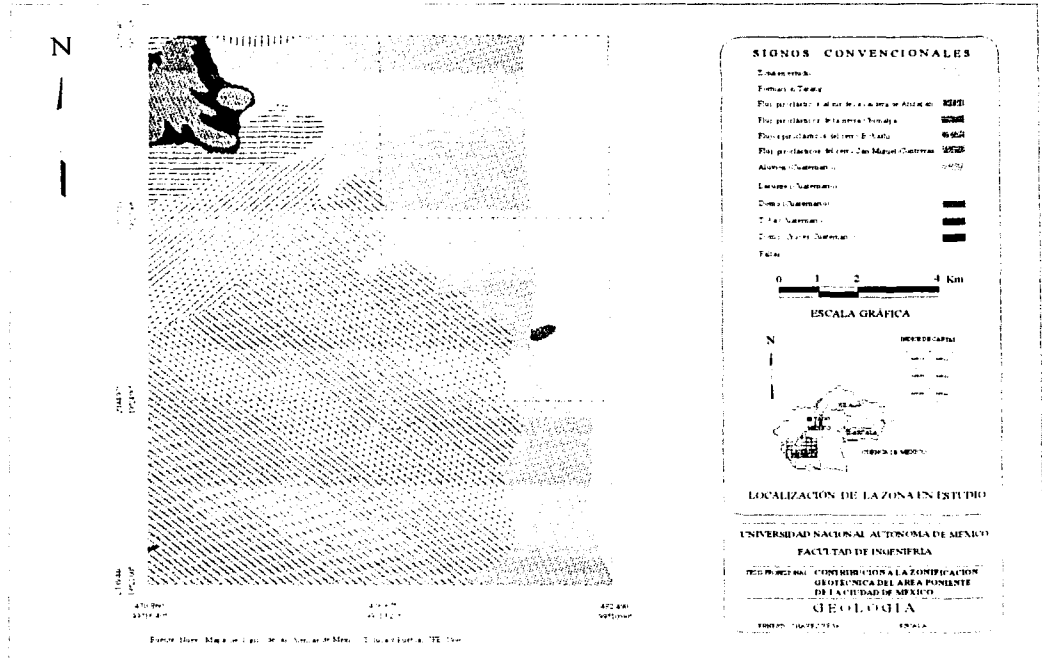


Figura I.11. Geología del área de estudio.

### 1.5 Geomorfología

La geomorfología del área de estudio se encuentra influenciada directamente por la geología, ya que se conforma de un conjunto de lomas subparalelas que descienden de la Sierra de las Cruces hacia el valle de México, separadas entre sí por valles profundamente excavados por escurrimientos cuya orientación preferencial corresponde a la que presenta el fracturamiento principal del eje neovolcánico, por lo que se considera que tanto el patrón de drenaje como la formación geomórfica en lomas del área de estudio, se relacionan directamente al patrón estructural de esta misma zona, en la que a su vez, debido a la poca compacidad de los materiales granulares de origen piroclástico ahí depositados, la erosión ha podido excavar paisajes geomórficos muy abruptos.

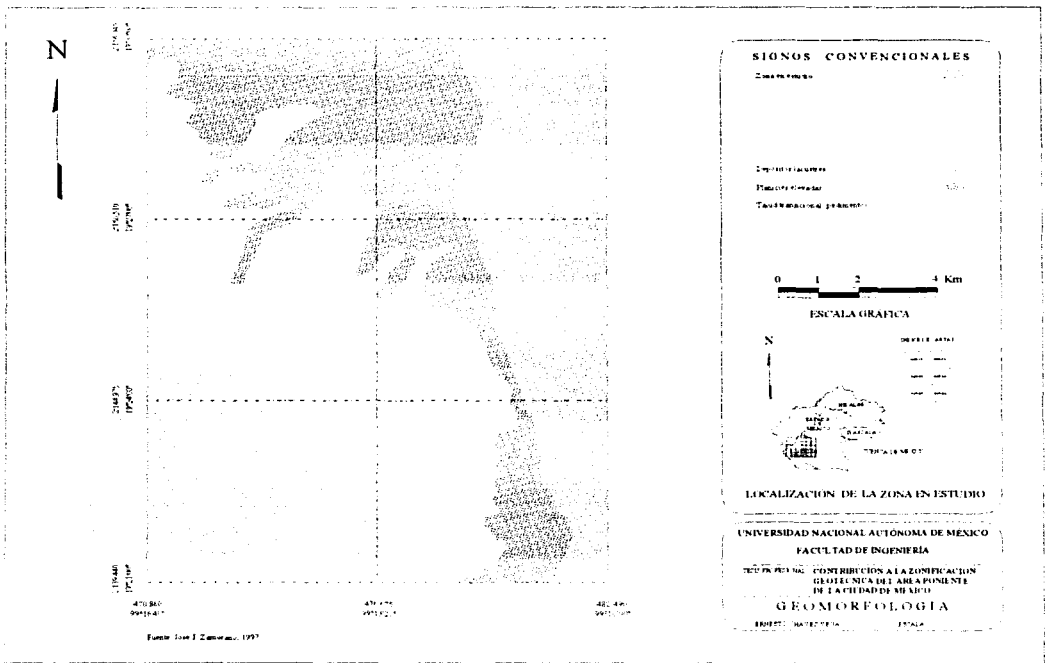
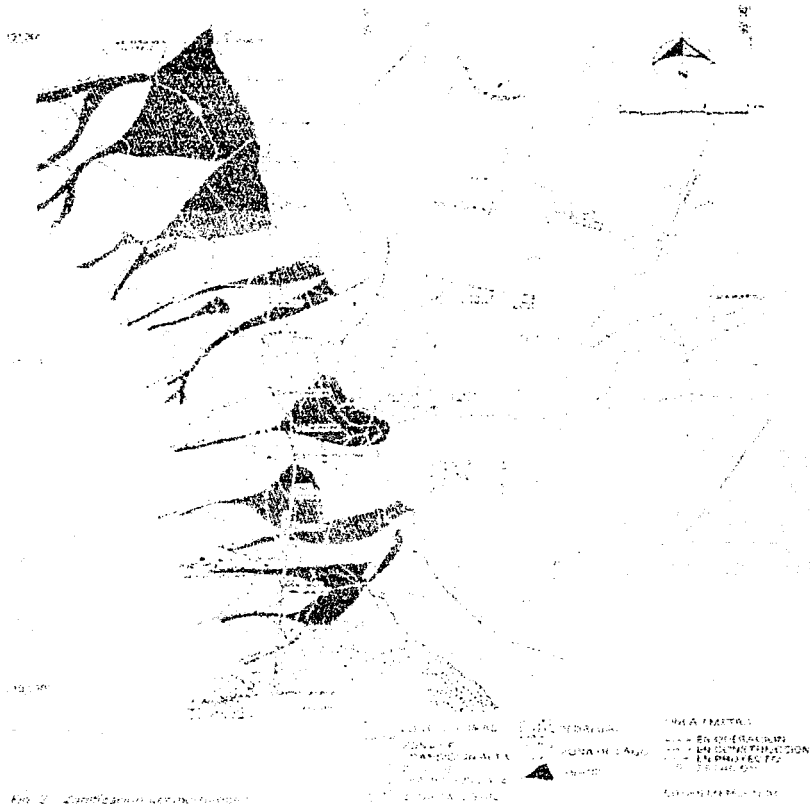


Figura 1.12. Geomorfología del área de estudio (Zamorano, 1997).

Esta erosión ha sido principalmente la formada por las corrientes de agua que bajan de lo alto de la sierra de las cruces hasta la planicie lacustre, formando las grandes barrancas que se encuentran el día de hoy principalmente en las delegaciones de Álvaro Obregón,

Cuajimalpa y la Magdalena Contreras. Al mismo tiempo estas corrientes han arrastrado gran cantidad de material producto de la erosión, depositándolo en la zona de lo que fue su desembocadura al antiguo lago, formando los llamados abanicos aluviales, en los que los materiales se fueron depositando en orden de acuerdo a su tamaño o granulometría, quedando los más voluminosos al pie de la sierra y los más finos esparcidos en una amplia zona, llegando a introducirse en el cuerpo del lago, formando parte de los depósitos lacustres.

En la figura I.13 se muestra la posible configuración de los abanicos aluviales mencionados anteriormente, junto con una zonificación geomorfológica de la zona, de acuerdo con la referencia 8.



**Figura I.13. Zonificación geomorfológica y abanicos aluviales en el área de estudio.**

## I.6 Geotecnia

El subsuelo de la zona poniente de la Ciudad de México está formado por una gran variedad de materiales de origen volcánico, siendo los más representativos las tobas, arenas azules, lahares y pómez. Estos suelos generalmente tienen una resistencia alta debido a que están cementados, por tal motivo los estudios realizados en esta zona no han sido tan detallados como en la zona de lago. Sin embargo también se presentan problemas en la estabilidad de cimentaciones y cortes por la heterogeneidad de los materiales y su fácil alteración cuando están sometidos a intemperización.

La estratigrafía que predomina en la zona de lomas es errática, dado que con gran frecuencia una misma formación geológica adquiere, indistintamente, diversas clasificaciones en el sistema unificado (SUCS).

La zona se caracteriza por una gran variedad de formaciones, las cuales van desde pequeños mantos superficiales de arcillas de baja plasticidad hasta arenas limosas cementadas (tobas) de cementación variable, depósitos de origen glacial y aluviones.

Los materiales más representativos de esta zona son limos arenosos de baja compresibilidad y arenas limosas de media a alta compacidad que en ocasiones se encuentran desde la superficie y alcanzan espesores de hasta 10 m, sin embargo la situación más común en esta zona es una disposición alternada de ellos.

En ocasiones se encuentran mantos de arena pumítica de compacidad media a alta localizados entre 7 y 10 m de la superficie con espesor medio de 3.00 m y se encuentran distribuidos prácticamente en toda el área en estudio.

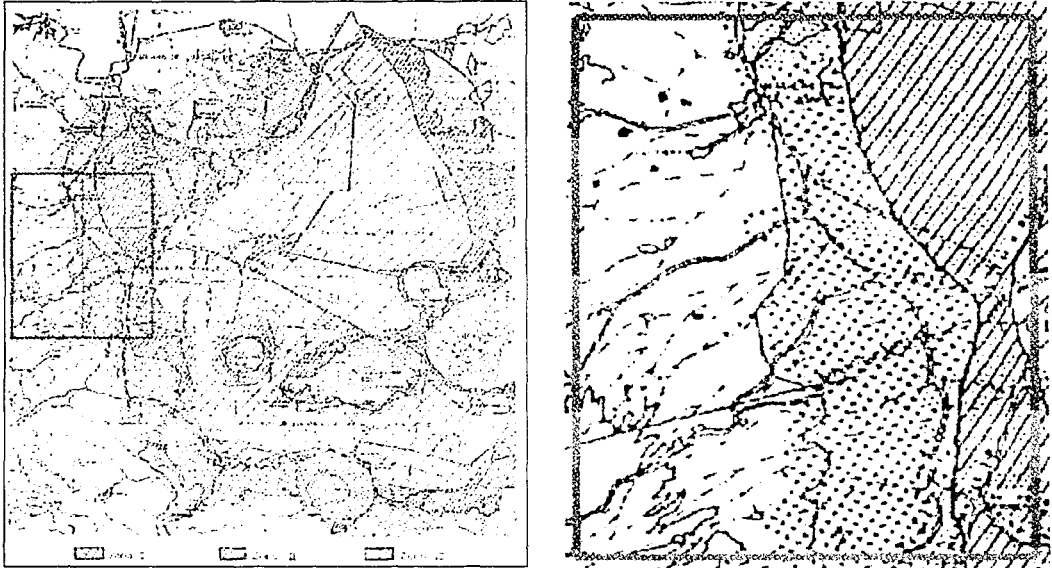
Los depósitos de transición forman la franja divisoria entre la zona de lomas y lacustre. Estos materiales generalmente de origen aluvial se clasifican en función de la cantidad de material clástico arrastrado por las corrientes hacia la zona lacustre.

Al pie de las barrancas se acumularon los acarrees fluviales, algunos extendiéndose hasta la arcilla del antiguo lago Texcoco, formándose intercalaciones de arcillas lacustre con arenas y gravas de río. El ancho de la franja de los depósitos transicionales varía según el clima predominante en cada época geológica. Esta área contiene en sus partes más profundas depósitos caóticos glaciales, laháricos y fluvio-glaciales caracterizados por enormes bloques encontrados en la boca de las barrancas de San Angel, del Muerto, Mixcoac, Tacubaya, Tarango y Río Hondo.

La zona de lago se caracteriza por los grandes espesores de arcillas blandas de alta compresibilidad, estos son la consecuencia del proceso de depósito y de alteración fisicoquímica de los materiales aluviales y de las cenizas volcánicas en el ambiente lacustre. Este proceso sufrió interrupciones formándose así costras endurecidas por deshidratación o por secado solar, lo cual formó una secuencia ordenada de estratos de arcilla blanda separados por lentes duros de limos y arcillas arenosas.



En la figura 1.14 se muestra la zona de estudio dentro del mapa de zonificación geotécnica vigente.



**Figura 1.14.** Zonificación geotécnica vigente del área de estudio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Capítulo II. Problemas Geotécnicos

### II.1 Taludes

Se denomina como talud a cualquier superficie inclinada adoptada por una estructura de tierra, ya sea natural (ladera) o artificial (corte o terraplén).

Como ya se vio en el capítulo anterior, la zona de estudio presenta una amplia región con un relieve abrupto debido a su formación geológica, con un gran número de barrancas, lo que implica la presencia de una cantidad importante de taludes naturales (como la loma Tarango, en la figura II.1). Además, la explotación de minas a cielo abierto (figura II.2) y la construcción de vialidades han generado numerosos taludes artificiales. Las delegaciones afectadas por la existencia de taludes son las siguientes: Álvaro Obregón, Miguel Hidalgo, Magdalena Contreras y Cuajimalpa.

La estabilidad de una ladera o talud depende de diversos factores entre los cuales se encuentran:

- a) Los materiales que lo constituyen,
- b) el flujo de agua en ellos, tanto superficial como interno,
- c) su geometría (altura, ángulo, longitud),
- d) las cargas aplicadas sobre ellos,
- e) el intemperismo.

En el caso de un talud inestable, el cambio de una o más de las características anteriores provoca el deslizamiento de importantes volúmenes de tierra, significando un gran riesgo para las construcciones y las personas cercanas a ellos. Estas variaciones pueden deberse a agentes tan variados como un sismo, que modifique la intensidad de las fuerzas que actúan en el talud, o un flujo de agua por el mismo debido a alguna tubería rota.

Un talud puede fallar de distintas formas (Juárez, E., Rico, A.), a continuación se definen las principales.

- a) Falla por deslizamiento superficial.

Cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones del suelo próximas a su frontera deslicen hacia abajo; el fenómeno es más intenso cerca de la superficie inclinada del talud a causa de la falta de presión normal confinante que allí existe. Como una consecuencia, la zona mencionada puede quedar sujeta a un flujo viscoso hacia abajo que, generalmente, se desarrolla con extraordinaria lentitud. El desequilibrio puede producirse por un aumento en las cargas actuantes en la corona del talud, por una disminución en la resistencia del suelo al esfuerzo cortante o, en el caso de laderas naturales, por razones de conformación geológica.

El fenómeno es muy frecuente y peligroso en laderas naturales y, en este caso, generalmente abarca áreas tan importantes que cualquier solución para estabilizar una estructura alojada en esa zona escapa de los límites de lo económico, no quedando entonces más recurso que un cambio en la localización de la obra de que se trate que evite la zona en deslizamiento.



**Figura II.1.** Talud natural en la Loma "Tarango".

b) Deslizamiento en laderas naturales sobre superficies de falla preexistentes.

En muchas laderas naturales se encuentra en movimiento hacia abajo una costra importante del material; no se trata ya de un mecanismo superficial, sino de otro producido por un proceso de deformación bajo esfuerzo cortante en partes más profundas, que llega muchas veces a producir una verdadera superficie de falla. Si los movimientos se aceleran se puede llegar a producir un deslizamiento de tierras. Parece ser que la mayor parte de este tipo de movimientos están asociados a ciertas estratigrafías favorables a ellos, al mismo tiempo que a flujos estacionales de agua en el interior de la ladera. En estos casos se observan con frecuencia superficies de falla prácticamente planas, que siguen los contactos entre los depósitos de talud y los materiales más resistentes de apoyo.

c) Falla por movimiento del cuerpo del talud.

En contraste con los movimientos superficiales lentos, pueden ocurrir en los taludes movimientos bruscos que afectan a masas considerables de suelo, con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo, lo cual recibe el nombre de deslizamiento de tierras. Dentro de éstos existen dos tipos claramente diferenciados. En primer lugar, un caso en el cual se define una superficie de falla curva, a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud; esta superficie forma una traza con el plano del papel que puede asimilarse a una circunferencia. Estas son las fallas llamadas por rotación. En segundo lugar, se tienen las fallas que ocurren a lo largo de superficies débiles, asimilables a un plano en el cuerpo del talud o en su terreno de cimentación. Estos planos débiles suelen ser horizontales o muy poco inclinados respecto a la horizontal. Estas son las fallas por traslación.



Figura II.2. Taludes en mina a cielo abierto en Santa Fe.

d) Flujos.

Este tipo de falla consiste en movimientos más o menos rápidos de zonas localizadas de una ladera natural, de manera que el movimiento en sí y la distribución aparente de las velocidades y los desplazamientos asemejan el fluir de un líquido viscoso. No existe, en sí, una superficie de falla, o ésta se desarrolla en un lapso muy breve al inicio del fenómeno. Estas fallas pueden ocurrir en cualquier formación no cementada, desde fragmentos de roca, hasta arcillas francas; suceden tanto en materiales secos, como húmedos.

e) Fallas por erosión.

Estas son también fallas de tipo superficial provocadas por arrastres de viento, agua, etc., en los taludes. El fenómeno es tanto más notorio cuanto más empinadas sean las laderas.

f) Fallas por licuación.

Estas fallas ocurren cuando en la zona del deslizamiento el suelo pasa rápidamente de una condición más o menos firme a la correspondiente a una suspensión, con pérdida casi total de resistencia al esfuerzo cortante. El fenómeno puede ocurrir tanto en arcillas extrasensitivas como en arenas poco compactas.

Debido a la explosión demográfica que ha sufrido la Ciudad de México y en especial la zona en estudio, las familias de escasos recursos se han visto en la necesidad de habitar, en forma precaria la mayoría de las veces, en zonas de alto riesgo como son los taludes de las barrancas, aumentando su peligrosidad al construir sus hogares sobre ellos, incrementando las cargas que podrían producir su deslizamiento (figura II.3).



**Figura II.3.** *Construcción precaria sobre loma natural estabilizada con bultos de arena.*

Un ejemplo de este caso se encuentra en las colonias Las Butacas, Primera y Segunda Victorias, donde la presencia de un cantil importante (superior a 20 m), en muchas partes en contratalud, pone en peligro la vida de los habitantes ubicados abajo o arriba de él.

La parte norte de la colonia Butacas se encuentra limitada por un talud casi vertical e inestable, de unos veinte metros de altura. Han ocurrido numerosos hundimientos de bóvedas y fallas locales en el talud, que han causado pérdidas humanas y daños de consideración a viviendas. En construcciones de la colonia se observaron agrietamientos con orientación oriente poniente y desplazamientos hacia el sur, en donde se localizaba la mina "El Cuernito" cuya altura del corte es por lo menos de 50 m.

En el lindero norte de las colonias Jalalpa y Ampliación Jalalpa la altura de la ladera y cantiles es de hasta 50 m, en donde los desprendimientos son inminentemente peligrosos para la mayoría de las construcciones, dada la gran altura de los cortes y la sección transversal muy reducida de la loma (figura II.4).



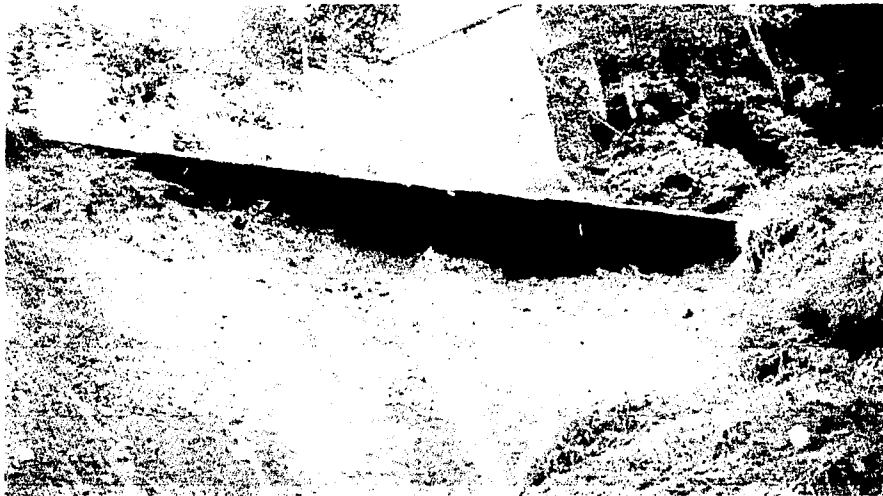
Figura II.4. Construcciones sobre talud en la colonia Jalalpa.

En la colindancia sur de la colonia Santo Domingo existen taludes inestables, con pendientes casi verticales, en estado criticos de equilibrio.

En la colonia San Clemente se observa un corte muy escarpado, que presenta contratalud y montículos dejados por la explotación a cielo abierto, los cuales constituyen un serio peligro para las casas alojadas en la parte superior del corte.

El problema de los deslizamientos se acentúa en la época de lluvias, en la que la saturación de los suelos y las corrientes que se forman durante las mismas provocan la falla de los taludes. Cabe hacer notar que en esta zona se tiene una precipitación promedio anual de 912 mm.

Las soluciones para la construcción de viviendas sobre taludes dependen de las condiciones económicas de los habitantes de la zona, van desde imponentes estructuras de concreto (en zonas residenciales como Tecamachalco o Interlomas), hasta sacos rellenos de arena (en asentamientos irregulares).



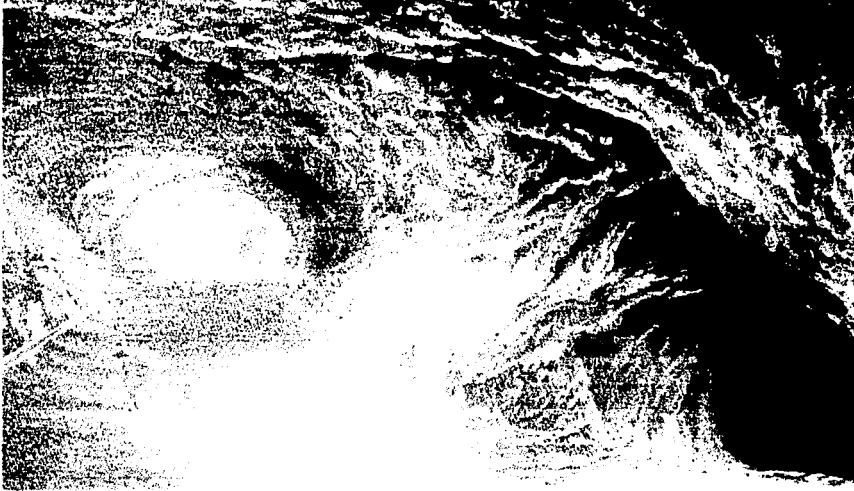
**Figura II.5.** *Deslizamiento de un talud, dejando sin apoyo a la estructura de una vialidad.*

## II.2 Minas

La presencia de minas en el subsuelo constituye uno de los principales riesgos geotécnicos en la zona sur-poniente de la Ciudad de México. Este hecho se debe a la explotación, desde fines del siglo XIX, de los materiales granulares en algunos estratos de la Formación Tarango cuya demanda, para las construcciones de la Ciudad, era elevada en aquel tiempo (figura II.6).

Desafortunadamente esa explotación se realizaba de manera rudimentaria, manual, puesto que no existía la maquinaria pesada de hoy y sin ningún tipo de planeación o control. El resultado fue una red de túneles en el subsuelo (en ocasiones hasta en tres niveles distintos de profundidad) de la cual no se llevó registro alguno ni se siguió proceder lógico u orden

premeditado, obedeció simplemente a la facilidad de la extracción y a la obtención de los mayores volúmenes de material que fuera posible.



**Figura II.6.** *Extracción rudimentaria en minas, a principios del siglo XX.*

La presencia de cavidades se subestimó o pasó inadvertida en el pasado. Por razones socio-económicas en la mayor parte de la zona donde se dio la explotación de las minas fueron desarrollándose asentamientos humanos, muchos de ellos irregulares así como fraccionamientos residenciales, construyéndose edificaciones y vialidades. Si bien en un principio las cavidades no resultaban peligrosas, en el presente constituyen un riesgo en potencia que tiende a acentuarse con el tiempo por la influencia del intemperismo y de la acción del propio hombre.

La mayoría de las cavidades existentes en las formaciones volcánicas del poniente de la Ciudad de México son de origen artificial, por lo que sus dimensiones originales debían permitir el acceso a ellas, es decir del orden de 1.5 a 2.0 m de altura y lo mismo de anchura (figura II.7), teniendo su entrada usualmente en las laderas de las barrancas, donde se podían reconocer los mantos o lentes de materiales útiles para la construcción (grava, arena y pómez), cuyas características hacían factible su empleo más o menos directo sin necesidad de procesos de trituración como los de hoy en día.

Donde los materiales eran particularmente aptos para su explotación se llegaron a excavar salones de grandes dimensiones que podían salvar claros de 10 m o más y alturas hasta de 4.00 m sin soportes ni apoyos intermedios (figura II.8).





**Figura II.7.** *Mina en la colonia Carlos A. Madrazo.*

Con el tiempo los materiales de las bóvedas suelen alterarse y debilitarse, produciéndose derrumbes que más tarde pueden ser arrastrados por agua infiltrada, de donde una o varias porciones de las minas pueden estar parcial o totalmente rellenas por estos derrumbes y sedimentos (figura II.9). En varias ocasiones el relleno de las minas se efectuó utilizando escombros de construcciones e incluso se llegó a utilizar basura, la cual se introducía por medio de perforaciones sobre el techo de la mina o por las bocaminas existentes en las laderas.

Como consecuencia de los problemas de inestabilidad del subsuelo, generado por la existencia de las minas, las autoridades del entonces Departamento del Distrito Federal decidieron llevar a cabo estudios iniciales en las zonas afectadas, con el objetivo de evaluar la problemática que representa la extensa zona minada.

Con este fin, el 6 de febrero de 1974 se constituyó la Comisión de Zonas Minadas. Esta comisión se abocó a la realización de un estudio sobre el grado de riesgo en 98 colonias. La Comisión cesó en sus funciones el mes de octubre de 1976, y a partir de entonces la

responsabilidad del estudio y atención de cavidades por parte del Gobierno del Distrito Federal recae en la Subdirección de Yacimientos Pétreos.



**Figura II.8.** *Galería de grandes dimensiones, cerca del vaso "La Mina".*

El problema de las minas afecta a las delegaciones Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Miguel Hidalgo, Coyoacán, Iztapalapa y Magdalena Contreras, en el Distrito Federal, siendo la primera de ellas la más afectada, sin embargo es bien conocido que se extienden hacia los lomeríos del Estado de México (municipios de Naucalpan y Huixquilucan), en donde se encuentran colonias tales como Tecamachalco, La Herradura, Bosques de las Lomas, Bulevares, Lomas Verdes, con problemas similares a los de las delegaciones del Distrito Federal; la extensión de la zona minada se muestra en la figura II.10.



**Figura II.9.** *Mina parcialmente rellena por derrumbes.*

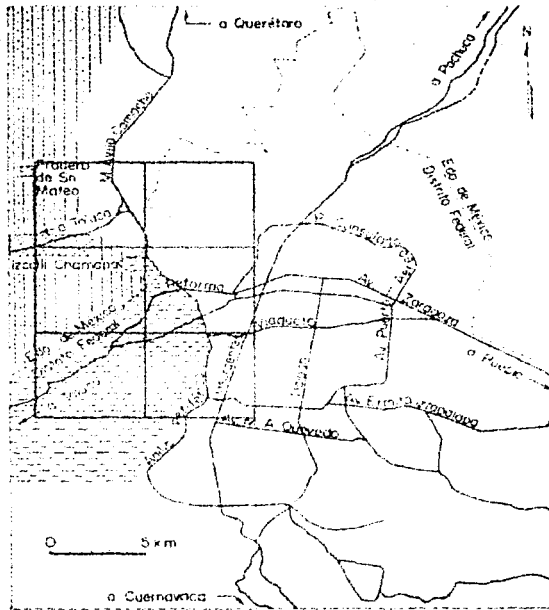
Los daños ocasionados por la presencia de minas van desde asentamientos diferenciales, los cuales producen el agrietamiento de las estructuras, hasta los derrumbes de las cavidades, provocando el colapso parcial o total de las construcciones erigidas encima de ellas, sean casas, edificios o vialidades.

Estos derrumbes se dan al seguir la cavidad un proceso que se conoce como "migración", a través del cual el techo de la mina, llamado encape, sujeto a los efectos del intemperismo, va adelgazándose a medida que se desprende el material que lo conforma y cae en el piso de la mina, de esta manera la cavidad va "avanzando" hacia arriba (aunque no siempre en una trayectoria vertical) hasta que el encape es tan delgado que no soporta su propio peso o el de las estructuras que soporta, colapsándose (figura II.11).

Lo anterior no sucede con todas las cavidades, pues el hecho de que afloren a la superficie depende de varios factores, entre los que se encuentran:

- a) La relación ancho/encape, el cual, si es mayor de 0.3, presentará un mayor riesgo de asentamientos;
- b) la relación encape/altura, ya que se sabe, empíricamente, que una mina puede "migrar" hacia arriba hasta una distancia aproximada de 7 veces su altura;

- c) el grado de intemperismo, que depende de que la mina esté abierta o cerrada, el flujo de agua a través de ella o de su encape, etc.,
- d) la densidad de cavidades (o número de ellas) en un sitio dado.

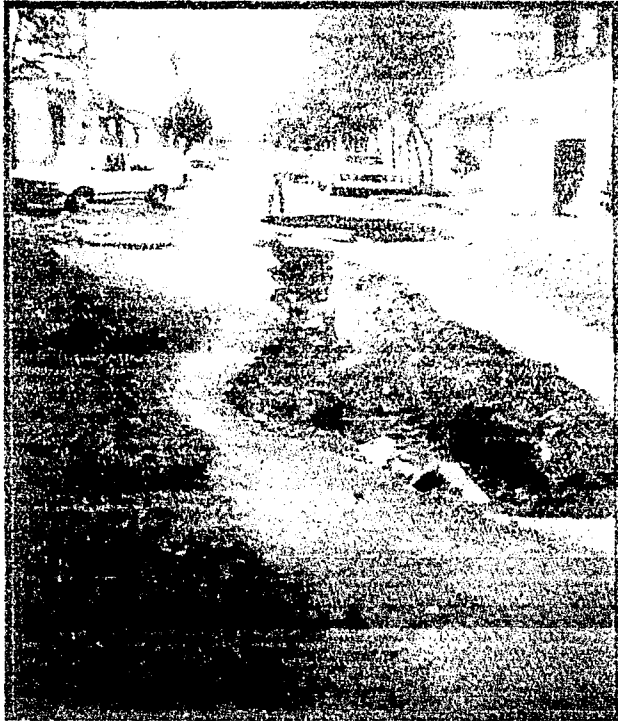


**Figura II.10.** Zona minada (sombreada) y área de estudio.

Para mitigar los daños que pudieran ocasionar las minas se ha procedido a su “regeneración”, entendiéndose por ésto a las acciones realizadas que buscan garantizar la estabilidad de las cavidades y que van desde muros de apoyo en su interior, que tomen parte de la carga del encape y protejan las paredes de la mina del intemperismo, hasta su relleno con diversos materiales, siguiendo desde luego un método de compactación adecuado.

Varias de las zonas minadas ya han sido regeneradas mediante procedimientos de estabilización, algunas por los propios fraccionadores para vender las construcciones realizadas en el lugar y otras por la delegación Álvaro Obregón, que implementó el programa de regeneración de minas en zonas críticas.

Desafortunadamente, debido a los derrumbes internos en las cavidades, no puede conocerse completamente la trayectoria de su desarrollo, descubriéndose finalmente al presentarse los problemas antes mencionados.



*Figura II.11. Colapso del encape de una cavidad en vialidad.*

### II.3 Cavernas

Las cavernas son cámaras subterráneas formadas naturalmente, ya sea en la masa rocosa producida por una colada lávica o erupción volcánica, o en rocas sedimentarias (principalmente calizas).

Las cavidades en las masas rocosas ígneas, son formadas durante el enfriamiento del magma; dependiendo de su viscosidad y composición química, el magma en la superficie de un flujo lávico se enfría más rápidamente, mientras que el que se encuentra en el interior

continúa fluyendo, de esta manera pueden formarse túneles o cavernas de diferentes magnitudes y formas. Otra razón por la que se forman estas cavidades es porque dentro del flujo puede quedar aire atrapado, formando una burbuja dentro de la roca.

En las rocas sedimentarias, las cavernas son formadas por el trabajo erosivo del flujo subterráneo del agua, que, con el paso de miles de años, va desintegrando la roca hasta formar cavidades que pueden alcanzar kilómetros de longitud y decenas de metros de altura.

Debido a su formación geológica, en la zona de estudio no se presenta este tipo de cavidades; como se vio en el apartado anterior, prácticamente todas las cavidades en el subsuelo de esta zona han sido creadas por la acción del hombre.

#### II.4 Rellenos

Los rellenos en la zona poniente de la Ciudad son generalmente recientes, se encuentran comúnmente en áreas ocupadas antiguamente por explotaciones mineras a cielo abierto y muchos de ellos están formados por depósitos de materiales residuales de obras de construcción. En estas zonas los materiales de relleno se colocaron a volteo, sin control de compactación.

Se han observado asentamientos de varias construcciones, desplomes y distorsiones angulares con fallas de los elementos estructurales resistentes.

Un ejemplo de este caso se localizó en la colonia Axomiatla, en donde la configuración original se modificó a base de rellenos de gran espesor, alcanzando hasta 18 m, los cuales fueron colocados sin compactar.

Terrenos ubicados en la colonia Nicanor Arvide se destinaron a la explotación de materiales para la construcción, no se localizaron cavidades subterráneas pero si rellenos de aproximadamente 20 m de espesor, los cuales se colocaron a volteo sin llevar un adecuado control de compactación.

La topografía natural de la zona es también otra causa de la existencia de rellenos. Las familias de escasos recursos, en su búsqueda de espacios para habitar, han llegado a establecerse en las laderas de las barrancas, en donde, con la finalidad de ganarle terreno a la ladera, la van rellenando con diversos materiales de desperdicio, en un proceso lento pero constante.

En la ladera localizada en la colonia Zenón Delgado se acumularon rellenos de basura y escombros, sobre los cuales se han sentado construcciones de tipo precario. Los escurrimientos superficiales en época de lluvias ocasionan erosión y deslizamiento de grandes masas de relleno (figura II.12).

La terminal poniente de autobuses se localiza en una zona que antiguamente fue ocupada por tabiquerías, razón por la cual existen rellenos con espesor de hasta 15 m.



**Figura II.12.** *Cauce natural al que son arrojados desperdicios, a fin de ganarle terreno a sus laderas.*

### II.5 Hundimiento Regional

A partir de 1846 se intensifica la perforación de pozos para la obtención de agua potable de los mantos subterráneos del valle de México. En estos años, la extracción de agua de pozo, combinada con los métodos artificiales de drenado, provocó que muchos manantiales naturales se secaran, que el nivel de los lagos decayera y que el agua del subsuelo perdiera presión, con la consecuente consolidación de las arcillas lacustres sobre las que se asienta la ciudad. Cerca de 1895, el hundimiento había alcanzado un promedio de cinco centímetros por año.

En 1925, Roberto Gayol, director de las obras de drenaje de la ciudad, reportó a la Sociedad Mexicana de Ingenieros y Arquitectos el hundimiento de la Ciudad de México observado durante los trabajos; Gayol agregaba que la causa de esto era, posiblemente, el drenaje del subsuelo, relacionado con la entonces reciente construcción del Gran Canal del Desagüe y del túnel de Tequixquiac.

La relación entre el hundimiento y la explotación del acuífero ha sido examinada muy de cerca desde aquella época. Nabor Carrillo fue el primero en desarrollar un modelo matemático para determinar la relación entre el hundimiento y el sistema hidrológico.

En 1947 el Dr. Nabor Carrillo publicó en el anuario de la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica un artículo titulado "Influencia de los Pozos Artesianos en el Hundimiento de la Ciudad de México". Apoyándose en la información histórica descrita y las nivelaciones efectuadas en los años cuarenta, dedujo que la causa principal del hundimiento era el abatimiento de la presión hidráulica en los acuíferos del subsuelo, ocasionado por el bombeo dentro de la zona urbana y, con la teoría de consolidación propuesta por Terzaghi en 1925, pudo predecir las modalidades del fenómeno. Los posteriores estudios de mecánica de suelos, las mediciones piezométricas y las nivelaciones del terreno permitieron verificar esta teoría.

Con el creciente bombeo efectuado, en el periodo que va de 1948 a 1953, el hundimiento había llegado a los 46 centímetros por año en algunas áreas. En 1953 ya se había demostrado que dicho hundimiento estaba asociado a la extracción de agua subterránea, por lo que muchos pozos del área urbana fueron clausurados, al tiempo que se inició la construcción de otros nuevos en la región de Chalco, Tláhuac y Xochimilco. El gasto normal de bombeo,  $12.2\text{m}^3/\text{s}$ , ha provocado en esta región hundimientos y el descenso de los niveles del agua.

En 1983 comenzó el muestreo sistemático de los niveles de agua en el acuífero. Desde entonces, el promedio anual de descenso del agua subterránea va de 0.1 a 1.5 metros por año en las diferentes zonas de la ciudad. Los niveles del agua durante el periodo que va de 1986 a 1992 muestran un descenso neto de 6 a 10 metros en las zonas más intensamente bombeadas de esta región.

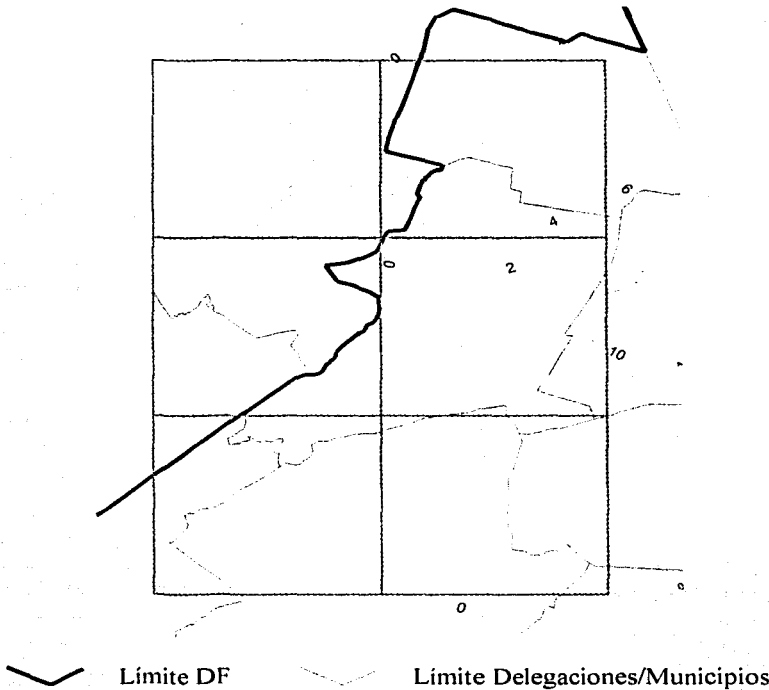
Se ha estimado que se extrae del acuífero  $57\text{m}^3/\text{s}$  y la recarga es de  $25\text{m}^3/\text{s}$ , lo que representa un déficit de  $32\text{m}^3/\text{s}$ . De acuerdo a estas condiciones, se extrae más del doble del agua que se infiltra, lo que ha provocado el desequilibrio geohidrológico, cuyos efectos principales son el descenso de los niveles piezométricos, la deformación por consolidación de la parte baja de la cuenca, con los consecuentes agrietamientos y el deterioro de la calidad del agua subterránea.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua, en 1997 oficialmente estaban registrados y en operación 910 pozos profundos en el D.F., en el estado de México 1,530, y en los territorios de Hidalgo y Tlaxcala pertenecientes a la cuenca, 306. Sin embargo, hay que hacer notar que a pesar de la mayor cantidad de pozos que existen en el estado de México respecto al D.F., se obtiene igual volumen de extracción de agua en ambas entidades. No se conoce con certeza si ello se debe a la mayor profundidad de los pozos en el D.F., o bien a una mayor disposición de agua en sus mantos freáticos.

Registros de la DGCOH informan que de 1983 a 1992 hubo hundimientos anuales alrededor del Aeropuerto Internacional de entre 15 y 25 centímetros; de 10 en el Centro Histórico, de entre 10 y 15 centímetros en Xochimilco y Tláhuac. Actualmente la situación no ha variado pues el hundimiento medio anual en el Centro Histórico es de 10 centímetros, en Xochimilco de 15; y de 20 a 25 en el Aeropuerto Internacional. El mayor se tiene en Ciudad Netzahualcoyotl con 30 cm. Los ritmos de hundimiento se reducen en las zonas no lacustres, como Azcapotzalco, a tan solo entre 2 y 5 centímetros anuales.



De acuerdo con la Gerencia de Aguas del Valle de México, el hundimiento neto en los últimos cien años ha hecho descender el nivel del terreno en la parte más afectada de la ciudad un promedio de 7.5m. El resultado ha sido un daño extensivo a la infraestructura de la ciudad, que abarca los cimientos de los edificios y el sistema de alcantarillado.



**Figura II.13.** Curvas de igual hundimiento en la zona de estudio, en cm/año (DGCOH, 1998).

En los lomeríos del poniente se han perforado durante los últimos años pozos de bombeo generando hundimientos apreciables, a pesar de la baja compresibilidad de los suelos afectados.

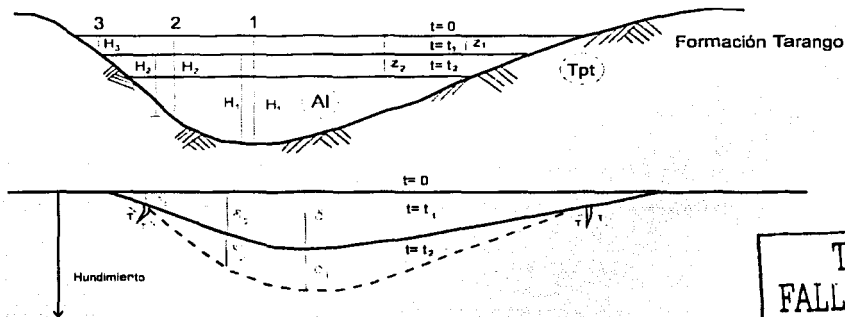
En otras partes de la zona de transición han ocurrido abatimientos fuertes debidos a la explotación de los acuíferos profundos y se han registrado hundimientos importantes en algunos sitios poco afectados con anterioridad.

Por otra parte, debido a la estratigrafía de la zona, en el municipio de Naucalpan el bombeo del agua subterránea ha dado lugar a la aparición de grietas en las colonias La Florida, Hacienda de Echegaray y Santa Cruz Acatlán. En la referencia 11 se propone un mecanismo de formación de grietas para esta zona que se describe a continuación.

Se observa que la zona afectada por las grietas se encuentra localizada en un antiguo valle de la formación Tarango, que posteriormente fue rellenado con los depósitos aluviales del río de los Remedios; estos depósitos, debido a su formación y edad, seguramente más compresibles que los correspondientes a la formación Tarango.

Las condiciones iniciales son las mostradas en la figura II.14, o sea los depósitos aluviales, con espesor máximo en el eje del valle, descansando sobre la formación Tarango más antigua.

Posteriormente se instalan pozos profundos para extraer agua de los depósitos aluviales y se empieza a producir un abatimiento piezométrico cuya consecuencia inmediata son los esfuerzos efectivos verticales. La magnitud de estos hundimientos es función de la compresibilidad y el espesor de los depósitos afectados por el incremento de esfuerzos. Si como se muestra en la figura II.14, se tienen diferencias de espesor en el manto compresible ( $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$ ), en el tiempo  $t_1$ , se presentaran hundimientos diferenciales con una configuración semejante mostrada en la parte inferior de la misma figura ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$  y  $\delta_3$ ). Para un tiempo  $t_1$ , el nivel piezométrico se abate una profundidad  $z_1$ . Al continuar el bombeo, el nivel piezométrico continuará descendiendo y es de esperarse que a partir del tiempo  $t_1$  la contribución a los asentamientos de la zona localizada entre la superficie y  $z_1$ , será prácticamente nula. Entonces se tendrá una zona que ya no se comprime y otra subyacente ( $H'_1$  y  $H'_2$ ) en la cual continuará la consolidación ( $\delta'_1$  y  $\delta'_2$ ) y que inducirá flexión en los materiales superyacentes. Esta flexión se traducirá en tensiones perpendiculares ( $T$ ) al eje del valle y, eventualmente en grietas paralelas al mismo. Al continuar el descenso del nivel piezométrico y no existiendo continuidad de los materiales superficiales entre las zonas adyacentes a la grieta se producirá un escalón.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura II.14. Mecanismo de agrietamiento (ref. 11).

## Capítulo III. Información Disponible y Recopilada

### III.1 Conceptos básicos de los Sistemas de Información Geográfica (Torres, M., 2001)

El primer Sistema de Información Geográfica (SIG por sus siglas en español o GIS por sus siglas en inglés) que funcionó fue el Canadian Geographical System (CGIS), su creación inició en 1964 y desde 1967 ha servido para el inventario y planeación del uso de suelo en el territorio canadiense. Este sistema fue desarrollado por Roger Tomlinson, e IBM fue la empresa que aportó el hardware necesario; en su creación se plantearon muchos de los problemas técnicos y conceptuales que después se han ido resolviendo, en especial los referentes a la estructura y organización de la base de datos y a los métodos de entrada de la información.

Otros sistemas de la misma índole son los siguientes:

- Land Use and Natural Resources Information Systems (LUNR), desarrollado en Nueva York en 1967.
- Minnesota Land Management Information System (MLMIS), desarrollado en 1969.
- Polygon Information Overlay System (PIOS), desarrollado en 1971.
- The Oak Ridge Modelling Information System (ORMIS), desarrollado en 1972.
- Storage and Retrieval of Data for Water Quality Control System (STORET), desarrollado en 1975.

El Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis es una de las Instituciones que más ha aportado al modelo de datos, fue fundado en 1966 con la finalidad de utilizar las computadoras para la elaboración de gráficos y el manejo de información espacial para la planeación territorial; también se realizó en él la creación del programa de cartografía asistida por computadora SYMAP que hasta el momento se encuentra presente en el mercado. Las actividades fundamentales del Laboratorio se pueden dividir por etapas:

1ª Etapa (1966-1970). Elaboración del programa SYMAP (1968). Este programa utilizaba una de las formas más sencillas para conservar digitalmente la información espacial. También se elaboran por estos años los programas GRID e IMGRID basados en la denominada representación raster.

2ª Etapa (1970-1980). Consiste en el desarrollo del programa POLYVRT, en el cual se plantea una importante novedad en cuanto a la estructura de información espacial, integrando en ella de modo explícito la topología de los objetos cartográficos.

3ª Etapa. Con posterioridad se crea el primer y verdadero SIG de tipo vectorial el programa ODISSEY, el cual incluye la digitalización semiautomática de los datos espaciales, el manejo de la base de datos y la elaboración interactiva de mapas. La tendencia es ahora

mejorar las técnicas de reproducción, incluyendo el color y forma más expresiva de los mapas. Este sistema utiliza una estructura de datos topológica Arco/Nodo.

En el mismo laboratorio se trabajó en una línea de programas cartográficos muy diferentes, basados en una representación *raster* de los datos, tales como el GRID e IMGRID, de ellos surge el programa MAP que ha servido como modelo para el desarrollo de sistemas como ERDAS e IDRISI.

Tras las aportaciones del Laboratorio de la Universidad de Harvard surge una empresa privada con importantes desarrollos, la Environmental Systems Research Institute (ESRI), que partiendo de los trabajos de J. Dangermond y S. Morehouse ha creado varios Sistemas de Información Geográfica y programas propios como Arc/INFO, el primer SIG comercial lanzado en 1981, bastante inspirado en el ODISSEY aunque con avances y mejoras muy significativas.

En términos generales se puede decir que la tendencia ha sido empezar, en los años 70's la construcción de SIG muy específicos, ligados a necesidades concretas de Instituciones públicas como el Departamento de Agricultura, Ayuntamientos, etc. Se trataba de sistemas tales como CGIS, LUNR, PIOS, MLMIS, ORMIS, etc., instalados en grandes computadoras y cuya finalidad principal era el inventario de recursos en especial de uso de suelo, aunque con pocas capacidades analíticas. El incremento de las posibilidades del análisis geográfico ha venido unido inicialmente a la creación de sistemas raster dada la mayor facilidad para ello de este tipo de representación del espacio. Sin embargo, la realización de inventarios no cuadra bien con una descripción raster.

Es por ello que han subsistido dos líneas de desarrollo, el enfoque raster y el enfoque vector. A veces se elaboran sistemas mixtos, que mantienen la base de datos vectorial para inventario y la recuperación selectiva de los datos, y la transforman a raster cuando necesitan realizar algunos análisis, en especial la sobreposición de mapas.

Solo a finales de los años 70, con el desarrollo de una estructura topológica para los datos espaciales se han creado Sistemas de Información Geográfica vectoriales con mayores capacidades analíticas y éstos han empezado a ser de uso más general como es el caso de Arc/INFO. La mayoría de estos programas han sido elaborados por empresas como ESRI, INTERGRAPH (programa TIGRIS) y SIEMENS (programa SICAD).

En los últimos años (finales de los ochenta e inicios de los noventa) los SIG se han convertido en un tema candente y en rápida expansión. Buena muestra de ello es, por ejemplo, la creación del Centro Nacional para la Investigación Geográfica y Análisis (NCGIA por sus siglas en inglés) de la National Science Foundation de los Estados Unidos de América en 1988, con la finalidad de desarrollar investigación básica sobre el análisis geográfico utilizando los SIG.

Este nuevo centro ha elaborado un plan de investigación con varias líneas como es el Análisis Espacial y Estadístico Espacial, Relaciones Espaciales y Estructuras de la Base de

Datos, Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos, visualización de datos espaciales y cuestiones institucionales, sociales y económicas de los SIG.

En otros países también se pueden encontrar iniciativas semejantes, por ejemplo, los Laboratorios de Investigación Regional de Gran Bretaña, financiados por el British Economic and Social Research Council, pretenden desarrollar centros avanzados en el estudio de los Sistemas Manejadores de Base de Datos, Análisis Espacial y desarrollo de software, así como las aplicaciones de estas técnicas en la investigación regional. También en Holanda se ha establecido el NexpRi (Centro Nacional Holandés para SIG) con finalidades semejantes.

Un Sistema de Información Geográfica se puede definir como “Una base de datos computarizada que contiene información espacial (Cebrian y Mark, 1986) o también como una tecnología informática que se utiliza para gestionar y analizar información espacial”.

Otra definición más amplia sería la de “Un conjunto de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el Mundo real para un conjunto particular de objetivos” (Burrough, 1988).

Otros expertos insisten más en su aspecto informático: “Un Sistema de Información Geográfica es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes” (Bracken y Webster, 1990).

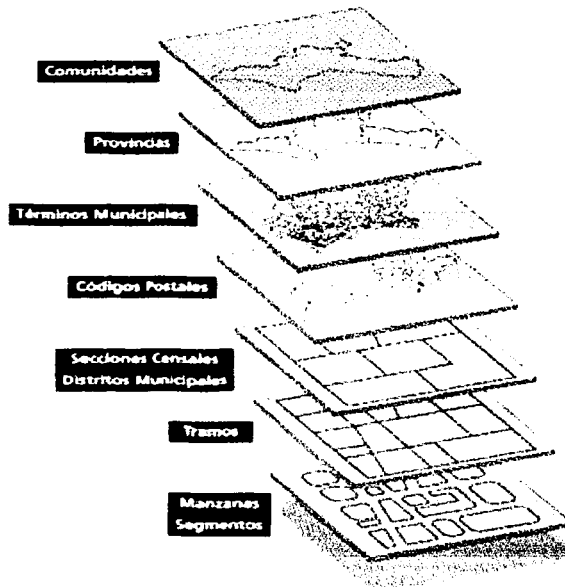
Finalmente, es importante recordar la definición realizada por el NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis, 1991) que dice: “Un Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”.

Otra de las definiciones importantes y que deja ver en claro qué es un SIG es la que se menciona a continuación: “Un Sistema de Información Geográfica es un sistema computacional, que consiste en una base de datos que almacena información espacial y descriptiva de un entorno geográfico como parte del Mundo real; además de permitir la entrada, mantenimiento, análisis, transformación, manipulación y presentación de datos espaciales, de algún punto geográfico en particular” (Goodchild, 1992).

De manera más simple e inmediata un Sistema de Información Geográfica se puede contemplar como un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar en particular tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas incluidos en el sistema de información. De este modo, resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento de la zona (figura III.1).

En las anteriores definiciones no queda demasiado claro el propósito práctico de esta tecnología, lo que es fundamental, ya que un Sistema de Información Geográfica se puede considerar esencialmente como una tecnología aplicada a la resolución de problemas

territoriales. En principio, las áreas de uso práctico de un Sistema de Información Geográfica son muy variadas: desde el inventario de los recursos naturales y humanos hasta el control y la gestión de los datos catastrales, de propiedad urbana y rústica (catastro multipropósito), la planificación y la gestión urbana y de los equipamientos, la cartografía y el control de grandes instalaciones (red telefónica, redes de abastecimiento y evacuación de aguas, redes de transporte), el marketing geográfico, etc. En realidad un Sistema de Información Geográfica es útil en cualquier área que sea necesario el manejo de información espacial.



**Figura III.1.** Estratos o capas de información en un SIG.

Los SIG forman parte del ámbito más extenso de los denominados “Sistemas de Información” (SI), que se pueden definir como un “Sistema (computacional o no) que está creado para dar respuesta a preguntas no predefinidas de antemano. Por lo tanto un SI incluye una base de datos, una base de conocimiento (conjunto de procedimientos de análisis y manipulación de los datos) y un sistema de interacción con el usuario. Los mismos elementos se pueden encontrar en la organización general de un SIG.

Un elemento muy relacionado con los SI son los Sistemas de Apoyo a la Decisión, que constituyen un nuevo paso adelante y forman una herramienta especializada, aunque de utilidad más parcial, pero más potente.

En ellos los datos y la base de conocimientos se estructuran para servir de ayuda a la toma de decisiones, facilitando posibles contestaciones y simulaciones de lo que podría ocurrir en caso de adoptar esta o aquella postura. Los SIG son en algunos casos simultáneamente, un Sistema de Información y un Sistema de Apoyo a la Decisión.

Un SIG es bastante más que un sistema de diseño asistido por computadora (CAD/CAM), y lo es por su capacidad de relacionar los elementos geográficos o datos espaciales (puntos, líneas y polígonos) que también son manejados por un sistema CAD/CAM, con los elementos de una base de datos temáticos, aspectos que faltan en el CAD.

Por otra parte, las diferencias con los programas de cartografía asistida por computadora estriban en su posibilidad de manejar más de un conjunto de elementos geográficos al mismo tiempo y sobre todo, la capacidad de construir nuevos datos a partir de los ya existentes en la base de datos. Por todo ello, se puede decir que, para el manejo de datos espaciales, los SIG son el mayor invento que se ha realizado desde la invención del mapa. En la figura III.2 se muestran los componentes que intervienen en un SIG.

Un SIG almacena información acerca del Mundo, como una colección de capas temáticas que pueden estar ligadas mutuamente por la geografía.

Esto es simple pero extremadamente poderoso y versátil, ya que ha proporcionado invaluable soluciones a problemas del Mundo real desde el seguir la pista a un vehículo hasta problemas más complejos y detallados como aplicaciones de planeación, modelado de la atmósfera para la circulación del aire, etc. La figura III.3 muestra lo anterior.

En el funcionamiento de un SIG intervienen dos factores muy importantes: la referencia geográfica y los modelos vectoriales y raster.



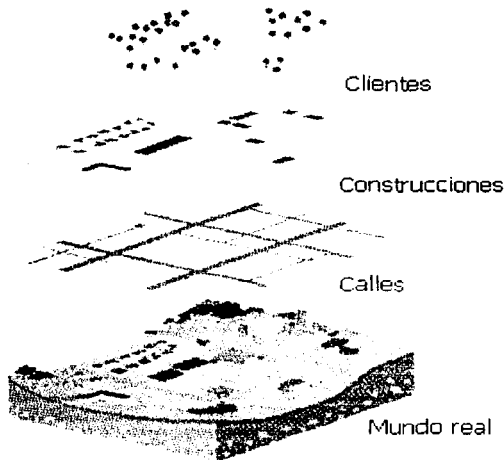
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura III.2. Componentes de un SIG.

**Referencia geográfica.** La información geográfica contiene una referencia geográfica explícita como es la latitud y longitud o coordenadas rectangulares o, en su defecto, una dirección, un código postal, etc. Un proceso automatizado llamado “geocoding” es utilizado para crear referencias geográficas explícitas (múltiples localizaciones) desde una referencia implícita (descripciones de cada dirección). Estas referencias geográficas permiten localizar distintos elementos como pueden ser negocios o áreas boscosas. Así también nosotros podemos localizar eventos como temblores sobre la superficie de la Tierra a través de un tipo de análisis.

**Modelos vectoriales y raster.** Un sistema de información geográfica trabaja con dos tipos fundamentales de modelos geográficos el “vector” y el “raster”. En el modelo vectorial se encuentran elementos como puntos, líneas y polígonos no codificados y almacenados como una colección de coordenadas x, y. La localización de un elemento puntual (pozos) se describe a través de sus coordenadas x, y. Los elementos lineales (carreteras y ríos) pueden ser almacenados como una colección de coordenadas de puntos. Los elementos poligonales (áreas de ventas, cuerpos geológicos) pueden ser almacenados con coordenadas cerradas que forman áreas.

El modelo vectorial es extremadamente usado para la descripción de elementos discretos y un poco menos utilizado para la descripción continua de elementos variables. El modelo raster envuelve estos elementos continuos. Es representado a través de una imagen que se considera como una colección de celdas almacenadas en una rejilla. Ambos modelos almacenan datos geográficos y cada uno de ellos tiene sus propias ventajas y desventajas.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura III.3. Funcionamiento de un SIG.

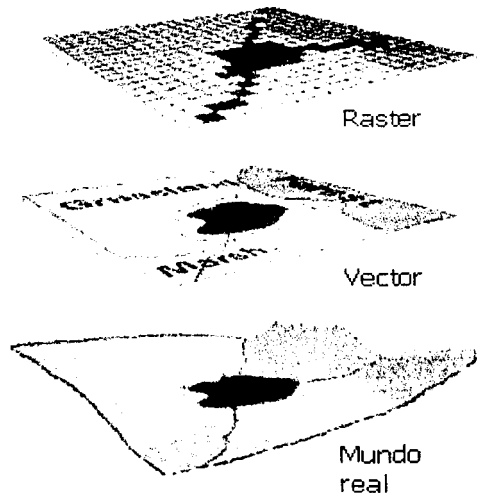


En la actualidad los SIG que mejor funcionan son aquellos que presentan ambos modelos para sus análisis.

Un SIG es, entre otras cosas, una herramienta computacional con capacidades específicas, las cuales se mencionan a continuación:

*Funciones para la Entrada de Información.* Son los procedimientos que permiten convertir la información geográfica del formato analógico, el habitual en el mundo real (especial en la forma de mapas); al formato digital que puede manejar la computadora. Esta conversión se debe realizar manteniendo todas las características iniciales de datos espaciales. Por ello en este subsistema se incluyen no sólo los mecanismos de entrada propiamente dichos (digitalización o similares), sino también los procedimientos que permiten eliminar errores o redundancias en la información incorporada al SIG. Previamente a la entrada de datos en un SIG la información que se va a utilizar se ha reunido y preparado para que sea tratada y convertida al formato digital (proceso de la obtención de la información).

*Funciones para la Salida Representación gráfica y cartográfica de la información.* Son las actividades que sirven para mostrar al usuario los propios datos incorporados en la base de datos del SIG y los resultados de las operaciones analíticas realizados por ellos, permiten obtener mapas, gráficos, tablas numéricas y otro tipo de resultados en diferentes soportes: papel, pantallas gráficas u otros.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Figura III.4.** Modelos raster y vector en un SIG.

*Funciones de gestión de la información espacial.* Con las cuales se extraen de la base de datos las porciones que interesan en cada momento, y es posible reorganizar todos los elementos integrados en ella de diversas maneras.

*Funciones analíticas.* Son el elemento más característico de un SIG, facilitan el procesamiento de los datos que se encuentran integrados para obtener mayor información, y con ella mayor conocimiento del que inicialmente se disponía. Estas funciones convierten a un SIG en una máquina de simulación equivalente. Por ejemplo, a las usadas por los pilotos para el aprendizaje en el manejo de aviones: en este caso, son los planificadores territoriales los que pueden obtener una impresión de cuál puede ser el resultado, en el territorio, de sus decisiones. Mediante su combinación apropiada se pueden construir los denominados Modelos Cartográficos, los cuales permiten resolver un gran número de cuestiones problemáticas de carácter espacial.

El propósito general de un sistema de información geográfica se basa principalmente en optimizar y realizar de manera adecuada las siguientes tareas:

*Entrada.* Antes de que la información geográfica pueda ser utilizada por un SIG, los datos deben convertirse a un formato digital. El proceso de conversión de datos analógicos (mapas en papel) es llamado "digitalización". La nueva tecnología SIG puede automatizar este proceso por completo, utilizando el reconocimiento de patrones para ello. Aunque pequeños trabajos pueden requerir alguna digitalización manual (uso de la tableta digitalizadora). En la actualidad muchos tipos de datos geográficos existen distintos en formatos que ya son compatibles con estos sistemas. Estos datos pueden obtenerse desde fuentes externas y cargados directamente en el SIG.

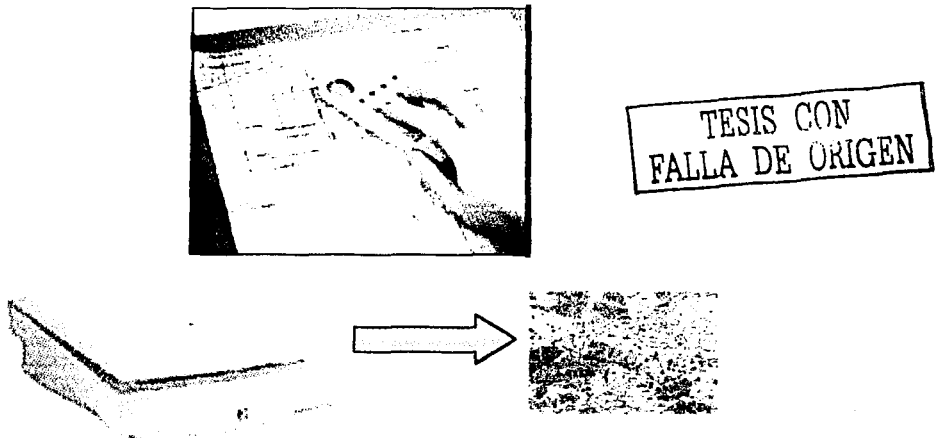


Figura III.5. Entradas de información para un SIG.

**Almacenamiento.** Los tipos de datos requeridos para un proyecto SIG, dependen de las necesidades del mismo, ya que se necesita hacer una transformación en algunos casos hay que hacer esta información compatible con el sistema. Por ejemplo la información geográfica se encuentra disponible en diferentes escalas (nivel de detalle). Antes de poder manipular la información esta debe ser integrada y transformada a una misma escala. Este tipo de transformación puede ser temporal, ya que únicamente puede utilizarse para un despliegue o algún análisis específico. La tecnología SIG ofrece muchas herramientas para el manejo de datos espaciales.

Existen dos tipos de almacenamiento para un SIG, el almacenamiento en formato raster y en formato vector. Los datos vectoriales representan elementos geográficos como puntos, líneas y áreas, este es el más utilizado en la representación y manejo de datos espaciales. En el modelo raster los elementos son representados como celdas en una rejilla con una localización específica (figura III.6). Los datos en formato raster se utilizan con mayor frecuencia para hacer análisis espacial. Se debe utilizar el modelo raster cuando solo se desea contar con relaciones de localización de un elemento geográfico.

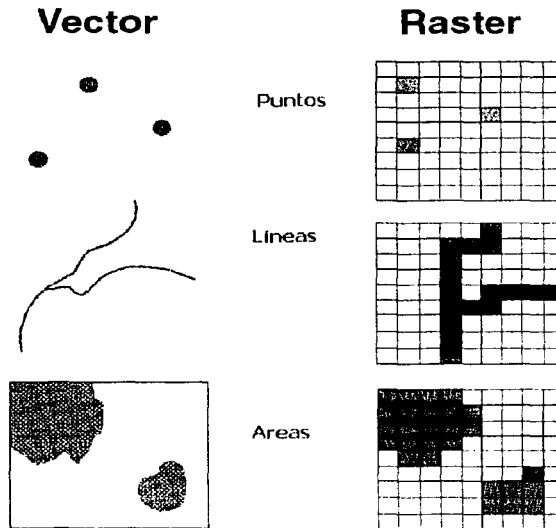


Figura III.6. Almacenamiento de la información en un SIG.

**Manejo de la información descriptiva.** Para pequeños proyectos SIG, puede ser suficiente almacenar información geográfica como simples archivos. Pero cuando los volúmenes de datos llegan a ser grandes y el número de datos de los usuarios es más pequeño,

lo mejor es utilizar un sistema manejador de base datos como auxiliar en el almacenaje, organización y manejo de los datos. En los SIG el modelo relacional es el más utilizado, ya que combina su funcionalidad para la interacción con un SIG, en la actualidad se están desarrollando bases de datos geográficas haciendo uso del modelo orientado a objetos (SIG experimentales), pero este todavía no es lo suficientemente robusto para proporcionar un rendimiento óptimo en las aplicaciones SIG.

*Análisis y consulta.* Una vez que se tiene en funcionamiento un SIG, el cual contiene información geográfica, entonces se puede iniciar con la petición de consultas simples como pueden ser: ¿Quién es el dueño del predio de la esquina, ¿Qué distancia existe entre dos ciudades, ¿Dónde está el tipo de suelo adecuado para colocar una fábrica?

También se pueden realizar peticiones analíticas como: ¿Dónde están todos los sitios adecuados para la construcción de nuevas casas?, ¿Cuál es el tipo de suelo predominante en cierta región específica?, Si, se construye una nueva autopista aquí, ¿Cómo podría afectarse el tráfico en este lugar?. Los SIG proporcionan ambos métodos, a través de sofisticadas herramientas de análisis, las cuales proporcionan este tipo de información de manera rápida.

Entre los análisis más importantes se encuentran el de análisis de proximidad y el análisis de sobreposición.

El análisis de proximidad realiza los siguientes tipos de peticiones, por ejemplo: ¿Cuál es el número total de clientes que se encuentran ubicados a más de 10 km. de la compañía?. Para contestar a esta pregunta, los SIG utilizan un proceso llamado "buffering", el cual determina las relaciones de proximidad entre los elementos.

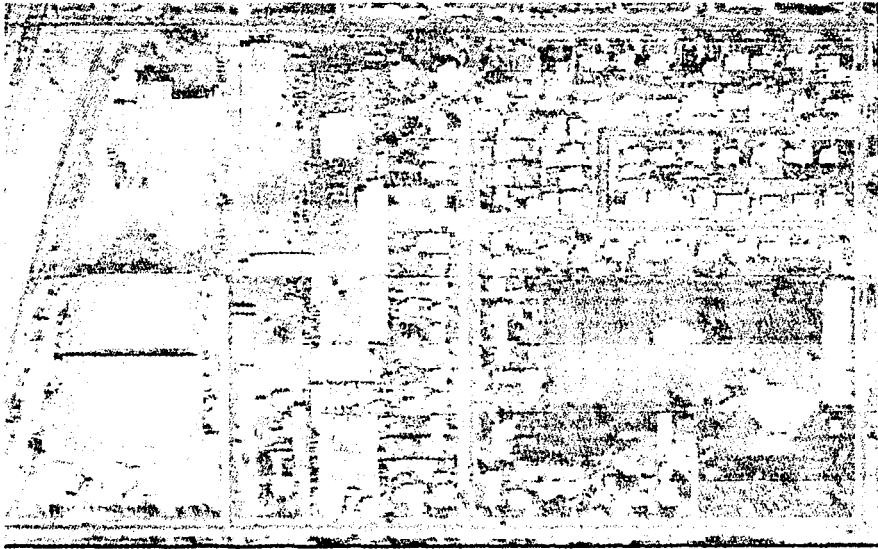
El análisis de sobreposición, se encarga de integrar diferentes capas de información. Este tipo de análisis se realiza a través de operaciones analíticas y requiere más de una capa de datos, ya que dará como resultado una capa unida físicamente con base en las otras. Esta sobreposición o unión espacial puede integrar datos de distinto tipo como por ejemplo: suelos, vegetación, poblados etc.

*Visualización.* El resultado final del uso de operaciones geográficas es un "mapa", el cual contiene información espacial y en algunos casos descriptiva de algún evento en particular.

Los mapas son muy eficientes para la comunicación y visualización de datos geográficos. Por otro lado los SIG proporcionan nuevas herramientas que hacen más sencilla y exacta la elaboración de un mapa.

Los mapas pueden ser integrados con reportes, vistas de tres dimensiones, atributos de una base de datos, imágenes aéreas y en algunas ocasiones con elementos multimedia.

Un Sistema de Información Geográfica es un herramienta computacional para manejar información, es decir, para facilitar el entendimiento de los fenómenos espaciales. Este entendimiento está basado en los datos.



**Figura III.7.** *Ejemplo de visualización de mapas con un SIG.*

Un dato geográfico se puede descomponer, conceptualmente, en dos elementos: la observación o soporte, una entidad de la realidad sobre la cual se observa un fenómeno y por otra parte la variable o atributo temático, que puede ser cualquier hecho que adopte diferentes modalidades en cada observación. Es decir, los objetos espaciales están dotados de propiedades intrínsecas las cuales se pueden medir; cada una de ellas constituye una variable o atributo temático asociado a un objeto. Los dos tipos de elementos tienen que ser manejados por un Sistema de Información Geográfica.

Esta definición de dato con los dos elementos citados, coincide con la que se puede efectuar para cualquier otra disciplina, como los datos sociológicos, económicos, biológicos, etc.

La diferencia entre la Geografía y sus datos con respecto a otras ciencias es la circunstancia de que el soporte de los datos geográficos está localizado en el espacio, lo que constituye una cuestión esencial del enfoque analítico de la Geografía y de las propiedades de los SIG.

Por otra parte las unidades de observación geográficas se pueden subdividir en dos grandes tipos:

Unidades de Observación Naturales. Son aquellas donde la referencia espacial es intrínseca al propio hecho (variable) observado, por ejemplo, la subdivisión del espacio por usos del suelo. En este caso el trazado de los límites depende de las propias características del fenómeno analizado.

Unidades de Observación Artificiales. Son creadas por el hombre, en las cuales la referencia espacial es extrínseca y ajena a los fenómenos o variables temáticas medidas en ellas. El mejor ejemplo es la partición del espacio en unidades administrativas, en este caso no existe ninguna razón natural para establecer unas u otras fronteras de separación, la definición humana de límites espaciales es siempre arbitrario.

En un SIG lo decisivo es que las observaciones son objetos situados en el espacio. Un cuestionamiento importante es especificar cuáles son los componentes de esta situación espacial de un objeto geográfico. Nuevamente se pueden considerar dos aspectos: la localización geométrica o absoluta en relación con algún sistema de referencia exterior y las relaciones topológicas cualitativas que mantiene con otros objetos espaciales, este tipo de información espacial es muy importante y útil, no sólo para la actividad real de una persona en el espacio, sino que también es necesaria en el funcionamiento de un SIG, ya que facilita en gran medida sus operaciones. De hecho, se puede considerar que una diferencia clave entre un SIG y un programa de cartografía asistida por computadora estriba precisamente en la información topológica incluida en la base de datos de un SIG, lo que facilita desarrollar análisis y operaciones complejas con los datos espaciales. Por el contrario, un programa de cartografía sólo emplea la referencia absoluta para preparar los mapas digitales.

Por otra parte, los tipos de unidades de observación espacial o elementos geográficos que se distinguen son básicamente tres y están en función de las propiedades geométricas/topológicas de las entidades geográficas, muy en concreto de las dimensiones espaciales de cada unidad de observación. Generalmente estos objetos son: puntuales (con cero dimensiones topológicas), lineales (con una dimensión) y poligonales (con dos dimensiones).

Lo primero que debe recordarse es que éstos dependen de la escala del mapa, ya que un mismo objeto varía sus dimensiones topológicas si se representa en mapas de distinta escala.

Puntos. Son elementos que están definidos por una coordenada cartesiana (x,y) y pueden cartografiar distintos elementos cuya distribución en el espacio no es uniforme, como puede ser la distribución de la población, así como determinados cultivos, pozos, etc.

Líneas o Arcos. Una línea o arco está definido por un conjunto ordenado de coordenadas cartesianas (x,y) que representan un elemento lineal o parte del cuerpo de un polígono en la superficie terrestre, tales como fronteras o límites, líneas de división o cambio de la manifestación de los fenómenos, como el tipo de suelo, formaciones geológicas, áreas con fallas y rupturas tectónicas entre otros.

Polígonos. Es un área definida por los arcos que conforman el cuerpo del polígono, los cuales pueden incluir en sí mismos elementos como los puntos u otros arcos. Muchos

fenómenos de la naturaleza y de la vida social, cuya extensión es amplia, como pantanos, bosques, regiones de cultivo y manchas urbanas, es posible representarlos a través de estos elementos.

En conclusión, un SIG debe estar en condiciones de manejar tanto las características espaciales de los objetos geográficos (la geometría o localización absoluta y la topología o relaciones cualitativas entre ellos) como los aspectos temáticos asociados a los objetos o unidades de observación.

Como ya se ha mencionado, los elementos geográficos pueden ser representados en tres formas geométricas: puntos, líneas y polígonos, las cuales representan elementos del Mundo real. Se utilizan estas formas geométricas, llamadas vectores (modelo de datos vectorial), porque algún elemento geográfico puede ser representado con una simple coordenada (x,y) o como una serie de éstas.

La forma y localización de un elemento geográfico es llamada información espacial y la información descriptiva que proporciona características acerca del elemento (qué es) es llamada información atributiva. Dónde un elemento está y qué elemento es determina el tipo de análisis que puede realizarse sobre él.

Existen dos componentes en la información geográfica, los datos espaciales y los datos descriptivos. Sobre los mapas, los símbolos texto transmiten información descriptiva, ofrecen información textual que proporciona una ruta de acceso de información adicional organizada en otros archivos. Un mapa entonces, llega a ser una herramienta poderosa para referenciar información. El mismo concepto aplica a los modelos de datos espaciales, una poderosa capacidad de un SIG es enlazar datos espaciales con datos descriptivos.

La figura III.8 muestra como la información espacial en un modelo de datos vectorial puede ser utilizada para representar elementos de localización y formas. Los atributos del elementos son información descriptiva que habla acerca de ellos.

Otros ejemplos que ilustran las relaciones entre información espacial y descriptiva son:

- La localización de un río y su nombre.
- La localización de un puente y su ancho.
- La localización de un espacio de área abierta y su tipo de vegetación.

Un SIG enlaza datos espaciales y descriptivos, con un mapa como soporte se pueden desplegar objetos geográficos y sus descripciones, realizar consultas a la base de datos, elaborar reportes y además se puede realizar análisis espacial.

Los datos espaciales se encuentran referenciados por un ID, de acuerdo al tipo de elemento topológico que se encuentre presente, a su vez esta capa espacial cuenta con datos descriptivos con respecto a los datos espaciales, almacenando alguna otra información importante para el análisis como puede ser la ubicación de cada uno de los objetos, es decir, las coordenadas correspondientes a cada elemento.

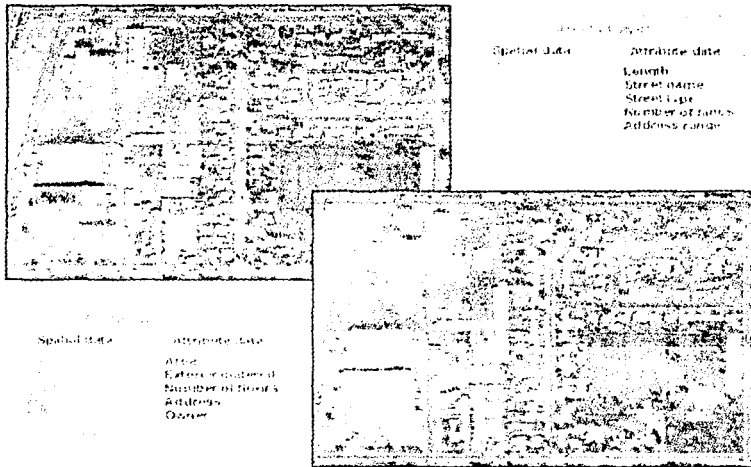


Figura III.8. Ejemplo de atributos espaciales y descriptivos.

### III.2 Integración de la información disponible

La integración de la información de que se dispone para la zona de estudio se hará a través de los SIG dada la facilidad que, como ya se vio, esta herramienta ofrece para el manejo de la información.

En la actualidad diversas compañías han producido diferentes versiones de software SIG y, aunque cada uno tiene particularidades respecto de los otros, todos comparten las funciones básicas que caracterizan a un SIG. En el presente trabajo se ha hecho uso del siguiente software:

- ILWIS (Integrated Land and Water Information System), versión 3.0, del International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) de Holanda.
- MapInfo Professional, versión 5.5, de MapInfo Corporation.
- ArcView, versión 3.2, del Environmental Systems Research Institute (ESRI).

Debe recordarse que para que pueda darse el manejo de la información en un SIG, ésta debe poseer dos características: encontrarse en formato digital y estar georreferenciada.



Una buena parte de la información básica se encuentra en formato analógico, esto es, impresa en papel, como las cartas topográficas, las fotografías, los mapas antiguos, los esquemas, etc., por lo cual el primer paso para la integración de esta información es su transformación al formato digital, esto se logra mediante los dispositivos denominados escáner, que pueden ser de cama plana o de rodillo; estos instrumentos transforman la información en un formato digital tipo raster.

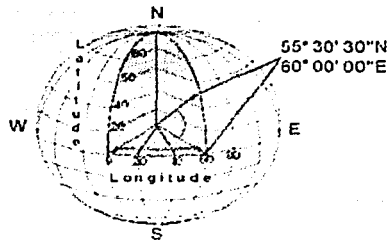
Sin embargo también es necesario contar con información en el otro tipo de formato digital llamado vectorial, ésta también se obtiene de la información analógica, transformándola con la ayuda de dispositivos como la tableta digitalizadora o vectorizadora o bien, más recientemente, con software vectorizador especializado.

Como se verá más adelante, actualmente parte de la información básica se obtiene ya en formato digital, sin embargo ésta, al igual que la información analógica digitalizada, puede contener errores, estar fragmentada o bien contener más información de la requerida; en cualquier caso se ve en la necesidad de modificarla, para lo cual se hace uso de software como los CAD (dibujo asistido por computadora) o los manejadores de imágenes, como el Photoshop de Adobe.

Una vez que la información se encuentra en formato digital (sea raster o vector) el siguiente paso para su integración en un SIG es la georreferenciación.

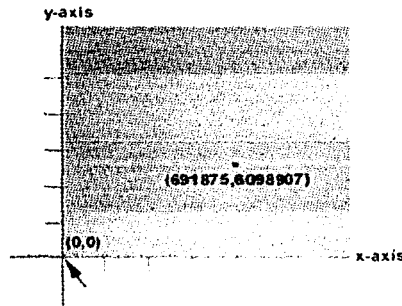
La georreferenciación es un procedimiento fundamentado en una base matemática, que consiste en proporcionar una referencia numérica del mundo real a la información espacial, a través de diferentes transformaciones y algoritmos previamente diseñados; cabe señalar que este método consiste en tomar valores o puntos de control reales, ya sea por alguna otra fuente de información (mapa en papel, puntos GPS, Geocoding, etc.) o datos ligados directamente a la base de datos. Existen dos tipos de sistemas de coordenadas para la referencia de la información espacial:

*Sistema de Coordenadas Latitud - Longitud (Coordenadas Geográficas).* Es el sistema de referencia más familiar, es muy utilizado para identificar la localización de puntos en cualquier parte de la superficie de la Tierra. La latitud - longitud son ángulos medidos del centro de la Tierra a un punto  $x$ . La latitud es medida de Norte a Sur y la longitud es medida de Este a Oeste. Una rejilla referenciada de líneas de latitud y longitud superpuesta en la superficie de la Tierra se emplea para referenciar diversos sitios. Las líneas de longitud algunas veces son llamadas meridianos, comienzan en el polo norte y terminan en el polo sur. Las líneas de latitud algunas veces son llamadas paralelos, rodean al globo formando anillos paralelos. La latitud y la longitud son tradicionalmente medidos en grados, minutos y segundos (DMS), figura III.9.



**Figura III.9.** Representación de la latitud y la longitud.

Sistema de Coordenadas UTM (Proyección Universal Transversa de Mercator). Los sistemas de coordenadas planas o sistemas de coordenadas cartesianas tienen muchas propiedades, lo cual hace que sean muy utilizados para la representación en mapas, entre las principales se encuentra el hecho de que utilizan dos dimensiones: "x", que se encarga de medir en dirección horizontal con valores que oscilan entre los cientos de miles de metros y por otro lado "y", que mide distancias en dirección vertical con valores que oscilan en millones de metros, figura III.10. La proyección UTM es una proyección cilíndrica que divide al mundo en 60 zonas o husos de 6° de longitud cada uno, en cada cual la coordenada "x" se mide a partir del meridiano medio de la zona, al que se le asigna un valor de 500,000 m para evitar coordenadas "x" negativas a la izquierda; la coordenada "y" se mide a partir del ecuador, al cual se le da un valor de 10'000,000 m únicamente para las coordenadas del hemisferio sur, con el fin de evitar coordenadas "y" negativas.



**Figura III.10.** Representación del sistema de coordenadas planas.

Debido a las ventajas que representa y a que es el sistema que adoptan diversas fuentes de información como el INEGI, para la integración de toda la información se manejará la proyección UTM con el Datum horizontal para Norteamérica de 1927.

Para el manejo de la información en formato digital y para la georreferenciación de la misma se empleó el siguiente software:

- Photoshop, versión 7, de Adobe.
- AutoCad, versión 2002, de AutoDesk.
- CadOverlay, versión 2002, de AutoDesk.
- AutoCad Map, versión 2000, de AutoDesk.
- Photopaint, versión 10, de Corel.

Una de las ventajas principales que presentan los SIG, es que estos cuentan con una base muy sólida para la construcción de cartográfica digital; por esto es necesario que un sistema de información geográfica pueda confeccionar y emplear en una forma correcta los mapas geográficos. Para esto es necesario comprender sus propiedades y particularidades, es por ello que el estudio y elaboración de los mapas requieren un enfoque analítico, una división de estos en sus elementos componentes, saber entender la esencia y el significado de cada elemento y sus correlaciones.

La información disponible está compuesta por:

- Cartografía.
- Topografía.
- Hidrografía.
- Geología.
- Geomorfología.
- Zonificación geotécnica.
- Fotografías aéreas.
- Imágenes de satélite.
- Mapas antiguos.

### Cartografía.

La cartografía está constituida por seis cartas urbanas que se construyeron a partir de la información magnética editada en discos compactos por el INEGI (CODICE 90, Zonas Metropolitanas, CIEN y CIMA). Cada carta urbana contiene la cartografía actualizada hasta 1994 a nivel de calles y manzanas, incluyendo nombres de calles y colonias, y se encuentra referida a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), cubriendo cada una de ellas una superficie de 6 x 6 km aproximadamente.

Uno de los primeros trabajos que hubo de realizarse fue la corrección de esta traza, pues presentaba diversos errores, como desplazamientos, repetición de elementos, etc.

### Topografía e hidrografía.

Los mapas digitales de topografía e hidrografía se obtuvieron también del INEGI, fueron editados por éste en CD's titulados "Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica Escala 1:50,000" en el 2000. Estos discos contienen información topográfica, hidrográfica, vías ferroviarias, etc., georreferida a la proyección UTM. Al igual que la traza urbana, fue necesario revisar y modificar los errores contenidos en esta información, así como realizar con ella algunos procesos que permitieran su integración en un SIG. La información topográfica es de suma importancia pues con ella y la ayuda del software SIG pueden obtenerse diversos productos derivados que nos permitan una mejor visualización y análisis de las características de la zona, como los modelos digitales de terreno (MDT), mapas de relieve sombreado, mapas de pendientes, etc.

### Geología.

Como se vio en el Capítulo I, F. Mooser ha estudiado la Cuenca de México desde varias décadas atrás; su último trabajo publicado a la fecha es el "Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla" (1996), el cual está compuesto por 36 cartas a escala 1:50,000. Se capturó digitalmente y se georreferenció el área de interés para delimitar la geología del área de estudio. Se tomó el trabajo de Mooser por contener la geología mas completa y detallada que se ha publicado hasta el momento.

### Geomorfología.

Esta información incluye tanto el mapa Geomorfológico de la Cuenca de México, elaborado por J. J. Zamorano en el año 1997, como el plano de Zonificación Geomorfológica, elaborado por COVITUR, mostrado en la figura 1.13. Ambos fueron digitalizados y georreferidos a la proyección UTM para su integración.

### Zonificación geotécnica.

El mapa digital de zonificación se capturó con base en el mapa que aparece en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1995, que es el plano reglamentario. El tener este mapa georreferenciado es de suma importancia ya que a partir de él se harán las correspondientes modificaciones si es el caso.

### Fotografías aéreas.

Las fotografías aéreas proporcionan un marco de referencia más cercano a la realidad y más práctico al momento de localizar un sitio determinado sobre el mapa. Las fotografías aquí empleadas fueron proporcionadas por el Instituto de Geografía de la UNAM y corresponden a líneas de vuelos del año 2000. Como estas fotografías se encontraban en archivos individuales, fue necesario elaborar un mosaico con ellas, y posteriormente georreferirlo a la proyección UTM, haciendo uso del software mencionado.

### Imágenes de satélite.

Las imágenes de satélite se emplean como un método de reconocimiento en diferentes disciplinas y su evaluación es uno de los primeros pasos que deben darse cuando se va a explorar o estudiar un sitio o territorio, debido principalmente a que definen la envoltura del espacio geográfico mediante su imagen real que cualquier otro recurso no proporciona, logrando con ello obtener una síntesis adecuada o visión de conjunto de toda el área o superficie del territorio.

En formato digital, una imagen de satélite puede concebirse como una matriz de números que refieren un valor de reflectancia; una vez transformados, estos valores permiten generar una imagen. Cada número es adjudicado a una celda (o píxel), cuyas dimensiones en el terreno definen la resolución espacial de la imagen. Así, el valor de cada celda en una imagen de satélite representa la cantidad de radiación que llega al sensor, desde los objetos presentes en la superficie terrestre. En forma simplificada, se puede suponer que ésta se encuentra cubierta por tres elementos fundamentales: vegetación, suelo, agua, y sus combinaciones.

El procesamiento de imágenes consiste en manejar los valores de reflectancia en dos etapas relacionadas entre sí: pre-procesamiento y clasificación multispectral; la primera implica las correcciones radiométricas y geométricas de la imagen. La segunda implica la segmentación del paisaje con base en la respuesta espectral de su cobertura. Esta extracción de información temática es comúnmente el objetivo central cuando se analizan imágenes de satélite para estudios del ambiente. Los criterios para el análisis visual de una imagen son: tono, color, textura, sombras, patrón espacial, contorno, formas de la imagen.

La imagen satelital que se utilizó tiene un tamaño de píxel de 30 m.

### Mapas Antiguos.

Debido a la intensa urbanización de la zona, muchos rasgos y características del terreno natural han quedado fuera de la vista: la carpeta asfáltica y las construcciones han cubierto el suelo, los ríos han sido entubados, etc. Un mapa antiguo nos permite ver, con cierto grado de exactitud, las características originales del área de estudio, tanto topográficas como hidrográficas y de crecimiento urbano. Diversos mapas antiguos de la Ciudad de México han sido recopilados, digitalizados y georreferenciados para integrarlos en un SIG junto con la demás información básica, como es el caso de la Carta Corográfica del Distrito Federal, del año 1898.

Todo el proceso de digitalización, georreferenciación y manejo de la información se llevó a cabo en el Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de ingeniería de la UNAM, que cuenta con los dispositivos y el software necesarios para estas tareas. La estructura de este laboratorio se muestra en la figura III.11.

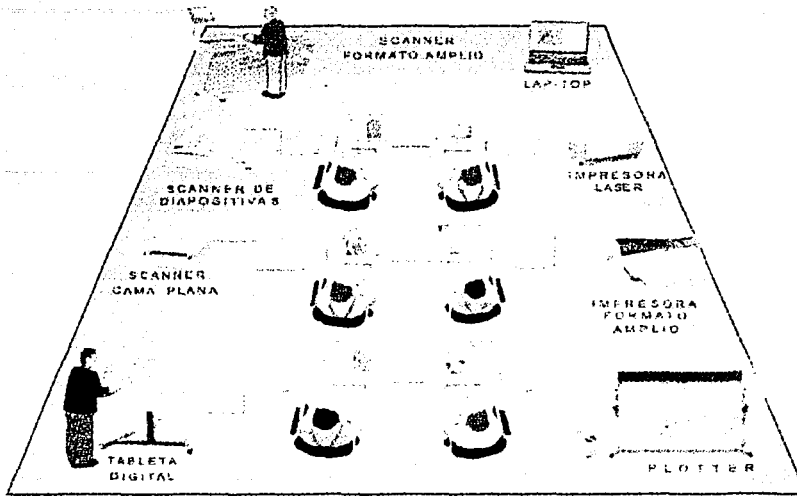


Figura III.11. Laboratorio de geoinformática.

### III.3 Recopilación, organización y captura de la información geotécnica

La creación de la base de datos para el SIG-SG es uno de los elementos principales del sistema; el primer antecedente de esta base de datos se remonta al primer banco de datos computarizado CATSON (Catálogo de Sondeos) el cual “se creó a raíz de los sismos de septiembre de 1985, ya que las autoridades tomaron una mayor conciencia de la importancia de la ingeniería de cimentaciones y la mecánica de suelos por las consecuencias que tuvieron los temblores, por lo cual la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS) decidió integrar este banco de datos con la intención de tener un mejor manejo y acceso a los sondeos realizados en la Ciudad de México, y ampliarlo a todo el ámbito nacional” (Ovando S., Méndez E., 1990).

La información geotécnica se obtuvo por medio de campañas de recopilación realizadas en diversas empresas privadas, institutos y dependencias, para las cuales se contó con la promoción de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS). La etapa de recopilación se extendió en varios periodos debido a que las campañas consistían en realizar visitas a las empresas, revisar toda la información de mecánica de suelos con la que contaba y seleccionar los sondeos de resultado de interés. Estas empresas proporcionaron dicha información al Instituto de Ingeniería de la UNAM para su incorporación al Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos SIG-SG (Auvinet, 1998).

Paralelamente a estas campañas se revisó la literatura de mecánica de suelos, como las memorias de las reuniones nacionales y de los simposios editados por la SMMS, principalmente las de la "5ª Reunión Nacional de Mecánica de Suelos" y del simposio "El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México".

La información contenida en estas publicaciones está constituida por un resumen general de los datos obtenidos en sondeos realizados sobre el área urbana de la Ciudad de México:

La información más valiosa fue recabada en las empresas privadas, pero, por razones prácticas, generalmente sólo se extrajo de los estudios de mecánica de suelos el perfil estratigráfico o, en su caso, los resultados obtenidos por métodos indirectos tal como las gráficas resultantes de la prueba de cono eléctrico.

En total se cuenta con 1182 sondeos para la zona de estudio. La tabla III.1 muestra las diferentes fuentes de donde se obtuvieron sondeos geotécnicos y el número de los mismos correspondientes a cada una de ellas.

Fuente de información	Número de sondeos	Porcentaje
Asesores en Cimentaciones	566	47.88
Barda Ingeniería.	3	0.25
DEMET S.A. de C.V.	6	0.51
Dessvi Consultores S.A. de C.V.	5	0.42
Diseño Especializado en Geotecnia	15	1.27
Diseño Geotécnico S.A. de C.V.	3	0.25
El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, SMMS.	33	2.79
ETA Consultores S.A. de C.V.	5	0.42
Geosol S.A. de C.V.	18	1.52
Geotecnia e Hidráulica Ingenieros Consultores	11	0.93
Ingenieros Constructores Contratistas Especializados	32	2.71
Ingenieros Especialistas en Cimentaciones	23	1.95
Ingeosuelos S.A.	2	0.17
Instituto de Ingeniería, UNAM	22	1.86
ISTME	10	0.85
Pemex Ingeniería Experimental.	2	0.17
Perforaciones y Cimentaciones, S.A.	140	11.84
Rioboo S.A. de C.V.	33	2.79
Solum Geotecnia	60	5.08
SYCSA	2	0.17

Tecnología en Control de Suelos y Concreto S.A. de C.V.	4	0.34
TGC Geotecnia.	57	4.82
V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, SMMS.	119	10.07
Otros	11	0.94
<b>TOTAL</b>	<b>1182</b>	<b>100.00</b>

**Tabla III.1.** *Número de sondeos recopilados por fuente.*

La información se organizó de acuerdo al tipo de sondeo utilizado en la exploración; teniéndose los tipos mostrados en la tabla III.2, a los cuales se les asignó un código numérico para facilitar su manejo.

Tipo de sondeo	Descripción	Número de sondeos	Porcentaje
00	Fuente bibliográfica	154	13.03
01	PCA o continuo	67	5.67
02	Sondeo de penetración estándar	491	41.54
03	Cono dinámico	100	8.46
04	Cono eléctrico	53	4.48
05	Mixto	142	12.01
06	De verificación	67	5.67
07	De avance controlado	108	9.14
	<b>TOTAL</b>	<b>1182</b>	<b>100.00</b>

**Tabla III.2.** *Tipos de sondeo.*

Cada uno de los sondeos fue georreferenciado, obteniéndose las coordenadas UTM de su localización, lo cual se logró ubicando cada sondeo en la cartografía digital georreferenciada, utilizando para ello los croquis de localización que acompañan a la información recopilada. Cabe señalar que varios de los sondeos recopilados inicialmente en las campañas no fueron incluidos por no haber sido posible su ubicación.

Con los datos generales de cada sondeo se elaboró una base de datos en Excel, la cual contiene los siguientes campos:

- Las claves general y auxiliar; que son los números que identifican a cada uno de los sondeos integrados dentro del sistema.



- El mes y año de ejecución, indican la fecha en que se realizó la exploración.
- El tipo de sondeo, de acuerdo a la tabla III.2.
- El ejecutor, corresponde a la fuente bibliográfica, empresa o dependencia que proporciona la información, tal como se muestra en la tabla III.1.
- La Calle y número; Colonia; Delegación o Municipio, Ciudad y Entidad Federativa, que corresponden a su ubicación.
- Las coordenadas X, Y y Z, correspondientes a la localización geográfica referida a la proyección UTM.
- También existe el registro correspondiente a la profundidad del sondeo.
- En el campo observaciones se registran datos relevantes respecto a la localización o ejecución del sondeo, como el tipo de obra para el que se realizó el estudio o el número de sondeo asignado por el ejecutor.
- Además se incluye un campo con la profundidad a la que se encontró el nivel de aguas freáticas, NAF, en ese sitio.

La figura III.12 muestra la densidad y distribución de los sondeos geotécnicos recopilados en el área de estudio. Un plano más detallado puede consultarse en el Anexo D.

La base de datos completa se encuentra en el Anexo B.

Además de capturarse esta base de datos, se digitalizaron también las imágenes correspondientes a los resultados de la exploración mencionadas anteriormente, esto es, la estratigrafía, contenidos de agua, número de golpes de la prueba SPT, etc., lo cual, con el empleo de un SIG, permitirá la consulta individual de cada imagen correspondiente a los sondeos recopilados, como se verá en el apartado siguiente.

También se cuenta con información de 95 pozos de agua construidos dentro de la zona de estudio, la cual consta de imágenes con el perfil estratigráfico del sitio. Se elaboró para esta información otra base de datos similar a la de los sondeos geotécnicos. Estos pozos fueron igualmente localizados en la cartografía y sus imágenes correspondientes digitalizadas para su consulta.

Así mismo, la Coordinación de Protección Civil y Zonas de Alto Riesgo de la Delegación Álvaro Obregón proporcionó información sobre las minas que se han encontrado en su territorio, en forma de planos de levantamientos topográficos de las cavidades, mismos que fueron vectorizados y georreferenciados para su integración en un SIG.

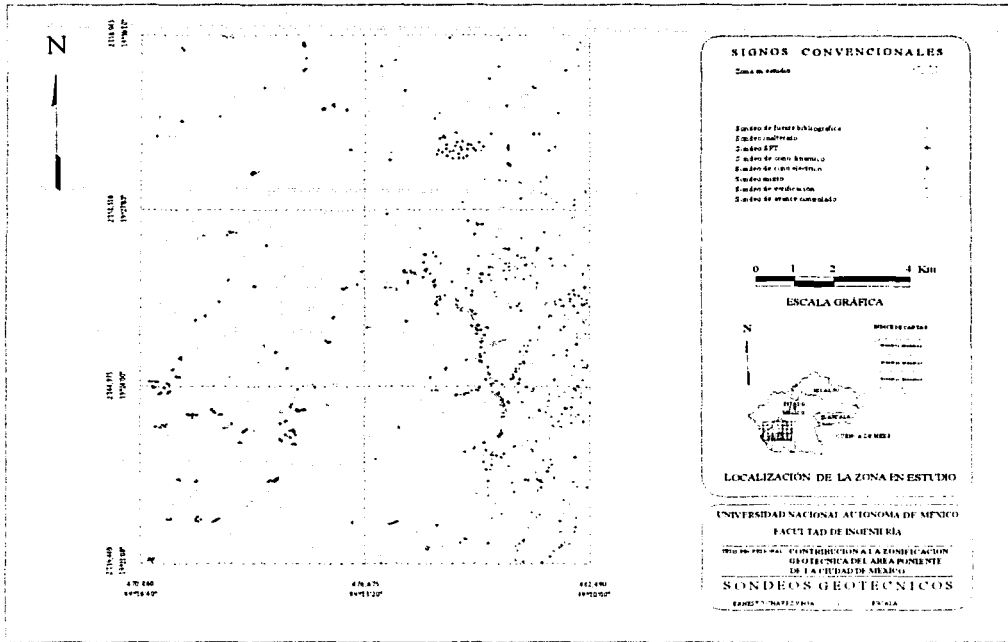


Figura III.12. Densidad y distribución de los sondeos geotécnicos en la zona de estudio.

### III.4 Sistema de Información Geotécnica

Toda la información, disponible y recopilada, se integra finalmente en un Sistema de Información Geográfica denominado Sistema de Información Geotécnica, desarrollado en el Instituto de Ingeniería para cumplir los siguientes objetivos:

- Presentar en forma clara la información geográfica y geotécnica general de la zona en estudio, que corresponde al área delimitada en el capítulo primero de este trabajo.
- Almacenar sistemática y permanentemente la información puntual sobre los rasgos generales del subsuelo disponible en la zona, conformada por sondeos y pozos.
- Permitir la consulta de información descriptiva y gráfica individual de esa información puntual.
- Ser dinámico, esto es, permitir la actualización de la información contenida en él y la incorporación de nueva información.

Para lograr estos objetivos, el software seleccionado para conformar la plataforma sobre la que se desarrolló el sistema es el ArcView versión 3.2, de la compañía ESRI, dado que presenta las siguientes ventajas:

- Se ejecuta bajo ambiente Windows en una computadora personal, evitándose el uso de estaciones de trabajo, más costosas y difíciles de manejar.
- Su manejo es intuitivo y fácil de aprender.
- Reconoce un gran número de formatos de archivos.
- Emplea la información de los archivos de origen, esto es, no existe la necesidad de transformar la información a un formato propio de ArcView, lo que disminuye el uso de memoria y agiliza la incorporación de información.
- Es personalizable y programable, lo que permite la incorporación de funciones específicas acordes a las necesidades del usuario.

La versatilidad de este software permite la lectura de archivos en formato DXF de AutoCad, de esta forma se integra directamente la información correspondiente a la cartografía, zonificación, geología, geomorfología, levantamiento de cavernas, etc. De la misma manera sucede con las imágenes en formato raster referenciadas previamente, como la imagen de satélite, las fotografías aéreas y los mapas antiguos.

Para la integración de la información contenida en la base de datos es necesario primeramente convertir el archivo de Excel a uno en formato Dbase, una vez en este formato, ArcView puede leerlo e integrarlo y, especificando el nombre de los campos que contienen las coordenadas de los registros, representará cada uno de ellos como un punto visible en el monitor.

La información así integrada se organiza en capas o estratos de información, en un orden específico tal que nos permita visualizar lo que deseamos en determinado momento; en la figura III.13 se muestra el modelo conceptual de esta organización.

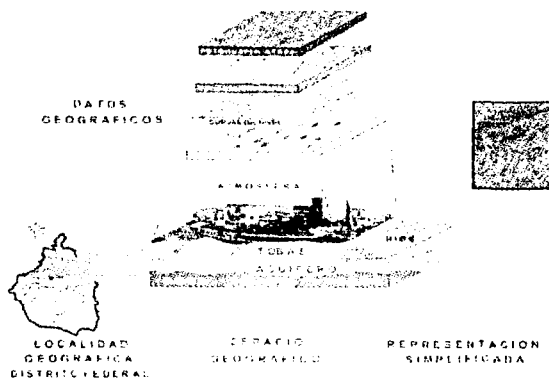


Figura III.13. Modelo conceptual del Sistema de Información Geotécnica.

Finalmente, las capas de información que contiene el sistema son las siguientes:

- Sondeos geotécnicos, representados por puntos con diferentes colores según el tipo, ligados a la base de datos de sondeos.
- Pozos, representados por puntos de un solo color, ligados a la base de datos de pozos.
- Zonificación geotécnica, representada por polígonos, uno por cada zona.
- Geología, representada por polígonos, uno por cada tipo de formación.
- Geomorfología, representada por polígonos, uno por cada tipo de formación.
- Hidrografía, representada por segmentos.
- Topografía, representada por segmentos, equivalentes a las curvas de nivel; contienen el atributo de elevación.
- Mapa de relieve sombreado, imagen raster generado a partir de la información topográfica.
- Fotografía aérea, imagen raster, mosaico formado con fotografías aéreas individuales.
- Imagen de satélite, en formato raster.

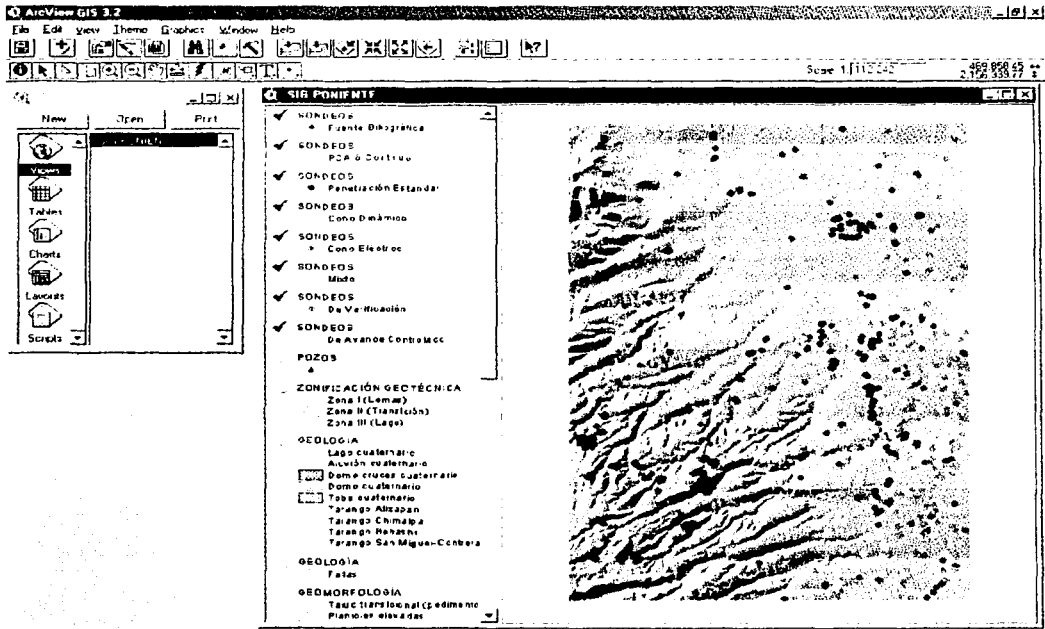


Figura III.14. Sistema de Información Geotécnica.

La figura III.14 muestra una vista general del sistema, en ella se tiene como imagen base el mapa de relieve sombreado de la zona, los sondeos se encuentran visibles en colores diferentes de acuerdo a su tipo, según la leyenda que aparece al lado, los pozos también aparecen, en color negro.

La visibilidad de cada capa puede ser activada o desactivada de acuerdo a la información que nos interese, por ejemplo, en la figura III.15 se ha eliminado el mapa de relieve sombreado y a cambio se ha puesto el mosaico de fotografías aéreas y se ha agregado la zonificación geotécnica de 1995.

Supongamos que nos interesa conocer la información geotécnica de un sitio cercano al Bosque de Chapultepec; es posible hacer un acercamiento a esta zona de manera que se identifique adecuadamente el sitio en cuestión y la información con que ahí se cuenta (figura III.16).

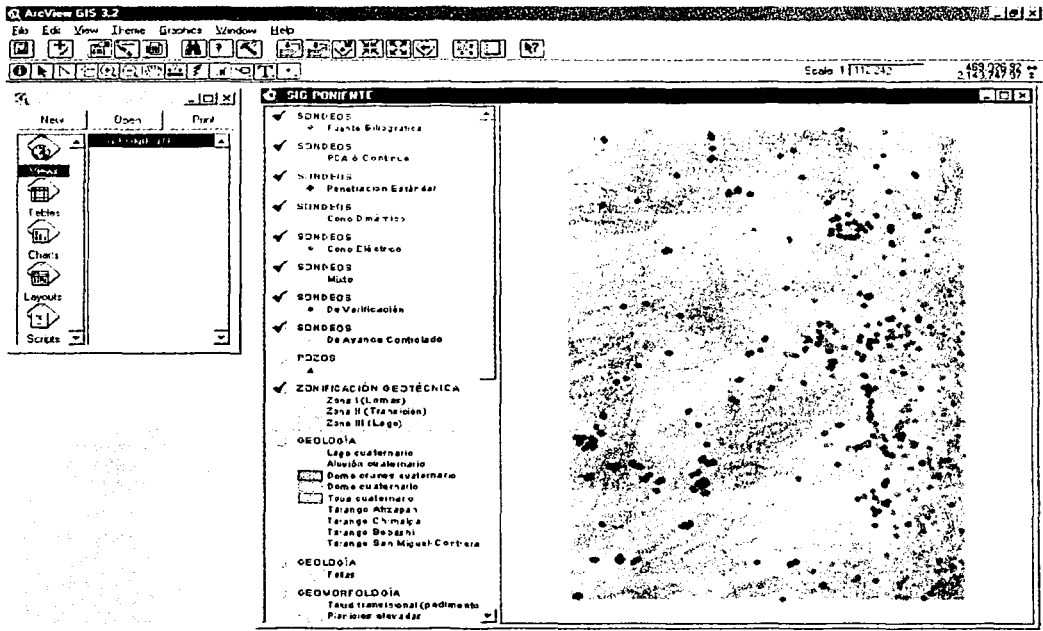


Figura III.15. SIG mostrando la zonificación geotécnica y fotografía aérea.

TRAMA CON  
FALLA DE ORIGEN

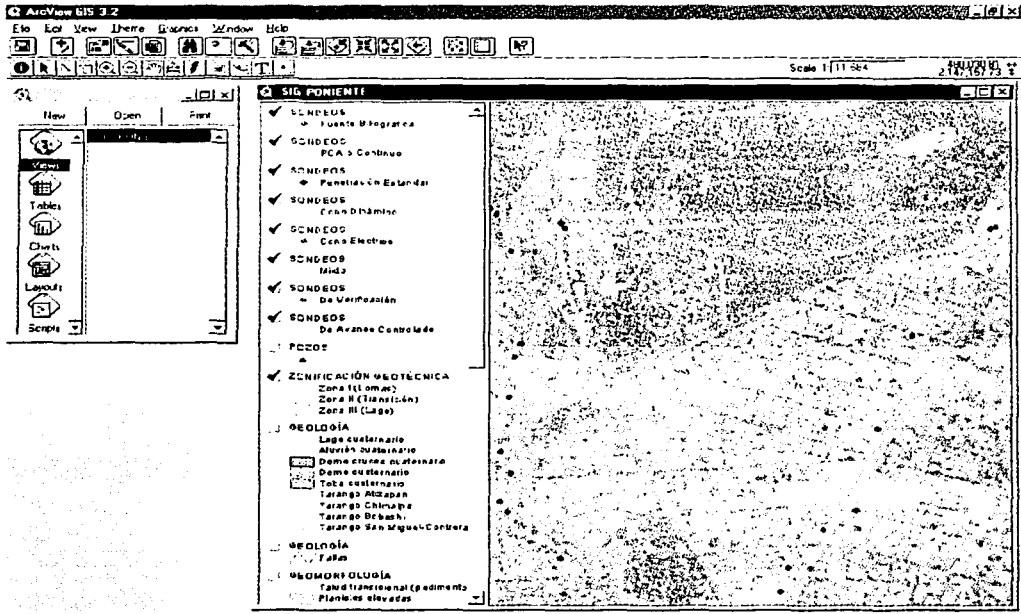


Figura III.16. Ampliación sobre un sitio de interés.

Puesto que la fotografía aérea tiene una determinada resolución, tal vez no sea posible identificar adecuadamente un sitio a un determinado nivel de acercamiento, entonces será necesario visualizar la cartografía urbana, la cual se encuentra a nivel de manzanas y calles en formato vectorial, también se incluye otra capa de información que contiene los nombres de las calles y colonias (figura III.17), de esta manera puede ubicarse un sitio con bastante precisión.

El hecho de que la capa que contiene los sondeos esté ligada a la base de datos, nos permite consultar la información sobre cada sondeo simplemente seleccionando el icono de información y haciendo clic sobre alguno de los puntos que representan a los sondeos, aparecerá una tabla mostrando esta información, como lo muestra la figura III.18, donde además se han etiquetado los sondeos para su correcta identificación. Esta misma operación puede ser realizada para los pozos.

Como se mencionó en el apartado anterior, cada sondeo tiene una imagen ligada a él; gracias a la programabilidad del sistema se logra que al hacer clic sobre el icono de liga y señalar cualquier sondeo o pozo deseado aparezca su imagen en una nueva ventana, como lo muestra la figura III.19.

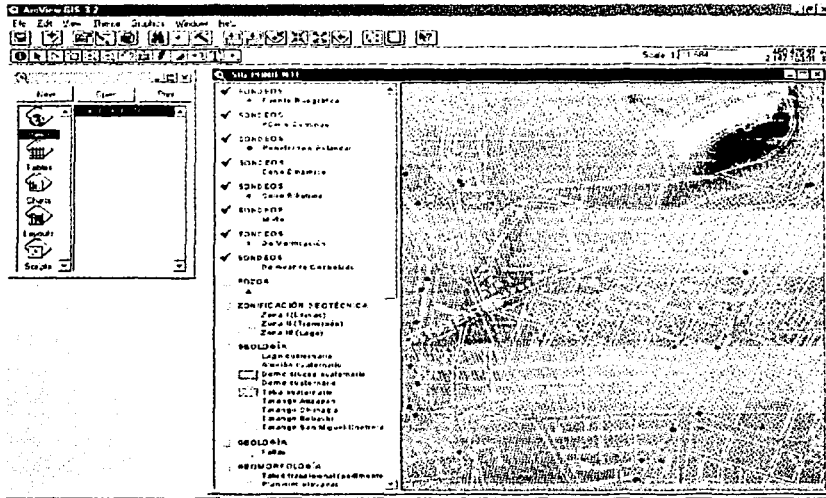


Figura III.17. Cartografía urbana en el sitio de interés.

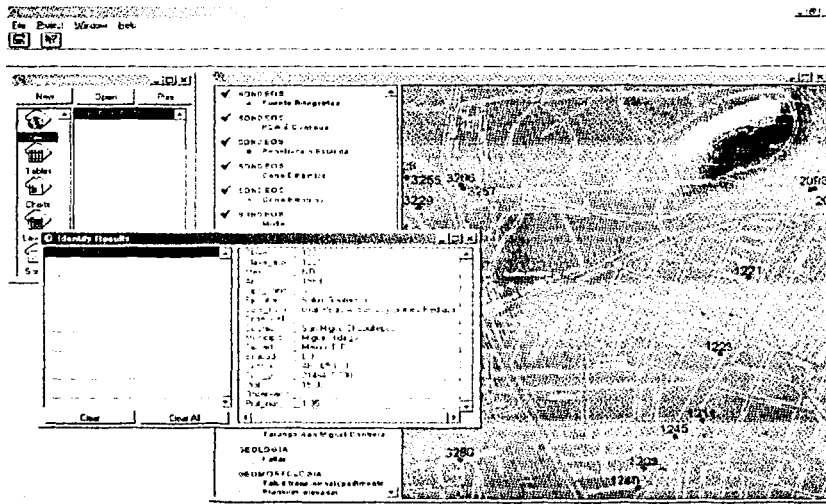


Figura III.18. Tabla de datos con la información del sondeo seleccionado.

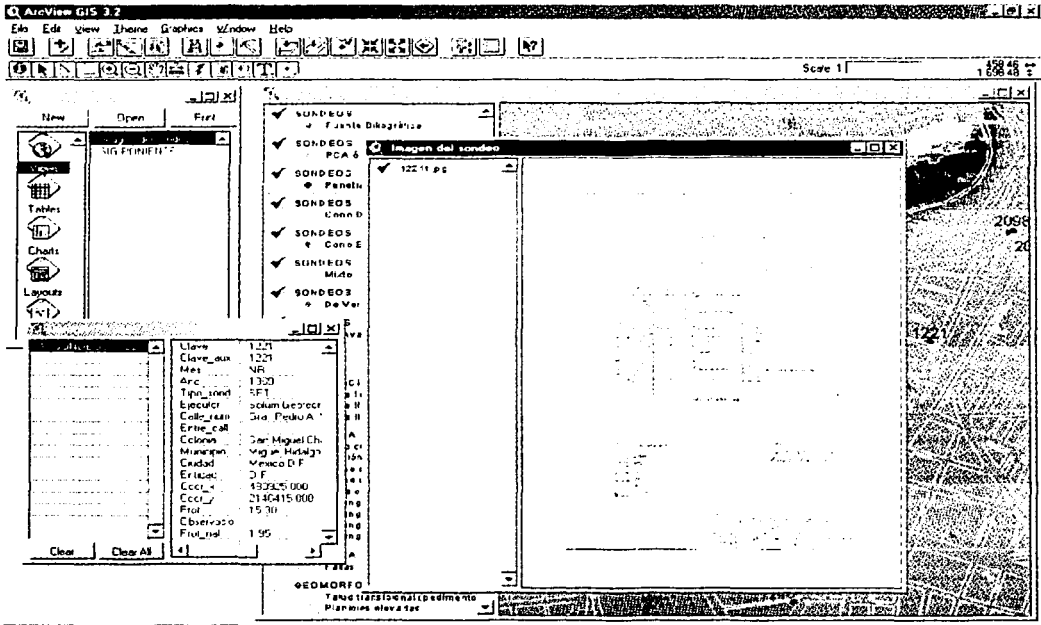


Figura III.19. Imagen del sondeo seleccionado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## Capítulo IV. Propuesta de Zonificación Geotécnica

### IV.1 Metodología

La propuesta de zonificación geotécnica de la zona en estudio se basa, como ya se ha mencionado, en información de diversa índole disponible y recopilada, integrada de la manera señalada en el capítulo anterior.

Es importante aclarar que esta propuesta forma parte integral de una de mayor extensión que ha sido dividida para su realización; de hecho, esta tesis es resultado del trabajo en dos proyectos que se llevan a cabo en el Instituto de Ingeniería:

- a) Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, SIG-SG, que tiene como objeto almacenar sistemática y permanentemente la información puntual disponible sobre los rasgos generales del subsuelo, a través de los datos contenidos en sondeos geotécnicos de diferentes tipos, y
- b) Actualización de la Zonificación Geotécnica del Distrito Federal y del Valle de México, con el objetivo que su nombre indica, con fines de reglamentación.

El análisis para definir el mapa de zonificación geotécnica de la zona consta de dos etapas, una preliminar y otra de detalle.

En la etapa preliminar se interpreta la información disponible (topografía, geología, geomorfología, etc.) con el objeto de conformar una idea inicial sobre la posible configuración de los materiales que constituyen el subsuelo de la zona, así como comprender el origen y desarrollo de esta disposición.

Esta interpretación se lleva a cabo mediante el empleo del SIG desarrollado ya que, al tener la información agrupada en diferentes capas, se puede entonces aprovechar la capacidad del sistema para efectuar combinaciones y permutaciones de una con otra o sintetizar a través de la integración de todas las capas de información en una sola, según los requerimientos del análisis.

A la superposición simultánea o integración al mismo tiempo de dos o más capas o estratos de información de diferente clase se le conoce como composición vertical de información (figura IV.1) y esta posibilidad de manejar la información se llama modelación visual-espacial realizada en un SIG. Esta modelación constituye el principio básico sobre el que se sustenta la metodología del análisis preliminar dirigido a la descripción de las características espaciales del subsuelo en múltiples aspectos del mismo y que se orienta a la definición del mapa de la zonificación geotécnica.

La modelación visual-espacial en un SIG permite efectuar múltiples operaciones para manejar y procesar volúmenes grandes de diferentes clases o temas de información alfanumérica y gráfica en formato digital, agrupándolos en capas.

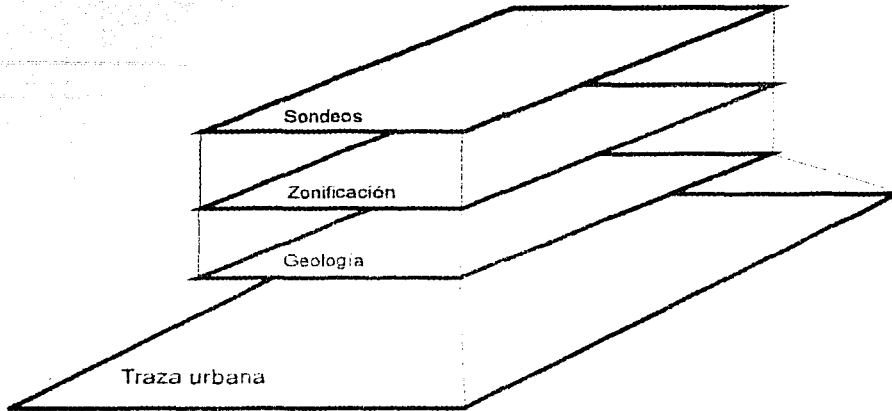


Figura IV.1. Coberturas temáticas para la modelación en un SIG.

El análisis de detalle consiste en afinar las líneas de frontera definidas en el análisis preliminar a partir de la información puntual sobre la estratigrafía y propiedades del suelo que proporcionan los diferentes tipos de sondeos geotécnicos (cono, SPT, muestreo continuo inalterado, dinámicos, mixtos, etc.). Este análisis permite ubicar la localización y distribución de rellenos, depósitos y formaciones geológicas en dos sentidos: uno sobre la proyección horizontal de un plano y otro a lo largo de la proyección vertical (profundidad).

Haciendo una vez más uso del GIS, se analizaron y caracterizaron los sondeos geotécnicos buscando líneas de estudio para la elaboración de cortes estratigráficos los cuales, junto con la información puntual y la general disponible, permitieron realizar los ajustes a la zonificación geotécnica actual.

El criterio para la modificación de las fronteras de la zonificación se basa en la definición de las diferentes zonas geotécnicas que se encuentra establecida actualmente en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, en los artículos que a continuación se transcriben.

**“Artículo 175.-** Para fines de estas disposiciones, el Distrito Federal se considera dividido en las zonas I a III, dependiendo del tipo de suelo.

Las características de cada zona y los procedimientos para definir la zona que corresponde a cada predio se fijan en el Capítulo VIII de este Título.

### *Capítulo VIII*

**Artículo 219.-** Para fines de este Título, el Distrito Federal se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta Zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena;

Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros, y

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m;

La zona a que corresponda un predio se determinará a partir de las investigaciones que se realicen en el subsuelo del predio objeto de estudio, tal y como lo establezcan las Normas Técnicas Complementarias. En caso de Edificaciones ligeras o medianas, cuyas características se definan en dichas Normas, podrá determinarse la zona mediante el mapa incluido en las mismas, si el predio está dentro de la porción zonificada; los predios ubicados a menos de 200 m de las fronteras entre dos de las zonas antes descritas se supondrán ubicados en la más desfavorable.

**Artículo 220.-** La investigación del subsuelo del sitio mediante exploración de campo y pruebas de laboratorio deberá ser suficiente para definir de manera confiable los parámetros de diseño de la cimentación, la variación de los mismos en la planta del predio y los procedimientos de edificación. Además, deberá ser tal que permita definir:

I. En la zona I a que se refiere el artículo 219 del Reglamento, si existen en ubicaciones de interés materiales sueltos superficiales, grietas, oquedades naturales o galerías de minas, y en caso afirmativo su apropiado tratamiento, y

II. En las zonas II y III del artículo mencionado en la fracción anterior, la existencia de restos arqueológicos, cimentaciones antiguas, grietas, variaciones fuertes de estratigrafía, historia de carga del predio o cualquier otro factor que pueda originar asentamientos diferenciales de importancia, de modo que todo ello pueda tomarse en cuenta en el diseño.”

## IV.2 Interpretación de la información general disponible

Esta información, integrada en el SIG, puede ser procesada para obtener información adicional o para presentarla en formas más claras que permitan su interpretación de manera más sencilla.

Uno de esos procesos, que se considera básico y en muchos casos insustituible para la mayoría de los estudios con aplicación a Ciencias de la Tierra consiste en la obtención de un Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir de la información topográfica representada generalmente por curvas de nivel. Posteriormente, el procesamiento del MDT permite obtener mapas de relieve sombreado o representaciones en 3D, con los cuales puede apreciarse de manera inmediata y precisa la configuración topográfica de la zona en estudio. Véase la figura I.3, donde se muestra la topografía de la zona representada por curvas de nivel y a continuación véase la figura IV.2, donde se muestra el mapa de relieve sombreado de la zona generado mediante el software ILWIS e integrado en el SIG desarrollado para la zona.

A primera vista podemos observar que existe una región montañosa y otra plana, tal como se describió en el primer capítulo. Esto nos conduce a pensar en una primera diferenciación de zonas, cuya frontera estaría marcada por el contorno que se aprecia entre dichas regiones.

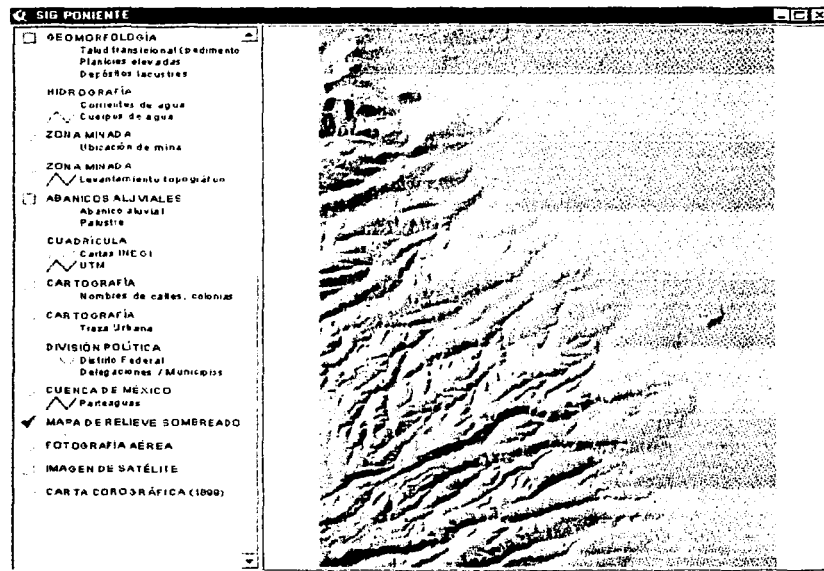


Figura IV.2. Mapa de relieve sombreado de la zona en estudio.

Por otra parte, si superponemos la geología del área, ésta nos muestra de manera más precisa la definición de las zonas mencionadas en el párrafo anterior, observándose además una división de la zona plana en dos: aluvión y lago.

La información geológica (figura IV.3) se considera básica pues nos muestra el origen, estructura y composición de la corteza terrestre; está fundamentada en estudios regionales extensos y apoyada por información de campo tal como los pozos, que pueden llegar a profundidades de cientos e incluso miles de metros. Sin embargo, esta información para el caso de la geotecnia y en particular de la zonificación, resulta muy general.

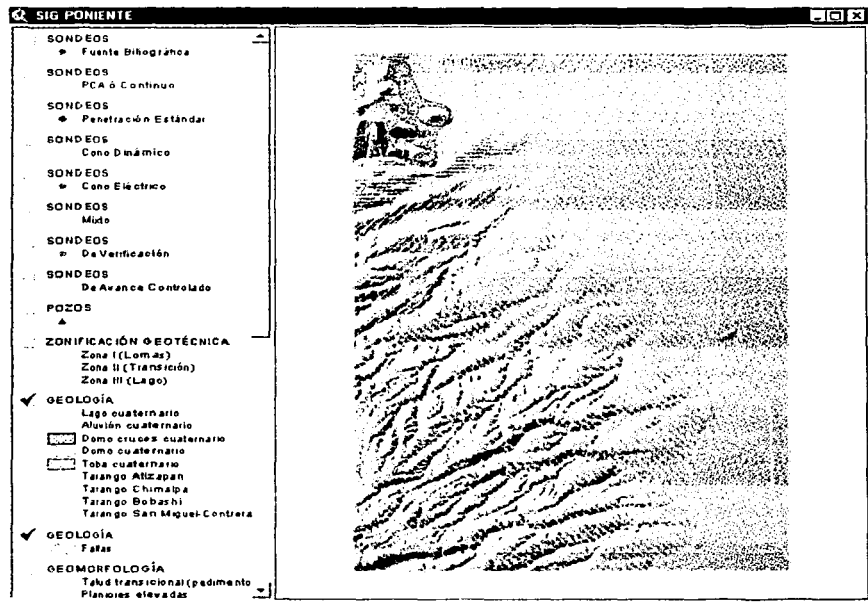


Figura IV.3. Geología de la zona sobre el mapa de relieve sombreado.

La geomorfología (figura IV.4) nos ofrece un panorama similar, sin embargo, al estudiar fenómenos que dieron forma al relieve de la zona y, por lo tanto, más cercanos a la superficie terrestre, puede arrojar más luz sobre la composición de la parte del subsuelo que interesa a los fines de la zonificación geotécnica.

La interpretación geomorfológica de los rellenos aluviales (en color verde) que circundan al pie de la Sierra de las Cruces, y que dan origen a la zona geotécnica llamada de transición, se describe a continuación bajo una óptica morfo-crono-genética.

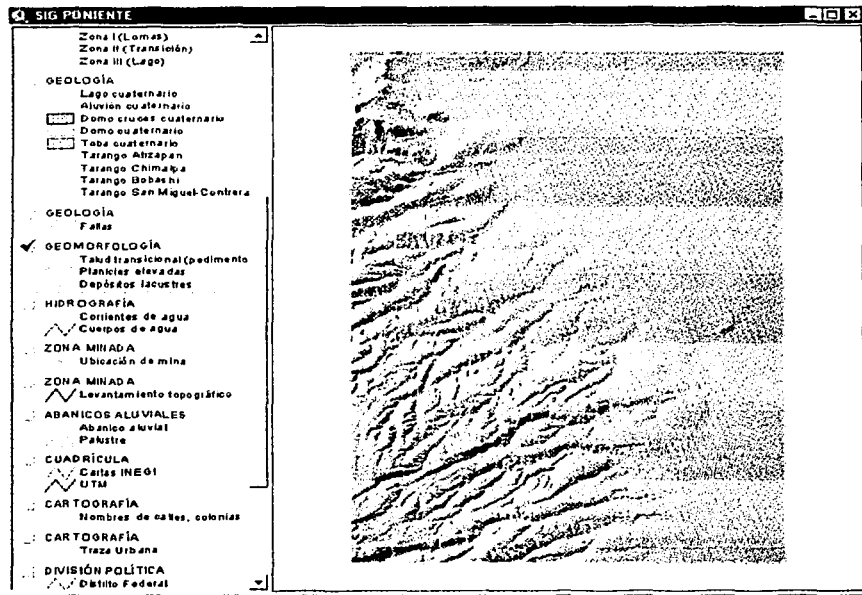


Figura IV.4. Geomorfología de la zona sobre el mapa de relieve sombreado.

Cuando la Cuenca de México era un valle, antes de entrar al Plioceno hace diez millones de años (figura IV.5), las laderas de la Sierra de las Cruces estuvieron sometidas a procesos fluviales que modelaron su relieve. Tanto estos procesos como los gravitacionales y los eólicos favorecieron la remoción de la capa superficial de materiales intemperizados hasta desplazarlos al pie de la Sierra, originando la sedimentación y la formación de erráticos depósitos de rellenos aluviales. Estos rellenos son lo que actualmente se llama como depósitos profundos.

De manera especial, en los cambios de pendiente de los cauces de ríos al bajar de la Sierra, se formaron depósitos de gran variedad de materiales de arrastre, en forma de abanicos, en cuyo vértice se acumulaban los materiales de mayor tamaño, pero que en ocasiones eran llevados más allá en época de lluvias torrenciales.

Estos rellenos aluviales localizados al pie de la Sierra conformaron en el relieve de la zona una unidad geomorfológica, integrada por diferentes elementos geomorfológicos que son: Llanuras, terrazas y los abanicos aluviales (figuras IV.7 y IV.9).

Tiempo después, se hace sentir la presión de la Placa de Cocos en el Valle provocando que el magma encontrara su curso en esta región de frágil corteza, iniciándose una intensa

actividad volcánica que dio origen a la Sierra del Chichinautzin, la cual cerró el paso de los ríos que desaguaban hacia el sur del valle, que entonces comenzaron a formar lagos en el interior de la nueva cuenca hace unos 700 mil años; en tal estado la conocieron sus primeros pobladores (figura IV.6).



**Figura IV.5.** Valle de México (inicios de Plioceno, hace diez millones de años).



**Figura IV.6.** Cuenca de México (Cuaternario, hace 700 mil años).

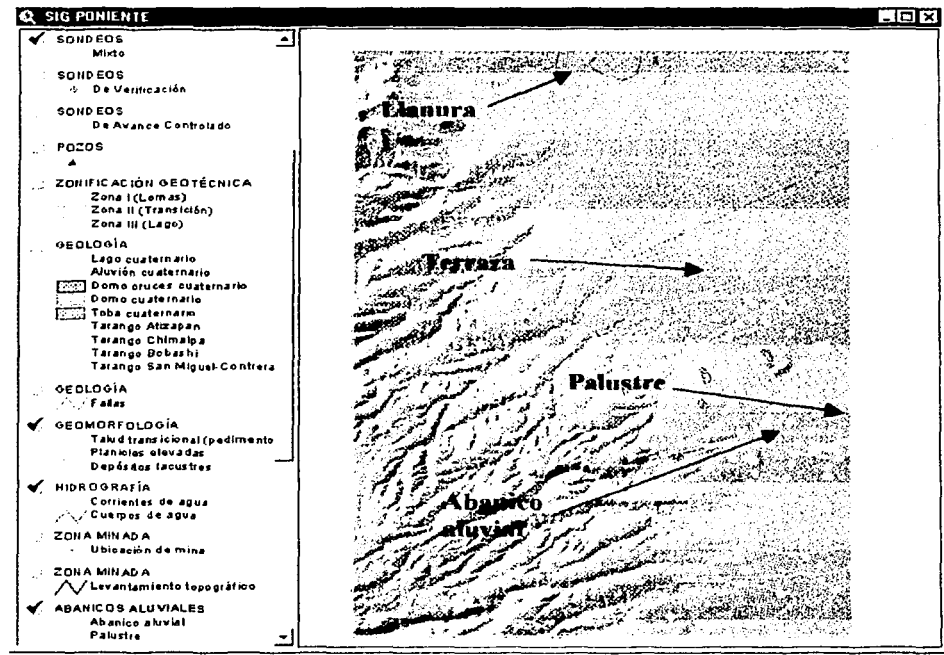


Figura IV.7. Vista en el SIG de los elementos geomorfológicos.

Finalmente, con la transformación del valle en una cuenca se inicia la sedimentación y formación de los depósitos lacustres que rellenan o azolvan el antiguo valle. Estos rellenos o azolves sobreyacen en parte a los depósitos fluviales anteriormente mencionados. A su vez, la interacción del lago en sus orillas, con sus continuas transgresiones y regresiones, va conformando otro depósito formado por arenas de playa, que pueden estar interestratificadas con los depósitos lacustres o bien con depósitos fluviales formados posteriormente.

En la figura IV.8 se presenta una sección transversal típica, cuyo trazo se encuentra en color rojo en la figura IV.7, al igual que un sondeo localizado sobre este trazo (clave 1453, en color amarillo) en los que pueden distinguirse: Los depósitos fluviales, en color café; los depósitos lacustres, en color azul; las arenas de playa, en color amarillo y la costra superficial, en color verde. Debajo de los depósitos fluviales se encuentra la formación Tarango.

Todos estos elementos integran la llamada zona de transición, entre las zonas de lomas y de lago, la cual se pretende definir con mayor precisión a partir de la información geotécnica puntual recopilada.



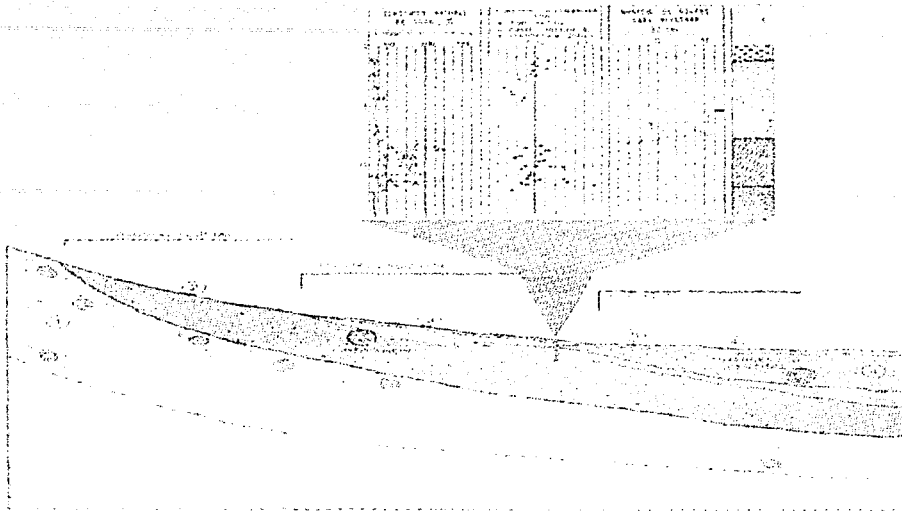


Figura IV.8. Sección transversal típica de la zona poniente de la ciudad de México.

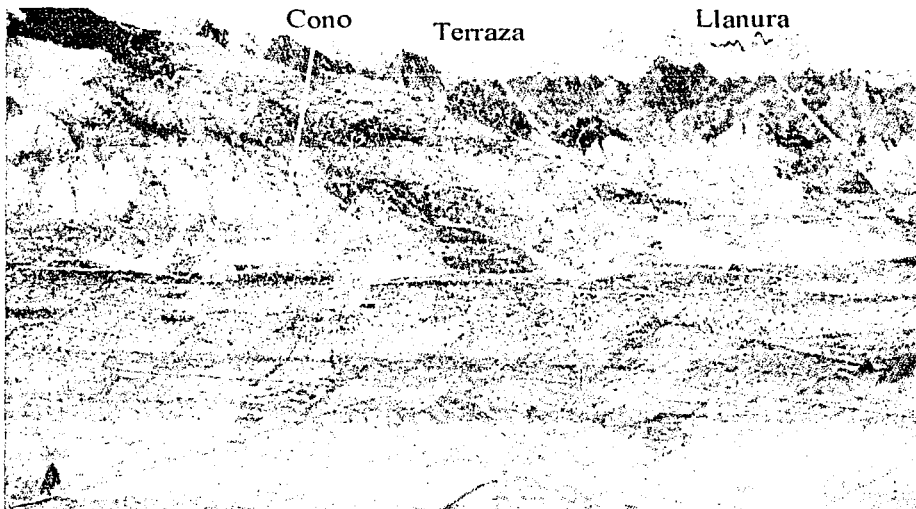


Figura IV.9. Vista oblicua de la zona poniente de la ciudad de México.

### IV.3 Evaluación de la información geotécnica recopilada

En el capítulo III se hizo mención de los tipos de sondeo que integran la base de datos, a continuación se describirán éstos con mayor detalle.

Los sondeos tipo 00 (fuente bibliográfica) corresponden principalmente a los contenidos en las publicaciones *El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México* y en la *5ª Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. La información contenida en estas publicaciones está constituida por un resumen general de los datos obtenidos en sondeos realizados sobre el área urbana de la Ciudad de México en los que se describen principalmente:

- El contenido de agua medio ( $w_m$ ).
- El número de golpes medio de la prueba de penetración estándar (N).
- La clasificación de los materiales de acuerdo al SUCS.
- La profundidad y espesores de las formaciones o estratos principales.
- La profundidad del nivel de aguas freáticas (NAF).

Estos datos se relacionan mediante una tabla con formaciones o estratos principales del subsuelo identificados como:

- Manto Superficial.
- Formación Arcillosa Superior (FAS).
- Primera capa resistente (PCR ó PCD).
- Formación Arcillosa Inferior (FAI).
- Depósitos profundos (DP).

Este modelo estratigráfico, elaborado por Marsal y Mazari en 1959, corresponde a la zona de los antiguos lagos, dejando de ser válida a medida que se adentra en la zona de transición.

Este tipo de sondeos será empleado únicamente como referencia, por carecer de un perfil estratigráfico detallado, así como por la antigüedad de los mismos.

Los sondeos tipo 01 (pozos a cielo abierto) proporcionan mayor confianza y precisión. Estos sondeos fueron realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Instituto de Ingeniería, 1986 - 1988) y otros por el mismo Instituto en colaboración con Ingenieros Civiles Asociados (ICA). Aunque también existen algunos realizados por Perforaciones y Cimentaciones, entre otros.

El procedimiento de exploración con PCA se puede considerar como el más adecuado para el reconocimiento directo del subsuelo. Generalmente se emplea cuando la carga transmitida a la cimentación es reducida y los suelos son de mediana a alta resistencia, y cuando el nivel freático se localiza a más de 3 m de profundidad.

La excavación de los PCA, es lenta y costosa; generalmente se realiza a profundidades variables entre 2 y 4 m, aunque en los suelos de la zona poniente correspondientes a las lomas se han realizado con profundidades de hasta 15 m, lo que permite una inspección visual de la estratigrafía de los materiales “in situ” y la recuperación de muestras alteradas y cúbicas inalteradas de buena calidad que posteriormente pueden ensayarse en el laboratorio. En ocasiones es necesario el empleo de taludes y ademes para la estabilidad de sus paredes.

A continuación, se presenta el perfil estratigráfico de un PCA (clave 1788) ubicado al pie de la Sierra de las Cruces, en Cerrada de Tecamachalco, colonia Reforma Social, en la delegación Miguel Hidalgo, realizado por la compañía Asesores en Cimentaciones, S.A. de C.V.

En estos pozos se registran por lo general la descripción del material, los contenidos de agua y límites plástico y líquido contra la profundidad.

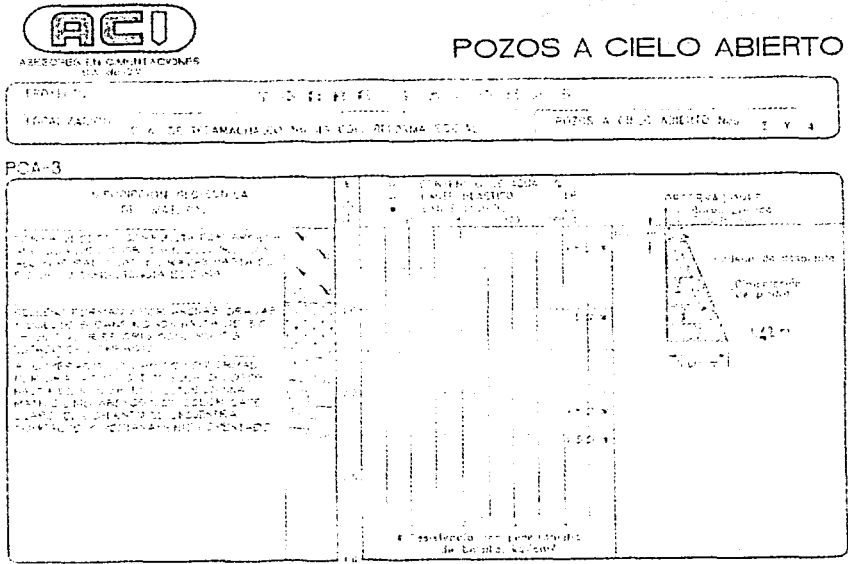


Figura IV.10. Estratigrafía al pie de la Sierra de las Cruces, determinada mediante pozo a cielo abierto.

En este perfil se puede observar que a una escasa profundidad (1.5 m) aparece la formación Tarango, representada por un aglomerado volcánico. Sobre ella existen rellenos fluviales someros y una capa vegetal. Lo anterior nos indica que se encuentra en la Zona I.

También existen agrupados bajo el mismo tipo (01), sondeos con recuperación continua. Estos se realizan en las arcillas blandas de las zonas de transición y lacustre, con el objeto de obtener un perfil continuo del contenido de agua. También sirven para evaluar la consistencia o compacidad de los materiales superficiales de la zona de lomas y de los estratos resistentes de las zonas de transición y lacustre.

Algunas de las propiedades y características registradas en este tipo de sondeo son: la descripción estratigráfica del suelo, la resistencia al corte con torcómetro y en compresión directa, o en prueba No consolidada – No drenada, los contenidos de agua natural ( $w$ ), el límite líquido y límite plástico, la relación de vacíos, la densidad, la profundidad y los espesores de los estratos.

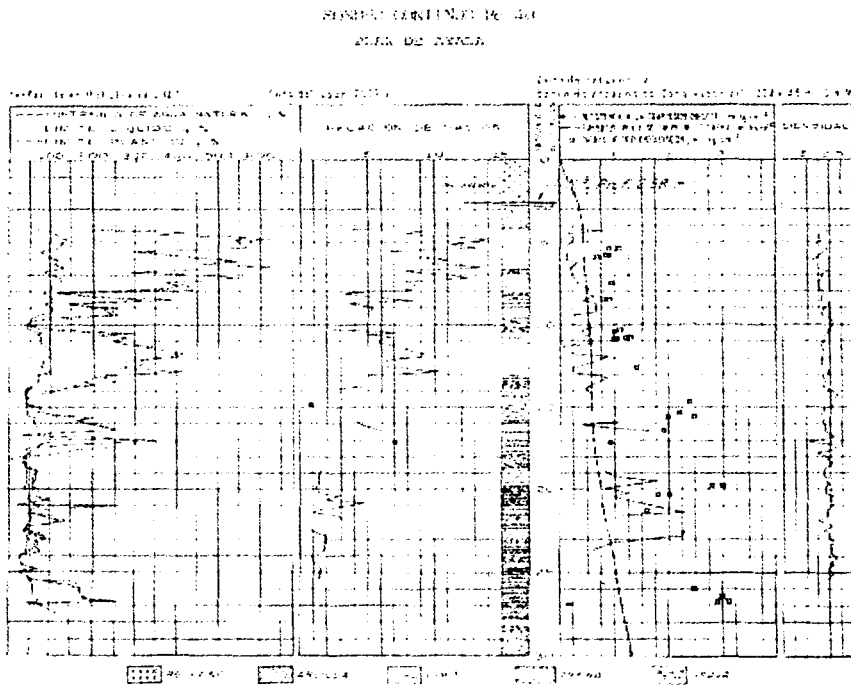


Figura IV.11. Perfil estratigráfico obtenido con un sondeo continuo.

En la figura IV.11 se muestra un perfil estratigráfico realizado mediante la exploración por sondeo continuo (clave 827) localizado en la colonia Plutarco Elías Calles, delegación Miguel Hidalgo, realizado por el Instituto de Ingeniería e ICA.

En la primera columna se indica el contenido de agua natural, que es una propiedad índice muy importante, debido a que está fuertemente correlacionado con el comportamiento mecánico de los suelos. También presentan los límites líquido y plástico, que corresponden a los contenidos de agua en las transiciones entre un estado de consistencia y otro. En la segunda columna se representa la relación de vacíos de los estratos, y en la tercera se indican la resistencia a la compresión directa, los esfuerzos por peso propio del terreno y las cargas de preconsolidación, así como el tipo de material encontrado.

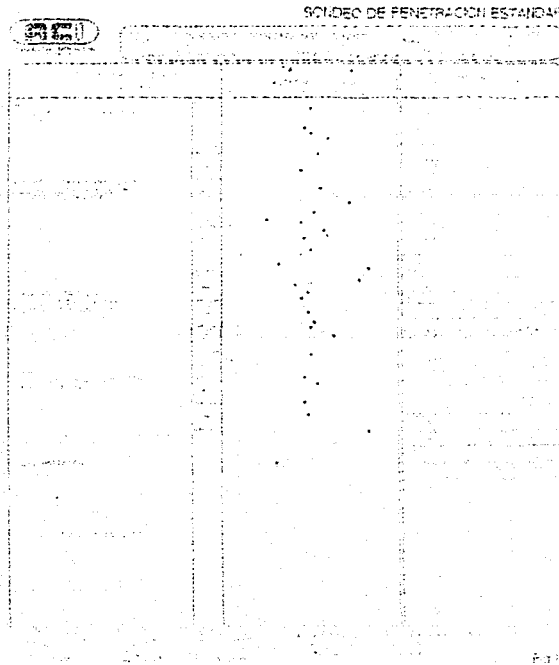
Los sondeos tipo 02 corresponden a aquellos en los que se realizó la llamada Prueba de Penetración Estándar (PPE), también conocida como SPT por sus siglas en inglés (Standard Penetration Test), que es el método de exploración más empleado.

Esta prueba permite adquirir una idea general de la resistencia a la compresión simple en suelos plásticos, conocer la compacidad de los suelos puramente friccionantes y recuperar muestras alteradas para su ensaye posterior en el laboratorio.

La prueba consiste en hacer penetrar un muestreador (conocido como penetrómetro estándar) de media caña que facilita la extracción de la muestra que haya penetrado en su interior. La penetración se realiza mediante golpes dados por un martinete hueco y guiado por la misma tubería de perforación con un peso de 63.5 kg (140 libras), el cual cae desde una altura de 76 cm (30 pulgadas). Se cuenta el número de golpes necesario para lograr una penetración de los 30 cm (1 pie) medios del instrumento, y en cada avance de 60 cm se retira el penetrómetro, removiendo la muestra de suelo de su interior.

La utilidad de esta prueba radica en la determinación de la estratigrafía a través de correlaciones. Es posible relacionar aproximadamente la compacidad, el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) en arenas, y el valor de la resistencia a la compresión simple ( $q_u$ ) en arcillas, con el número de golpes necesarios para que el penetrómetro estándar logre entrar en el suelo los 30 cm especificados. Sin embargo, en suelos cementados el número de golpes es alto y no existen correlaciones confiables.

A manera de ejemplo, el sondeo de la figura IV.12 (clave 4141) realizado con SPT por la compañía ACI, localizado en Augusto Ingres en la delegación Benito Juárez, muestra la estratigrafía del lugar, típica de la zona de lomas. A la izquierda se encuentra la descripción de la columna estratigráfica, en la que se distinguen: un relleno superficial, estratos de arenas limosa sueltas, tobas y finalmente roca andesítica. En la parte media se encuentran los contenidos de agua, los que como se puede ver varían entre 10% y 40%. A la derecha están registrados los números de golpes necesarios para avanzar cada 60 cm. Podemos observar que la resistencia del relleno y del estrato formado por arenas arcillosas sueltas es similar, arrojando un número de golpes promedio de 10; después de este estrato lo siguen dos formados por tobas, que alcanzan números de golpes mayores a 100; finalmente la roca andesítica conforma el estrato más resistente, que registra números de golpes de hasta 300 para avanzar unos cuantos centímetros y en donde fue necesario el avance con broca tricónica. El sondeo finaliza a una profundidad de 15 m.

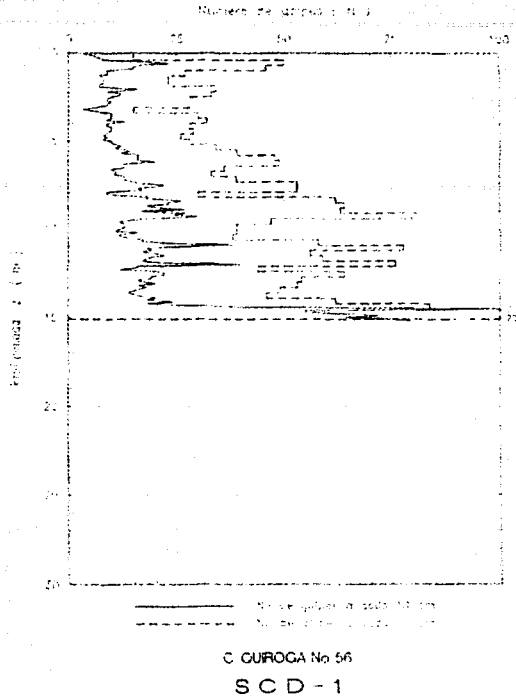


**Figura IV.12.** *Sondeo de Penetración Estándar, en la delegación Benito Juárez.*

El cono dinámico es otro tipo de sondeo, identificado en este trabajo con el número 03, de ejecución rápida y económica que consiste en hacer penetrar una punta cónica en el suelo mediante un sistema de percusión, registrando el número de golpes necesarios para penetrar una determinada profundidad, generalmente de 10 o 30 cm. Este número de golpes puede relacionarse con la resistencia a la penetración del suelo mediante fórmulas que involucran a las dimensiones del cono hincado y a la energía empleada para hincarlo. Además, su correlación con otras técnicas reduce tiempo y costo en grandes campañas de exploración.

La principal aplicación de esta técnica de exploración es la determinación de la compacidad y de los espesores de estratos en rellenos y tobas blandas; en los materiales muy duros y cementados no puede penetrar.

En la figura IV. 13 se muestra un sondeo de este tipo (clave 4076), de la compañía ACI, localizado en cerrada de Quiroga 56, en Lomas de Santa Fe, delegación Álvaro Obregón. En él se registran los números de golpes a cada 10 cm y a cada 30 cm, explorándose hasta una profundidad de 15 m.

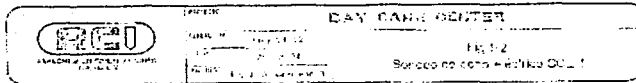
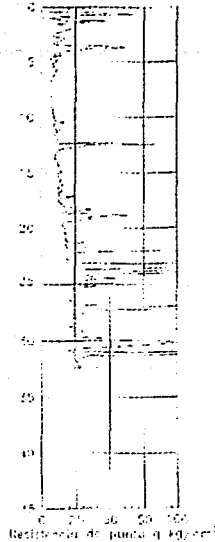


**Figura IV.13.** Perfil obtenido a partir de una exploración con cono dinámico.

Los sondeos tipo 04 corresponden a aquellos en los cuales se empleó el cono eléctrico. Este instrumento, que es un penetrómetro equipado con celdas eléctricas que registran la presión de punta y la fricción local, permite realizar sondeos de verificación estratigráfica sin recuperación de muestras. Se hinca a presión con una velocidad de penetración constante del orden de 1 cm/s. La presión se aplica sobre la parte superior de la tubería de perforación con un gato hidráulico, empleando un marco fijo de carga que puede estar sujeto al ademe que protege a la tubería de perforación. De esta manera se obtiene un registro que contiene una gráfica con los valores de la presión necesaria para lograr cierta penetración contra la profundidad.

La rapidez y facilidad de este método permiten detectar con precisión los cambios estratigráficos, indicados por la variación de la resistencia a la penetración, debidamente correlacionados con la estratigrafía del área basada en muestras representativas, permitiendo la clasificación indirecta de los suelos y una interpolación confiable entre sondeos de muestreo directo.

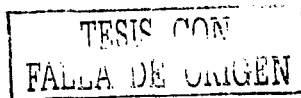
Existe el inconveniente de que se pueden obtener resultados no representativos de la realidad en el caso de las arcillas saturadas, ya que su resistencia depende mucho de la velocidad de aplicación de las cargas. El aparato debe calibrarse cada 10 sondeos a fin de comprobar su confiabilidad.



**Figura IV.14.** Perfil estratigráfico de un sondeo de cono eléctrico.

En la figura IV.14 se muestra un sondeo de cono eléctrico (clave 1790) localizado en la calle de Sevilla en la delegación Cuauhtémoc, ejecutado por ACI, en el que se presentan los valores de la resistencia de punta en kg/cm<sup>2</sup> contra la profundidad en m. En algunos casos se muestran los resultados en dos escalas, una de 0 a 20 y otra de 0 a 100, esto con el fin de cubrir el amplio rango de resistencias que pueden obtenerse.

Puede observarse la predominancia de estratos de baja resistencia (de 5 a 20 kg/cm<sup>2</sup>), correspondientes a arcillas de alta plasticidad, intercalados con estratos someros de resistencias de hasta 80 kg/cm<sup>2</sup>. Este conjunto rebasa los 20 m de profundidad, lo que indica que se encuentra en la zona de lago. La profundidad del sondeo es de 32.4 m.





Los sondeos tipo 05, o mixtos, consisten en la combinación de dos o más de las técnicas de exploración anteriormente mencionadas en la misma perforación. Los sondeos mixtos pueden ser con recuperación alternada de muestras inalteradas y alteradas en las zonas de transición y lacustre. Así, es posible combinar la prueba SPT con el muestreo mediante tubos de pared delgada tipo "Shelby", barriles "Denison" y barriles dobles giratorios provistos con broca de diamante, para la recuperación de suelos inalterados blandos y duros, así como núcleos de roca y muestras representativas en depósitos que contienen gravas o boleas.

Los sondeos tipo 06, de verificación, son realizados con equipo rotatorio, y generalmente se hacen para comprobar la existencia de cavidades en el subsuelo, se hace además una clasificación del material recuperado por lavado. También se encuentran en este rubro los sondeos de muestreo selectivo, que tienen la finalidad de obtener muestras representativas de un estrato en particular.

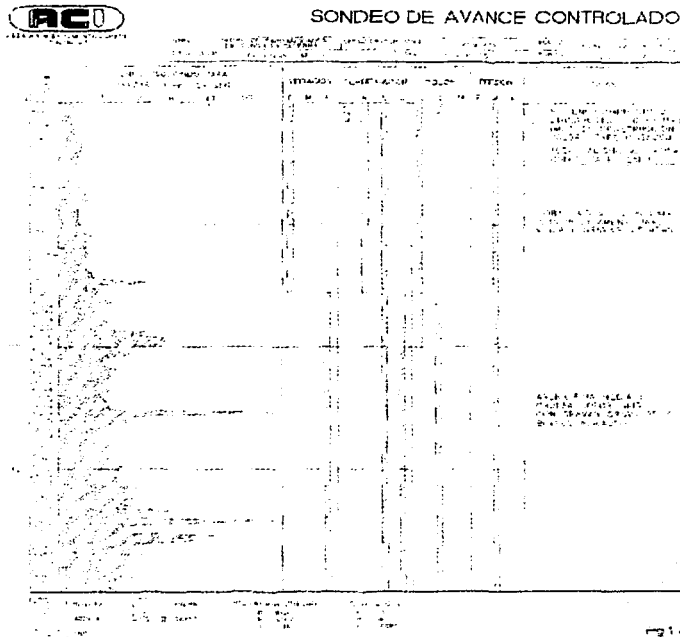


Figura IV.15. Sondeo de avance controlado (clave 4075).

Finalmente, los sondeos tipo 07, de avance controlado, son ejecutados con equipo neumático y en ellos se registra el tiempo en segundos que tarda el equipo en penetrar una cierta profundidad, generalmente de 10 cm, se toman además datos subjetivos (bajo, medio,

alto) de la perforación como la vibración del equipo, la presión empleada, el tipo de material en general (arcilla, limo, grava o arena) así como su color (café, gris o negro). Todos estos datos sirven para hacer una clasificación preliminar del tipo de suelo encontrado, como se muestra en la figura IV.15.

#### IV.4 Cortes estratigráficos

Todos los sondeos geotécnicos contenidos en el SIG se analizaron particularmente con la referencia de la zonificación geotécnica actual y la información general disponible como fondo, con el objeto de verificar la zona correspondiente al sitio del sondeo, así como identificar trazos de cortes estratigráficos a realizar para la afinación de las líneas de frontera entre zonas.

Del análisis individual de cada sondeo se percibe la naturaleza errática de la estratigrafía de la zona de estudio, misma que presenta grandes variaciones tanto en planta como en profundidad, sin que puedan identificarse estratos continuos en el subsuelo, lo que hace sumamente difícil la realización de cortes estratigráficos extensos.

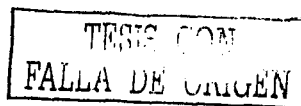
Sin embargo, se aprecia también que la necesidad de realizar cortes estratigráficos puede ser prescindible debido a que en el sistema es posible observar el perfil estratigráfico de un sondeo en su localización exacta y compararse con los de los sondeos vecinos, permitiendo al mismo tiempo la modificación de las líneas de zonificación, empero se realizaron siete cortes estratigráficos, los cuales tienen orientación preferencial poniente-oriente. Éstos se trazaron de tal manera que cruzaran la división entre zonas con la finalidad de conocer con mejor precisión la delimitación entre las mismas.

La correlación de estratos se basó en el número de golpes de los sondeos de penetración estándar y de cono dinámico, en la resistencia de punta del cono eléctrico, en los contenidos de agua (cuando se registraron) y en la distribución de los materiales con la profundidad tomando en cuenta lo explicado en el apartado IV.2.

En la realización de estos cortes se buscó principalmente la identificación de estratos representativos, con el fin de poder aplicar los criterios para la identificación de las zonas mencionados en el apartado IV.1, por lo que en la estratigrafía de los cortes se omiten estratos secundarios, ya que para efecto de esta tesis son irrelevantes.

La localización de los cortes realizados se muestra en la figura IV.16, en la que aparecen como trazos en color rojo, junto a su numeración correspondiente.

Se tienen seis cortes que se trazaron en el límite de las zonas de lomas y transición, en los cuales se aprecia la gran variación de la estratigrafía; en el corte estratigráfico No. 2 (figura IV.17) por ejemplo, se aprecia que en el lado poniente, en donde se inicia, existen tobas arenolimosas y suelos limo-arenosos de alta resistencia, conforme se avanza hacia el este se observa la presencia de estratos de arcilla y limo de origen aluvial en la parte superior, mientras que a



una profundidad de unos 10 m aparece un estrato de arcilla lacustre (de baja resistencia) que va haciéndose más potente hacia el oriente.

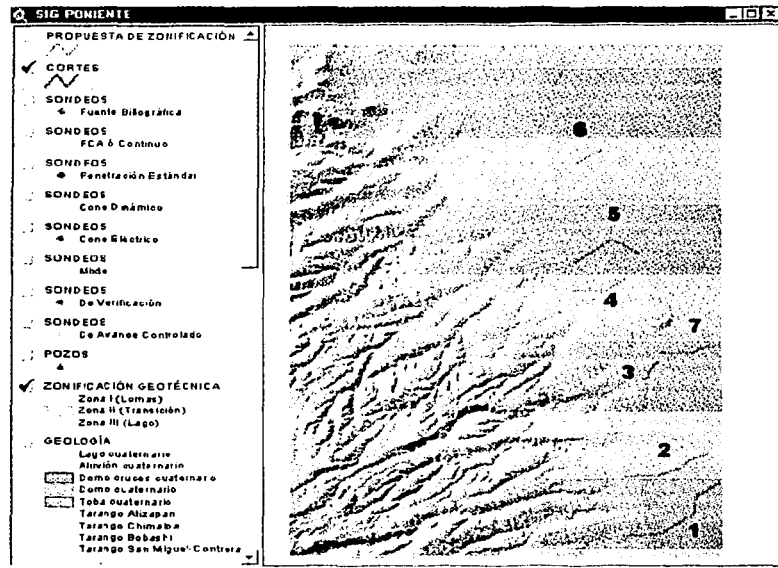


Figura IV.16. Localización de los cortes estratigráficos realizados.

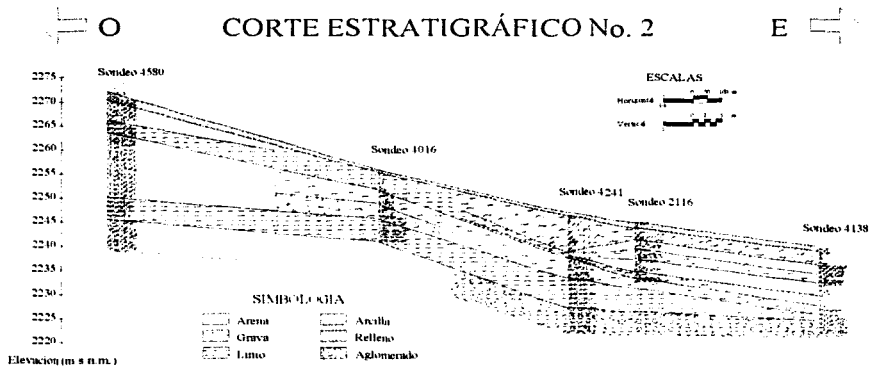
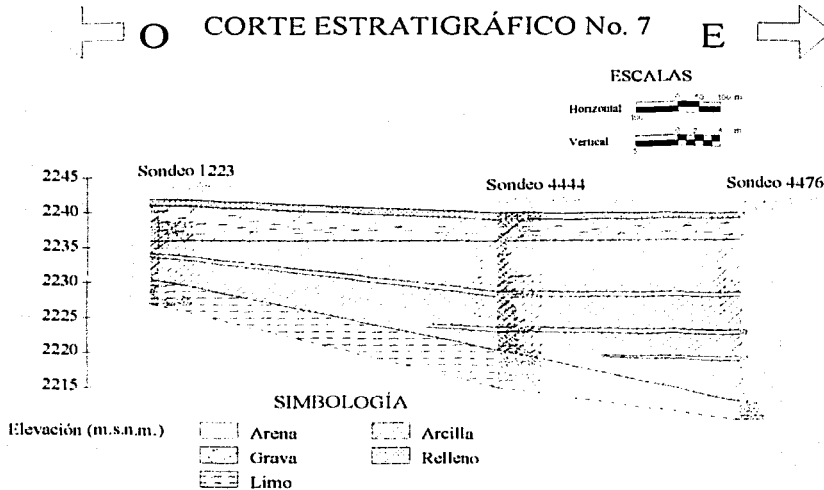


Figura IV.17. Corte estratigráfico entre las zonas de lomas y transición.

Se observa en este mismo corte la presencia de un abanico aluvial, a una profundidad de entre 15 y 20 m, representado por un aglomerado, en lo que es propiamente la zona de transición.

En la figura IV.18 se tiene el corte estratigráfico No. 7, realizado entre las zonas de transición y lago. En él se observan los potentes depósitos de arcilla lacustre en el este, que alcanzan una profundidad de 27 m en el extremo oriente del corte, y van disminuyendo de espesor hacia el poniente, muy cerca del sondeo 4444 la profundidad de estos depósitos alcanza lo 20 m, por lo que aquí se encuentra el límite entre las dos zonas.

Pueden observarse los lentes de arena estratificados con los de arcilla, resultado de periodos de desecación del lago y actividad volcánica. Subyaciendo a los depósitos lacustres se encuentran los llamados depósitos profundos, que como se puede ver corresponden en este caso a estratos limo-arenosos, presumiblemente parte de la formación Tarango.



**Figura IV.18.** Corte estratigráfico entre las zonas de transición y lago.

Los cortes realizados pueden ser consultados con mayor detalle en el anexo C de esta tesis.

Después del análisis de la estratigrafía en los cortes realizados y en cada sondeo analizado mediante el SIG, se modificaron las líneas de zonificación geotécnica de la manera que aparecen en la figura IV.19., en la que se presentan las modificaciones en color azul, sobre

el fondo formado por la zonificación geotécnica actual y el mapa de relieve sombreado de la zona.

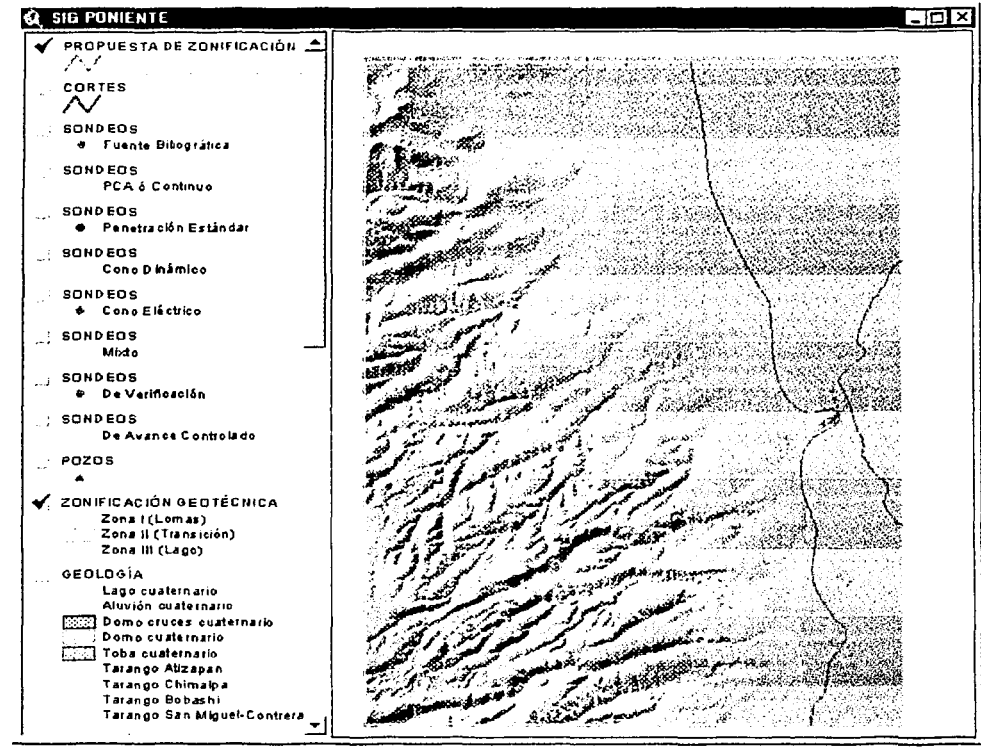


Figura IV.19. Zonificación geotécnica actual y propuesta de zonificación (en azul).

#### IV.5 Mapa de zonificación geotécnica propuesto

Finalmente se presenta el mapa de zonificación geotécnica propuesto para la zona poniente de la Ciudad de México (figura IV.20), el cual puede consultarse con mayor detalle en el anexo D de este trabajo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

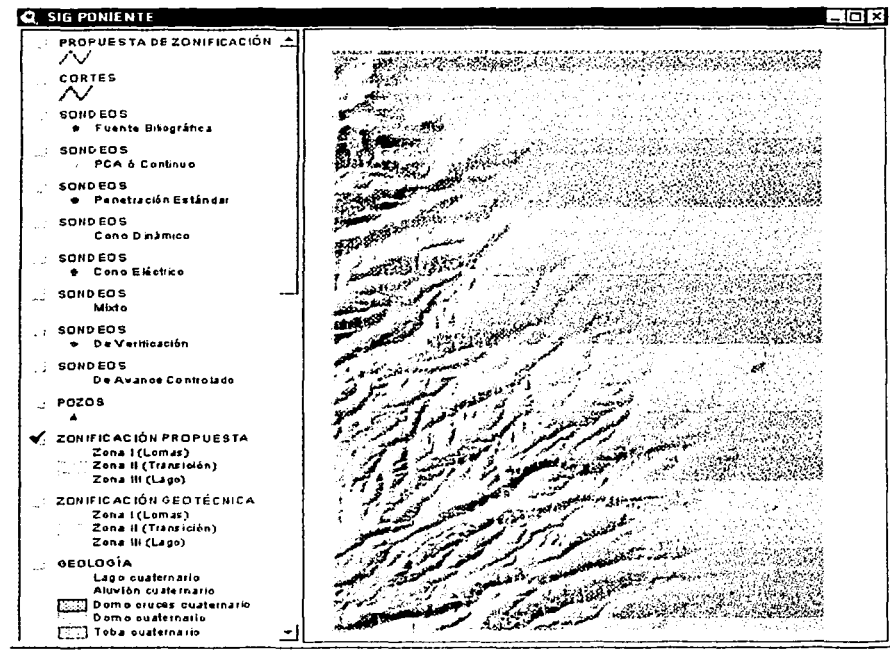


Figura IV.20. Mapa de zonificación geotécnica propuesto para la zona poniente de la Ciudad de México.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Capítulo V. Cimentaciones Comunes en la Zona.

Las cimentaciones son elementos estructurales cuya función es lograr que las cargas de la estructura se transmitan adecuadamente al suelo con la finalidad de que no se rebasen la resistencia al corte de éste y que las deformaciones sufridas por el terreno y la estructura sean tolerables, de manera que no se dañe la estructura misma, las vecinas o las instalaciones subterráneas en la proximidad de la cimentación.

El tipo de cimentación que se elija para una determinada obra depende de varios factores como: las cargas que debe soportar, el tipo y dimensiones de la superestructura, el espesor, resistencia, deformabilidad y permeabilidad de los suelos o rocas sobre las que se apoya y el costo de la cimentación comparado con el costo de la superestructura, interviniendo en gran medida la experiencia e intuición del ingeniero que la diseña.

Las cimentaciones generalmente se clasifican en dos tipos dependiendo de la profundidad del estrato de suelo sobre el que transmiten las cargas, teniéndose según este criterio cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas.

### Cimentaciones superficiales

En este grupo se consideran las cimentaciones que se apoyan en estratos poco profundos que tienen suficiente capacidad para resistir las cargas de la estructura, puede decirse que en ellas la profundidad de desplante no excede de dos o tres veces al ancho del cimientado, sin que pueda ofrecerse un criterio más preciso para diferenciarlas.

La presencia del NAF (Nivel de Aguas Freáticas) es un problema que limita con mucha frecuencia el uso de las cimentaciones superficiales, ya que el flujo de agua en las paredes de la excavación plantea los problemas de estabilidad de taludes, obligando al empleo de ademes que hacen perder la ventaja económica de la solución, produce el inconveniente adicional de anegar el fondo de la excavación dificultando mucho la realización de los trabajos; eliminar esta agua puede exigir complicados y muy costosos procesos de bombeo que intervienen muy fácilmente la balanza económica a favor de las cimentaciones profundas.

Este tipo de cimentaciones es el más empleado para casas habitación; entre ellas se encuentran las zapatas aisladas y corridas (de mampostería, concreto simple o concreto reforzado), las losas y los cajones de cimentación.

### Cimentaciones profundas

Si en el caso de considerar una cimentación superficial, los esfuerzos transmitidos al subsuelo sobrepasan la capacidad de carga de éste o se generan asentamientos excesivos, evidentemente habrá de recurrirse a soportar la estructura sobre estratos más firmes, que se encuentren a mayores profundidades, para lo cual se hace uso de cimentaciones profundas.

Las constituyen principalmente los pilotes y las pilas, los primeros transmiten su carga por punta o por fricción y son prefabricados e hincados en el terreno, las pilas se apoyan directamente en el estrato resistente y son coladas en el sitio, con diámetros mayores a los de los pilotes.

Los pilotes se emplean cuando el terreno superficial tiene baja capacidad de carga, cuando se tienen requisitos muy estrictos de asentamientos admisibles y cuando se quiere evitar cimentaciones muy voluminosas apoyadas en estratos de suelo poco favorables para la construcción.

Los pilotes pueden colocarse bajo zapatas, bajo losas de cimentación o cajones de cimentación y puede combinarse con éstas de manera que la carga pueda ser soportada en parte por el apoyo somero y por el apoyo profundo.

No hay reglas muy precisas para elegir entre cimentaciones superficiales y profundas. Las consideraciones económicas suelen ser el factor decisivo de la elección que finalmente se haga. Las cimentaciones superficiales son menos costosas que las profundas pero incuestionablemente esta favorable relación de costos se va haciendo menos significativa según aumente la profundidad de desplante, pues es sabido que el costo de las excavaciones a cielo abierto varía con la profundidad muy rápidamente.

### **V.1 Zapatas aisladas y corridas**

Una zapata es una ampliación de la base de una columna o muro con el propósito de transmitir al suelo la carga con una compresión adecuada a las propiedades mecánicas del mismo. Si la zapata soporta una sola columna se dice que es una zapata aislada. La zapata que soporta un muro se conoce con el nombre de zapata continua. Si la zapata soporta varias columnas se llama zapata combinada.

Generalmente, la carga admisible del terreno es inferior a la del material de construcción de las zapatas, excepto en el caso de roca dura, por ello, es necesario que la cimentación transmita la carga a una superficie mayor.

Este tipo de cimentación es muy utilizado cuando la construcción es ligera y con lo cual la carga transmitida es soportada por el suelo.

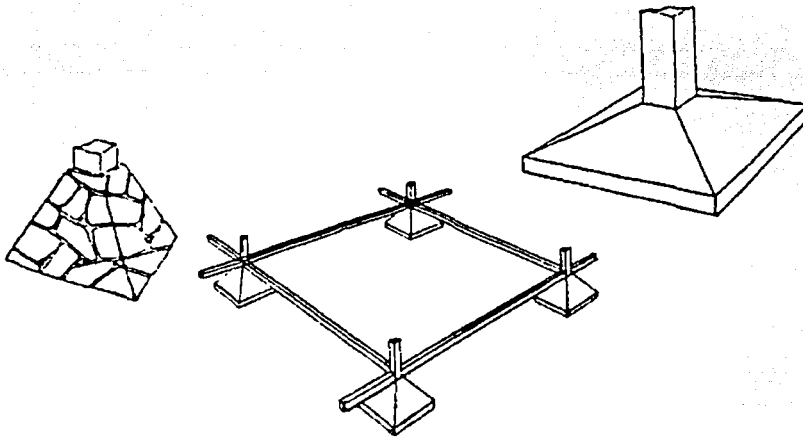
La zapata puede construirse de diferentes materiales: concreto simple, mampostería o concreto armado, siendo este último el más utilizado. Su profundidad dependerá de las características del suelo y de la carga que deberá de soportar. Las zapatas corridas deben tener la longitud suficiente para recibir un muro o una hilera de varias columnas, tienen la ventaja de utilizarse como puentes sobre las zonas blandas locales, ofreciendo un apoyo más firme que las zapatas individuales.



Zapatas aisladas

La función de este tipo de cimentación es la de recibir las descargas de la superestructura por medio de columnas, esto es, puntualmente. Generalmente, a cada columna le corresponde una zapata cuadrada; su armado se coloca ortogonalmente y se calcula de acuerdo con los esfuerzos que la reacción del terreno produce en la zapata como el esfuerzo de flexión, el esfuerzo cortante y la adherencia. En el diseño de zapatas de este tipo, se deben revisar los esfuerzos de penetración que ejerce tanto la columna dentro del cimientto como éste dentro del terreno.

Las zapatas aisladas generalmente están formadas por una base rectangular rígida de piedra o concreto armado de dimensiones: anchura B y longitud L. Generalmente se tiene  $L/B \leq 1.5$ .

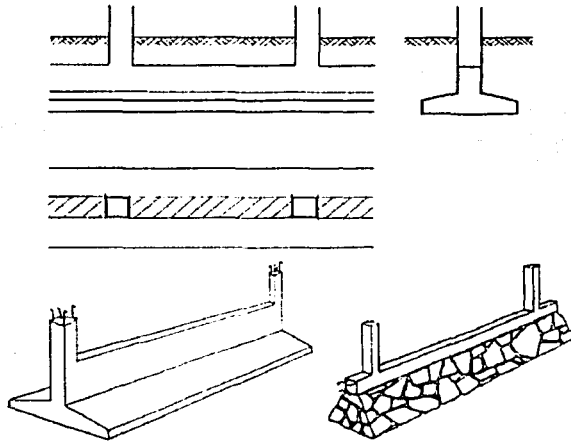


**Figura V.1.** Zapatas aisladas.

Este tipo de zapata es aplicable para el subsuelo de la ciudad de México pero generalmente no es recomendable para las zonas II y III para cargas considerables, ya que conduce a hundimientos inaceptables. Para asegurar un buen comportamiento en condiciones sísmicas, es necesario ligar las zapatas aisladas con una dala. En general, las cimentaciones aisladas se usaran en suelos de coeficiente de compresibilidad bajo y en estructuras donde los asentamientos diferenciales de las columnas pueden ser controlados por la rigidez de la superestructura

*Zapatas corridas.*

Se utilizan cuando es necesario controlar dentro de ciertos límites la magnitud de los asentamientos diferenciales entre las columnas soportadas por una cimentación desplantada sobre depósitos de suelo de mediana compresibilidad, como en la Zona II. Este tipo de zapata debe tener la longitud suficiente para recibir un muro o una hilera de varias columnas, teniendo la ventaja de funcionar como puente sobre las zonas blandas locales, ofreciendo un apoyo más firme que las zapatas aisladas. La zapata se calcula y diseña por flexión y adherencia, su profundidad de desplante depende de las características del suelo y de la carga que deberá soportar. Comúnmente la zapata se desplanta a la profundidad mínima en que pueda encontrarse un material que tenga la capacidad de carga adecuada. Las zapatas corridas pueden construirse de diferentes materiales tales como la mampostería y el concreto armado (fig. IV.1.2.1).



**Figura V.2.** Zapatas corridas.

Las zapatas corridas deben tener la rigidez necesaria para satisfacer los requerimientos de asentamientos diferenciales verticales controlados a través de la unión de dos o más columnas por medio de una trabe rígida, cuya elección de la trabe depende de la distribución de los pesos de las columnas y otros requerimientos funcionales al diseño estructural y arquitectónico del proyecto. Otra ventaja de la cimentación con zapatas corridas es la variedad de arreglos que se pueden adoptar con éstas, permitiendo, si lo requiere el proyecto, proporcionar rigidez en una o ambas direcciones (figura V.3).

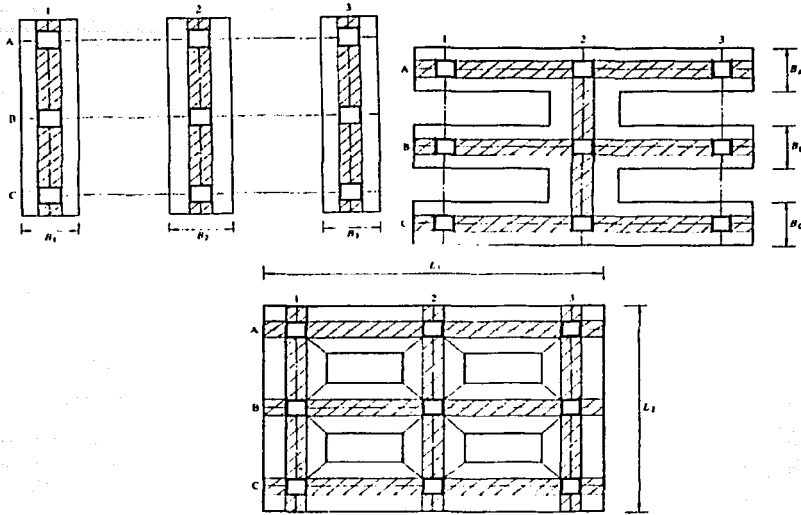


Figura V.3. Diferentes arreglos de zapatas corridas.

En general las cimentaciones superficiales de construcciones ligeras construidas sobre zapatas aisladas o corridas han presentado un buen comportamiento, sobretodo durante el sismo de 1985. Edificaciones de hasta tres niveles se han cimentado satisfactoriamente sobre zapatas de concreto reforzado, aun en la zona de lago, procurando desplantar desde los estratos naturales del suelo y utilizando elementos del mismo material que ligen las zapatas. Sin embargo, existen casos donde predominaron los asentamientos diferenciales en cimientos superficiales con construcciones pequeñas, en cimientos apoyados en rellenos sueltos o donde los asentamientos fueron inducidos por cimentaciones pesadas aledañas.

El uso de zapatas aisladas o corridas es frecuente en la zona de lomas. Su comportamiento es satisfactorio, incluyendo en aquellas zonas donde existen minas, siempre y cuando éstas reciban un tratamiento adecuado, ya que en caso de que se ignore su presencia se puede generar un mal comportamiento o incluso la falla de la cimentación aún siendo ligera la estructura.

En esta zona existen edificios pesados sobre zapatas aisladas o corridas apoyadas en una capa superficial compacta o dura de espesor grueso y capacidad de carga alta, con grados de cementación variables y que yace sobre suelos no cementados y de consistencia o compacidad más bajas.

## V.2 Losas de cimentación

Si las zapatas aisladas o corridas no son suficientes para la transmisión de cargas cuando la capacidad de carga del suelo es baja, la solución será utilizar una losa de cimentación, o bien si las zapatas corridas ocupan cerca del 50% del área proyectada del edificio, es más económico usar una losa continua que cubra el área total. En este caso, se puede asumir que la carga total es distribuida uniformemente en el área cubierta por el edificio

La losa de cimentación puede ser usada en suelos de mediana y alta compresibilidad (Zona II y III). Comúnmente las losas forman un elemento monolítico junto con una retícula de traveses que le transmiten las descargas de la superestructura, la retícula proporciona al mismo tiempo rigidez a la losa, lo que evita los hundimientos diferenciales, por lo que las traveses se localizan bajo muros de carga o ejes de columnas, quedando por arriba o abajo de la losa, según el arreglo estructural que convenga, este tipo de losas recibe el nombre de nervuradas, en caso de que no posean esta retícula se les llama losas planas (figura V.4).

Las cargas que obran hacia abajo sobre la losa son las de las columnas individuales o las de los muros. Si el centro de gravedad de las cargas coincide con el centroide de la losa, se considera que la carga hacia arriba es una presión uniforme igual a la suma de las cargas hacia abajo dividida por el área de la propia losa. No se considera el peso de ésta en el proyecto estructural, porque se supone que la soporta directamente el suelo. Como en este método de análisis no se consideran los momentos y las fuerzas cortantes producidas por los asentamientos diferenciales, se acostumbra reforzar la losa más de lo que se requiere de acuerdo con el análisis.

En ocasiones, cuando los claros entre apoyos verticales son relativamente grandes, se utilizan losas planas. Si los claros son muy grandes el empleo de losas es económicamente prohibitivo y deben de analizarse otras alternativas de cimentación.

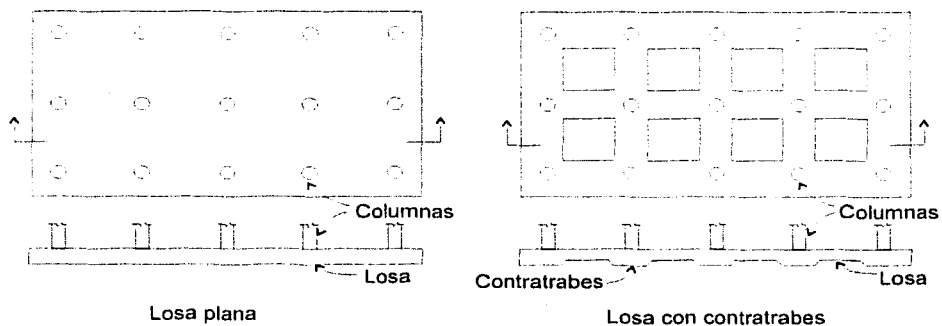


Figura V.4. Losas de cimentación.

Es común su utilización para estructuras ligeras de uno o dos niveles, tales como casas habitación, edificios escolares y los edificios ligeros industriales y comerciales. No es adecuado cuando la existencia del nivel freático es alto o en suelos expansivos.

En la construcción de grandes conjuntos habitacionales o comunidades urbanas formadas por casas de uno y dos pisos, resulta conveniente el empleo de losas de cimentación que facilitan la aplicación de procedimientos de construcción en serie, reduciendo los tiempos de ejecución y compitiendo económicamente con los tipos de cimentaciones tradicionales basados en cimientos de mampostería o zapatas. La losa se puede utilizar a la vez como piso de planta baja.

Este tipo de cimentación generalmente se usa en depósitos de suelo de mediana compresibilidad; sin embargo, en ciertos casos, puede usarse en superficies de suelo de alta y muy alta compresibilidad, donde pueden permitirse grandes asentamientos totales, reduciendo eficazmente los asentamientos diferenciales.

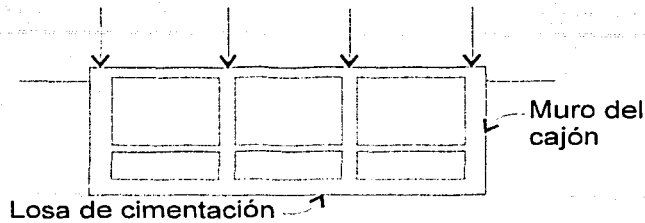
La Zona II puede plantear los problemas más diversos y complejos en la cimentación de construcciones. Difícil sería predecir las condiciones del subsuelo a partir de un número limitado de exploraciones; su característica fundamental es la erraticidad. Por ello, no es sorprendente que en esta región de la ciudad hayan ocurrido los casos más notables de edificios afectados por asentamientos diferenciales. En realidad, es muy raro el caso de una falla imputable a insuficiencia de la resistencia al corte del suelo, y en cambio, muy frecuente los daños en casas (grietas, desplomes o destrucción parcial) provocados por movimientos diferenciales, razón por la cual las losas representan una buena opción de cimentación. Dentro de esta zona existen algunos sitios como los de los antiguos cauces de ríos rellenos con material granular grueso de acarreo, donde se han construido edificios mayores de 10 niveles empleando losas de cimentación poco profundas.

### V.3 Cajones de cimentación

Los cajones de cimentación son otra alternativa para cimentar. Están formados por losas de cimentación y de tapa, una retícula de trabes y muros de contención como se muestra en la figura V.5. Son empleados en depósitos de suelos de mediana, alta y muy alta compresibilidad y baja capacidad de carga (zonas II y III).

Al igual que las losas de cimentación, las cimentaciones compensadas forman un elemento monolítico junto con una retícula de trabes, que le transmiten las descargas de la superestructura, la retícula proporciona al mismo tiempo rigidez a la losa, lo que evita los hundimientos diferenciales.

El empleo de cajones de cimentación da lugar al concepto de cimentaciones compensadas, que son aquellas en las que se busca minimizar el incremento neto de carga aplicado al subsuelo mediante la excavación de un volumen importante del mismo.



**Figura V.5.** *Cajón de cimentación.*

Cuando se excava un volumen de terreno tal que su peso sea igual al peso del edificio, la cimentación se denomina totalmente compensada. Si la descarga neta es sólo una fracción del peso del edificio, la cimentación se denomina parcialmente compensada. La descarga neta se calcula para que los asentamientos no rebasen los límites tolerables. La cimentación es sobrecompensada cuando el peso del terreno excavado es mayor que el de la estructura, generando decrementos en las presiones efectivas del subsuelo.

En el diseño de cimentaciones compensadas, recordando que el suelo puede ser considerado como un material de dos fases, una sólida y otra líquida, la compensación se realiza considerando dos efectos:

- a) La sustitución del peso efectivo del suelo
- b) El efecto de flotación por el peso de líquido cambiado de sitio.

Ambos efectos se usan para igualar el peso total del edificio. El volumen del cajón de concreto que forma la estructura de la cimentación y los sótanos desplaza un peso de líquido que, según el principio de Arquímedes, tomará el valor de la flotación de la cimentación y reducirá la carga aplicada a la fase sólida. La carga es tomada por la fase sólida, sin embargo, deforma el suelo debido al cambio en el esfuerzo efectivo inducido en la estructura del suelo.

Los conjuntos habitacionales de tres a cinco niveles se han desarrollado en las últimas décadas, para estas edificaciones cuando se localizan en la zona lacustre y si el nivel freático no es muy somero, es común recurrir a la cimentación compensada formada por un cajón, trabes y losas de concreto reforzado. Los asentamientos por consolidación son tolerables, y mínimos los efectos de los sismos. En terrenos vírgenes de la zona de lago, las excavaciones mayores de 2.0 m se deben realizar con un diseño conservador de los taludes para evitar fallas que afecten la estabilidad de los mismos y del fondo.

Cuando la cimentación se va a desplantar abajo del nivel freático, se deben abatir los niveles piezométricos bombeando el agua. En caso de que el periodo de bombeo se prolongue, se deben de tomar medidas para limitar los asentamientos de construcciones vecinas, confinando el área de trabajo con tablestacas o muros impermeables.

Las cimentaciones totalmente compensadas y sobrecompensadas resultan, generalmente, de la necesidad de espacio subterráneo útil. Estos tipos de cimentaciones han adquirido importancia en la Ciudad de México en las últimas décadas, por la construcción de vías rápidas que requieren de pasos a desnivel, por la construcción del metro y por la creciente tendencia a dotar los edificios de uno o más sótanos para estacionamiento.

En la Ciudad de México frecuentemente se utilizan las cimentaciones combinadas de un cajón que compensa parte del peso del edificio y pilotes de fricción a los que se les transmite el peso restante, reduciendo los asentamientos. Esta solución tiene como ventaja reducir la profundidad de excavación y el costo, facilitando la construcción, comparada con una cimentación totalmente compensada.

Teóricamente las cimentaciones totalmente compensadas no deberían presentar problemas de expansiones o hundimientos, pero debido al proceso constructivo y a los tiempos de construcción esto se hace imposible de cumplir. Puesto que el peso del suelo extraído no se sustituye inmediatamente, surgen problemas de estabilidad y de deformación de las paredes y del fondo de la excavación. El movimiento de las paredes se puede evitar diseñando un troquelamiento apropiado para estabilizar los bordes de la excavación. Cuando las expansiones inmediatas por descarga son excesivas se recomienda hacer la excavación por partes, construyendo inmediatamente la sección de cimentación correspondiente.

La magnitud de los asentamientos en este tipo de cimentación depende fundamentalmente de la conservación de las condiciones de presión en la masa de suelo durante la excavación y de la manera en que el suelo es recargado después. Por lo tanto, el comportamiento posterior de este tipo de cimentación es función del proceso de excavación.

#### V.4 Pilotes

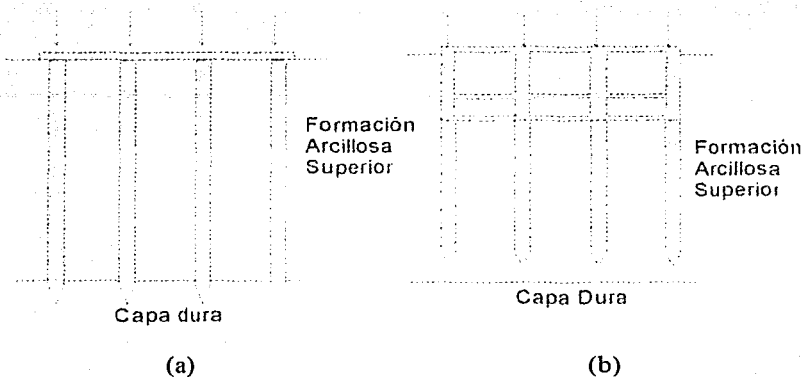
Cuando el suelo situado al nivel al que se desplantaría normalmente una zapata o una losa de cimentación es de alta o muy alta compresibilidad, las cargas se transmiten a un material más adecuado a mayor profundidad por medio de pilotes o pilas. Los pilotes son miembros estructurales con un área de sección transversal pequeña comparada con su longitud. A menudo se hincan en grupos o en filas, conteniendo cada uno suficientes pilotes para soportar la carga de una sola columna o muro.

Los pilotes pueden agruparse según su forma de trabajar en dos tipos:

De punta, son los que transmiten la mayor parte de la carga a un estrato resistente por medio de su punta, es decir, trabajan como columnas transmitiendo la carga de la superestructura a una capa inferior más resistente.

Por fricción, en este caso transmiten a capas inferiores del terreno la carga de la superestructura; la fricción a lo largo de su superficie lateral hace que sostengan el peso que se les ha asignado. Su resistencia aumenta con la longitud. Frecuentemente se utilizan las

cimentaciones combinadas de un cajón que compensa parte del peso del edificio y pilotes de fricción a los que se les transmite el peso restante.



**Figura V.6.** Pilotes trabajando por punta (a) y fricción (b).

Según el material los pilotes pueden ser de madera, acero o concreto. El pilote de madera ha caído en desuso en México por no conseguirse fácilmente, por su baja capacidad de carga y porque se requiere de longitudes grandes por lo general y por lo tanto el uso de varios tramos difíciles de empalmar.

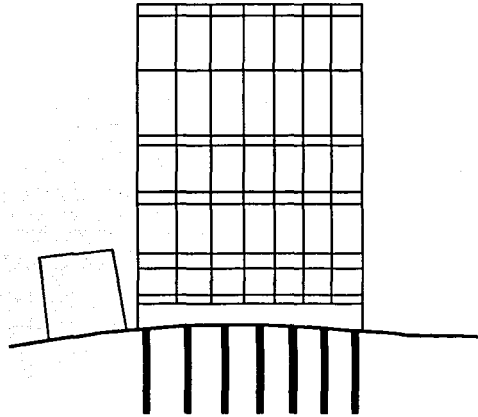
Los pilotes de concreto son los que más se utilizan en la Ciudad de México debido a su bajo costo relativo, pueden ser colados en el lugar o prefabricados. La sección transversal del pilote puede ser rectangular, cuadrada, triangular, octogonal, y en general cualquier forma en la que se facilite el cimbrado. Es indispensable que lleven varilla de refuerzo la cual se calcula para soportar las cargas verticales y horizontales que les impondrá la estructura construida, así como los movimientos al transportarlos de la cama de colado hasta el punto donde se hincan.

Como pilotes de acero se usan principalmente las secciones H y los tubos de acero. La sección H puede tener ciertas aplicaciones por ejemplo para hincar fácilmente a través de arenas densas con gravas. Los pilotes de tubo soportan ser hincados a través de boleos, enrocamientos, rellenos artificiales y suelos duros donde otro tipo de pilote pudiera dañarse y tienen la ventaja de tener poca masa, lo cual facilita su hincado a golpe.

Las columnas con poca carga pueden necesitar en algunos casos un solo pilote. Sin embargo, ya que en las condiciones del trabajo de campo, la posición real de un pilote puede quedar a varios centímetros de la posición proyectada, difícilmente pueden evitarse las cargas excéntricas. En consecuencia, las cabezas de los pilotes aislados usualmente se arriostran en dos direcciones por medio de contrarabes. Los grupos que contienen tres o más pilotes están provistos de cabezales de concreto reforzado, y se consideran estables sin apoyarlos con contrarabes.



Debido al proceso de consolidación del subsuelo, es frecuente observar que los edificios cimentados directamente sobre pilotes, en algunos casos, van sobresaliendo continuamente del terreno y que los edificios adyacentes a veces se desploman y sufren daños más o menos importantes (fig. IV.2.2.4). Además es necesario reparar las banquetas, drenajes, ductos, reacondicionar entradas al edificio, etc. Este fenómeno aumenta las cargas que deben soportar los pilotes.



**Figura V.7.** *Desplome del edificio de la izquierda ocasionado por el hundimiento del subsuelo y la presencia de pilotes en la cimentación colindante.*

Las solicitaciones a que están sujetas las cimentaciones piloteadas han generado el desarrollo de varios pilotes de tipo especial cuyo mecanismo de trabajo se adapta a las necesidades de la construcción, eliminando o reduciendo los aspectos indeseables del comportamiento de los pilotes convencionales.

En la figura V.8 se muestra el más conocido y más antiguo de los pilotes de tipo especial: el pilote de control, el cual penetra dentro de la cimentación del edificio por perforaciones en las losas o contratraves y tienen un dispositivo para limitar la carga máxima que puede aplicársele al pilote en su cabeza.

Con este dispositivo se puede subir o bajar a voluntad los edificios o estructuras cimentadas sobre pilotes, permitiendo, si se desea, que el edificio siga los movimientos del terreno, o bien corregir desplomes. Asimismo permitirá que los pilotes reciban únicamente las cargas para que fueran proyectados, en consecuencia, la cimentación trabajará siempre de acuerdo con las cargas para las que fue diseñada. También permitirá que el edificio o estructura se apoye siempre en el terreno, aún cuando éste se compacte o enjute, por lo que el

terreno puede tomar parte de la carga o peso del edificio. Su principal desventaja es la de requerir atención constante durante toda la vida de la estructura.

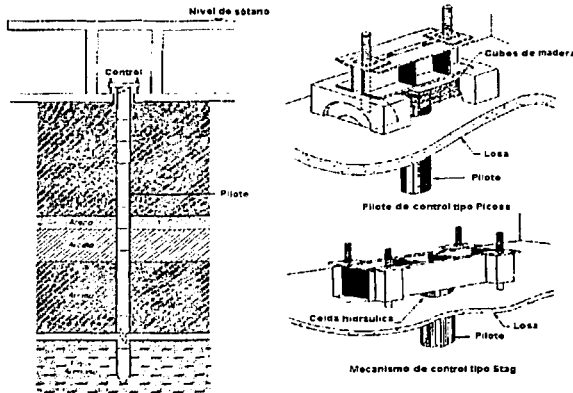
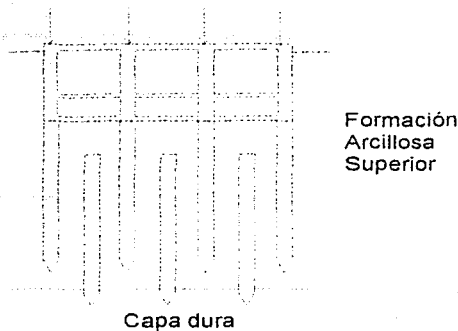


Figura V.8. Pilote de control.

Teniendo en cuenta que muy posiblemente haya necesidad de variar la carga que se le da a cada pilote, los dispositivos o controles, deben quedar en lugar fácilmente accesible, y este lugar se ha buscado que sea el espacio que queda entre la losa de cimentación y la losa de piso. El control consta esencialmente de cuatro elementos:

- Anclas, que después del colado sobresalen lo indispensable para sujetar los tornillos; estas anclas, después de colocados los tornillos pueden protegerse con concreto.
- Los tornillos, con los que se permite la penetración del pilote y con los cuales moviendo las tuercas se hace variar la carga o el nivel del edificio.
- El puente, el cual transmite la carga directamente al pilote.
- La celda de deformación, patentada, que es un dispositivo por medio del cual el pilote recibe una descarga constante, previamente proyectada y que, sin embargo, permite que el pilote penetre dentro del edificio en forma natural hasta determinada longitud.

Los pilotes de tipo entrelazado, mostrados en la figura V.9, aprovechan las características de los pilotes de punta y de fricción, reduciendo los hundimientos que tendría la cimentación con pilotes de fricción, y a la vez permiten que la cimentación siga los movimientos del terreno circundante. Cabe señalar que el proceso constructivo de esta cimentación es complicado.



**Figura V.9. Pilotes entrelazados.**

Otros pilotes de tipo especial son: los penetrantes de sección variable, los electrometálicos y los telescópicos.

Es indispensable hacer estudios detallados de la estratigrafía y una interpretación geológica de los suelos en el lugar donde se piensa hincar pilotes. La estratigrafía es determinante para escoger la profundidad, el tipo de pilotes más adecuado y la carga que pueden soportar. En el caso de pilotes de punta el definir y determinar la capacidad de carga del estrato de apoyo, y en el caso de pilotes de fricción el determinar la resistencia al corte y la adherencia máxima del suelo contra el pilote.

Los grandes problemas que existen en la Ciudad de México, como la estratigrafía en la zona de lago y el hundimiento general, han provocado que el uso de cimentaciones superficiales para edificios de cinco niveles o más resulte costoso, por lo que se justifica económicamente el uso de pilotes para edificios de más de cinco pisos de altura aun cuando pudiera utilizarse otro tipo de cimentación, evitándose realizar excavaciones profundas y bajar el nivel freático para construir cimentaciones superficiales.

La presencia de la Sierra de las Cruces en el área de estudio trae como consecuencia la existencia de una gran cantidad de lentes duros discontinuos. Esta situación puede conducir a un comportamiento inadecuado de las cimentaciones sobre pilotes de fricción. En efecto, si algunos pilotes se apoyan sobre estos lentes duros, debe esperarse que la estructura presente fuertes desplomes.

La capacidad de los pilotes y la reducción de los asentamientos totales y diferenciales dependen de las propiedades mecánicas del depósito en el cual son hincados, de la forma en que se hinca el pilote, el espaciamiento entre los pilotes y su longitud, el procedimiento utilizado en la perforación, la excavación y el control de las excavaciones hidráulicas del subsuelo.

### V.5 Pilas

Son un elemento de cimentación profunda, generalmente de diámetro superior a los 60 cm y coladas en el lugar. La capacidad de carga de este elemento es muy alta y se determina de manera similar a la de los pilotes.

En ocasiones se requieren elementos de mayor sección que los anteriores, a los que se llama cilindros, cuando tienen tal forma o cajones de cimentación, cuando son paralelepípedicos. Se construyen de concreto reforzado y son huecos por razones de ahorro de material.

Cuando las cargas de la superestructura son de grandes magnitudes y el estrato superficial del suelo es blando y compresible, se utiliza pila de punta, la cual tiene la ventaja de que se puede acampanar en su base para aumentar su carga útil, figura V.10.

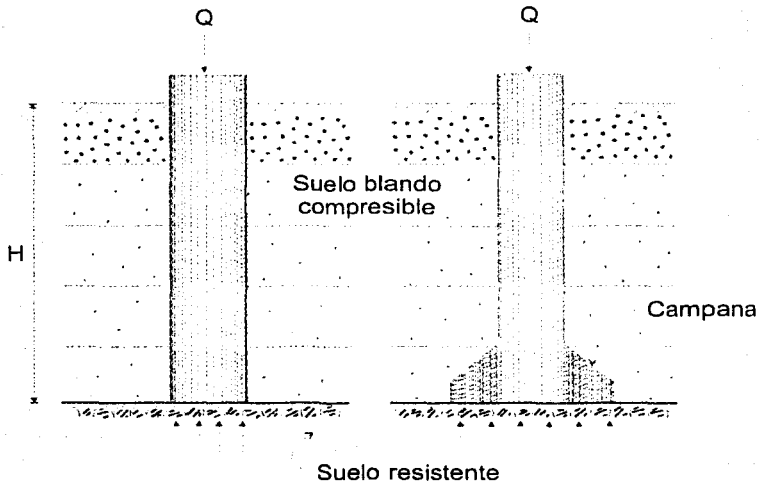
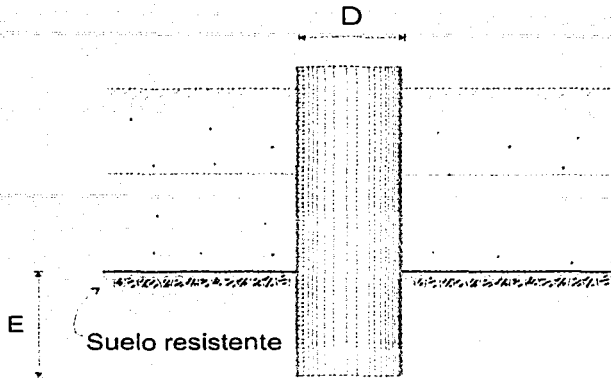


Figura V.10. Pilas de punta.

Para incrementar la capacidad de carga, la pila se puede empotrar a cierta profundidad en el estrato resistente, hasta donde constructivamente hablando sea posible (figura V.11).

Las pilas se construyen de concreto simple o reforzado, colado en el lugar haciéndose una perforación previa. El concreto simple se puede utilizar cuando se trate de pilas cortas en una región no sísmica.



**Figura V.11. Pilas empotradas.**

Los parámetros que más influyen en la transferencia de carga entre una pila y el suelo son: la rigidez relativa entre la pila y el suelo, rigidez relativa del suelo arriba y abajo del nivel de desplante de la base de la pila, y su geometría (longitud, diámetro de fuste y diámetro de base).

El uso de las pilas sustituye a varios pilotes, además de eliminar la necesidad de dados o zapatas sobre los mismos. Los procedimientos constructivos son sencillos y es muy conveniente para construcciones pesadas.

La cimentación basada en pilas se utiliza cuando la estructura transmite a la cimentación cargas de gran magnitud, y el estrato resistente se localiza a profundidades menores de 20 m. Su utilización se ha incrementado a partir del desarrollo urbano en las zonas con subsuelo de compresibilidad media y baja.

En la construcción de pilas se puede perforar a través de gravas y boleos, la que en el caso de pilotes, los desviarían y causarían varios problemas. Pueden construirse hasta la profundidad de proyecto, aún con la presencia de lentes compactos o cementados.

En los últimos años, en la Ciudad de México, se ha generalizado el uso de pilas en la cimentación cuando se construye en las zonas de lomas y transición, debido a que el estrato resistente se localiza a profundidades menores de 20 m. En estas zonas las pilas resultan más económicas que los pilotes, ya que se construyen con equipo ligero y móvil, realizándose las perforaciones con diámetros de 0.60 a 3.00 m, siendo suficiente una pila para soportar la carga de una columna.

En la zona de transición cuando las cargas a soportar por el subsuelo son muy altas y las cimentaciones profundas por compensación con pilotes de fricción no son suficientes, se

recurre a la utilización de pilotes de punta y pilas diseñadas con la suficiente rigidez para controlar los asentamientos diferenciales, por lo que se requiere de un apoyo sobre estratos firmes o duros de baja o muy baja compresibilidad y alta resistencia al esfuerzo al cortante, donde las pilas tengan su punto de apoyo sobre un estrato o depósito firme con un espesor conveniente.

En terrenos minados se ha utilizado este tipo de cimentación, desplantándose en un estrato resistente localizado bajo el piso de cavidades y en edificaciones desplantadas sobre rellenos con altas descargas al subsuelo. El uso de las pilas en zonas minadas se recomienda conjuntamente con un tratamiento o regeneración de las cavidades.

La utilización de este tipo de cimentación resulta ser muy conveniente, se recomienda una atención y supervisión muy cuidadosas y estrictas. Las desventajas existentes se deben a que su uso en terrenos arenosos el peligro de derrumbe se acentúa debido a la vibración del equipo rotatorio o el tránsito de las ollas de concreto, provocando que la estabilidad de las paredes de la perforación sea crítica.

## Capítulo VI. Conclusiones

La actualización de la zonificación geotécnica de la Ciudad de México es importante ya que tiene el objetivo principal de guiar al ingeniero o arquitecto en la planeación de los trabajos de exploración y muestreo del subsuelo.

El presente trabajo constituye una contribución al mejor conocimiento del subsuelo de la ciudad; en él se revisaron las condiciones geotécnicas de la zona poniente de esta gran urbe, se identificaron los principales riesgos geotécnicos y se presentó una propuesta de zonificación en esta área; así mismo se revisaron los principales tipos de cimentación aplicables en la zona.

La llamada Zona I está representada principalmente por la formación Tarango, resultado de los productos piroclásticos de la actividad volcánica que se dio en la Sierra de las Cruces; son depósitos limo-arenosos generalmente, en estado compacto (formando tobas) o suelto de bajo contenido de agua y resistencia de media a alta. En el extremo poniente llegan a aparecer las rocas andesíticas que subyace a la formación Tarango y que son resultado también de la actividad volcánica de la sierra mencionada, aunque en épocas geológicas anteriores. En el área cercana a la zona de transición se presentan los suelos de pradera, consistentes en limos, arcillas y arenas resultado de la redepositación de las tobas, de origen aluvial.

La Zona II está formada por la intercalación de estratos de arcilla lacustre y suelos de origen aluvial que se generó debido a las condiciones climáticas que propiciaban las transgresiones y regresiones del lago de Texcoco sobre tierra firme. En ella se encuentran también los abanicos aluviales, compuestos por materiales gruesos que fueron arrastrados desde la zona de lomas por las diversas corrientes de agua y fueron depositados en las desembocaduras de éstas al lago.

En la Zona III el principal material encontrado es la arcilla lacustre intercalada con abundantes lentes de arena y limo.

En lo que respecta a riesgos geotécnicos, se encontró que los principales problemas son la existencia de minas y taludes en la zona de lomas, mientras que en la zona de transición y lago existen problemas de hundimientos regionales y de agrietamiento en los suelos, fenómenos atribuibles a la excesiva extracción de agua para consumo humano que se ha hecho en la Cuenca.

La utilidad de los Sistemas de Información Geográfica se ha manifestado al constituir una herramienta que ofrece la ventaja de manejar grandes volúmenes de información gráfica y alfanumérica para su procesamiento, interpretación y presentación, permitiendo al mismo tiempo su almacenamiento permanente y sistemático, agilizando el proceso de consulta, lo que evita la dispersión y pérdida de información como sucedía décadas atrás.

Lo anterior no debe suponer que se pueda prescindir de la realización de estudios geotécnicos para una obra en particular, esta herramienta deberá funcionar sólo como una guía y punto de referencia para la ejecución de dichos estudios.

Los esfuerzos realizados para afinar la zonificación geotécnica para la zona poniente de la Ciudad de México solamente permitieron obtener resultados medianamente satisfactorios debido a que, si bien la cantidad de sondeos contenidos en la base de datos pueda parecer abundante, su distribución deja mucho que desear. La separación entre éstos y sus diferentes características (cono eléctrico, SPT, mixtos, etc.) impiden que se puedan correlacionar adecuadamente.

Sin embargo, el mapa de zonificación propuesto podrá seguir siendo actualizado a medida que se obtenga más y mejor información, lo cual será bastante más fácil y rápido gracias al SIG creado para este fin. Aparentemente casi toda el área cubierta por esta tesis ya está urbanizada, pero un buen porcentaje de las construcciones son ligeras o medianas de poca extensión, lo que tal vez en un futuro próximo cambie a edificaciones más importantes que requieran de información preliminar más confiable.



**Bibliografía**

1. Marsal, R.J. "Estudios Relativos al Comportamiento del Subsuelo del Valle de México", Instituto Nacional de la Investigación Científica, México, D.F., 1952.
2. Marsal, R.J., Mazari, M. "El subsuelo de la Ciudad de México", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F., 1959.
3. Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A. "Nuevo Mapa Geológico del Sur-Poniente del Valle de México", Memorias del Simposio "Experiencias Geotécnicas en la Zona Poniente del Valle de México", pp 5-16, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1992.
4. Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A. "Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos", Comisión Federal de Electricidad, 1996.
5. Marsal, R.J. "La estratigrafía y sus implicaciones", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 1-7, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
6. Del Castillo, R. "Ciudad de México", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 15-50, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
7. Mooser, F., Santoyo, E., Támez, E. "Características Geológicas y Geotécnicas del Valle de México", Serie 100 kilómetros de Metro, COVITUR, septiembre de 1986.
8. Veytia, M., Ocampo, F., Olguín, M. "Construcción de Túneles para Metro en Zona Poniente de la Ciudad de México", Serie 100 kilómetros de Metro, COVITUR, julio de 1988.
9. Mooser, F. "Geología del relleno Cuaternario de la Cuenca de México", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 9-13, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
10. Real, E., Milan, R. "Estudio geológico encaminado a localizar cavernas o túneles en seis colonias ubicadas dentro del área Poniente de la Ciudad de México, D.F.", Tesis de licenciatura, I.P.N., México, D.F., 1989.
11. Marín, G. "Un mecanismo de falla generado por el abatimiento piezométrico", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 192-194, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.

12. Moreno, G. "Influencia del abatimiento piezométrico en los agrietamientos y hundimientos del subsuelo", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 186-191, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
13. Canedo, M. "Geología general y geomorfología de la porción sur de la Sierra de las Cruces", Tesis de Licenciatura, ESIA, I.P.N., 1992.
14. Torres, M. "Herramienta SIG de escritorio para la recuperación, manejo y análisis de datos espaciales", Tesis de Maestría, CIC, I.P.N., 2001.
15. Ordóñez, E. "Las rocas eruptivas del sudoeste de la cuenca de México". Boletín del Instituto Geológico de México, 1895.

## **Anexo A. Evolución de la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México**

En la segunda mitad de los años cuarenta se despertó el interés de varios ingenieros por la mecánica de suelos, se realizaron trabajos de campo y laboratorio con el fin de conocer las propiedades mecánicas de las arcillas de la Ciudad de México y obtener la información necesaria para verificar la teoría del hundimiento de la ciudad desarrollada por Nabor Carrillo. Varios de los sondeos se realizaron en conexión con trabajos particulares y otros se efectuaron de acuerdo con el convenio realizado entre el Instituto Nacional de la Investigación Científica y la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.

La mayoría de los estudios durante el período 1945-1955 fueron realizados con el objetivo de proyectar cimentaciones. La información obtenida se utilizó para desarrollar investigaciones especiales con el fin de aclarar y solucionar los problemas de la mecánica de suelos. Con las exploraciones realizadas se logró obtener información para conocer las características estratigráficas y mecánicas del subsuelo de la Ciudad de México.

Con la información existente hasta 1952 Raúl J. Marsal elaboró la primera zonificación geotécnica del área urbanizada, en la figura A.1 se puede observar la primera propuesta de dividir el subsuelo del Valle de México en zonas geotécnicas. Basándose en las características del subsuelo fue posible dividir la ciudad en cuatro regiones: 1) La zona A, formada por terrenos limo-arenosos compactos, conglomerados y derrames basálticos en el sur de la ciudad, típicos de las Lomas, parte de Tacubaya, Mixcoac y El Pedregal. 2) La zona B, de transición entre la zona A y el Lago de Texcoco, en la que se encontraban mantos de arcilla en la parte superficial, de composición y características muy variables, debajo había depósitos de aluvión gruesos y compactos. 3) Las zonas C y D son semejantes, las diferencias entre ambas se deben al efecto de cargas superficiales y perturbaciones ocasionadas por el bombeo en los acuíferos profundos.

En 1953 se obtuvieron fondos para realizar sondeos en las zonas no cubiertas por los trabajos anteriores, instalar piezómetros en la zona urbana y regiones vecinas del Valle, hacer nivelaciones periódicas de la ciudad para observar la evolución del hundimiento regional, llevar a cabo la exploración gravimétrica y las primeras investigaciones geológicas.

De acuerdo con la geología del Valle de México y considerando las características estratigráficas y mecánicas que presenta el subsuelo en el área urbana, Raúl J. Marsal y Marcos Mazari, en 1959 presentaron un plano de zonificación para la Ciudad de México (figura A.2) en el que se pueden observar las tres principales zonas geotécnicas en que se dividió la ciudad.

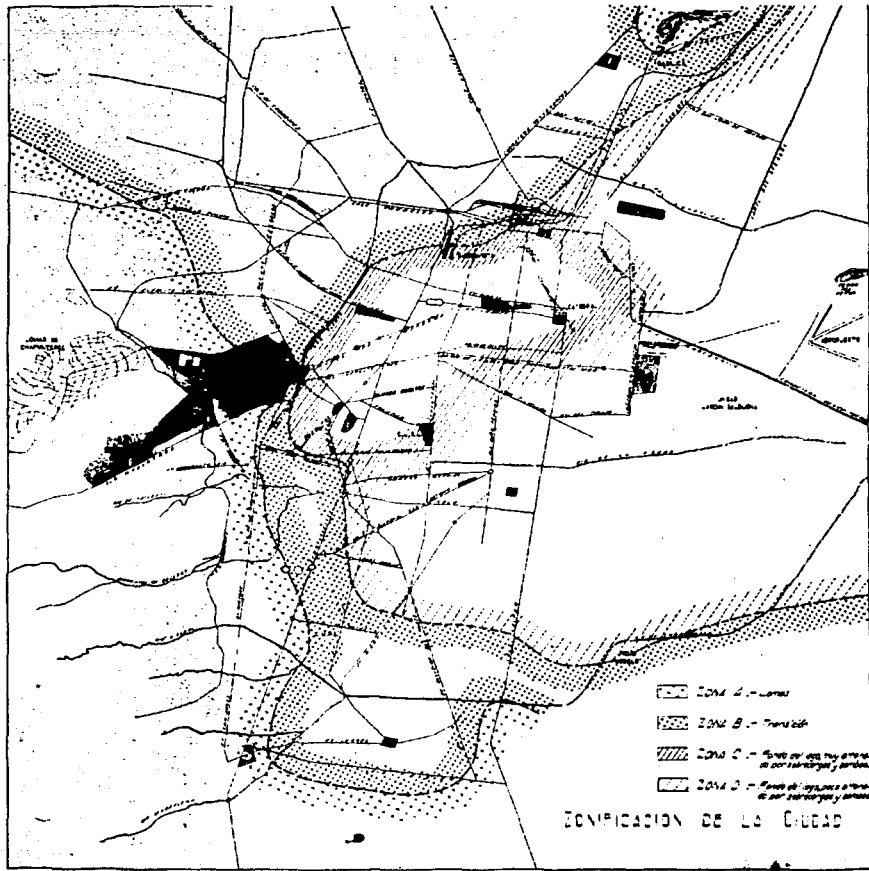


Figura A.1. Primera zonificación geotécnica de la Ciudad de México.

Las tres zonas son: 1) Lomas, formada por terrenos compactos, areno-limosos, en algunas ocasiones con alto contenido de gravas, y otras, por tobas pumíticas bien cementadas; al sur constituida por los derrames basálticos, 2) Transición, en esta zona las condiciones estratigráficas del subsuelo son muy variables de un punto a otro de la ciudad, 3) Lago, considerada como la frontera interior de la zona de transición, tomando como base la formación típica de la parte centro y oriente de la ciudad construida sobre el fondo del lago de Texcoco.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



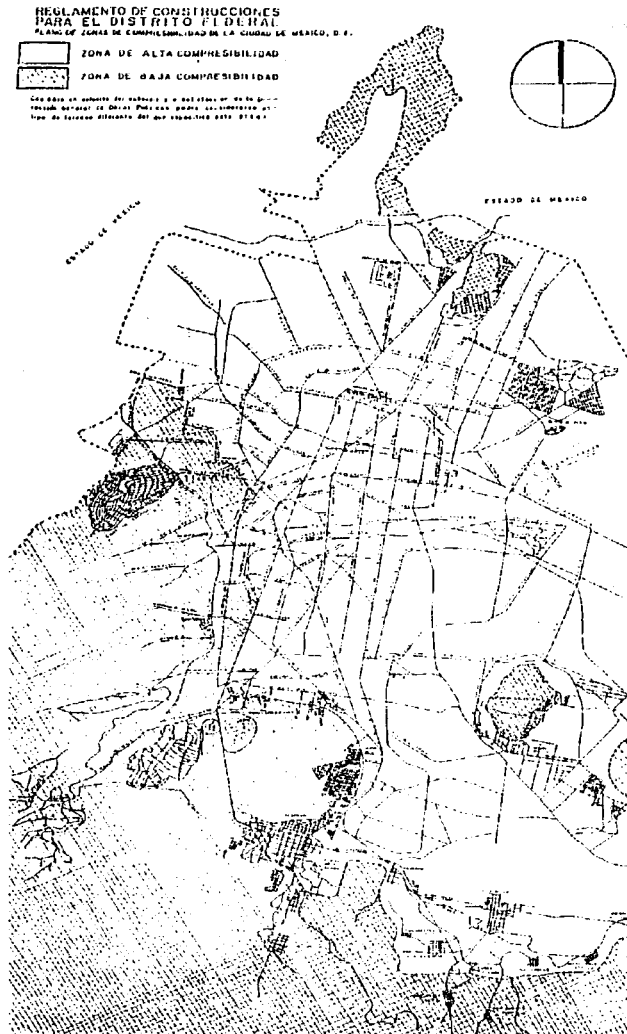


Figura A.3. Zonificación geotécnica de 1966.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

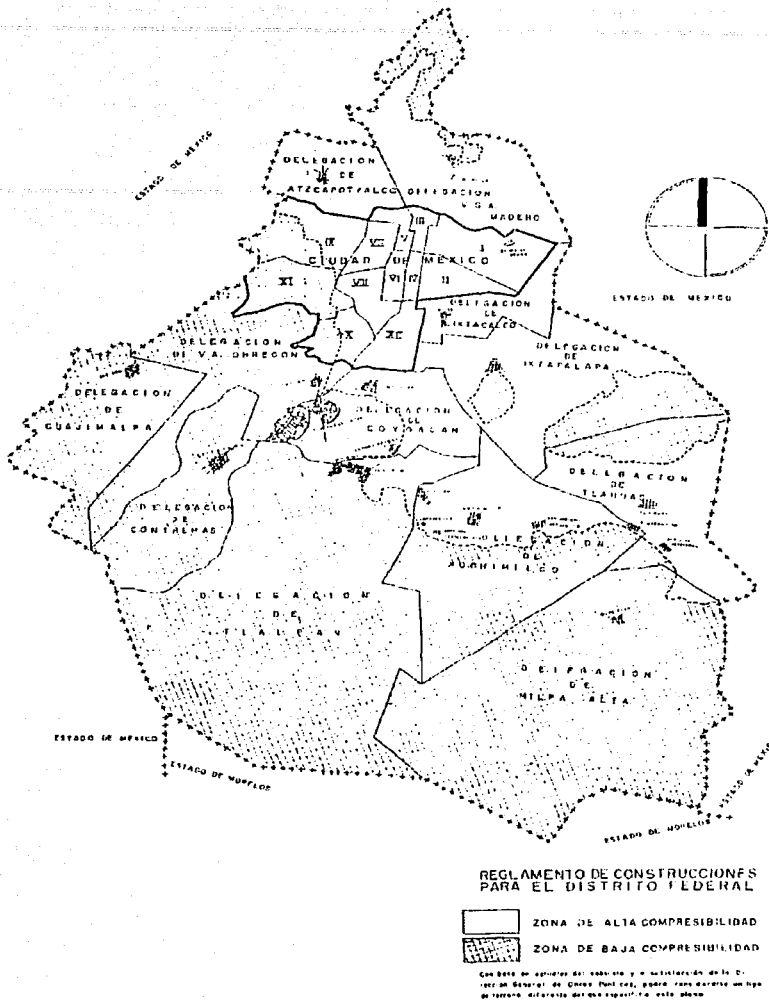


Figura A.4. Zonificación geotécnica de 1966.

La zonificación geotécnica fue evolucionando y fue J.J. Schmitter quién en 1968 realizó una nueva zonificación, quedándose el original en la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, la cual no se incorporó al reglamento de 1976, y se dio a conocer

a la comunidad geotécnica por medio del simposio "El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el Valle de México", publicado en 1978. La actualización geotécnica se extendió hasta zonas no consideradas anteriormente, perfeccionando la información que se tenía hasta el momento, en la figura A.5 se observa cómo la zonificación se extendió hasta zonas alejadas de la ciudad, pero que ya empezaban a ser importantes.

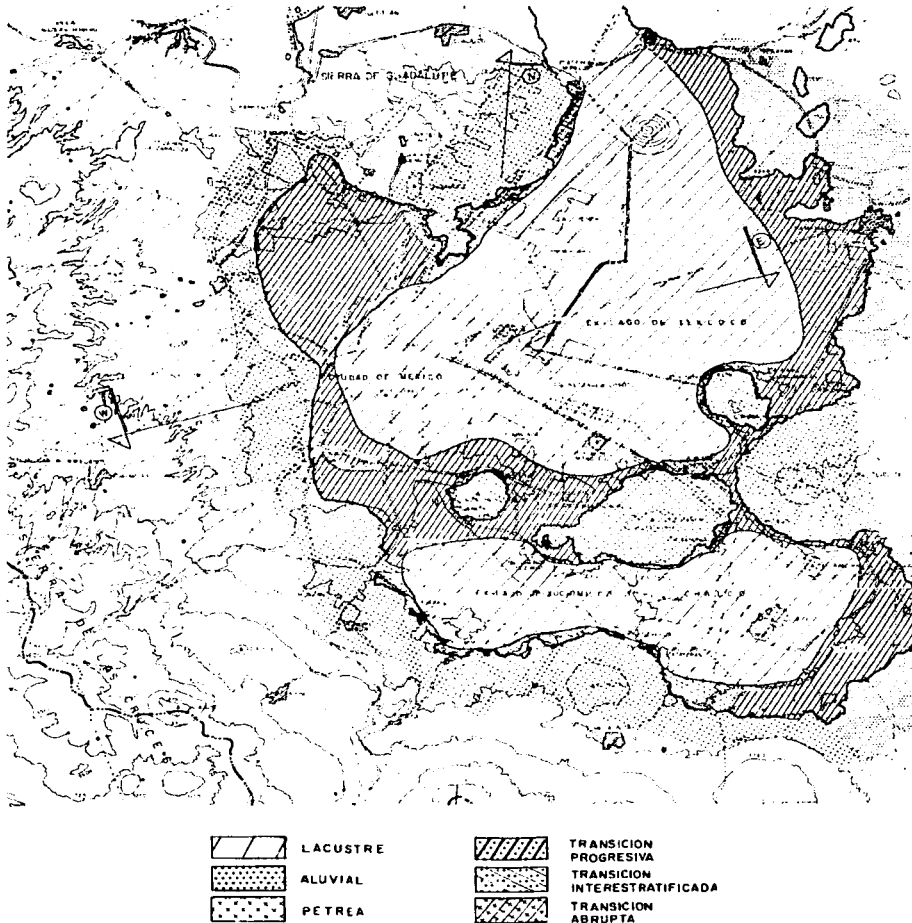
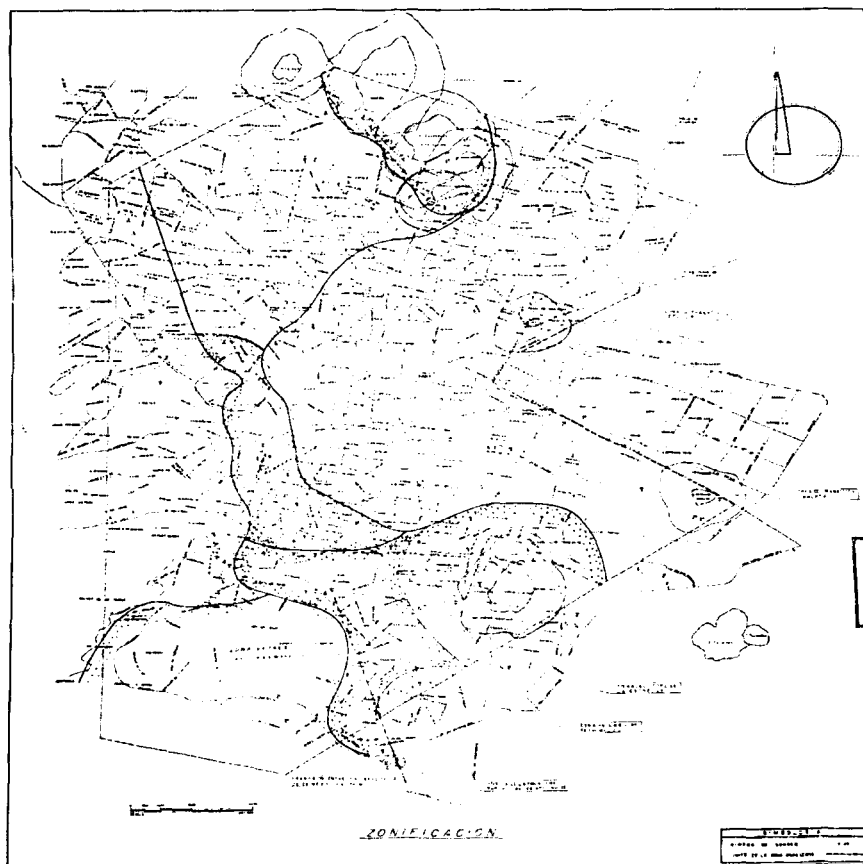


Figura A.5. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (1968).





Rodolfo del Castillo (1978) presentó una zonificación geotécnica basada en 217 sondeos realizados de 1970 a 1978, consideró la información presentada por el D.D.F. en la publicación "Concentración de datos Básicos de los estudios de mecánica de suelos realizados para dependencias del D.D.F.", en la información de la " V reunión nacional de mecánica de suelos" y en la zonificación de 1959, comparó ésta con el plano presentado en el Simposio sobre Zonas Minadas (Rodríguez, J., 1976) y con la Memoria de las Obras del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, D.D.F., 1976, capítulo correspondiente a geología, además analizó el desarrollo geológico e hidrográfico de la Cuenca de México. Su trabajo consistió en ampliar la zonificación presentada por Marsal y Mazari en 1959. En la figura A.7 se presenta la zonificación resultante en zonas lacustre, de transición y pétreas.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura A.7. Zonificación geotécnica (1978).

Tomando en cuenta el criterio de zonificación de Marsal y Mazari e incorporando la información obtenida durante la construcción del Sistema de Transporte Colectivo "Metro", la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR) elaboró un plano de zonificación para la Ciudad de México. Esta zonificación establece subdivisiones tanto en la zona de transición como en la zona de lago, de acuerdo con la estratigrafía y características particulares de cada sitio. En la zona de lomas los estudios establecen una delimitación muy similar a la del Reglamento de Construcciones. En la figura. A.8. se observan las zonas en que se dividió la ciudad, así como las subdivisiones existentes.

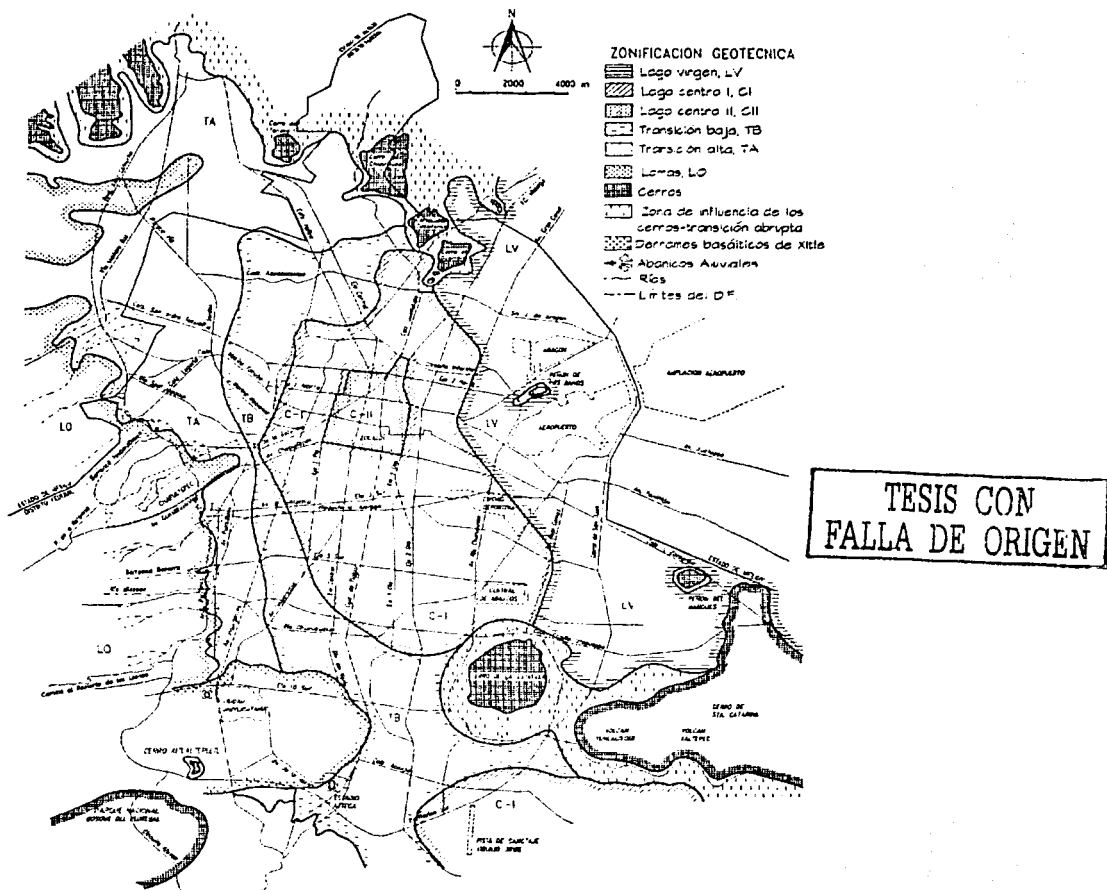


Figura A.8. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (COVITUR, 1986).

Toda la información que se obtuvo en sondeos de exploración, cortes de tajos y túneles del Sistema de Transporte Colectivo "Metro", influyó en la elaboración de un nuevo plano de zonificación por el subcomité de normas y procedimientos de construcción, que aparece en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones publicadas en la Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal del 12 de noviembre de 1987 (figura A.9).

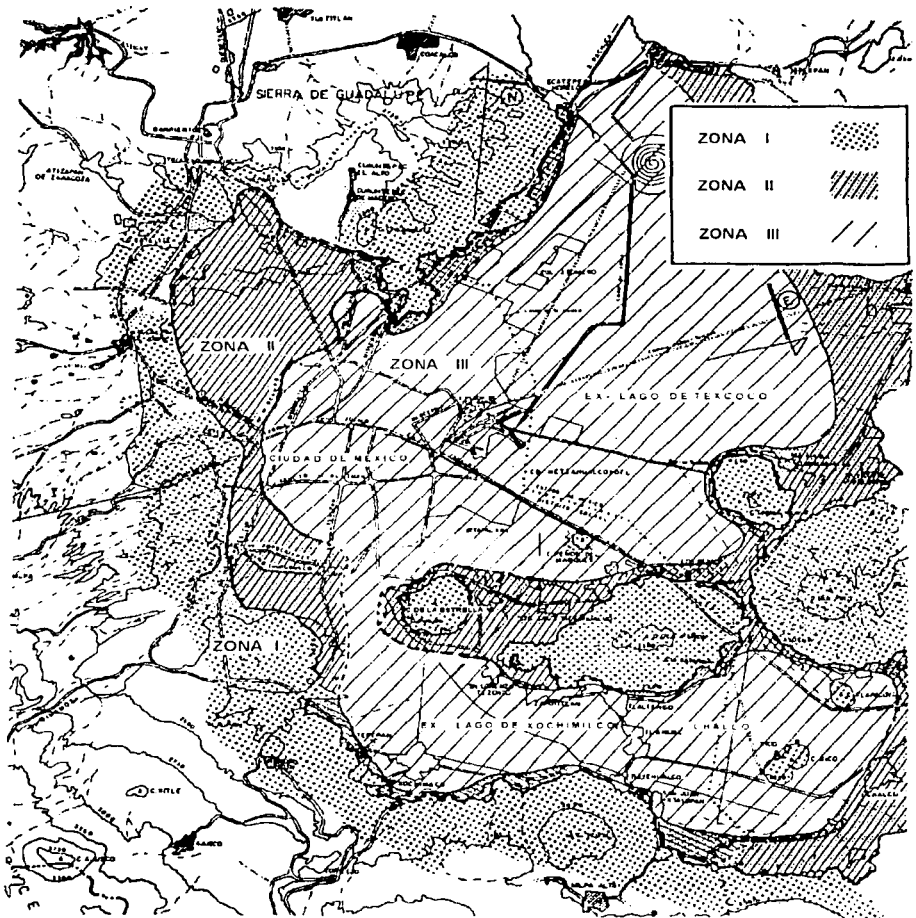


Figura A.9. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (1987).



De acuerdo con el artículo 219 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal publicado el 3 de julio de 1987 en el Diario Oficial de la Federación, el Distrito Federal se encuentra dividido en tres zonas cuyas definiciones son las siguientes:

Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena;

Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros, y

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50m.

La zonificación geotécnica vigente fue publicada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, contenidas en la Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal del día 27 de febrero de 1995. Las zonas en que se encuentra dividida se definen de la misma manera que para la zonificación geotécnica de 1987; en esta zonificación los cambios fueron mínimos, en algunas partes la transición se incrementó más hacia la zona centro de la ciudad, pero el más representativo fue el que se realizó en las inmediaciones del Cerro de la Estrella.

Esta zonificación se muestra en la figura A.10, en la que se observa cómo los cambios que se realizaron en el poniente no fueron muy significativos.

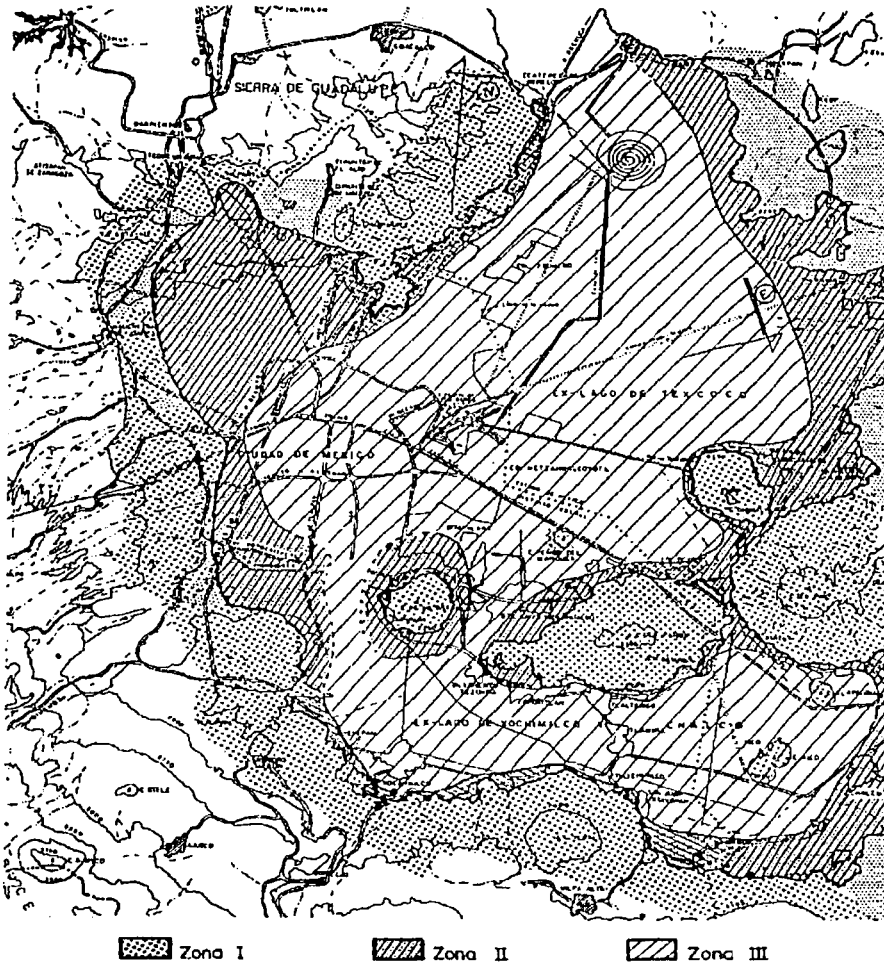


Figura A.10. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (1995).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



CLASE	MESES	MODALIDAD	EDIFICIO	CALLE NUM	ENTRADA CAL	CELEBRACION	MUNICIPIO	COSTA T	COSTA F	PREDICIONES	PROG. MOD.
441	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
442	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
443	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
444	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
445	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
446	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
447	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
448	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
449	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
450	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
451	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
452	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
453	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
454	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
455	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
456	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
457	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
458	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
459	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
460	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
461	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
462	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
463	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
464	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
465	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
466	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
467	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
468	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
469	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
470	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
471	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
472	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
473	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
474	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
475	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
476	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
477	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
478	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
479	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
480	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
481	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
482	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
483	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
484	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
485	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
486	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
487	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
488	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
489	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
490	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
491	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
492	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
493	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
494	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
495	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
496	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
497	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
498	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
499	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
500	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180

TESIS CON FALLA DE ORIGEN





TESIS DE GRADO  
FALTA DE OÍNGEN

Clave	Nombre	Apellido	Grado	Fecha	Estado	Observaciones	Clave	Nombre	Apellido	Grado	Fecha	Estado	Observaciones
101	...	...	...	...	...	...	101	...	...	...	...	...	...
102	...	...	...	...	...	...	102	...	...	...	...	...	...
103	...	...	...	...	...	...	103	...	...	...	...	...	...
104	...	...	...	...	...	...	104	...	...	...	...	...	...
105	...	...	...	...	...	...	105	...	...	...	...	...	...
106	...	...	...	...	...	...	106	...	...	...	...	...	...
107	...	...	...	...	...	...	107	...	...	...	...	...	...
108	...	...	...	...	...	...	108	...	...	...	...	...	...
109	...	...	...	...	...	...	109	...	...	...	...	...	...
110	...	...	...	...	...	...	110	...	...	...	...	...	...
111	...	...	...	...	...	...	111	...	...	...	...	...	...
112	...	...	...	...	...	...	112	...	...	...	...	...	...
113	...	...	...	...	...	...	113	...	...	...	...	...	...
114	...	...	...	...	...	...	114	...	...	...	...	...	...
115	...	...	...	...	...	...	115	...	...	...	...	...	...
116	...	...	...	...	...	...	116	...	...	...	...	...	...
117	...	...	...	...	...	...	117	...	...	...	...	...	...
118	...	...	...	...	...	...	118	...	...	...	...	...	...
119	...	...	...	...	...	...	119	...	...	...	...	...	...
120	...	...	...	...	...	...	120	...	...	...	...	...	...
121	...	...	...	...	...	...	121	...	...	...	...	...	...
122	...	...	...	...	...	...	122	...	...	...	...	...	...
123	...	...	...	...	...	...	123	...	...	...	...	...	...
124	...	...	...	...	...	...	124	...	...	...	...	...	...
125	...	...	...	...	...	...	125	...	...	...	...	...	...
126	...	...	...	...	...	...	126	...	...	...	...	...	...
127	...	...	...	...	...	...	127	...	...	...	...	...	...
128	...	...	...	...	...	...	128	...	...	...	...	...	...
129	...	...	...	...	...	...	129	...	...	...	...	...	...
130	...	...	...	...	...	...	130	...	...	...	...	...	...
131	...	...	...	...	...	...	131	...	...	...	...	...	...
132	...	...	...	...	...	...	132	...	...	...	...	...	...
133	...	...	...	...	...	...	133	...	...	...	...	...	...
134	...	...	...	...	...	...	134	...	...	...	...	...	...
135	...	...	...	...	...	...	135	...	...	...	...	...	...
136	...	...	...	...	...	...	136	...	...	...	...	...	...
137	...	...	...	...	...	...	137	...	...	...	...	...	...
138	...	...	...	...	...	...	138	...	...	...	...	...	...
139	...	...	...	...	...	...	139	...	...	...	...	...	...
140	...	...	...	...	...	...	140	...	...	...	...	...	...
141	...	...	...	...	...	...	141	...	...	...	...	...	...
142	...	...	...	...	...	...	142	...	...	...	...	...	...
143	...	...	...	...	...	...	143	...	...	...	...	...	...
144	...	...	...	...	...	...	144	...	...	...	...	...	...
145	...	...	...	...	...	...	145	...	...	...	...	...	...
146	...	...	...	...	...	...	146	...	...	...	...	...	...
147	...	...	...	...	...	...	147	...	...	...	...	...	...
148	...	...	...	...	...	...	148	...	...	...	...	...	...
149	...	...	...	...	...	...	149	...	...	...	...	...	...
150	...	...	...	...	...	...	150	...	...	...	...	...	...
151	...	...	...	...	...	...	151	...	...	...	...	...	...
152	...	...	...	...	...	...	152	...	...	...	...	...	...
153	...	...	...	...	...	...	153	...	...	...	...	...	...
154	...	...	...	...	...	...	154	...	...	...	...	...	...
155	...	...	...	...	...	...	155	...	...	...	...	...	...
156	...	...	...	...	...	...	156	...	...	...	...	...	...
157	...	...	...	...	...	...	157	...	...	...	...	...	...
158	...	...	...	...	...	...	158	...	...	...	...	...	...
159	...	...	...	...	...	...	159	...	...	...	...	...	...
160	...	...	...	...	...	...	160	...	...	...	...	...	...
161	...	...	...	...	...	...	161	...	...	...	...	...	...
162	...	...	...	...	...	...	162	...	...	...	...	...	...
163	...	...	...	...	...	...	163	...	...	...	...	...	...
164	...	...	...	...	...	...	164	...	...	...	...	...	...
165	...	...	...	...	...	...	165	...	...	...	...	...	...
166	...	...	...	...	...	...	166	...	...	...	...	...	...
167	...	...	...	...	...	...	167	...	...	...	...	...	...
168	...	...	...	...	...	...	168	...	...	...	...	...	...
169	...	...	...	...	...	...	169	...	...	...	...	...	...
170	...	...	...	...	...	...	170	...	...	...	...	...	...
171	...	...	...	...	...	...	171	...	...	...	...	...	...
172	...	...	...	...	...	...	172	...	...	...	...	...	...
173	...	...	...	...	...	...	173	...	...	...	...	...	...
174	...	...	...	...	...	...	174	...	...	...	...	...	...
175	...	...	...	...	...	...	175	...	...	...	...	...	...
176	...	...	...	...	...	...	176	...	...	...	...	...	...
177	...	...	...	...	...	...	177	...	...	...	...	...	...
178	...	...	...	...	...	...	178	...	...	...	...	...	...
179	...	...	...	...	...	...	179	...	...	...	...	...	...
180	...	...	...	...	...	...	180	...	...	...	...	...	...
181	...	...	...	...	...	...	181	...	...	...	...	...	...
182	...	...	...	...	...	...	182	...	...	...	...	...	...
183	...	...	...	...	...	...	183	...	...	...	...	...	...
184	...	...	...	...	...	...	184	...	...	...	...	...	...
185	...	...	...	...	...	...	185	...	...	...	...	...	...
186	...	...	...	...	...	...	186	...	...	...	...	...	...
187	...	...	...	...	...	...	187	...	...	...	...	...	...
188	...	...	...	...	...	...	188	...	...	...	...	...	...
189	...	...	...	...	...	...	189	...	...	...	...	...	...
190	...	...	...	...	...	...	190	...	...	...	...	...	...
191	...	...	...	...	...	...	191	...	...	...	...	...	...
192	...	...	...	...	...	...	192	...	...	...	...	...	...
193	...	...	...	...	...	...	193	...	...	...	...	...	...
194	...	...	...	...	...	...	194	...	...	...	...	...	...
195	...	...	...	...	...	...	195	...	...	...	...	...	...
196	...	...	...	...	...	...	196	...	...	...	...	...	...
197	...	...	...	...	...	...	197	...	...	...	...	...	...
198	...	...	...	...	...	...	198	...	...	...	...	...	...
199	...	...	...	...	...	...	199	...	...	...	...	...	...
200	...	...	...	...	...	...	200	...	...	...	...	...	...







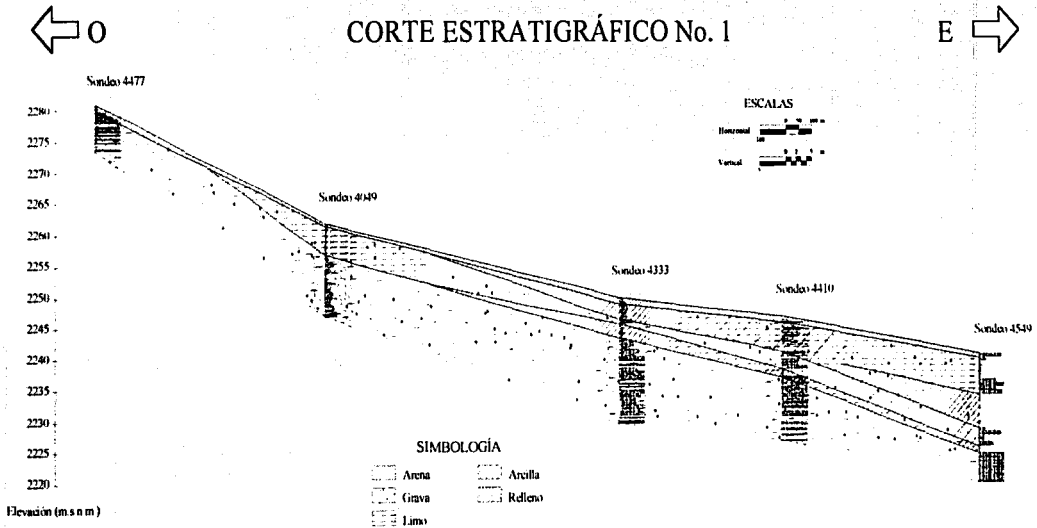




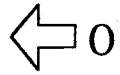




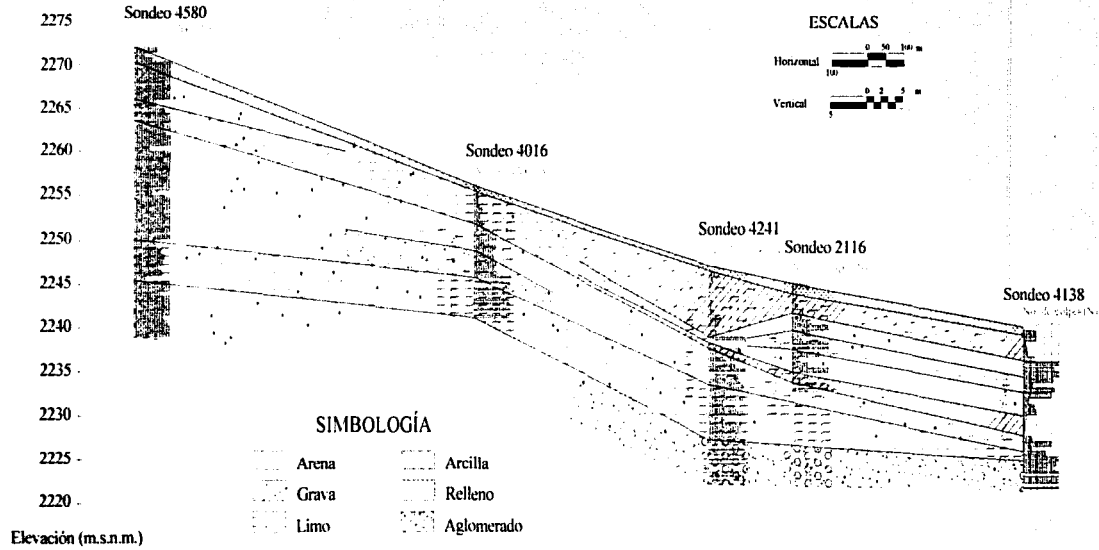
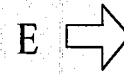
### Anexo C. Cortes Estratigráficos



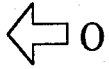
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



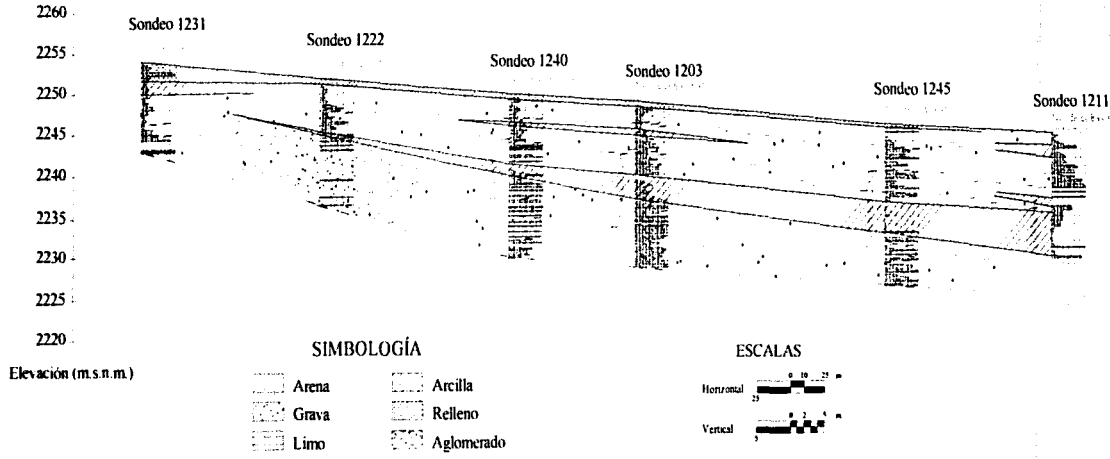
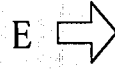
# CORTE ESTRATIGRÁFICO No. 2



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

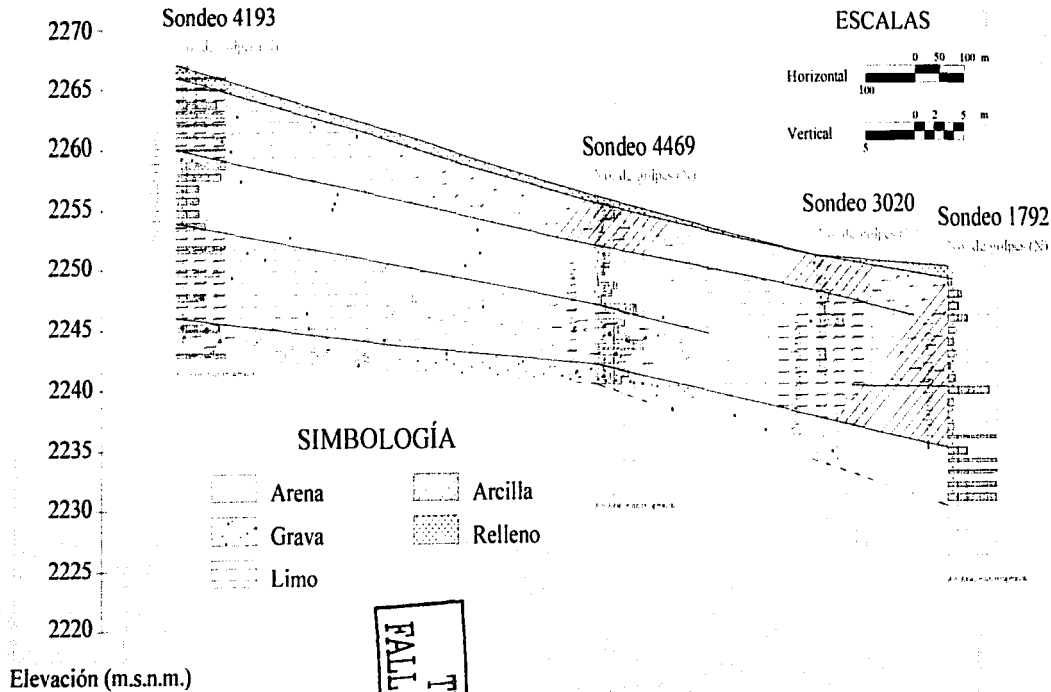
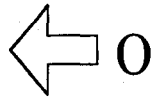


### CORTE ESTRATIGRÁFICO No. 3



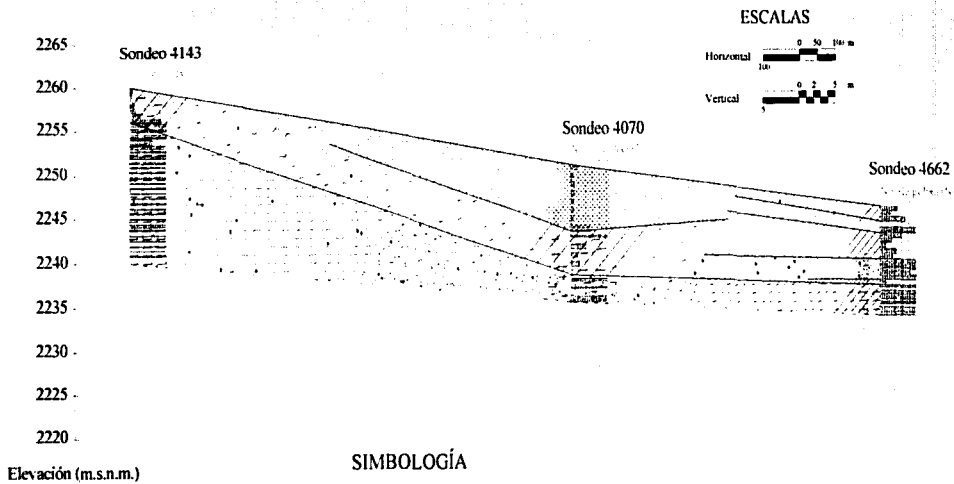
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# CORTE ESTRATIGRÁFICO No. 4



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# ← O CORTE ESTRATIGRÁFICO No. 5 E →



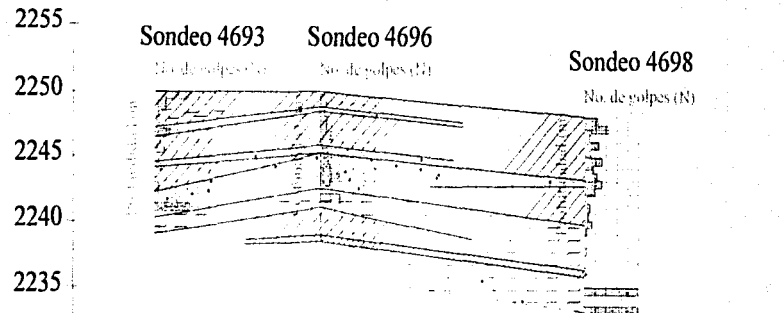
## SIMBOLOGÍA

- |  |       |  |         |
|--|-------|--|---------|
|  | Arena |  | Arcilla |
|  | Grava |  | Relleno |
|  | Limo  |  |         |

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CORTE ESTRATIGRÁFICO No. 6



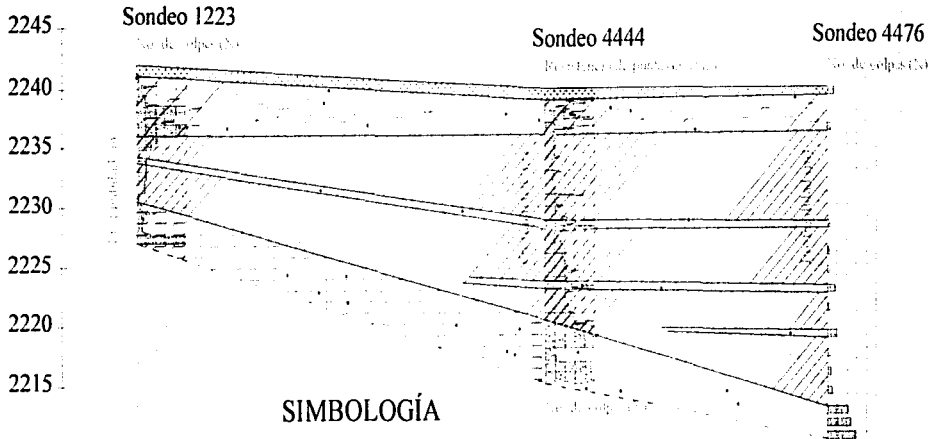
	<b>ESCALAS</b>													
	Horizontal	<b>SIMBOLOGÍA</b>												
	Vertical	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"></td> <td>Arena</td> <td style="width: 50%;"></td> <td>Arcilla</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Grava</td> <td></td> <td>Relleno</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Limo</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Arena		Arcilla		Grava		Relleno		Limo		
	Arena		Arcilla											
	Grava		Relleno											
	Limo													
Elevación (m.s.n.m.)														

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# CORTE ESTRATIGRÁFICO No. 7



## ESCALAS



## SIMBOLOGÍA

Elevación (m.s.n.m.)	Arena	Arcilla
	Grava	Relleno
	Limo	

## Anexo D. Planos

A continuación se presentan dos planos, en el primero se encuentra la localización y distribución de los sondeos geotécnicos en el área de estudio así como la localización de los cortes estratigráficos realizados, en el segundo se muestra la propuesta de zonificación geotécnica para la zona.



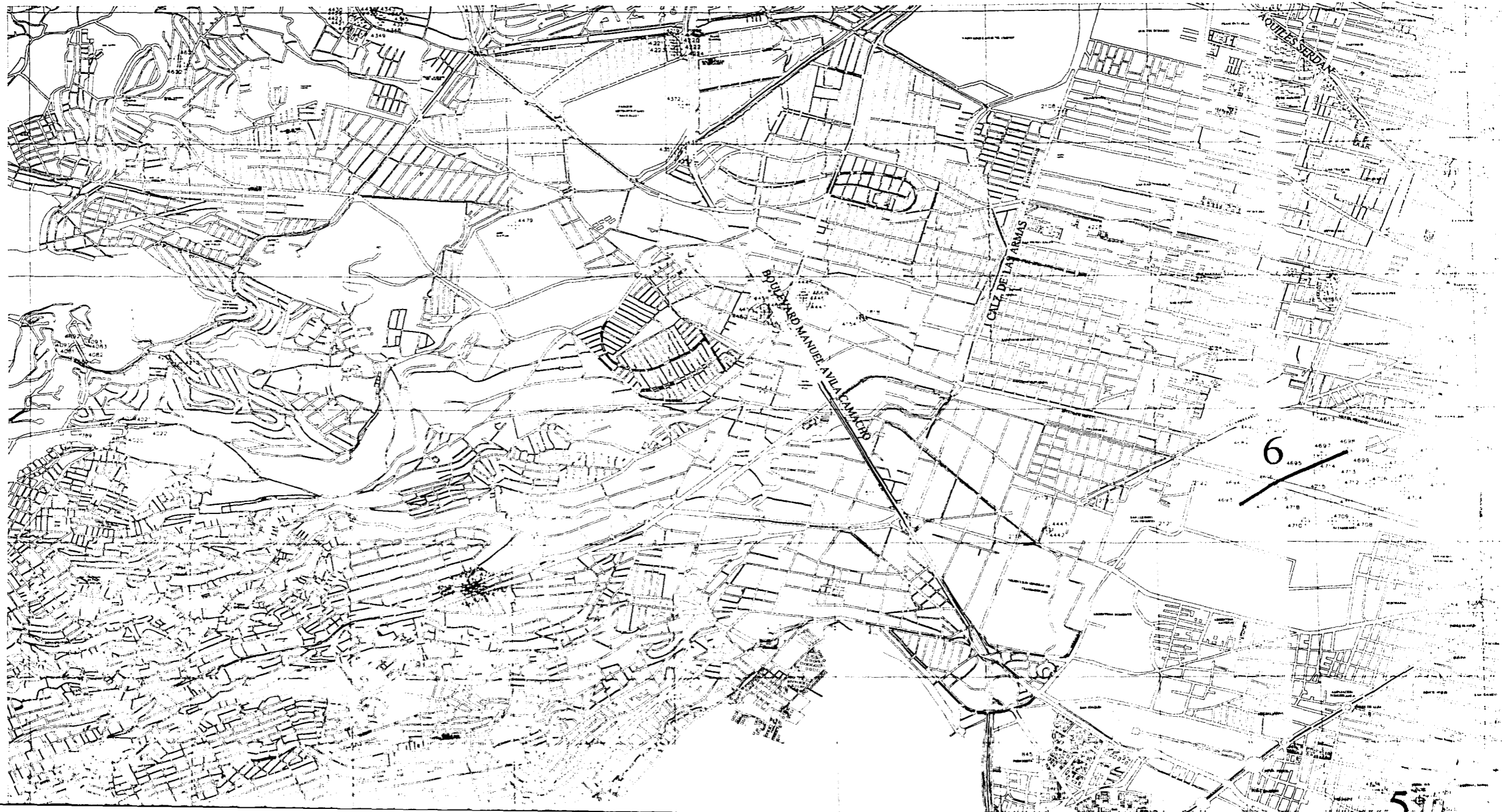
2150,510

19°27'00"

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2156,045

19°30'00"



54



N



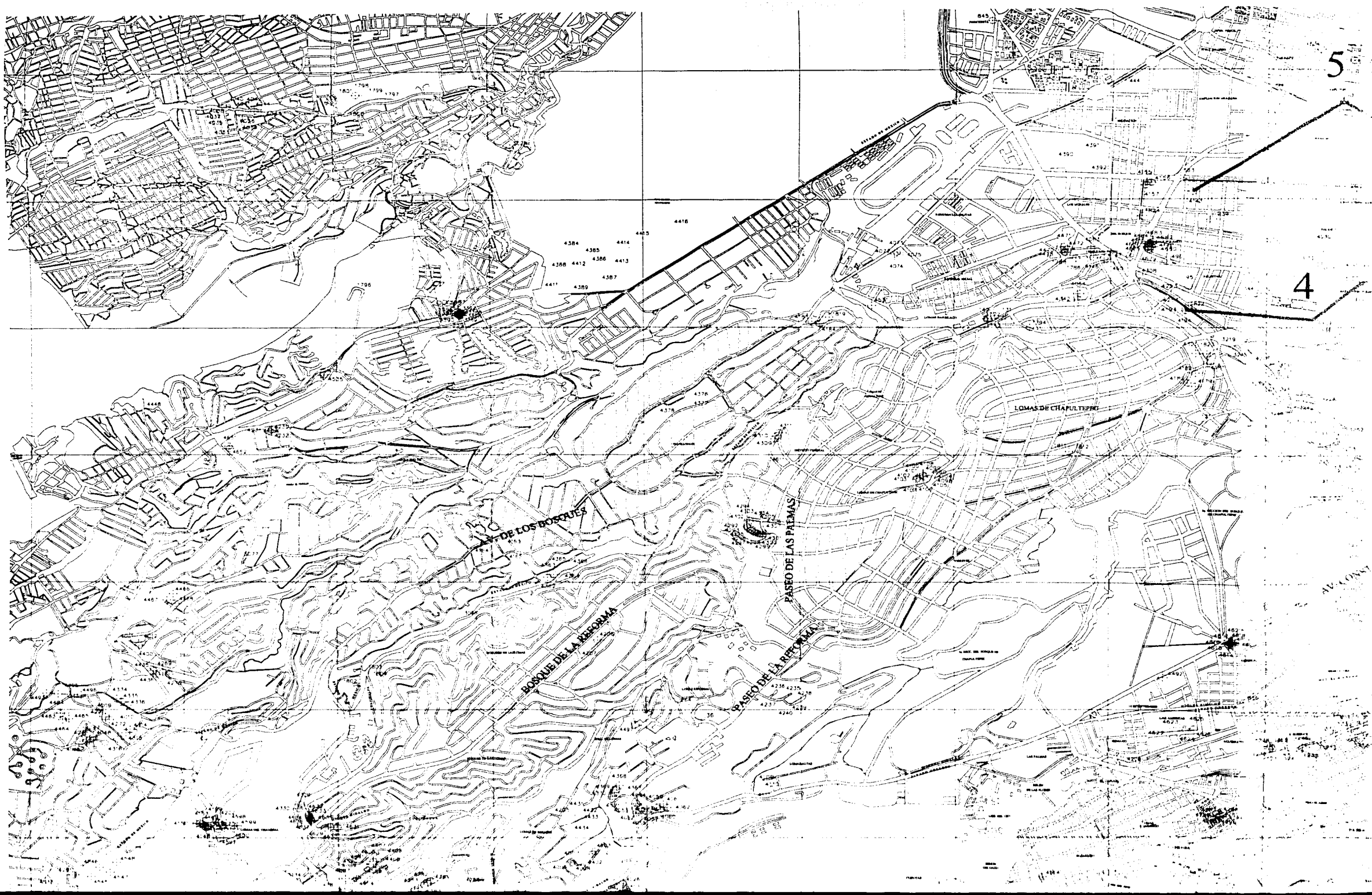
2144,975

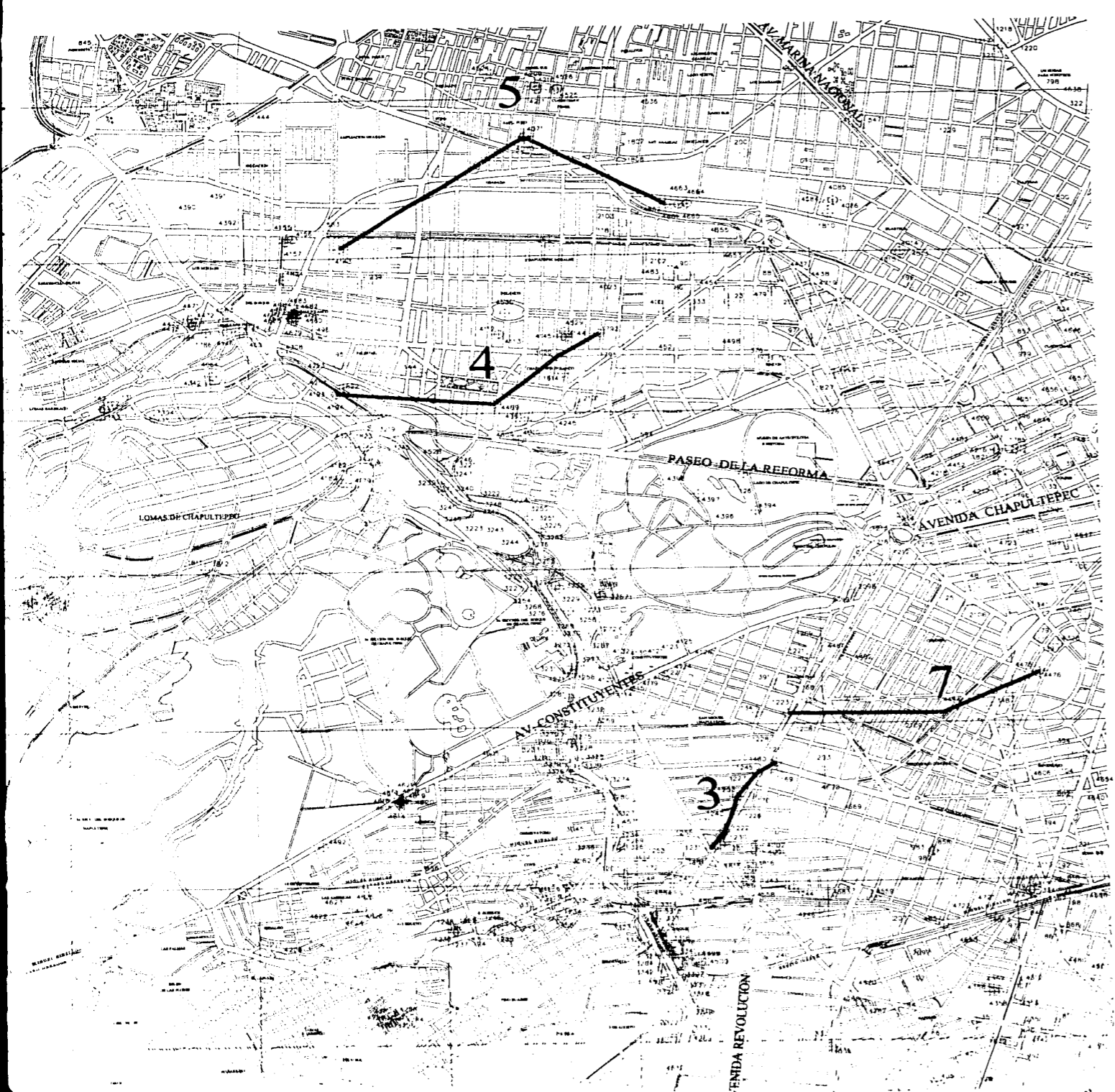
19°24'00"

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2'1"

19°



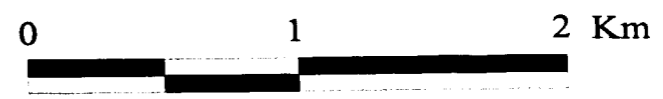


TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### SIGNOS CONVENCIONALES

- Zona en estudio □
- Coordenadas UTM a cada 1000 m —
- Cartas Inegi 1:10,000 - - -
- Sondeo de fuente bibliográfica ⊕
- Sondeo inalterado ⊙
- Sondeo SPT ⊗
- Sondeo de cono dinámico ⊘
- Sondeo de cono eléctrico ⊙
- Sondeo mixto ⊙
- Sondeo de verificación ⊙
- Sondeo de avance controlado ⊙
- Corte estratigráfico 7



ESCALA GRÁFICA

N

ÍNDICE DE CARTAS

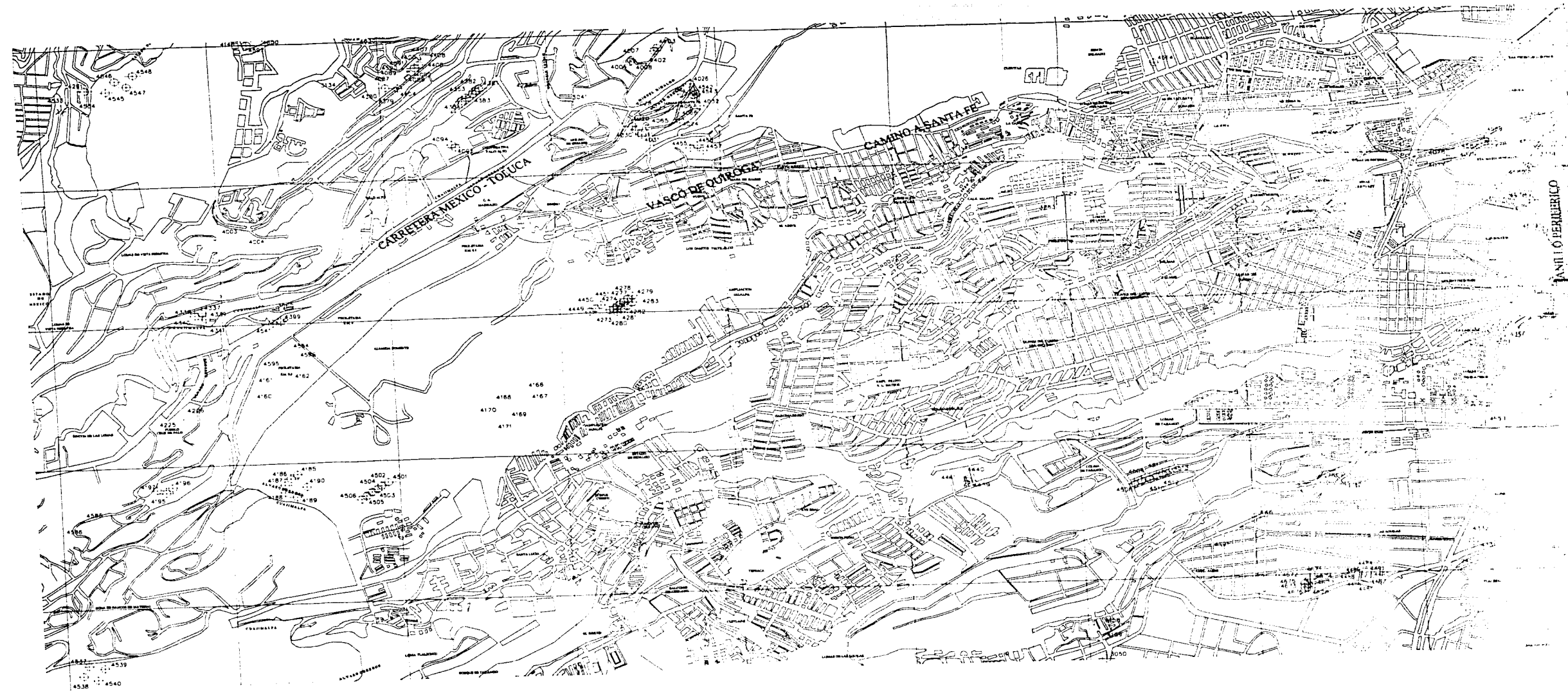
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2'139,440

19°21'00"

470,860

99°16'40"

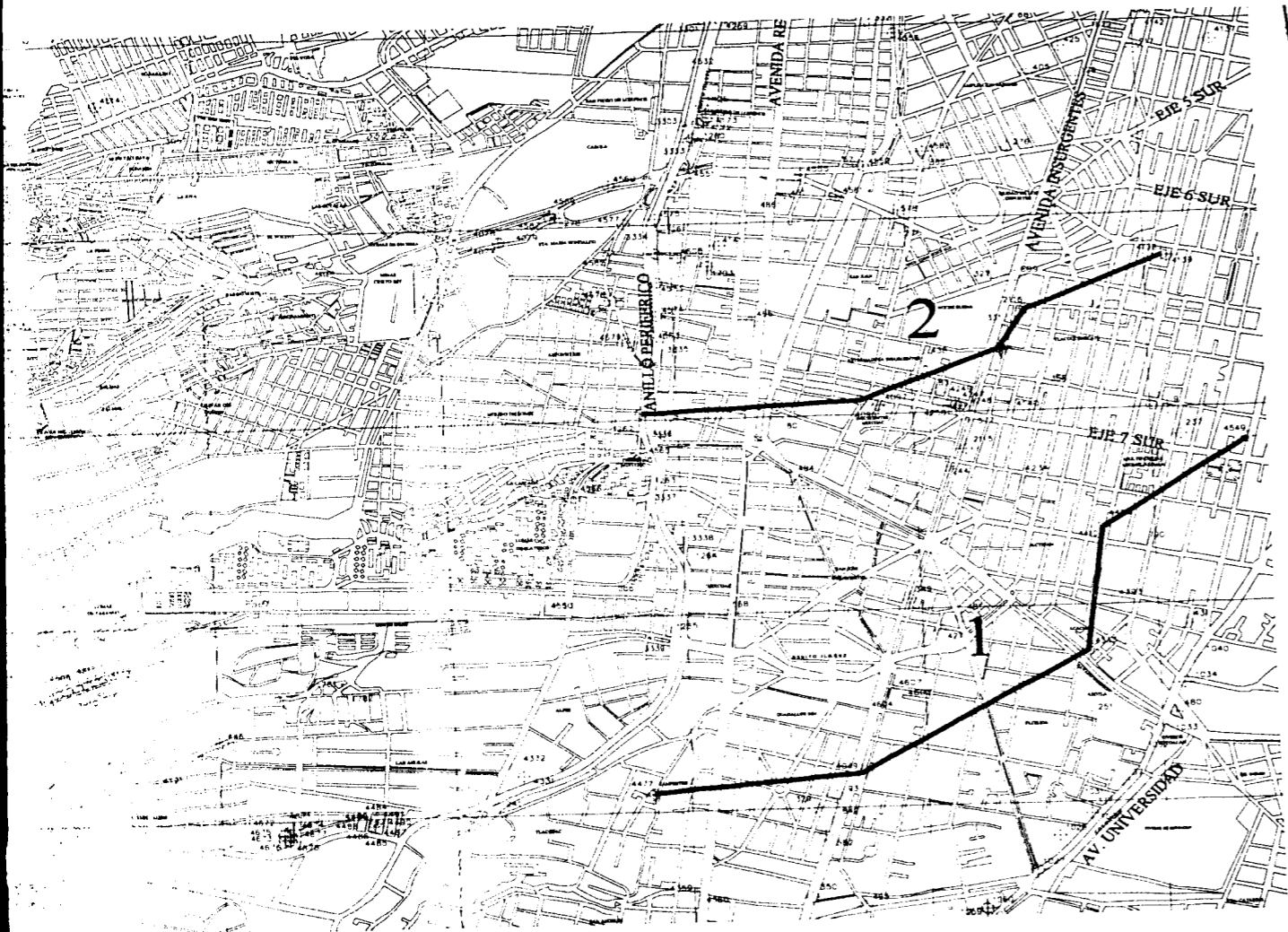


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

476,675

99°13'20"

JANU O PERIERICO



CON  
ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

482,490  
99°10'00"



ÍNDICE DE CARTAS

E14A39-12	E14A39-13
E14A39-22	E14A39-23
E14A39-32	E14A39-33



CUENCA DE MÉXICO

LOCALIZACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL: **CONTRIBUCIÓN A LA ZONIFICACIÓN  
GEOTÉCNICA DEL ÁREA PONIENTE  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**SONDEOS GEOTÉCNICOS**

ERNESTO CHÁVEZ VEGA

ESCALA 1:25000

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

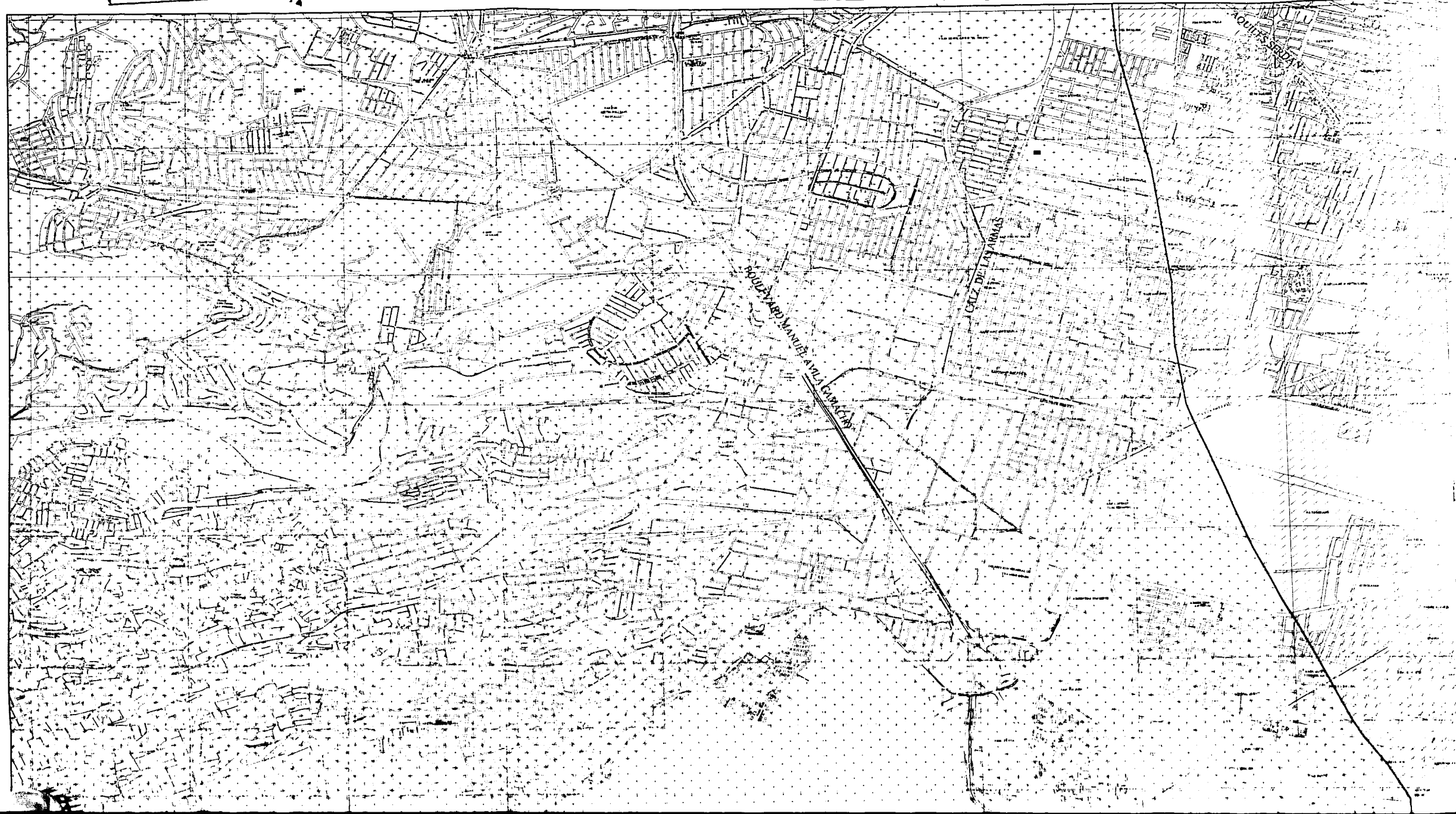
2°156,045

19°30'00"

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2°150,510

19°27'00"





TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

N



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



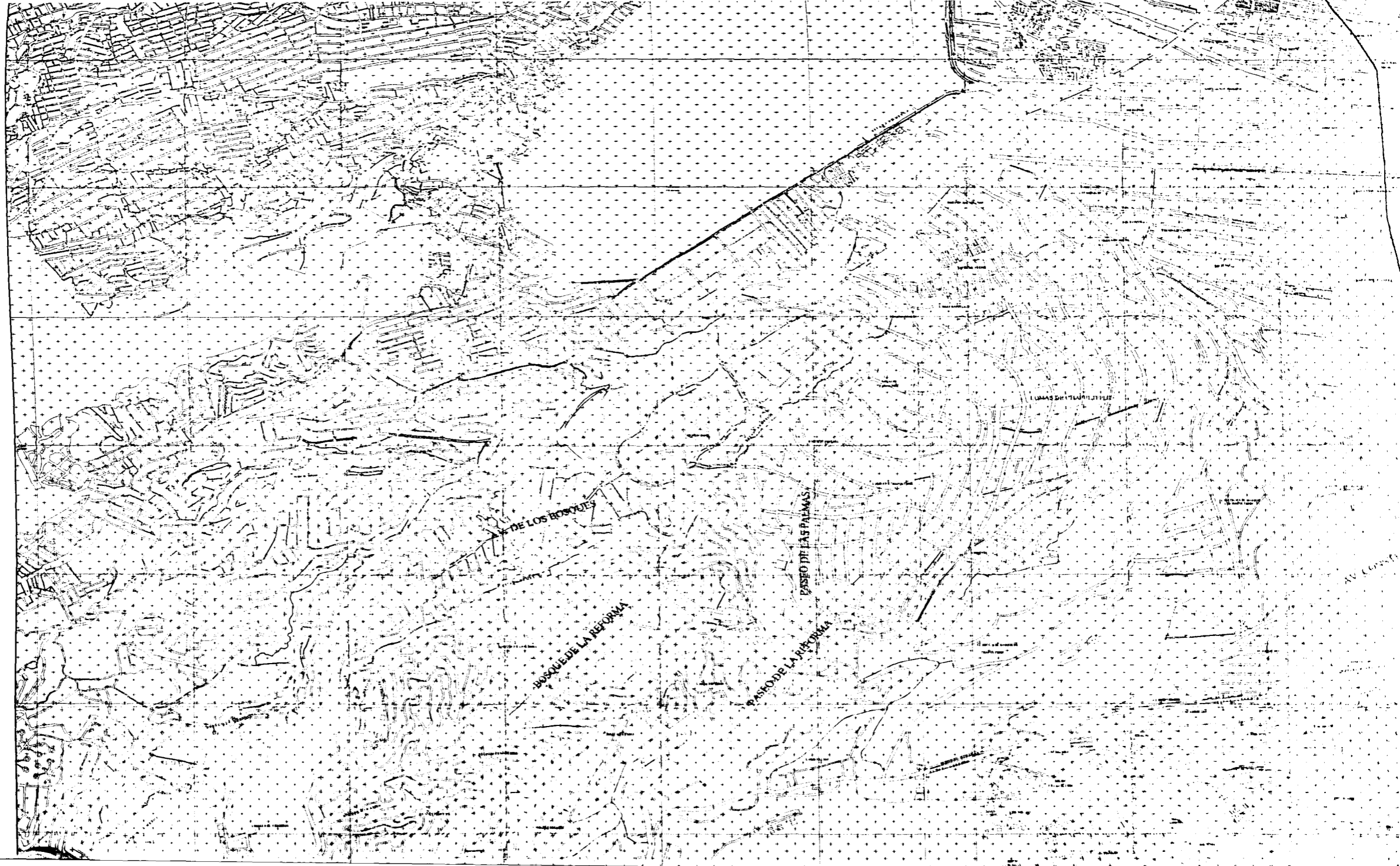
2'144,975

21'

19°24'00"

19°

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### SIGNOS CONVENCIONALES

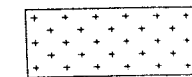
Zona en estudio



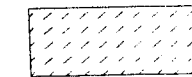
Coordenadas UTM a cada 1000 m  
Cartas Inegi 1:10,000



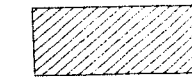
Zona I, de lomas



Zona II, de transición



Zona III, de lago



ESCALA GRÁFICA

N

ÍNDICE DE CARTAS

E14A39-12	E14A39-13
E14A39-22	E14A39-23
E14A39-32	E14A39-33

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



2'139,440

19°21'00"

470,860

99°16'40"

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

476,675

99°13'20"

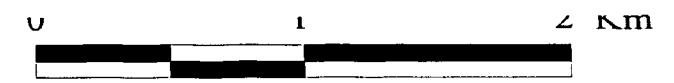
FALLA



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

482,490  
99°10'00"

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

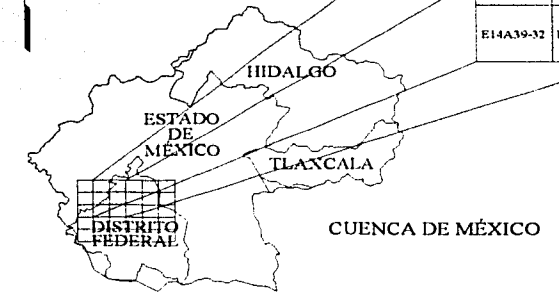


ESCALA GRÁFICA



ÍNDICE DE CARTAS

E14A39-12	E14A39-13
E14A39-22	E14A39-23
E14A39-32	E14A39-33



LOCALIZACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL: **CONTRIBUCIÓN A LA ZONIFICACIÓN  
GEOTÉCNICA DEL ÁREA PONIENTE  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PROPUESTA**

ERNESTO CHIÁVEZ VEGA

ESCALA 1:25000

139