

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



01163
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE LA GEOINFORMÁTICA A LA
ZONIFICACIÓN DEL SUBSUELO DE LA CUENCA DE MÉXICO**

EDGAR MÉNDEZ SÁNCHEZ

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE
ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(MECÁNICA DE SUELOS)**

DIRECTOR DE TESIS: DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD

MÉXICO D.F.,



m. 343748

2005



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.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

RECONOCIMIENTOS

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

NOMBRE: EDGAR MÉNDEZ SÁNCHEZ

FECHA: 02/05/05

FIRMA: 

Expreso mi gratitud a todos los sinodales por sus consejos durante el desarrollo y revisión de la tesis. En particular al Dr. Gabriel Auvinet Guichard por su ejemplo como investigador e ingeniero; al Dr. Efraín Ovando Shelley por su optimismo y empuje contagiosos; Dr. Miguel P. Romo Organista por su apoyo a cargo de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería, UNAM; al Dr. Alberto Jaime Paredes por su guía y dedicación; al Dr. Raúl Flores Berrones por sus consejos y al Dr. Víctor Manuel Taboada Urtuzuástegui.

Una gran parte de esta investigación fue patrocinada por el Banco Interamericano de Desarrollo, Gobierno del Estado de México, Gobierno del Distrito Federal, el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la DGAPA, UNAM y CONACYT. En todas las etapas conté con la valiosa colaboración de mi amigo M. C. Moisés Juárez Camarena y a los estudiantes de licenciatura que colaboran en multitud de tareas en el Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería, UNAM. Por último al Sr. Silvestre Soto por su comprensión.

Dedico esta tesis a mis hermanos: Guadalupe Patricia y Mariano, también a mis sobrinos Yaloani A. y Mariano G. que con su cariño y risas me llenan de optimismo y energía.

Que esta tesis sea un homenaje póstumo a mis padres, Mariano Méndez Soto y Gloria Sánchez Alvarado, por su afán de haber dado siempre a sus hijos todo lo mejor de ellos sin esperar nada a cambio.

CONTENIDO

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 Planteamiento
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Objetivo
- 1.4 Alcance
- 1.5 Metodología
 - 1.5.1 Planteamiento
 - 1.5.2 Marco geográfico
 - 1.5.3 Marco físico
 - 1.5.4 Criterios adoptados
 - 1.5.5 Análisis espacial y síntesis
 - Etapa de análisis inicial
 - Etapa de análisis final

2. MARCO GEOGRÁFICO

- 2.1 Localización de la unidad de estudio y análisis
 - 2.1.1 Localización de la cuenca de México
 - 2.1.2 Concepto de ciudad de México
 - 2.1.3 Composición y distribución por entidad federativa
 - 2.1.4 Límites orográficos
- 2.2 Información histórica
 - 2.2.1 Descripciones históricas
 - 2.2.2 Funcionamiento de los lagos y albardones en la época prehispánica
 - 2.2.3 Las inundaciones y las obras de desagüe
- 2.3 Toponimia
- 2.4 Cartografía
- 2.5 Topografía
- 2.6 Imagen de satélite
- 2.7 Fotografías Aéreas Digitales

3. MARCO FÍSICO

- 3.1 Geología
 - 3.1.1 Origen y conformación del relieve orográfico
 - 3.1.2 Estructura geológica
 - Subducción, orogenia y vulcanismo
 - Principios prevolcánicos
 - Primera fase de vulcanismo
 - Segunda fase de vulcanismo
 - Relleno cuaternario
 - Estratigrafía del subsuelo de la ciudad de México
- 3.2 Geomorfología
 - 3.2.1 Unidades geomorfológicas
 - 3.2.2 Dinámica geomorfológica externa

3.3 Geofísica

- 3.3.1 Pozos profundos
- 3.3.2 Gravimetría
- 3.3.3 Resistividad
- 3.3.4 Tendidos de refracción sísmica
- 3.3.5 Resultados geofísicos

3.4 Hidrografía

- 3.4.1 Hidrografía de la Cuenca de México
 - Zona I
 - Zonas II y III
 - Zona IV
 - Zonas V y VI
 - Zona VII
 - Zona VIII
 - Zonas IX, X y XI
 - Lagos
 - Lago de Texcoco
 - Lago de Xochimilco
 - Laguna de Zumpango

3.5 Geotecnia

- 3.5.1 Introducción
- 3.5.2 Antecedentes
- 3.5.3 Objetivo y alcance
- 3.5.4 Modelo conceptual
- 3.5.5 Procesamiento de datos
- 3.5.6 Operación del sistema
- 3.5.7 Estado actual
- 3.5.8 Utilidad del acervo contenido en el banco del Sistema SIG-SG
- 3.5.9 Extensiones
- 3.5.10 Conclusiones

4. SÍNTESIS

4.1 Descripción espacial

- 4.1.1 Zona sur, Sierra de Chichinautzin
- 4.1.2 Zona poniente, los rellenos aluviales que circundan el pie de la Sierra de las Cruces

4.2 Contribuciones a la zonificación

4.3 Propuesta de zonificación geotécnica

5. CONCLUSIONES

6. REFERENCIAS

- ANEXO A** Glosario de Informática
- ANEXO B** Sistemas de Información Geográfica
- ANEXO C** Percepción Remota
- ANEXO D** Sistemas de Posicionamiento Global
- ANEXO E** Modelo Digital del Terreno

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento

La elaboración de zonificaciones geotécnicas cada vez más precisas para fines de reglamentación y como soporte de los estudios realizados para proyectos específicos es una tarea que tiene que efectuarse en forma continua. Actualmente, se cuenta con novedosas herramientas de análisis espacial basadas en la modelación espacial, la cual se ocupa de construir modelos o representaciones simplificadas de cualquier medio geográfico de algún territorio.

Estas herramientas presentan un gran potencial pero se han usado poco hasta ahora en Geotecnia; quedan inscritas en el contexto general de las tecnologías de la Geoinformática, especialidad que recibe el aporte de diversas ciencias y técnicas tales como la Geografía, Geodesia, el Análisis Espacial y la Informática. En la Geoinformática, destacan tres importantes tecnologías:

La primera se refiere al desarrollo que han alcanzado los bancos o manejadores de bases de datos de índole espacial. Estos bancos permiten integrar y manejar información relacionada con entidades geográficas de un territorio dado. Se denominan Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG están orientados a la administración de grandes volúmenes de información con carácter espacial (como los empleados en proyectos y estudios sobre algún territorio dado). Se trata de información referenciada geográficamente bajo un sistema de coordenadas proveniente de una proyección. La administración de este tipo de información implica contar con sistemas que contengan funciones o capacidades tales como capturar, almacenar, manejar, procesar y recuperar eficientemente los datos espaciales.

La segunda se refiere a la información geográfica generada con la toma de imágenes de satélites artificiales y de radar por medio de sensores que se montan en aeronaves o satélites artificiales. La aplicación de variadas técnicas y metodologías para el procesamiento de esta información se denomina Teledetección o Percepción Remota y se emplea para la obtención de datos o como base de estudios y proyectos acerca de la superficie terrestre. Presenta la ventaja de mostrar, resaltar y relacionar los rasgos generales del terreno con todos sus detalles para, finalmente, poner de manifiesto información de interés respecto a los temas de: Geotecnia, Geología, Geomorfología, etc.

La tercera y última se refiere a los Sistemas de Posicionamiento Global o GPS. Esta tecnología proporciona la localización geográfica puntual por medio de la captación de señales satelitales de objetos estáticos o en movimiento como grietas, fallas, y sitios en tierra (personas, vehículos), mar o aire. Facilita la determinación en tiempo real de coordenadas y distancias en los trabajos de campo de geotecnistas, geólogos, etc.

Es imprescindible destacar que las técnicas, modelos y métodos de análisis incluidos en los Sistemas de Información Geográfica y otros ya existían, pero muchos de ellos estaban en desuso y olvidados. Por ejemplo, el mapa es el método clásico y universal de análisis espacial, tan antiguo como la escritura. Lo nuevo consiste en que se modifican los procesos tradicionales, algunos de ellos realizados tradicionalmente en forma manual (por ejemplo, los procesos para la producción de la Cartografía, Mosaicos Fotográficos, Maquetas y Modelos en 3D del Terreno). Uno de estos procesos se refiere al uso de los archiveros o muebles que almacenaban los registros de información en forma tabular y que han sido sustituidos por archivos electrónicos.

Además de modificar las técnicas tradicionales, día con día, se reducen los tiempos requeridos para las diversas etapas del procesamiento. Sin duda, el aporte más significativo consiste en ofrecer a los especialistas la posibilidad de realizar estudios y análisis para una multitud de alternativas al combinar diversas variables lo que, sin el uso de la computadora, sería muy difícil o casi imposible de hacer manualmente o mediante interpretación visual.

El potencial de los Sistemas de Información Geográfica y de la Geoinformática en general para los geotecnistas es por tanto muy importante. Sin embargo, es conveniente tener presente lo afirmado por Maguire, 1991, citado por J. L. Blanco en su tesis doctoral: "La orientación comercial que se le ha dado a los Sistemas SIG y a las actividades relacionadas con ellos, ha provocado que exista información exagerada o falsa (los Sistemas SIG no toman decisiones ni resuelven los problemas de la ingeniería), sobrevaloración y ocultismo internacional en cuanto a las dificultades y alcances reales que se pueden obtener cuando se trabaja con esa tecnología. A lo anterior se suma la gran cantidad de información contradictoria que manejan los consultores, incluyendo la de Internet, así como a la existencia de amplias y variadas interpretaciones de conceptos de uso común, debido a la heterogeneidad de los campos de aplicación y de usuarios".

En el trabajo que se presenta a continuación se muestra sin embargo la gran utilidad de estas nuevas tecnologías para una tarea específica: la actualización y ampliación de la zonificación geotécnica de la cuenca de México. La presente tesis está dividida en seis capítulos y cinco anexos. Se incluye un resumen de los resultados obtenidos en el trabajo.

Después de un capítulo introductorio que se refiere al planteamiento, a los antecedentes, a los objetivos y a la metodología general del trabajo, el capítulo 2: "Marco Geográfico", se ocupa de la descripción de la localización de la unidad de estudio y análisis, así como de presentar toda la información recopilada que permitió sintetizar las características esenciales que definen la naturaleza de todos los rasgos geográficos de la unidad de estudio.

El capítulo 3: "Marco Físico" está orientado a fundamentar la naturaleza y las características de las estructuras y materiales del subsuelo que integran a la unidad de estudio y que se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de ella. Es a través del contexto geológico, geofísico, geomorfológico, hidrográfico y geotécnico así como de mediciones y observaciones de índole diferente que fue posible fundamentar y establecer la metodología empleada para poder describir tanto la superficie como el subsuelo, lo que condujo a la definición y elaboración de la zonificación geotécnica.

El capítulo 4 aborda la labor de síntesis en tres apartados: descripción espacial de la "zona sur y poniente", contribuciones a la zonificación y propuesta de zonificación geotécnica. Esto último, se alcanza mediante un estudio y análisis preliminar y de detalle a través de dos marcos de referencia que permiten describir el entorno y la estructura natural del subsuelo de la cuenca de México. Estos marcos son: el Físico y Geográfico. El marco físico permite con la ayuda del geográfico hacer resaltar y fundamentar rasgos generales, características, procesos y fenómenos que presenta y experimenta el subsuelo en la Cuenca.

Los trabajos presentados aquí no son desarrollos exclusivos del autor, pero fueron ideados, dirigidos y orientados por el mismo y forman parte de los trabajos conjuntos que se han realizado para proyectos en colaboración con estudiantes de tesis, académicos e investigadores del Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería, UNAM.

1.2 Antecedentes

Sobre la base de información recopilada hasta el año de 1952, se zonificó a la ciudad, atendiendo a la composición del subsuelo, es decir, se elaboró la primera zonificación geotécnica (Marsal, J., 1952) del área urbana de aquella época (Fig 1.1).

Se consideraron cuatro regiones distintas:

Zona A, formada por terrenos limo-arenosos compactos, conglomerados o derrames basálticos, típicos de Las Lomas, parte de Tacubaya, Mixcoac y El Pedregal.

Zona B, de transición entre la anterior y el Lago de Texcoco, en la que pueden encontrarse mantos de arcillas en la parte superficial, relativamente de poco espesor (5 a 10m), de composición y características muy variables; debajo de los cuales se encuentran depósitos de aluvi3n gruesos y compactos.

Zonas C y D son semejantes; las diferencias entre ambas se deben principalmente, al efecto de cargas superficiales y perturbaciones ocasionadas por el bombeo en los acuíferos profundos. En esta parte del lago de Texcoco, la corteza arcillosa, extraordinariamente compresible, tiene un espesor medio de 40m.

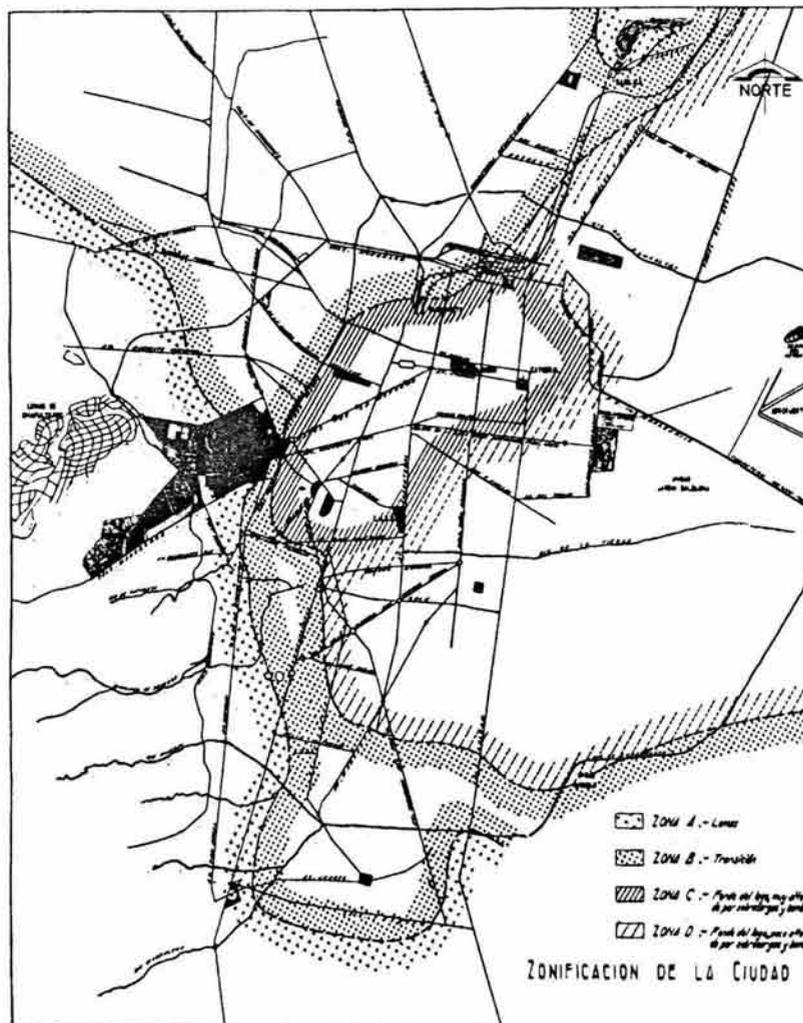


Fig 1.1 Zonificación geotécnica 1952

En esta primera zonificación se da el nombre a las zonas A y B, de "Lomas" y "Transición" respectivamente, sin embargo a las zonas C y D aún no se da un nombre específico, llamándolas: "Fondo del lago, muy alterado por sobrecargas y bombeo" y "Fondo del Lago, poco alterado por sobrecargas y bombeo", respectivamente.

Pocos años después, se recopila mayor cantidad de información geotécnica proveniente de investigaciones realizadas de 1947 a 1959; la recopilación y el análisis del conjunto de datos se confiaron al Instituto de Ingeniería. Con estos datos se zonificó atendiendo principalmente a las propiedades de los materiales que se encontraron en sondeos perforados hasta una profundidad de 50m o menor, llegando en algunos puntos hasta 100m (Marsal, R. y Mazari, M., 1959).

La zonificación geotécnica (Fig 1.2) se define de la siguiente manera:

El nombre de **zona de lomas** se da al derrame basáltico de El Pedregal (lavas del Xitle) y a las faldas de la serranía de Las Cruces, debido a su altitud relativa, que presentan generalmente condiciones favorables para cimentar estructuras; la capacidad de carga del terreno es elevada y no existen capas de arcillas compresibles que puedan ser causa de asentamientos diferenciales de gran magnitud.

La **zona de transición** la localizan entre las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco, donde las condiciones estratigráficas del subsuelo varían en forma extraordinaria de un punto a otro. En general, se tienen superficialmente los depósitos arcillosos o limosos orgánicos de la formación Becerra, cubriendo a estratos de arcilla volcánica muy compresible y de espesor variable, intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, los cuales descansan sobre potentes mantos en los que los materiales predominantes son la grava y la arena.

Llaman **zona del lago** a las fronteras interiores 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, un sondeo de esta zona exhibe los siguientes estratos: **1**, depósitos areno-arcillosos o limosos, con abundancia de restos arqueológicos, o, bien rellenos artificiales que en algunos puntos de la ciudad llegan hasta 10m de profundidad; **2**, arcillas volcánicas extraordinariamente compresibles, de variados colores y consistencias entre blanda y media, intercaladas con pequeñas capas o lentes de arena; su potencia total varía de 15 a 32m; **3**, la primera capa dura, de unos 3m de espesor, constituida por suelos arcillo o limo-arenosos, compactos y rígidos; **4**, arcillas volcánicas de características semejantes a las de la formación superior, aunque más comprimidas y resistentes; este manto tiene una potencia comprendida entre 4 y 14m; **5**, depósitos de arena con grava, separados por estratos de limo o arcilla arenosa. En algunos lugares se ha encontrado una tercera formación compresible integrada por arcillas volcánicas, a 65m de profundidad aproximadamente.

Para esta última zona, los autores tomaron en consideración que la estratigrafía antes definida puede sufrir variaciones importantes, debido principalmente, a la historia de las cargas aplicadas en la superficie del terreno; por tanto, subdividieron la zona del lago en dos regiones. La primera abarca la antigua traza de la ciudad, refiriéndose a la zona ocupada por los monumentos aztecas y de la Colonia; la segunda pertenece a la parte del área urbana que, en aquella época, no había experimentado cambios sensibles debido a que las cargas actuantes en la superficie eran moderadas o nulas.

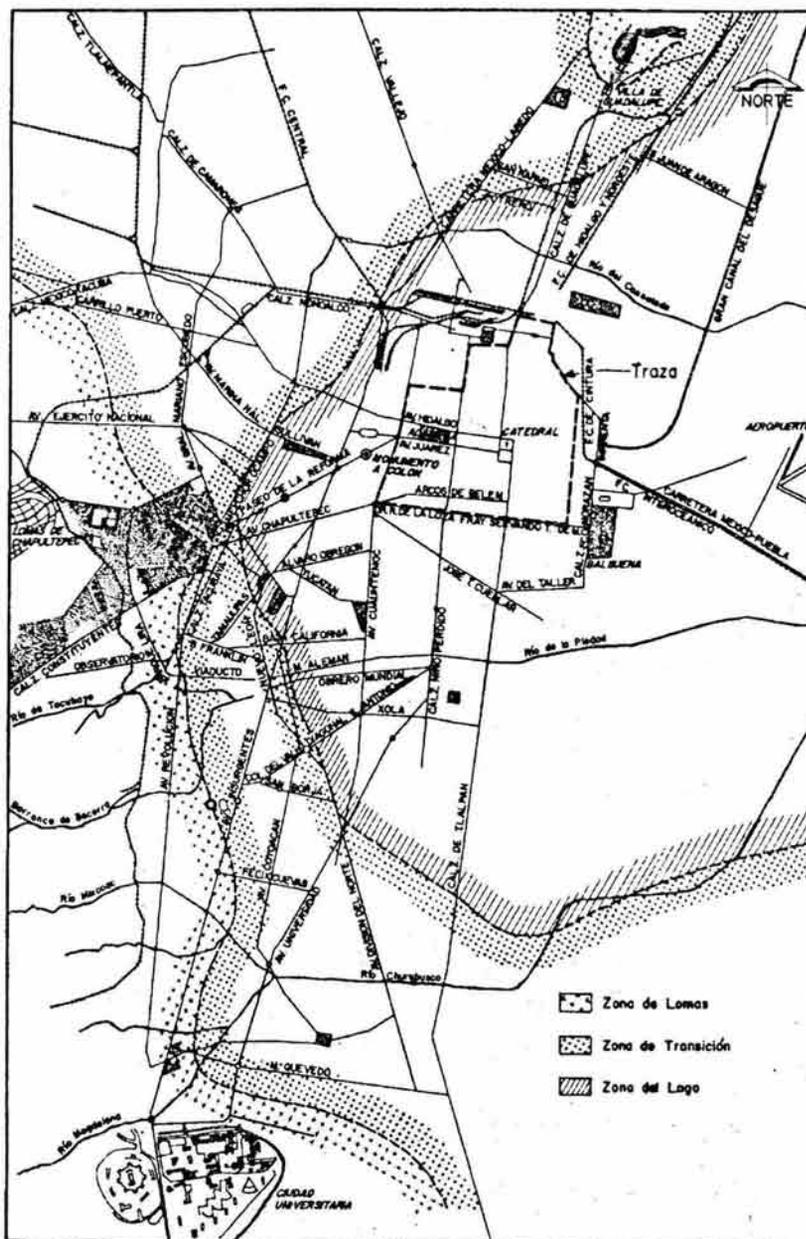


Fig 1.2 Zonificación geotécnica 1959

En el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 9 de febrero de 1966, se propone una zonificación geotécnica diferente de las antes mencionadas, la cual solo se divide en zonas de baja y alta compresibilidad, llamada en dicho reglamento "Plano de Zonas de Compresibilidad de la Ciudad de México, D.F." (Fig 1.3) y "Plano de Zonas de Compresibilidad del Distrito Federal" (Fig 1.4). A continuación se presenta el fragmento del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal mencionado;

Capítulo XXV.- Cimentaciones
Artículo 190.- Zonas

Para la aplicación de este capítulo y desde el punto de vista de la composición del subsuelo, se considera el territorio del Distrito Federal dividido en zonas de alta compresibilidad y de baja compresibilidad, de acuerdo con los "Plano de Zonas de Compresibilidad de la Ciudad de México, D.F." y "Plano de Zonas de Compresibilidad del Distrito Federal", que se insertan a continuación:

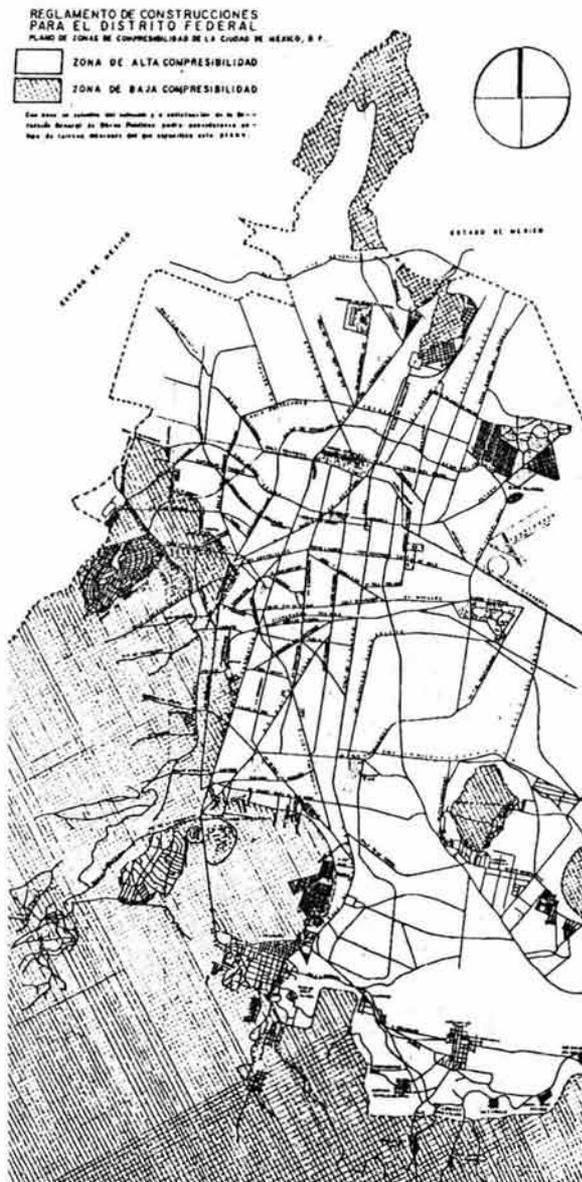


Fig 1.3 Zonificación geotécnica 1966

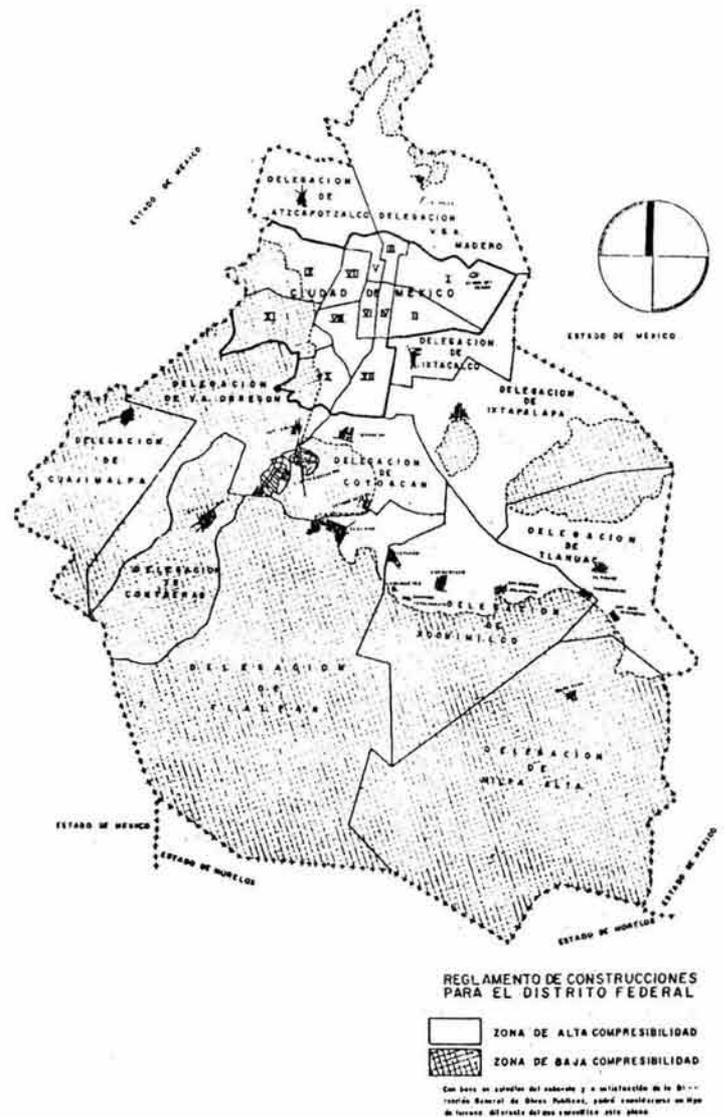


Fig 1.4 Zonificación geotécnica 1966

En 1978, Raúl J. Marsal presenta una zonificación geotécnica, la cual fue tomada del original número CH-G1003 de la Comisión de Aguas del Valle de México de noviembre de 1968, elaborado por J.J. Schmitter (Fig 1.5), basada en la geología según F. Mooser (1956), diversos sondeos realizados en la época y la disposición de las grandes masas observadas superficialmente.

En esta zonificación geotécnica se distinguen tres áreas importantes con los nombres de: lacustre, aluvial y pétreo, además se mencionan las zonas de transición que pueden ocurrir en las fronteras de las formaciones pétreo, aluvial y lacustre, estableciendo una distinción entre Transición progresiva, Transición interestratificada y Transición abrupta. Se da en dicha publicación comentarios para cada zona:

Zona lacustre: Debido a la magnitud e importancia de las construcciones que se encuentran en ella, se tiene información estratigráfica y de propiedades mecánicas confiable. Con motivo de los estudios efectuados por el Proyecto Texcoco ampliados por la Comisión del Lago Texcoco, datos del mismo tipo se han extendido a la parte central de la cuenca, abarcando el área de El Caracol al Norte, el Gran canal de Desagüe al Oeste, la zona de Teotihuacán- Texcoco-Chiconautla al Este y el bordo Xochiaca al Sur. La información es escasa y dispersa en las zonas lacustres de Xochimilco y Chalco, al Sur y Sureste respectivamente.

Zona aluvial: En esta zona se tiene abundantes datos de estratigrafía, particularmente hacia el Norte y Noroeste de la ciudad, concluyendo que todo esfuerzo de establecer correlaciones de propiedades y secuencia de formaciones está condenado al fracaso por la heterogeneidad de materiales e historia de su deposición.

Zona pétreo: Cambiante por los diferentes tipos de rocas que pueden identificarse en las partes altas (tobas, lavas, escoria volcánica, etc.)

Transición progresiva: En que la formación rocosa aparece cubierta por depósitos de origen aluvial, a su vez subyacentes a las capas más recientes de arcilla lacustre.

Transición interestratificada: Característica de regiones en las que las fases aluvial y lacustre se suceden en forma alternada, dando lugar a la intercalación de mantos blandos arcillosos con otros de matriz granular contaminados por finos, generalmente más duros y más resistentes, también el caso de derrames de lava sobre arcillas o suelos aluviales, cubiertos por otras capas más recientes de la formación lacustre o acarreo fluviales.

Transición abrupta: Se distingue porque los depósitos lacustres están en contacto con la formación rocosa, tapizada por derrubios o suelo residual.

Por ultimo, Raúl J. Marsal señala que la delimitación de las zonas lacustre, aluvial, pétreo y sus respectivas transiciones es aproximada, dado que la información recabada sobre estratigrafía y propiedades es reducida y dispersa; casi sin excepción, los sondeos realizados corresponden a estudios de predios en que se proyectaron obras de importancia.

En el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 14 de diciembre de 1976, se edita la siguiente zonificación geotécnica (Fig 1.5).

De acuerdo con el artículo 262, el Distrito Federal se encuentra dividido en cuatro zonas cuyas definiciones son las siguientes:

Zona I, con suelos compresibles de espesor $H < 3m$;

Zona II, con suelos compresibles de espesor $3m \leq H < 20m$;

Zona III, con suelos compresibles de espesor $H \geq 20m$; y

Zona IV, poco conocida desde el punto de vista de la mecánica de suelos.

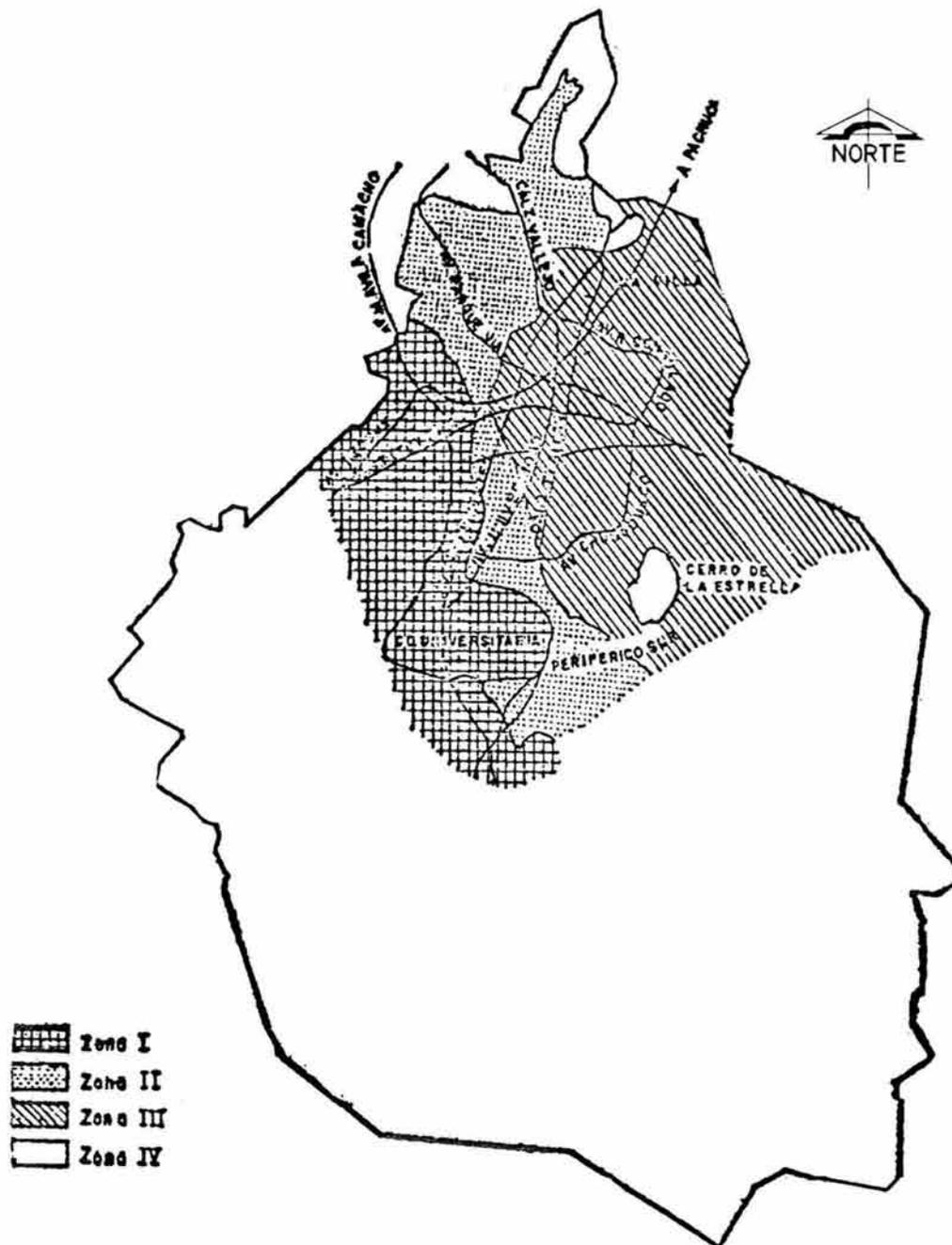


Fig 1.5 Zonificación geotécnica 1976

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 " Vª Reunión nacional de mecánica de suelos" y en la zonificación propuesta, así como en la información que se encuentra en dicho libro; comparó la zonificación 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 Fig 1.6, se presenta la división resultante en zonas lacustre, de transición y pétreas.

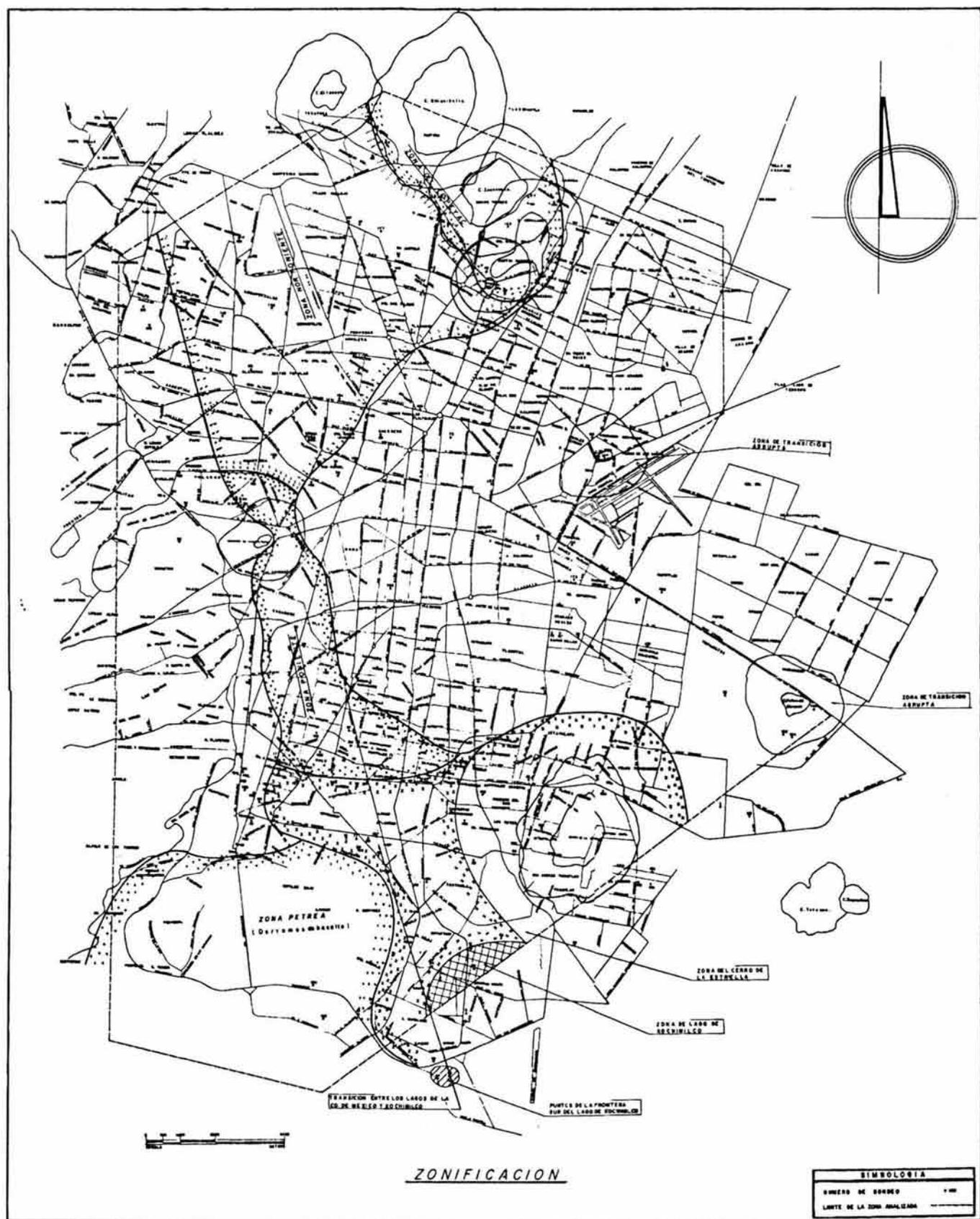


Fig 1.6 Zonificación geotécnica 1978

COVITUR (1986) presenta una zonificación geotécnica (Fig 1.7) del área urbana que sigue los lineamientos presentados por Marsal y Mazari (1959), basada en las propiedades de compresibilidad y resistencia de los depósitos característicos de la Cuenca: lacustres, aluviales y volcánicos, y en información estratigráfica que fue fundamentada en todas las publicaciones disponibles sobre ese tema y en la derivada de los estudios geotécnicos realizados para las distintas líneas del Metro.

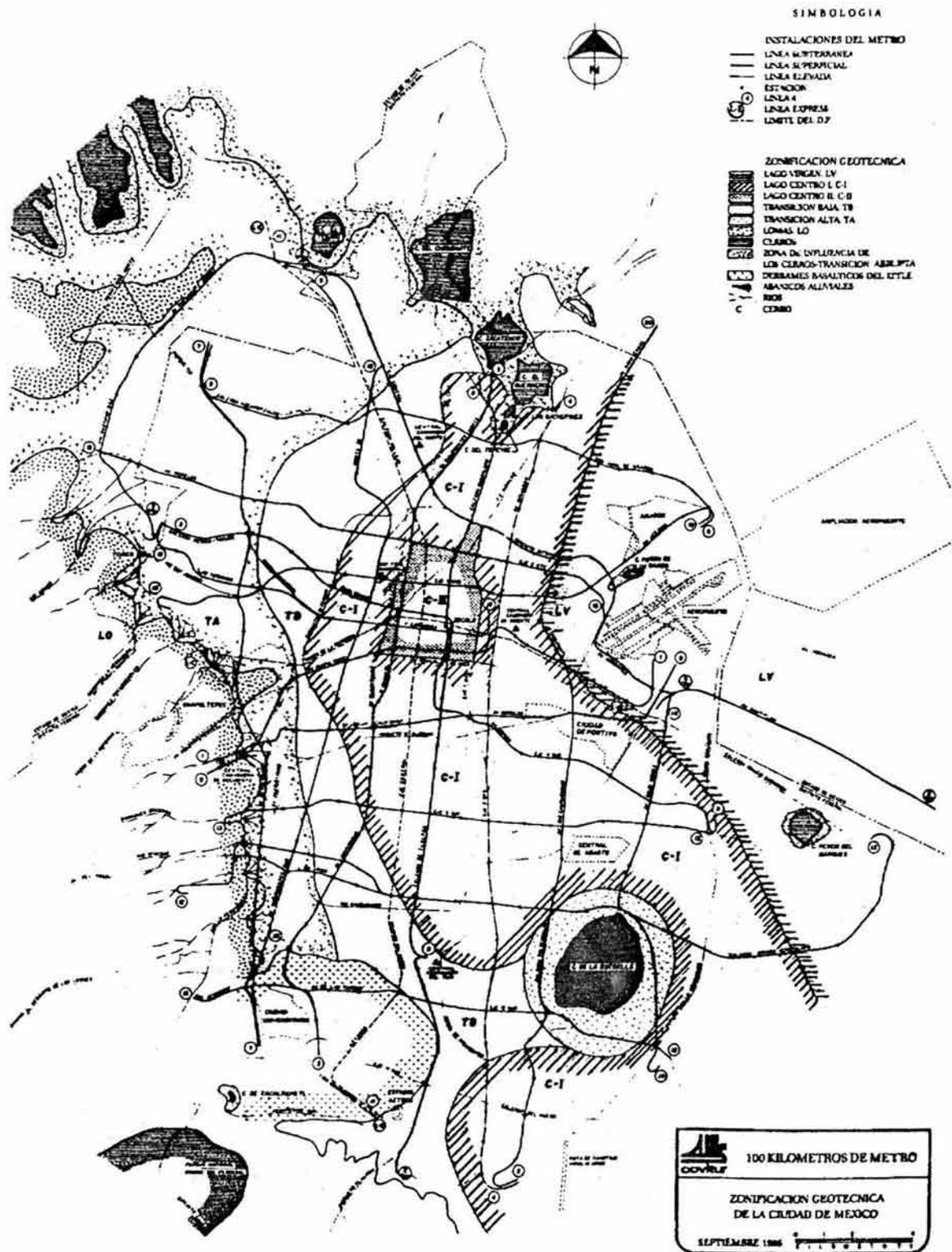


Fig 1.7 Zonificación geotécnica 1986

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, publicadas el 12 de noviembre de 1987, presentan la siguiente zonificación geotécnica (Fig 1.8).

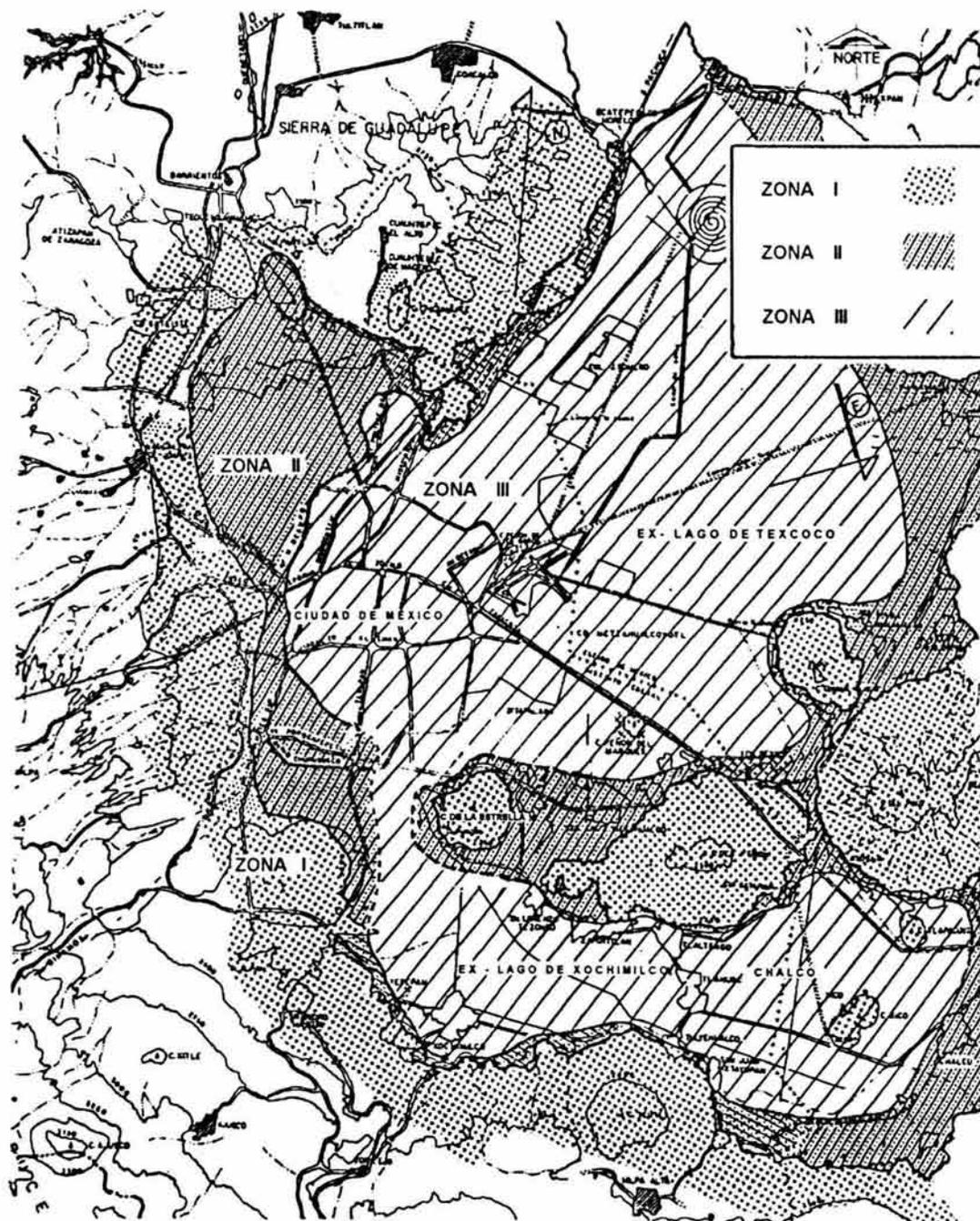


Fig 1.8 Zonificación geotécnica 1987

De acuerdo con el artículo 219, 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 20m 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.

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 (Fig 1.9) fue publicada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, el 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, sin embargo se introducen ciertas modificaciones en la cercanía del Cerro de la Estrella.

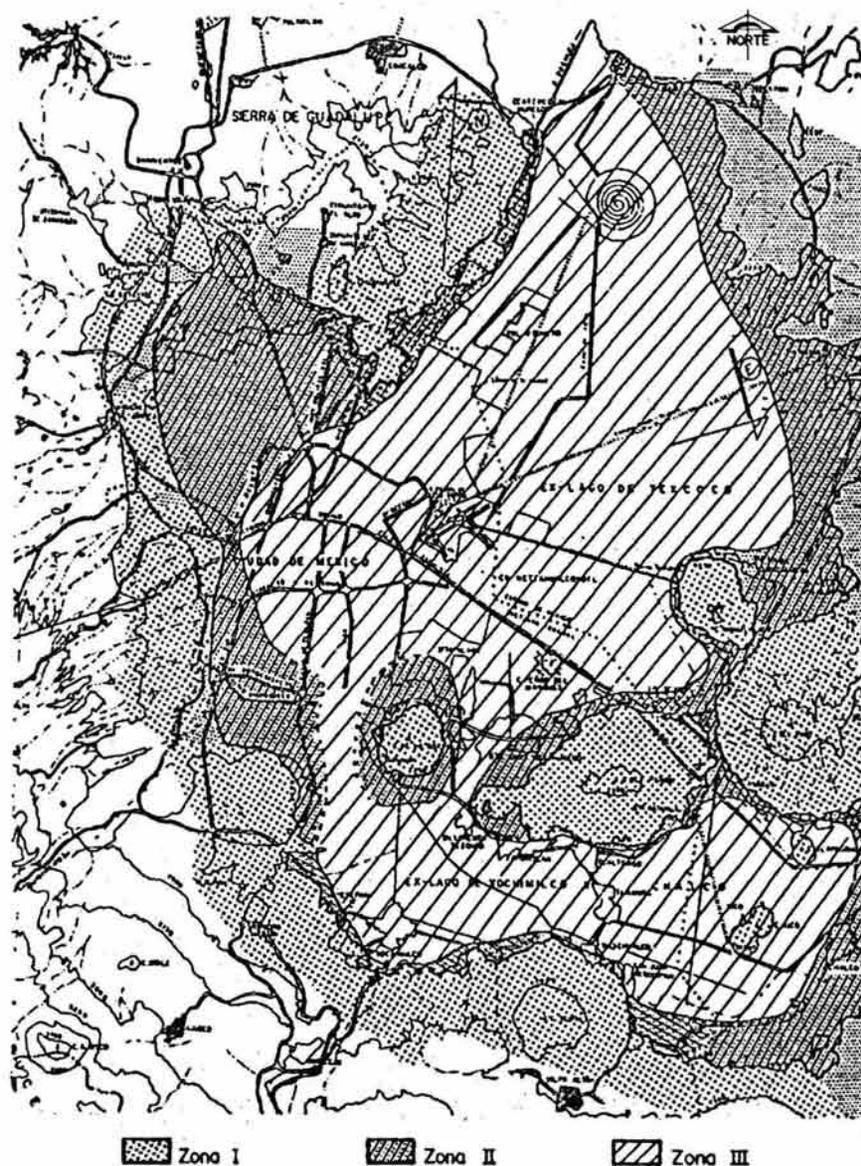


Fig 1.9 Zonificación geotécnica 1995

Esta última zonificación geotécnica fue el resultado de algunas modificaciones de 1987, introducidas por Mendoza (investigador del Instituto de Ingeniería, UNAM); dicha zonificación ya publicada por el Instituto de Ingeniería en julio de 1993, solamente fue oficial a partir de su publicación en las NTC de 1995.

Después de esta reseña histórica sobre la evolución de la zonificación geotécnica es posible observar que conforme se tenga mayor información sobre el subsuelo son necesarias la actualización y la ampliación de dicha zonificación.

1.3 Objetivo

A pesar del enorme esfuerzo que se ha efectuado en el pasado por mejorar el estado del arte del conocimiento sobre el subsuelo de la ciudad de México, se hace necesario profundizar aún más sobre él mismo. Para ello, es necesario que se analice y estudie de manera sistemática y permanente todos los elementos y características físico-geográficas acerca del entorno o estructura natural de la cuenca de México mediante la automatización de la información.

En esta dirección, el objetivo central del presente trabajo es generar nuevos conocimientos acerca del subsuelo de la Cuenca a través de actualizar y ampliar el mapa de zonificación geotécnica. Esto implica sintetizar y describir la distribución de los materiales del subsuelo a través de dos marcos de referencia: el Físico y Geográfico. El marco físico permite fundamentar los estudios de interpretación y análisis general y de detalle para la definición del mapa de zonificación bajo el contexto proporcionado por la Geología, incluyendo la Geomorfología, la Geofísica, la Hidrografía, la Orografía y la Geotecnia. Estos estudios se apoyan en el marco geográfico (Topografía, Imágenes de Satélites Artificiales, etc.) para hacer resaltar las características físicas y los rasgos geométricos generales del entorno natural del territorio de la Cuenca y en esta forma definir la naturaleza y la distribución espacial de los depósitos de suelo, rellenos aluviales, afloramientos de masas rocosas y estructuras geológicas así como la potencia de estratos u horizontes típicos.

Uno de los objetivos particulares para alcanzar el objetivo central del presente trabajo, fue diseñar y poner en servicio un Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos denominado SIG-SG, antes CATSON, Catalogo de Sondeos (1989 –1992). Este sistema tiene como objetivo almacenar sistemática y permanentemente la información puntual disponible proveniente de exploraciones directas del subsuelo, a través de los datos obtenidos en los sondeos geotécnicos de diferentes tipos (es decir, datos de la variación con la profundidad de la estratigráfica y propiedades índice, mecánicas y dinámicas). Por ahora y desde hace ya varios años, la información de los sondeos geotécnicos se toma únicamente de estudios de Mecánica de Suelos, efectuados en diferentes épocas por dependencias o empresas que laboran en la Cuenca de México. Las posibilidades de aplicación del Sistema SIG-SG son muy numerosas y se describen ampliamente en los diez incisos del subcapítulo 3.5.

1.4 Alcance

Se pretende que la información presentada sea una síntesis global de la información existente respecto al subsuelo de la cuenca de México. Se incluyen aspectos geológicos, geofísicos, geomorfológicos, hidrográficos, orográficos y geotécnicos. Se proporciona una extensa bibliografía que permitirá al lector profundizar en aquellos temas que sean de su interés acerca del subsuelo, así como una serie de anexos que le permitirán iniciarse o complementar sus conocimientos acerca de las técnicas, modelos y métodos de análisis que proporcionan las herramientas de análisis espacial aquí empleadas.

También se propone un marco metodológico general, el cual puede extenderse hacia otras disciplinas o áreas de las Ciencias de la Tierra e incluso a otros territorios para actualizar y generar nuevos conocimientos acerca del subsuelo con el fin de proceder a su integración y presentación en forma sintetizada en los mapas de las zonificaciones geotécnicas mediante la modelación espacial que se ocupa de construir modelos o representaciones simplificadas de cualquier medio geográfico de algún territorio y que queda inscrita en el contexto general de las tecnologías de la Geoinformática. Finalmente, se estudia y analiza la distribución espacial de los materiales en planta y en cortes a lo largo de ejes de estudio.

1.5 Metodología

En este inciso se describe la metodología establecida para la definición de la zonificación geotécnica. Una exposición general acerca de los marcos de referencia empleados para la zonificación es el tema de los subincisos 1.5.2 y 1.5.3; sin embargo, la exposición detallada de cada uno de los elementos que conforman los marcos de referencia se encuentra en el segundo y tercer capítulo. El subinciso 1.5.4 describe los criterios adoptados para establecer la zonificación. La parte correspondiente al análisis que permite definir los elementos empleados para la zonificación, y la labor de síntesis final que debe realizarse se discuten en el inciso 1.5.5. Esta labor de síntesis de los trabajos de descripción de las características y distribución de los materiales del subsuelo de las zonas geotécnicas, que da como resultado la zonificación geotécnica, se discute con mayor detalle en el capítulo 4.

1.5.1 Planteamiento

Para la definición y actualización del mapa de zonificación geotécnica de la cuenca de México, se ha considerado necesario recurrir, desde hace ya varios años, a una campaña sistemática e intensa de recopilación de documentos y estudios de muy distinto índole con el fin de tener un conocimiento general acerca de la estructura físico-geográfica de la Cuenca, y proceder a su integración y presentación en forma sintetizada en el mapa de la zonificación geotécnica.

La información recopilada, procesada e incorporada en forma sintética en el mapa de zonificación geotécnica, está fundamentada en todas las publicaciones disponibles sobre ese tema y en más de cinco mil perfiles de sondeos geotécnicos, veinticinco perfiles de velocidad de onda al corte y cuatrocientos pozos profundos para agua que se encuentran almacenados en formato digital en el banco de datos denominado Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG). Para conocer y comprender la genética y naturaleza de los depósitos de suelo, rellenos aluviales y afloramientos de rocas y la estratigrafía de los mantos sobre los que se edifica la ciudad de México, es necesario salir de dos marcos de referencia: el marco geográfico y el físico con el fin de lograr una visión de la colosal complejidad que reviste la estructura del territorio de la Cuenca (Tabla 1.2).

Tabla 1.2 Elementos considerados para la definición de una zonificación geotécnica.

MARCO GEOGRÁFICO	MARCO FÍSICO
<ul style="list-style-type: none"> - Información histórica - Toponimia - Cartografía - Topografía - Fotografías aéreas - Imágenes de satélite 	<ul style="list-style-type: none"> - Geología - Geomorfología - Geofísica - Hidrografía - Geotecnia

Para enfrentar el reto de la enorme labor que implica el manejo, almacenamiento, procesamiento y tratamiento eficiente de la abundante información sobre los múltiples estudios de los que ha sido objeto el extenso territorio de la cuenca de México, se hizo necesario, desde hace varios años, reunir la infraestructura física con que cuenta actualmente el Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Fig 1.15).

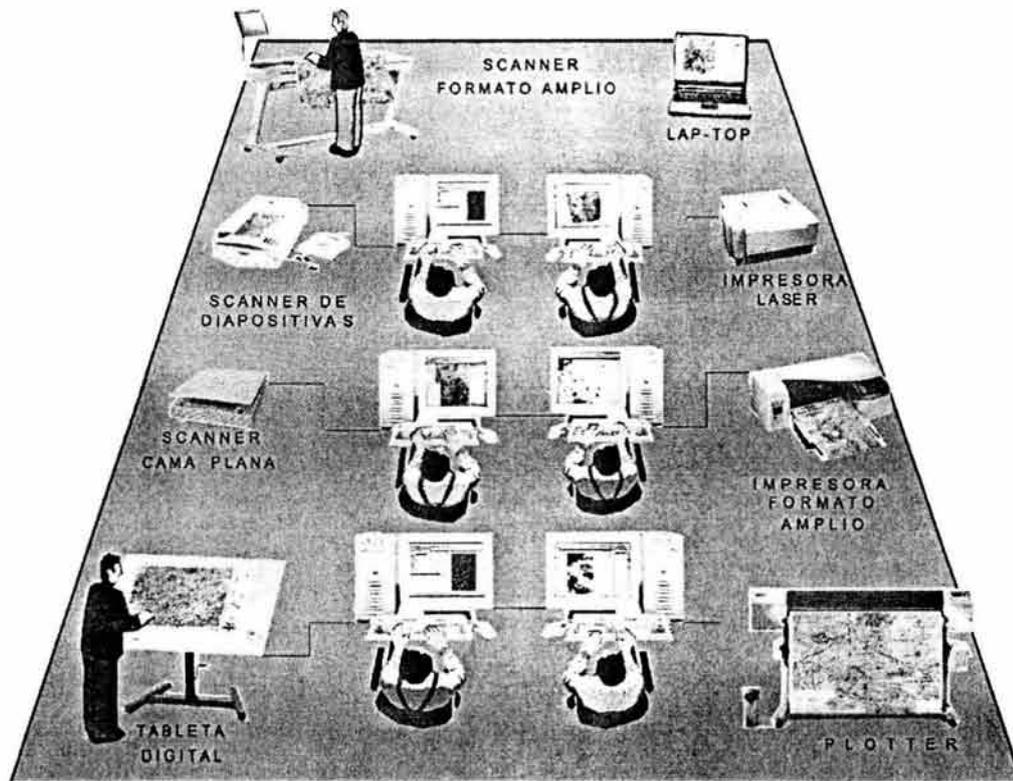


Fig 1.15 Infraestructura física del Laboratorio de Geoinformática

1.5.2 Marco geográfico

Este marco que empleara el hombre antiguo y que perdura hasta nuestros días, es el soporte clásico de información acerca de la forma y de las dimensiones del entorno general de un territorio; es decir, está constituido por los documentos informativos acerca del territorio a través del idioma espacial, el cual se encarga de consignar los rasgos u objetos geográficos (ríos, laderas, calderas, conos, vías de comunicación, otro) mediante la representación de puntos, líneas y áreas que, empleando diferentes símbolos y colores, facilitan su interpretación y lo presentan así, en un idioma clásico o universal.

Este marco es el soporte de información y comunicación más usualmente empleado en nuestra civilización, por permitir una lectura e interpretación más fácil y estructurada que cualquier otra forma de comunicación científica y se recurre a él para enmarcar los estudios realizados por los especialistas de las distintas disciplinas de las Ciencias de la Tierra. Resulta ser un medio útil para expresar la información de sus estudios de interpretación y análisis y las conclusiones de sus investigaciones.

Este marco incluye también imágenes de satélite y fotografías aéreas digitales, las cuales son documentos o recursos tecnológicos relativamente novedosos y usados ampliamente hoy en día como método preliminar de reconocimiento y adquisición de datos sobre el entorno general de un territorio, sin necesidad de ir al campo; es decir, complementan y enriquecen las tareas de gabinete y campo de los especialistas. Finalmente, se incluye un aspecto pocas veces empleado o en desuso por los especialistas: la toponimia. Este elemento tiene una gran relevancia en la cuenca de México debido a la tradición prehispánica de asignar a los lugares nombres descriptivos de sus características físicas y, frecuentemente, geológicas.

1.5.3 Marco físico

Este proporciona una visión amplia del conocimiento acerca de las características y rasgos de la estructura física de la Cuenca de México y facilita la comprensión de la naturaleza y genética de la Cuenca.

Este marco consiste en información proveniente de la Geología, Geomorfología, Geofísica, Hidrografía y Geotecnia que en todo momento puede combinarse con dos o más de los seis elementos que conforman al Marco Geográfico. Así, se hacen interactuar los elementos de un marco con el otro para relacionarlos con el propósito de acentuar y visualizar ciertos procesos para revelar condiciones o simplemente indicar eventos ocurridos de interés geotécnico. Esta información se plasma en diferentes documentos cartográficos o laminas; intentando siempre elaborar documentos con información explícita y descriptiva para fines de zonificación.

Esto ayuda a complementar y enriquecer el desarrollo de las múltiples investigaciones encaminadas a describir la distribución espacial de los materiales del subsuelo como son la definición de los extensos espacios cubiertos por los rellenos aluviales (los cuales se clasifican en: subcuencas, llanuras, terrazas y abanicos aluviales), depósitos de suelo, afloramientos superficiales de masas rocosas, así como de formaciones geológicas previamente documentadas de la corteza terrestre; y por último, permite definir la potencia o espesor de estratos u horizontes típicos.

1.5.4 Criterios adoptados

Se adoptaron en el presente trabajo de zonificación los criterios establecidos en el Artículo 219 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (1997), Capítulo VIII de Seguridad Estructural. Por tal motivo, el mapa de zonificación geotécnica conserva la sencillez de la división clásica en tres zonas: Lomas, Transición y Lago.

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 compresibles, 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 los 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 construcciones 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.

Se consideró adecuado dividir la superficie de interés en seis zonas de estudio. La primera razón de tal división, es facilitar el trabajo de mostrar o ilustrar los resultados de la descripción de las características de los depósitos de suelo, rellenos aluviales, afloramientos de masas rocas y la estratigrafía. La segunda razón, es la gran extensión que abarca la Cuenca: aproximadamente 9,600 km². La integración de la descripción de las distintas zonas geotécnicas da como resultado la zonificación geotécnica global.

1.5.5 Análisis espacial y síntesis

El análisis espacial realizado para definir el mapa de zonificación geotécnica se basa tanto en las funciones ordinarias como en la modelación espacial que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (Fig 1.16).

Las funciones y la modelación facilitaron la descripción de las características espaciales de los extensos espacios cubiertos por los rellenos aluviales, depósitos de suelos blandos, afloramientos superficiales de masas rocosas de formaciones geológicas previamente documentadas de la corteza terrestre, y la definición de la potencia de estratos u horizontes típicos obtenida través de cortes estratigráficos.

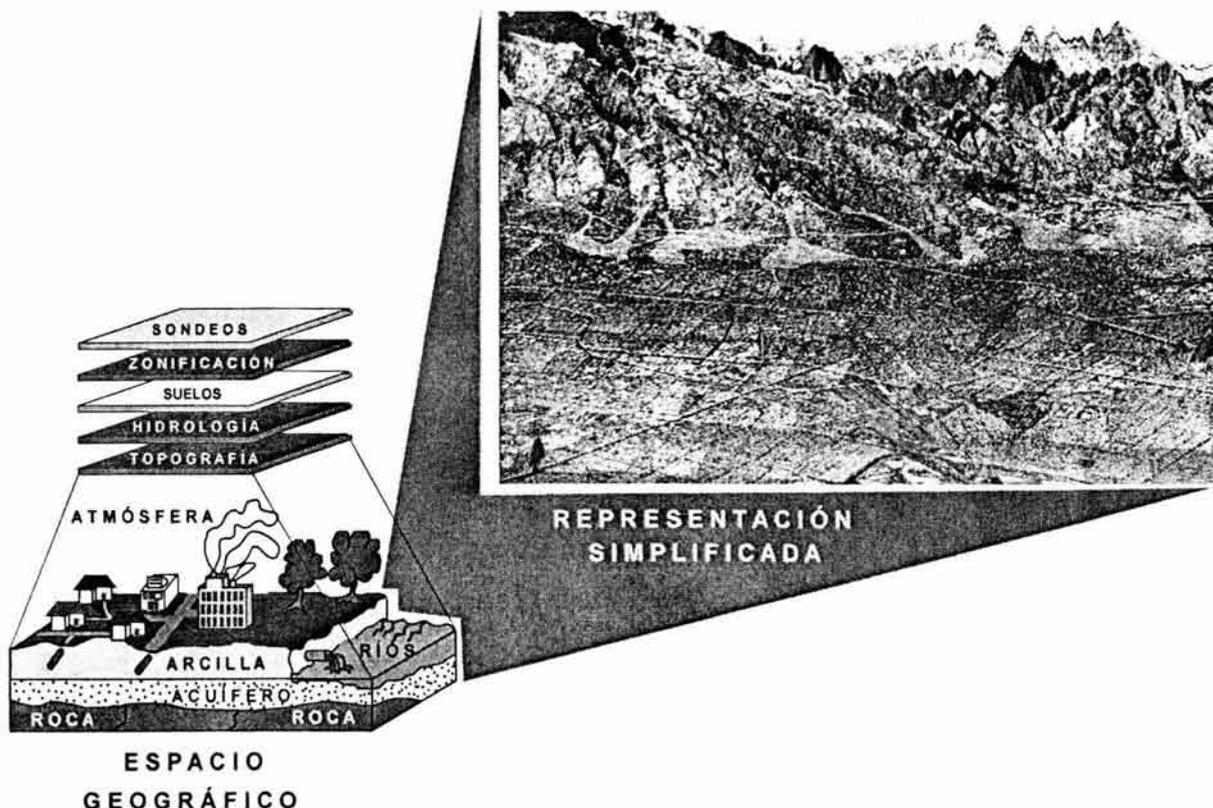


Fig 1.16 Modelo del mundo real, organizado a partir de capas o estratos de información clasificados por temas a partir de un Sistema de Información Geográfica

El primer paso que hay que efectuar antes de iniciar la modelación, es transformar la información analógica a formato digital estándar llamado DXF (Data Exchange File); el segundo paso consiste en la depuración de la información con el fin de personalizarla o arreglarla en capas o estratos para su correcta referenciación geográfica bajo un Sistema de Proyección coherente y sus correspondientes coordenadas geográficas.

Este último aspecto es el que permite el manejo y despliegue simultáneo de dos o más capas o estratos de información; es decir, la *Integración o Composición Vertical de Información*. A esta posibilidad de manejar la información se llama modelación espacial apoyada en un Sistema SIG.

La modelación espacial en un SIG, consiste en integrar o agrupar ordenadamente la información en estratos o capas de diferentes clases o temas con el fin de lograr la mejor interacción entre ellas (según convenga) y, con ello, sintetizar a través de la *Integración o Composición Vertical de Información* algún hecho, resultado o conclusión de un estudio o investigación.

El Modelo de Relieve Sombreado (MRS) es un derivado del Modelo Digital de Terreno (MDT) construido a partir del mapa de curvas de nivel en formato digital, es una de las modelaciones espaciales que se consideran básicas y en muchos casos insustituibles en los estudios con aplicación a las Ciencias de la tierra.

En efecto, la topografía tiene una notable influencia sobre las numerosas variables que intervienen en la dinámica de los procesos endógenos y exógenos; los cuales, originan y modelan a través del tiempo al relieve. Por tal motivo, se ha generalizado el empleo de los MDT en diversos temas de gran interés práctico (Fig 1.17).



Fig 1.17 Modelo de Relieve Sombreado a partir de un Modelo digital de Terreno

El análisis espacial consta de una etapa inicial y otra final:

Etapa de análisis inicial

En esta etapa, se definen las líneas iniciales que dividen el área en tres zonas: Lomas, Transición y Lago. En esta etapa, se realiza una composición vertical de cuatro capas de información; es decir que se despliegan simultáneamente en la pantalla de la computadora: la Geología, Geomorfología, Carta Hidrográfica antigua del Valle de México y la topografía con el propósito de establecer primeramente la línea que delimita la zona de lago de la zona de transición y la segunda, la línea que delimita la zona de transición de la zona de lomas.

Esta integración vertical se realizó, después haber efectuado un simple análisis visual de los mapas de Geología, Geomorfología y de la Carta Hidrográfica del Valle de México de 1900.

La línea que separa la zona de transición de la zona de lomas, se relaciona primeramente con las curvas de nivel que pueden representar el límite de la extensión de la zona lacustre. En la figura 1.18 se muestra la franja que conforman las curvas de nivel 2240 y 2250 msnm. Asimismo, dicha línea se relaciona con la franja conformada en algunos sitios por las zonas de pantanos que circundaban los ex lagos y en otros sitios por los cambios de nivel de los ex lagos en diferentes épocas que originaban trasgresiones y regresiones de dichos lagos; tal y como lo delinea la Carta Hidrográfica antigua del Valle de México (Fig 1.19).

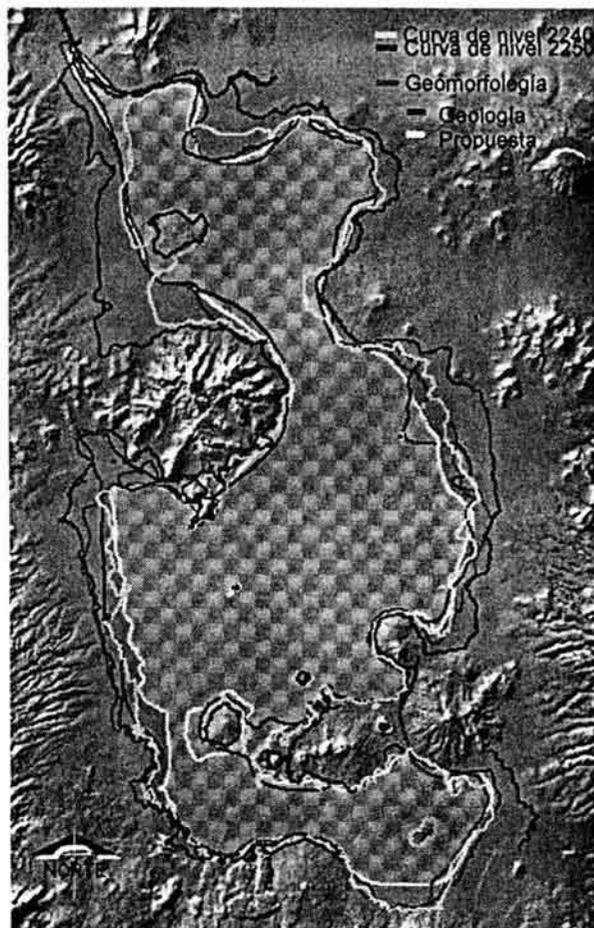


Fig 1.18 Líneas iniciales que separan las tres zonas geotécnicas



Fig 1.19 Carta Hidrográfica, 1900

La interrelación que existe entre la línea que divide la zona de lago de la zona de transición y los límites marcados por los mapas de Geología, Geomorfología y la Carta Hidrográfica es más difícil de establecer puesto que los autores de dichos mapas se basaron principalmente en evidencias superficiales. Como primera aproximación, tomando en cuenta dichos mapas y zonificaciones anteriores se adoptó provisionalmente la línea blanca indicada en la Fig 1.18.

Etapa de análisis final

En esta etapa, se definen las líneas definitivas o finales que dividen al área de interés en tres zonas. Esta etapa consiste en afinar las líneas iniciales que fueron definidas en la etapa inicial del análisis y que delimitan las zonas de lago, transición y lomas con el detalle o precisión que proporciona la cartografía simbólica de gran escala cuya función es visualizar y manejar zonas con gran densidad de datos como la cartografía urbana a nivel de calles, manzanas, plazas y parques, escala 1:10,000, que se muestra en la Fig 1.20.

También, el suavizado o perfeccionado de las líneas iniciales se efectúa con el detalle o precisión que proporciona la variación con la información relativa a la estratigrafía y propiedades índice, mecánicas y dinámicas proveniente de los diferentes tipos de sondeos geotécnicos (cono, SPT, muestreo continuo inalterado, dinámicos, mixtos, otros).

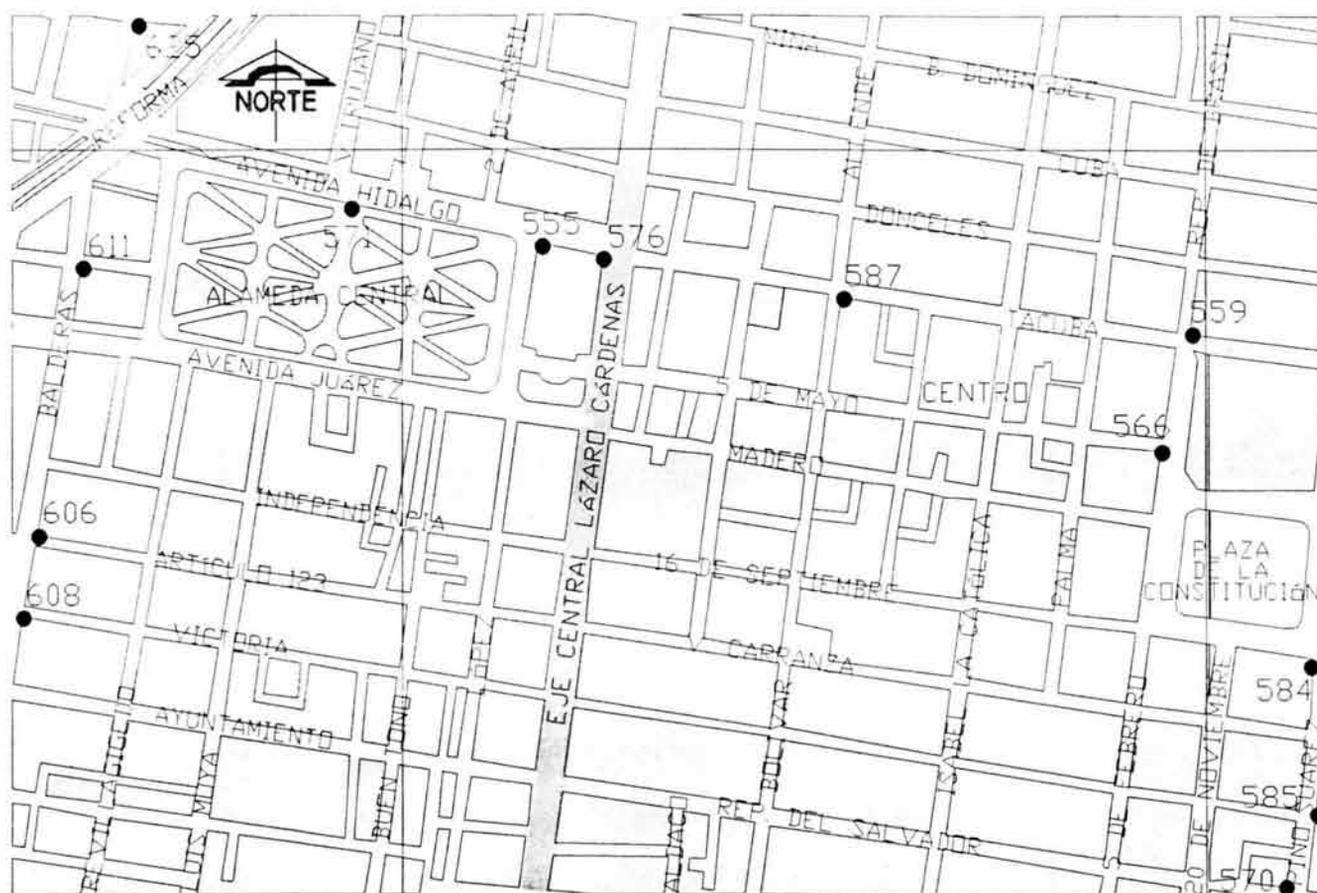


Fig 1.20 Carta urbana, México, D.F.

Otro aspecto importante que se tomó en cuenta para afinar las líneas iniciales es el espesor de los estratos u horizontes típicos, obtenido a través de la elaboración de cortes estratigráficos realizados perpendicularmente a las líneas iniciales

La Topografía, Geología, Geomorfología, Hidrografía, Cartografía Antigua y los otros elementos que integran a los dos marcos de referencia intervinieron para verificar la lógica y consistencia de las nuevas zonas: Lomas, Transición y Lago a través de la descripción de las características espaciales de los rellenos aluviales, depósitos de suelos y afloramientos superficiales de roca de la Cuenca de México.

2. MARCO GEOGRÁFICO

2.1 Localización de la unidad de estudio y análisis

2.1.1 Localización de la cuenca de México

La República Mexicana está dividida por una cadena de montañas volcánicas denominada Eje Neovolcánico Transmexicano, que cruza al país de este a oeste a lo largo de más de 900 km, desde las costas de Colima y Nayarit hasta los litorales del estado de Veracruz, con un ancho que va de 50 a 250 km y se eleva en promedio a 2,500 m (Fig 2.1).

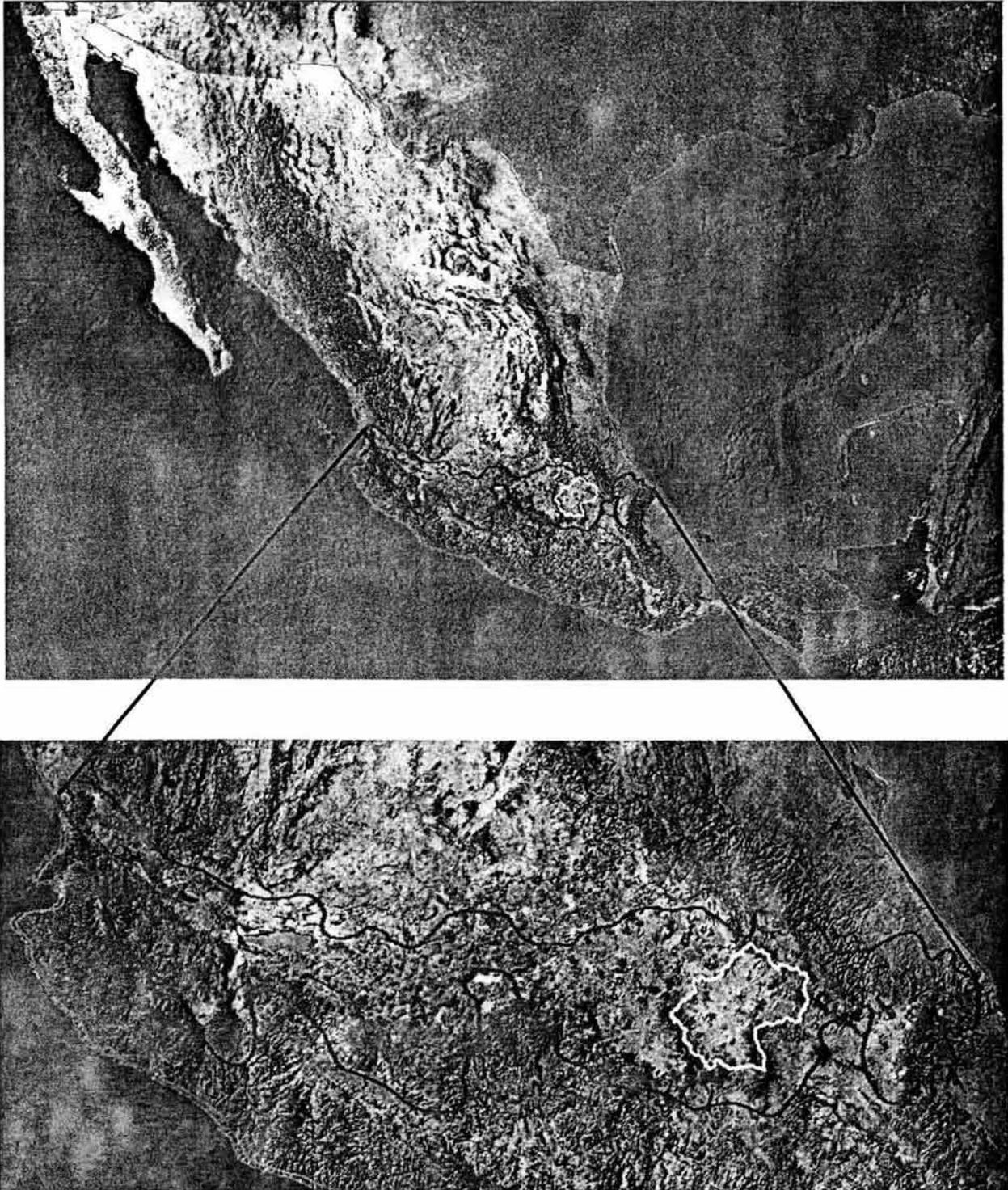


Fig 2.1 Localización de la cuenca de México en el contexto nacional y en el eje Neovolcánico

En esta franja meridional del Altiplano Mexicano se formaron a lo largo del tiempo una serie de planicies a diferentes altitudes, cerradas muchas de ellas, donde se extienden valles como el de Toluca y llanuras planas de naturaleza lacustre como las de Chapala, Pátzcuaro, Cuitzeo y Texcoco.

En general, la corona de montañas que circunda la Cuenca de México ha sido el resultado de procesos geológicos, como la actividad volcánica y el diastrofismo (plegamientos y fallas), derivados del choque de las placas tectónicas. Nuestro país ha sido en gran medida producto de estos procesos, ya que se encuentra dominado por montañas y volcanes. Son pocas las regiones donde no predominan los sistemas montañosos, por ejemplo, la Península de Yucatán, la costa del Golfo de México y algunas planicies en el interior del país. La actividad volcánica del Eje Neovolcánico Transversal es notable. Las montañas están constituidas de rocas volcánicas y lava, que las hacen más resistentes a la erosión. El Eje Neovolcánico Transversal es considerado como la división fisiográfica entre América del Norte y Centroamérica (desde 1940), además de constituir una frontera climática.

La cuenca de México se localiza en el borde de la franja meridional en la parte más alta del sur de la Mesa Central del Altiplano Mexicano y se extiende sobre el Eje Neovolcánico Transversal. Esta cuenca es una de las mayores de la región oriental y se ubica entre los paralelos $19^{\circ} 01' 18''$ y $20^{\circ} 09' 12''$ de latitud norte, y entre los meridianos $98^{\circ} 31' 58''$ y $99^{\circ} 30' 52''$ de longitud al oeste de Greenwich, y comprende una superficie de alrededor de $9,600 \text{ km}^2$ (Fig 2.2).

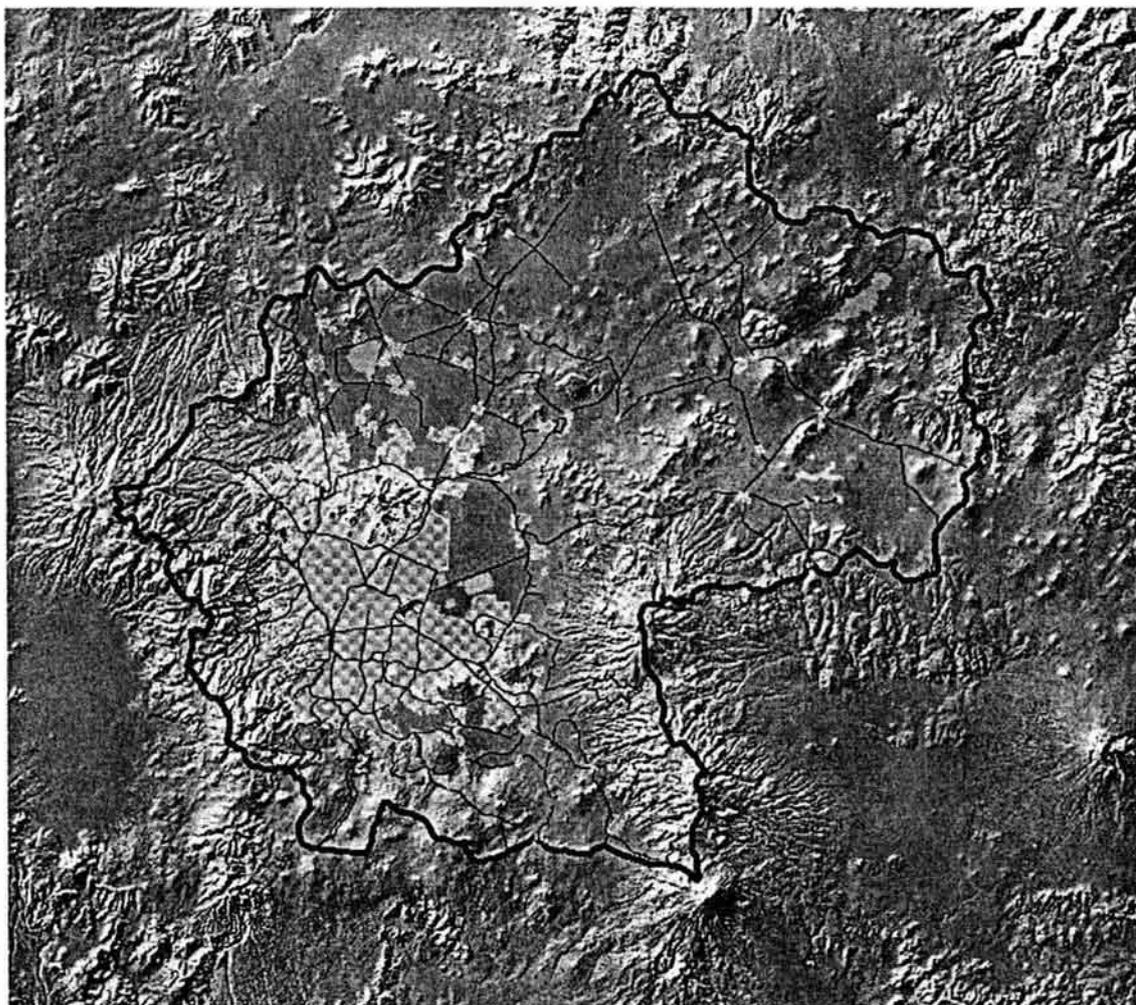


Fig 2.2 Cuenca de México

Tiene una forma semejante a una elipse con ejes mayor y menor, de 110 y 80 km, respectivamente; el mayor de estos ejes está orientado de suroeste a noreste. Por no tener salidas naturales para los escurrimientos que se generan dentro de la misma, constituye una unidad hidrológica cerrada o endorreica. Sin embargo, a finales del siglo XIX se construyó el Gran Canal que le proporcionó una salida artificial. Algunas partes o áreas bajas (2,236 a 2,240 msnm de altitud) que se localizan al interior de la Cuenca son planicies o llanuras de relieve suave donde existían antiguos pantanos y lagos someros, de los cuales el de Texcoco fue el mayor.

Le sigue en extensión la laguna de Zumpango, al noreste, mientras que el lago de Chalco, tercero en importancia, se extinguió prácticamente por completo a principios del siglo XX. Los dos primeros lagos y los canales de Xochimilco, son los últimos vestigios de otros mayores y más numerosos que formaban probablemente un solo cuerpo de agua antes del asiento de la ciudad Azteca, al final de la última época glacial (Fig 2.3).

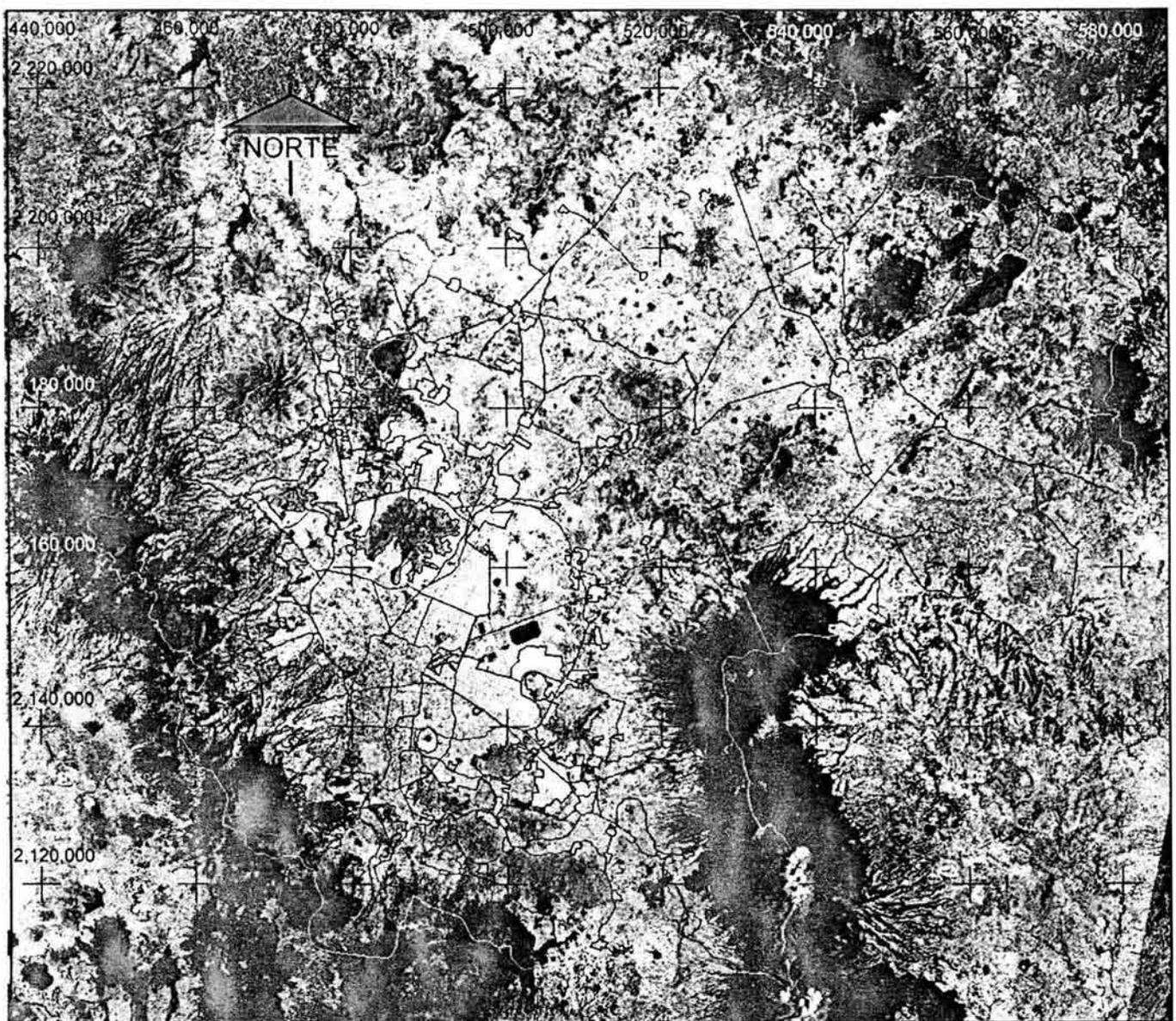


Fig 2.3 Situación actual de la Cuenca de México, composición en falso color 1 2 3 (Imagen de Satélite, proporcionada por el Instituto de Geografía, UNAM)

2.1.2 Concepto de ciudad de México

En la parte sur de la cuenca que se ha descrito, se asienta la ciudad de México. Aunque en realidad no sólo incluye al Distrito Federal, sino también una porción del Estado de México e Hidalgo, en el pasado los términos Distrito Federal y ciudad de México se utilizaron como sinónimos. Ahora, algunos usan la expresión "zona o área metropolitana" o "valle de México" para referirse al área urbana constituida por las 16 delegaciones del Distrito Federal, 56 municipios del Estado de México y un municipio del Estado de Hidalgo (Fig 2.4).

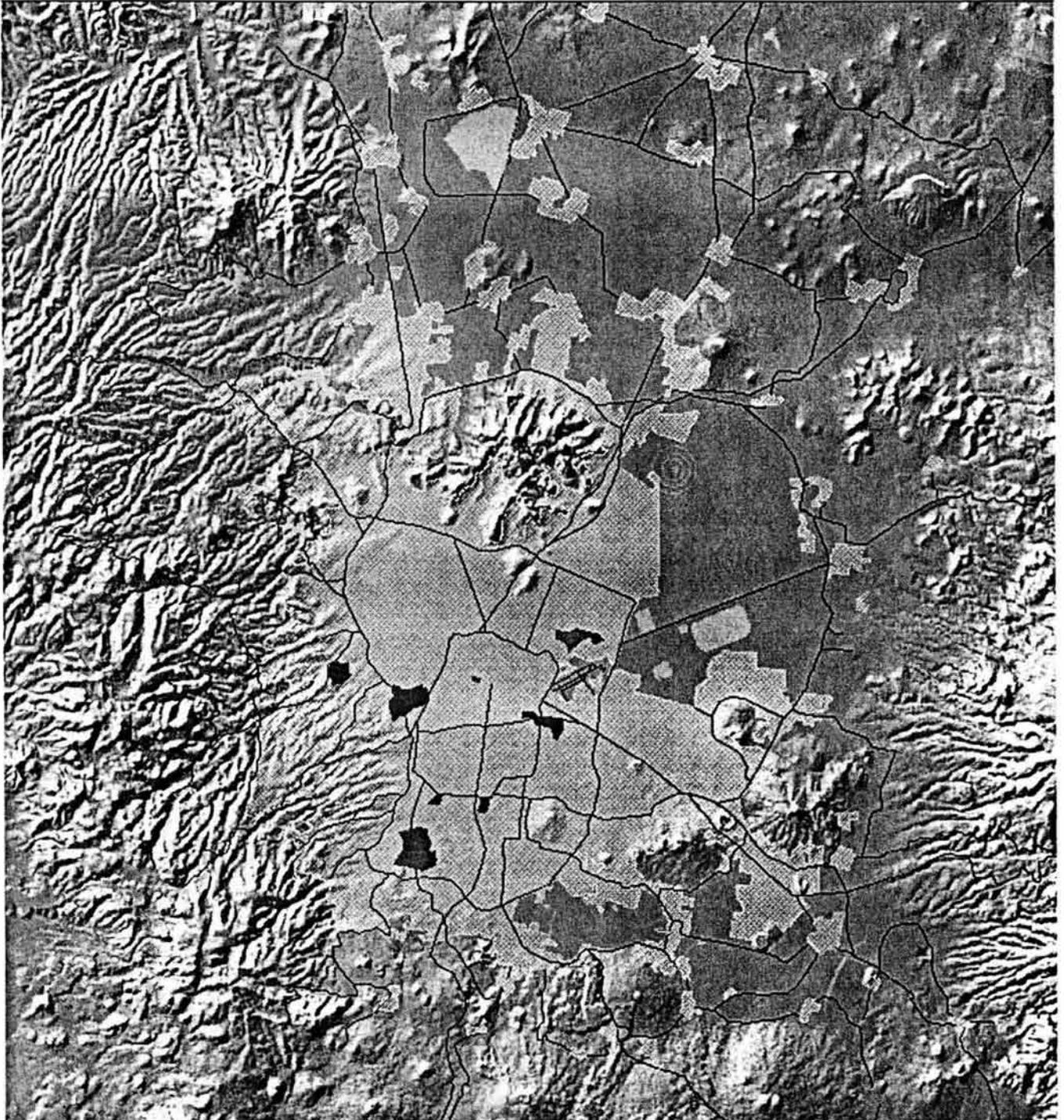


Fig 2.4 Zona metropolitana de la ciudad de México

2.1.3 Composición y distribución por entidad federativa

La superficie de la Cuenca de México se extiende sobre 85 municipios de cinco entidades federativas, de las cuales el Estado de México absorbe la mayor superficie (56 municipios, 50%, 4,800 km²), abarca la mayor parte del Distrito Federal (16 delegaciones, 13.8%, 1,320 km²), la porción occidental de Tlaxcala (8.7%, 840 km²), una reducida porción del oeste de Puebla (1%, 100 km²) y la fracción sur del estado de Hidalgo (1 municipio, 26.5%, 2,540 km²). Ver Tabla 2.1 y Fig 2.5. Fuente: Bassols (1966).

Tabla 2.1 Cuenca de México: Superficie por Entidad Federativa, Bassols (1966).

ENTIDAD	SUPERFICIE (km ²)	SUPERFICIE (%)
Estado de México	4,800.00	50.0
Hidalgo	2540.00	26.5
Distrito Federal	1,320.00	13.8
Tlaxcala	840.00	8.7
Puebla	100.00	1.0
TOTAL	9,600	100



Fig 2.5 Cuenca de México. Superficie por entidad federativa

2.1.4 Límites orográficos

La Cuenca está cercada en tres de sus flancos por una sucesión de sierras volcánicas:

Hacia el norte, de oeste a este, se encuentra limitada por los cerros de Sincoque, San Sebastián, Xalpan y Huelpoxtla, por las serranías de Tezontlalpan, Tepetzotlán, cerro de Acayucan y sierra de Pachuca, las cuales se caracterizan por ser las de menor elevación, con alturas máximas de 3,000 msnm y estar muy erosionadas.

Por el oriente de la cuenca se levanta la sierra Nevada y en su ángulo suroriental sobresale por su altitud de 5,465 msnm el volcán Popocatepetl (actualmente activo y coronado por un glaciar). Cerca se encuentra el volcán Iztaccíhuatl, con 5,286 msnm.

Por el este, de norte a sur, se distingue la sierra de Pachuca, los cerros Tecajete, San Gabriel Xihulco, Tlalzalan, Tláloc, Telapon, Papayo y los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl.

Por el sur, de este a oeste, se distingue el Popocatepetl, la sierra de Chichinautzin, el Ajusco y el monte de las Cruces. Al sur se localizan las sierras del Ajusco y Chichinautzin. La primera se ubica al suroeste con una elevación de 3,937 msnm y la segunda alcanza una altitud de hasta 3,900 m.

Por el oeste, de norte a sur, destacan la Sierra de Tepetzotlán, el monte Bajo, el monte Alto y la Sierra de las Cruces, la cual tiene una continuación con la sierra de Tepetzotlán con orientación noroeste. Las principales eminencias dentro de la Cuenca "*muchas de ellas resultado de los desprendimientos de las formaciones circundantes*", constituyen las vertientes internas, siendo de norte a sur: la loma de España, los cerros Cuaqueme, Xoloc, Paula, sierra de Pitos, cerro Gordo, de Chiconautla, sierra de Guadalupe, los cerros de Chiquihuite, los cerros de la Magdalena, el cerro de la Estrella, el cerro de Chimalhuacán, el cerro de la Caldera, el cerro de Santa Catarina, el cerro del Pino, el Texolotl, el Ajusco y el Teuhtli.

2.2 Información histórica

Uno de los aspectos más significativos tomados en cuenta en los trabajos que siguen, se refiere a la información contenida en litografías, mapas históricos y mosaicos de fotografías aéreas antiguas, los cuales dan cuenta de los aportes prehispánicos y de la evolución de la ciudad, presentando los trazos que la conforman en el surgimiento de la ciudad española y la cartografía urbana virreinal y dejando ver las transformaciones que tuvieron lugar durante los siglos XIX y XX.



Carta corográfica de la ciudad de México, Manuel Fernández Leal, 1899



Mosaico fotográfico digital de la Cd. de México, Institutos de Geografía e Ingeniería, 2000

Algunos de los aportes de estos documentos tienen un alto significado geotécnico y geológico para la descripción de las características del subsuelo como: ubicación de cauces de antiguos ríos y barrancas; trazo y cruces de antiguos canales; configuración o distribución en extensión de ex-lagos y lagunas (encharcamientos eventuales); bordos o diques; calzadas; etc. Su estudio puede contribuir en particular al análisis de la historia de cargas en determinados predios, ayudando a comprender muchas de las causas del mal comportamiento de algunas estructuras y de sus problemas posibles.



México y sus cercanías (Atlas Pintoresco e Histórico), Don Antonio García y Cubas, 1885



Imagen de satélite, composición en falso color 123, ex Lagos de Xochimilco y Chalco, 2000

Esta información permite también detectar cambios en el escenario del marco geográfico a través de las características, condiciones y rasgos generales del subsuelo reflejadas y plasmadas en dichos documentos, por superposición con los actuales. Asimismo, ayuda a confirmar, ampliar, explicar, definir y complementar características y rasgos generales del entorno natural y del escenario urbano cubiertos por la urbanización y olvidados en la memoria de los hombres. Permite además verificar sobre alguna tendencia o simplemente, verificar la lógica respecto a alguna densidad o patrón de ciertos datos y resultados, a través de los parámetros, variables, características y rasgos generales plasmados por el cartógrafo en dichos documentos. Contribuye a la obtención de una visión del conjunto de todo el territorio, necesaria para la comprensión de la naturaleza de los depósitos de suelo, rellenos arqueológicos y formaciones geológicas que se alojan en la Cuenca.

2.2.1 Descripciones históricas

La primera descripción de la cuenca de México la hizo Hernán Cortés en su segunda carta de relación (Fig 2.6) “... La cual dicha provincia es redonda y está toda cercada de muy altas y ásperas sierras, y lo llano de ella tendrá en entorno hasta 70 leguas y en el dicho llano hay dos lagunas que casi lo ocupan todo, porque tienen canoas en torno más de 50 leguas. Y la una de estas dos lagunas de agua dulce y la otra, que es mayor, es de agua salada. Divídelas por una parte una cordillera pequeña de cerros muy altos que están en medio de esta gran llanura y al cabo se van a juntar las dichas lagunas en un estrecho de llano que entre estos cerros y las sierras altas se hace. El cual estrecho tendrá un tiro de ballesta, y por entre una laguna y la otra y las ciudades y otras poblaciones que están en las dichas lagunas, contrastan las unas con las otras en sus canoas por el agua, sin haber necesidad de ir por la tierra. Y porque esta laguna salada grande crece y mengua por sus mareas según hace la mar todas las crecientes, corre el agua de ella a la otra dulce tan recio como si fuese caudaloso río y por consiguiente a las menguantes va la dulce a la salada ...”



Fig. 2.6 Tenochtitlán según Plano Nuremberg, 1524

Contemporánea a la de Cortés es la descripción de Motolinía: *"...Lo más alto de esta Nueva España y los más altos montes, por estar en la más alta tierra, parecen ser los que están alrededor de México. Está México toda cercada de montes, y tiene una muy hermosa corona de sierras a la redonda de sí, y ella está puesta en el medio, lo cual le causa gran hermosura y ornato, y mucha seguridad y fortaleza; y también le viene de aquellas sierras mucho provecho, como se dirá adelante. Tiene muy hermosos montes, los cuales la cercan toda como un muro. De estas montañas bajan arroyos y ríos, y en las laderas y bajos salen muchas y muy grandes fuentes. Toda esta agua, y más la llovediza, hace una gran laguna, y México está situado por dentro de ella, y parte la orilla. A la parte de occidente, por la mitad del agua va una calzada que la divide; la una parte es de muy pestífera agua e la otra es de agua dulce, y esta dulce entra en la salada, esta más alta y aquella calzada tiene cuatro o cinco ojos con sus puentes, por do sale la agua dulce..."*

Torquemada utilizó en todo lo anterior a Motolinía transcribiendo casi totalmente su texto, al que únicamente agregó: *"... En estas lagunas dulce, y salada, solían entrar siete ríos, que aunque no eran grandes, eran suficientes para tenerlas llenas de agua; y ello era la causa, porque esta ciudad estaba cercada, y rodeada de ella..."*

Humboldt (Fig 2.7) y sus seguidores, Garay y Orozco y Berra, le concedían una extensión de 244 y media leguas cuadradas, en tanto que Luis Espinosa afirmaba que tomando por límite la cresta de cordilleras y líneas divisorias de aguas en los lomeríos del contorno se obtiene una extensión aproximada de 8,058 km². Sin embargo, de acuerdo con levantamientos más recientes, el área de la cuenca de México es de aproximadamente 9,600 km².

Según Francisco de Garay *"se trata de una inmensa boca volcánica, en cuyo contorno y centro se ven los cráteres apagados de multitud de volcanes"*.

Por su parte, a fines del siglo XVIII, Velázquez de León decía: *"llamamos Valle de México aun con alguna impropiedad, a un país cercado por todas partes de alturas más o menos elevadas, en las que se reparten las aguas, unas corriendo para lo interior del terreno, en cuyos bajíos forman diferentes lagos y charcos, etc."*

Otra descripción es: *"...La Cuenca de México como estructura natural es una unidad hidrológica cerrada o endorreica cuya forma en planta, se asemeja a la paleta de un pintor. Su contorno perimetral está circundado por elevadas montañas como una hermosa corona de sierras a la redonda de sí. Al final de la época glacial, las aguas fluviales se repartían hacia el interior o fondo más bajo constituido por diferentes llanuras planas donde se asentaban hasta cubrir diferentes áreas. Al cerrarse la cuenca, en el Cuaternario superior, las aguas fluviales quedaron encajadas, formando un conjunto de lagos y áreas pantanosas; como fueron, la laguna de México, al este el lago de Texcoco, al sur los lagos de Xochimilco y Chalco que formaban uno solo, y al norte los lagos de Zumpango y Xaltocan - San Cristóbal..."*

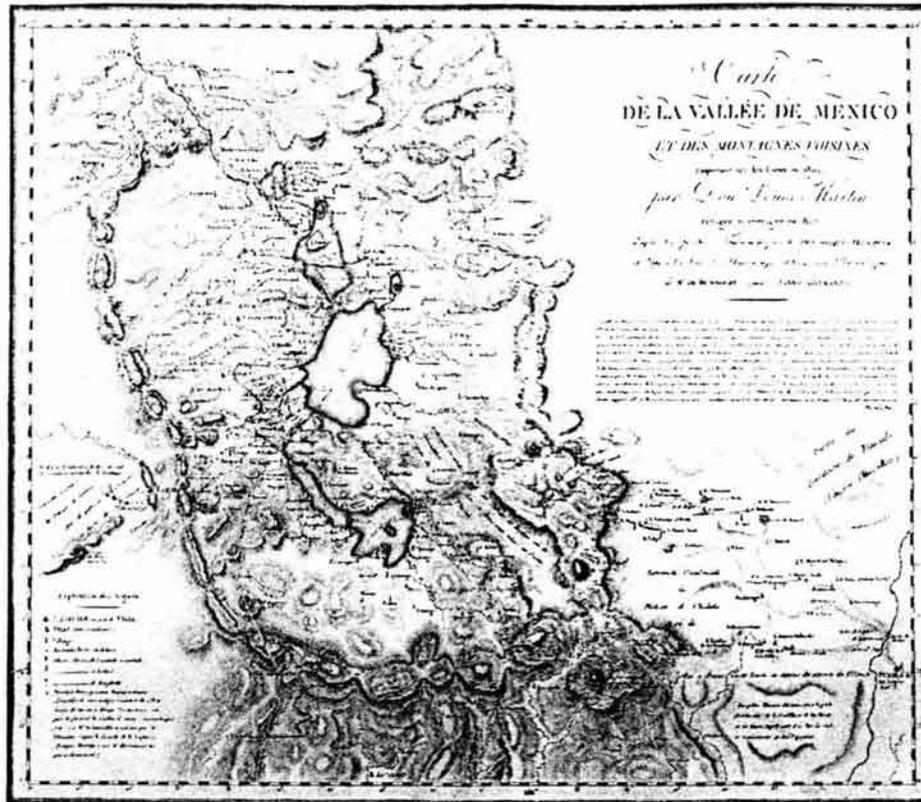
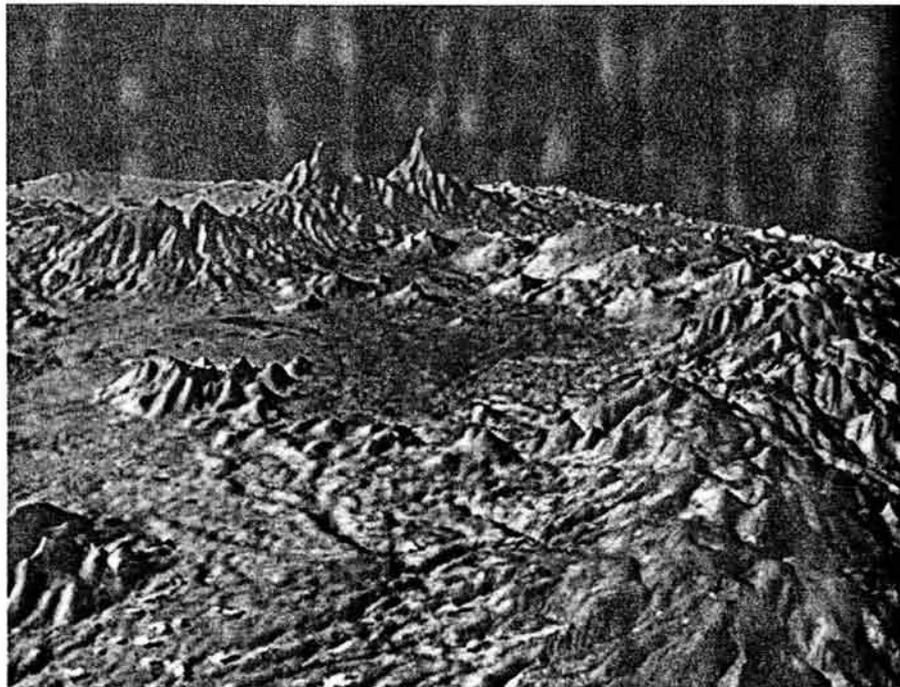


Fig 2.7 La cuenca de México en la época de Humboldt, 1807 (Mapa del Valle de México, "y de las montañas vecinas, esbozado sobre el terreno en 1804 por don Luis Martín, redactado y corregido en 1807, según las operaciones trigonométricas de don Joaquín Velásquez , y de acuerdo con las observaciones astronómicas y las mediciones barométricas del señor Humboldt, por Jabbo Oltmanns, grabado en cobre coloreado, escritura de L. Aubert según un dibujo G. Grossmann, concluido por F. Friesen. Berlín 1807 y A. de Humboldt, Paris 1808. Col. MONCLAU



Cuenca de México

2.2.2 Funcionamiento de los lagos y albarrones en la época prehispánica

A la llegada de los españoles, gran parte de la cuenca de México era una región lacustre, cuyo recipiente mayor era el lago de aguas saladas de Texcoco, ubicado en su parte central y más baja. La ciudad de Tenochtitlán se hallaba en la laguna de agua dulce, separada de la salada por un albaradón construido por Netzahuaicóyotl en la época de Moctezuma Ilhuicamina. Ambas "ciudad y laguna" se encontraban en un sitio del Lago de Texcoco (Fig 2.8).

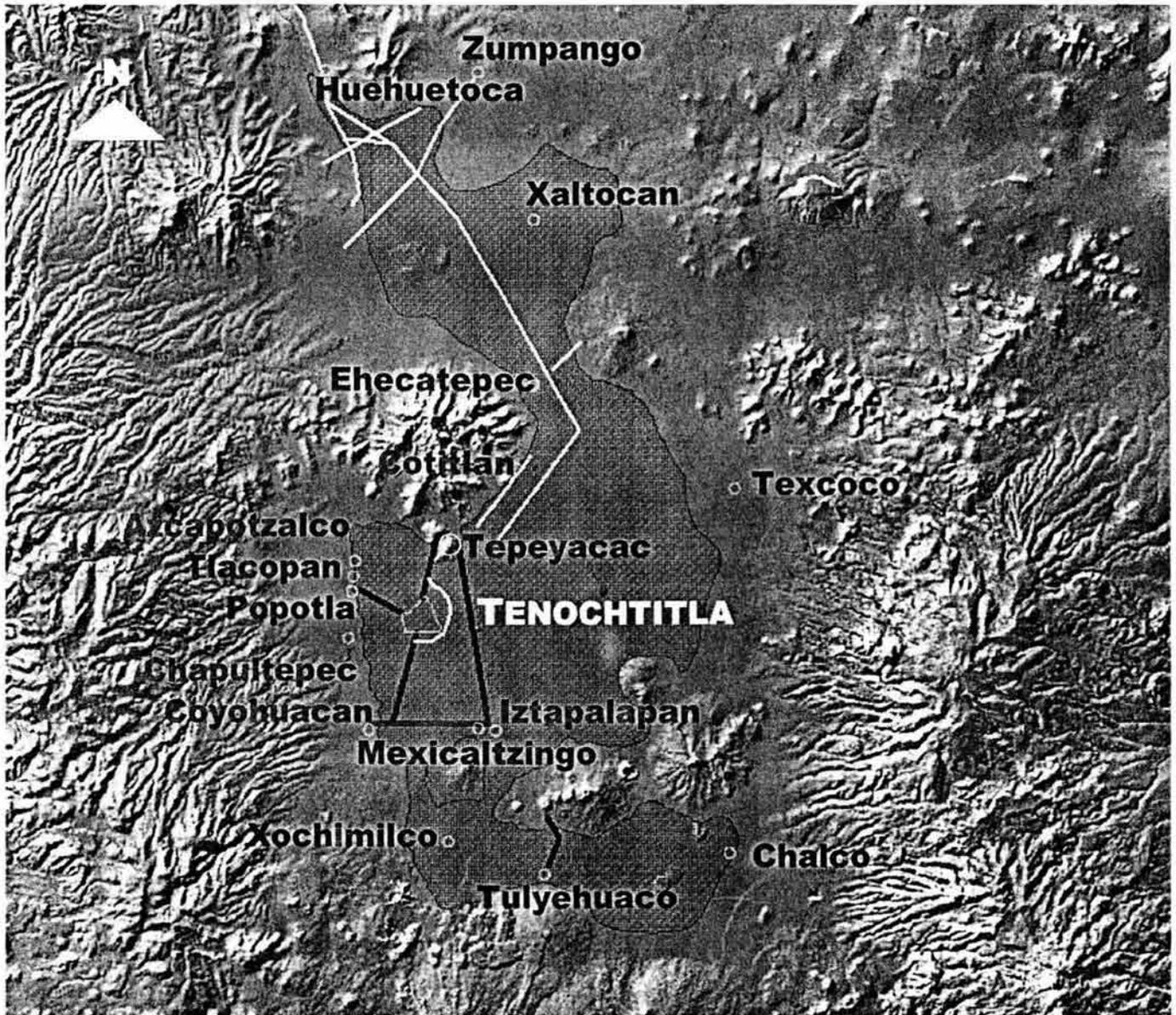


Fig 2.8 Extensión de lagos a principios del Siglo XVI y localización de los diques

Al norte y en niveles más altos, estaban los lagos de Xaltocan y Zumpango. Al sur y separado por el dique de Mexicaltzingo, estaba el lago de Xochimilco, a su vez separado del de Chalco por el dique de Cuicláhuac. Estos lagos eran de agua dulce y más altos que las lagunas de México y Texcoco, por lo que desaguaban sobre estas últimas a través de las compuertas del dique de Mexicaltzingo.

La laguna de México poseía a su vez diques calzadas: Tepeyacac, hacia el sur, que se bifurcaba en el fuerte de Xólotl, con un ramal en dirección de Coyohuacan y el otro de Mexicaltzingo e Iztapalapan. Mediante estas albarradas se controlaban las aguas que llenaban las acequias navegables que cruzaban la ciudad de México.

El Lago de Texcoco era el lugar, a partir del cual el terreno ascendía hacia los cuatro puntos cardinales, por lo que todas las aguas llovedizas o provenientes de ríos y manantiales concurrían necesariamente hacia este vaso (A fin de comprender lo anterior, se incluyen las alturas relativas de los lagos en 1864). Por su parte en el lago de Chalco desaguaban los ríos Tenango, Tlalmanalco y arroyo de San José, que eran alimentados por muchos arroyos que descendían de los cerros Tecama y Papayo y de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl.

Lago de Zumpango	6.062 m
Lago de Xaltocan	3.474 m
Lago de San Cristóbal	3.597 m
Lago de Texcoco	0.000 m
Ciudad de México	1.907 m
Lago de Xochimilco	3.119 m
Lago de Chalco	3.082 m

Los ríos y los arroyos que alimentaban el lago de Texcoco nacían en las sierras Tláloc y Telapón; y eran los de Coatepec, Santa Mónica, San Bernardino, Chapingo, Texcoco, Magdalena, Papalotia, Coxacoaco y Teotihuacán; por el sureste bajaban los ríos de San Francisco y San Rafael.

Al norte de las sierras mencionadas existe una sucesión de lomas que se unen con la sierra de Pachuca, donde tiene su origen el río Papalote, de cuyo torrente se formaba la laguna de Apan. El Papalote corría por un lomerío hasta llegar al cerro Gordo que dividía la vertiente; por el este, seguían el río Teotihuacán, que desembocaba en el lago de Texcoco. El Papalote, al final de su trayecto, se convertía en el río de las Avenidas de Pachuca y desaguaba en la laguna de Zumpango.

La vía hidráulica con mayor caudal era el río Cuautitlán, que nacían en las estribaciones de la serranía del poniente, y tenía como afluentes los ríos Tepetzotlán, Guadalupe y el río Grande. Este río alimentaba en la antigüedad, parte de la laguna de Zumpango, conocida como Coyotepec, la que a su vez estaba separada por el dique de la Cruz del Rey, de la del Citlaltepec.

Por el poniente, el lago de Texcoco recibía las aguas del río Guadalupe, que se formaba del río los Remedios y del Tlanepantla.

En la cordillera del Ajusco nacía el río de San Juan de Dios que terminaba en el lago de Xochimilco. También en el Ajusco brotaba el San Buenaventura, alimentado por infinidad de manantiales y que desaguaba en el lago de Xochimilco.

2.2.3 Las inundaciones y las obras de desagüe

Además de los ríos, existía un número de manantiales que alimentaban a los lagos de la Cuenca. Algunos eran tan importantes como los de Xochimilco, Tlalpan, Coyohuacan, Culhuacán, Churubusco, Iztapalapan, Chapultepec, Ayotzingo, etcétera.

De todos los ríos de la Cuenca, el más caudaloso y peligroso para la Ciudad de México era el Cuautitlán, que de acuerdo con Humboldt, tenía un caudal superior al de todos los demás juntos. Este -como se dijo-, desaguaba en el recipiente del Coyotepec, fracción del Zumpango, mientras que en la otra fracción, es decir, la de Citlaltepec, desembocaba el río de las Avenidas de Pachuca.

Las aguas de ambos cauces hacían que la laguna de Zumpango se derramara en la de Xaltocan (que después fue la de San Cristóbal) y ésta en la de Texcoco, que al subir de nivel provocaba las inundaciones de la Ciudad de México. Podría decirse que éste era el proceso más común en las inundaciones urbanas (Fig 2.9 y Fig 2.10).

Al fin de comprender mejor el por qué de las inundaciones que afectaron a la ciudad, se incluyen las alturas de los lagos en 1864, calculadas en varas, y que convertidas a metros representan una sucesión de escarpas, sobre el nivel del Lago de Texcoco, lo mismo hacia el norte que hacia el sur:

Lago de Zumpango	6.06 m
Lago de Xaltocan	3.47 m
Lago de San Cristóbal	3.59 m
Lago de Texcoco	0.00 m
Ciudad de México	1.91 m
Lago de Xochimilco	3.12 m
Lago de Chalco	3.08 m

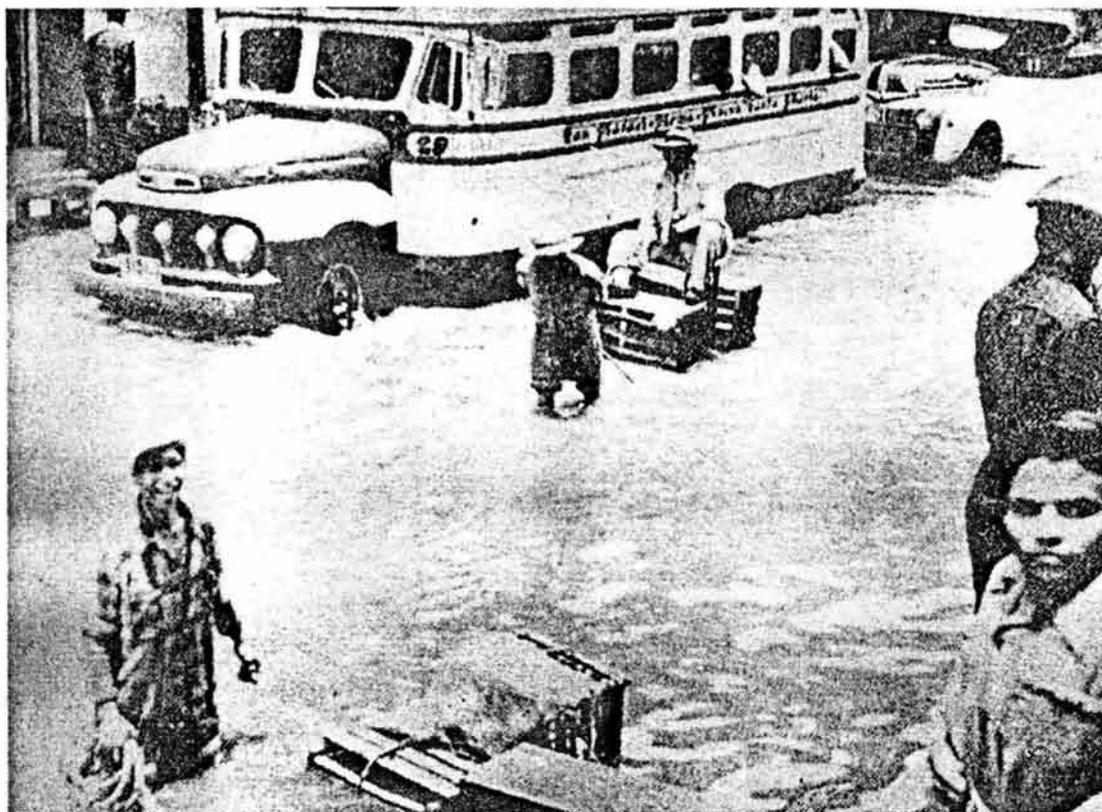


Fig 2.9 Inundación del centro de la ciudad de México, 1950

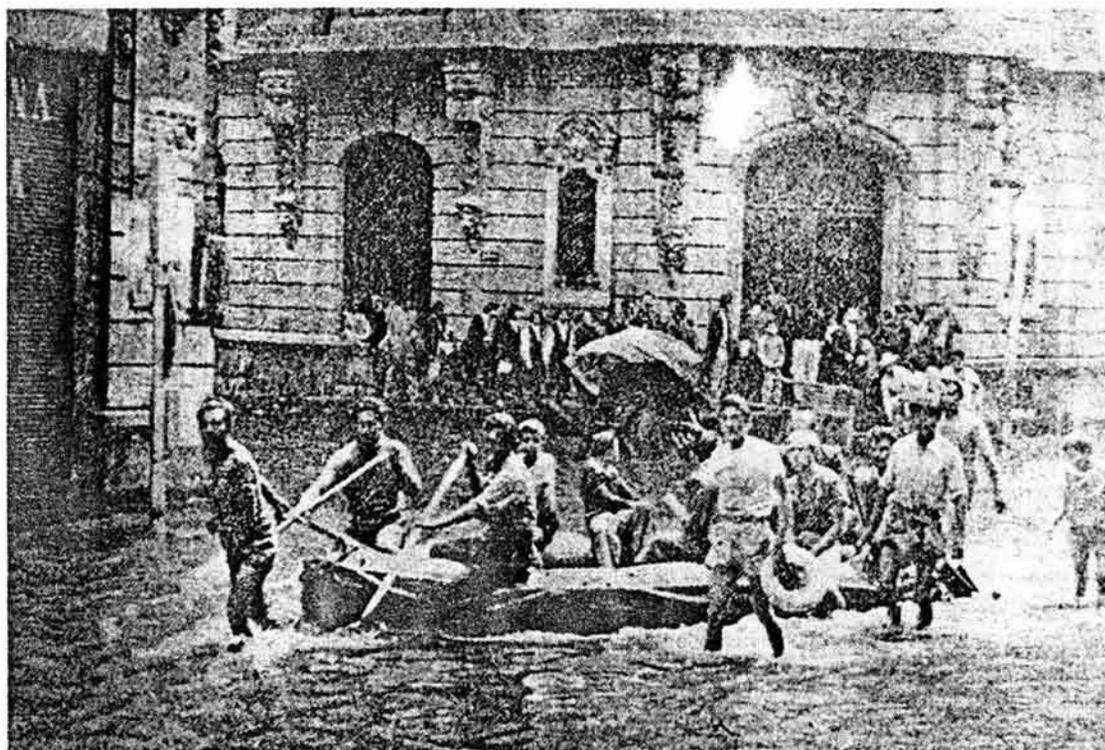


Fig 2.10 Inundación del centro de la ciudad de México, 1951

La extensión de los lagos y de la zona lacustre variaba de acuerdo con la época del año y los ciclos de abundancia o sequía. Según datos históricos, el área de la zona lacustre era más o menos de 2,000 km² de los cuales el Lago de Texcoco, el más grande de ellos, ocupaba el 50% del área total, aproximadamente (Fig 2.11 y Fig 2.12)

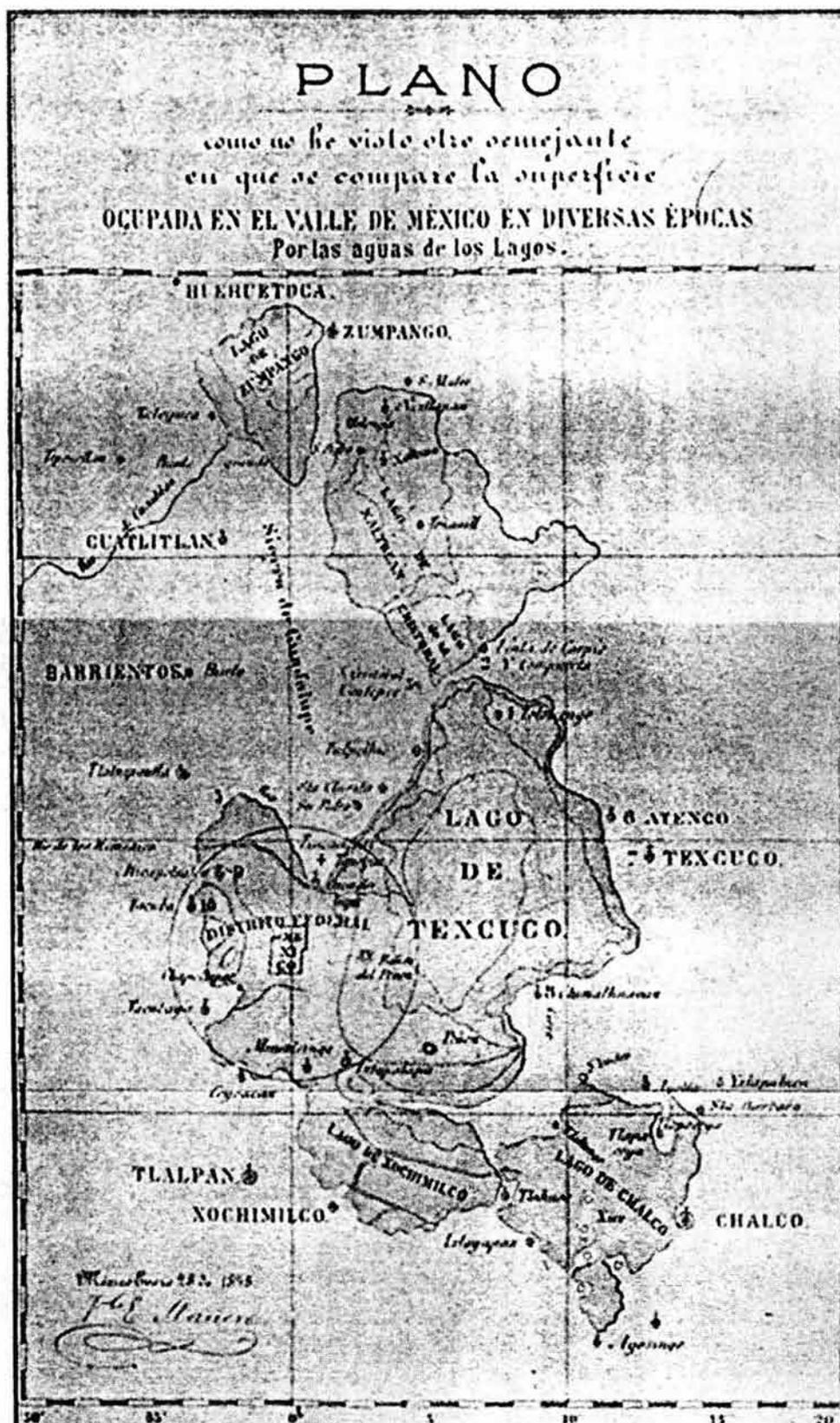
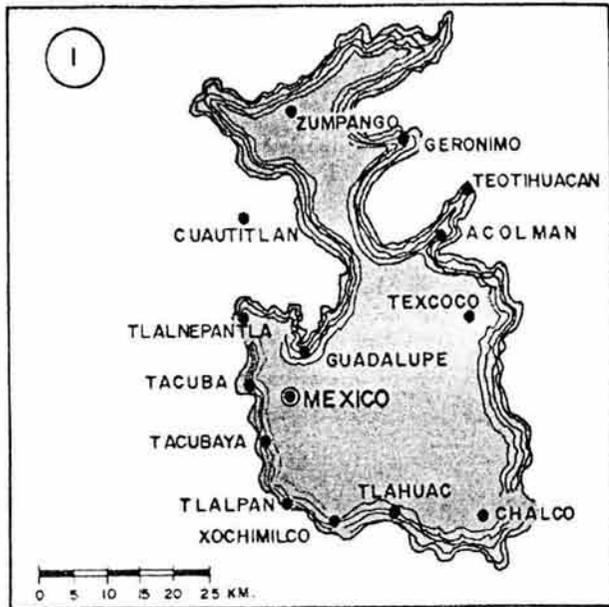
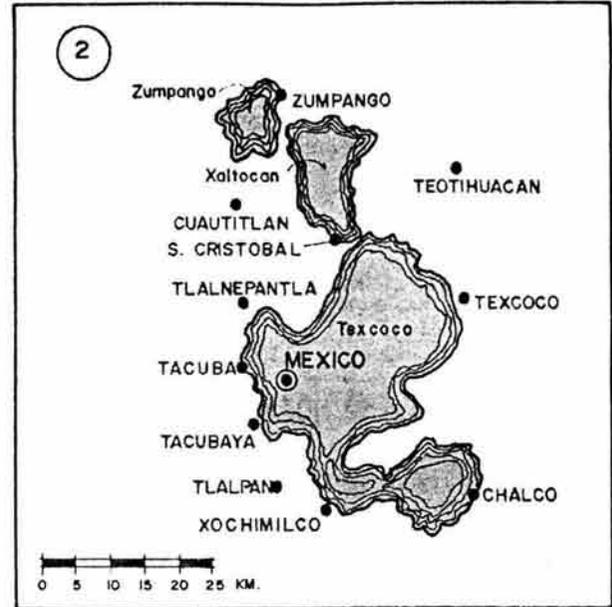


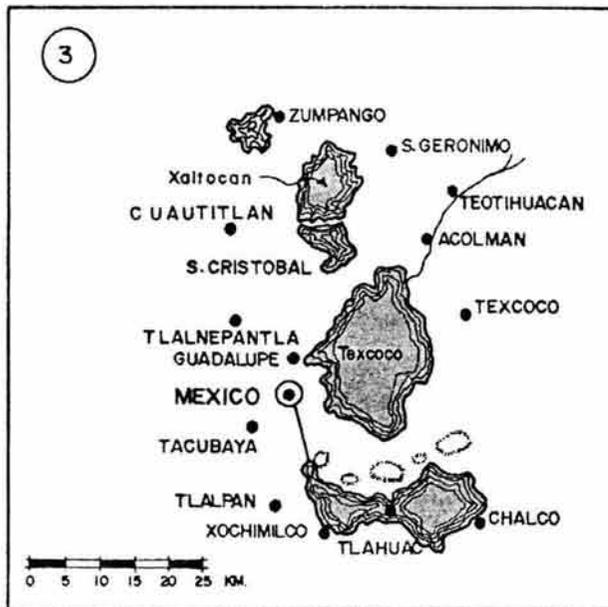
FIG 2.11 Superficie ocupada por las aguas de los lagos en diferentes épocas



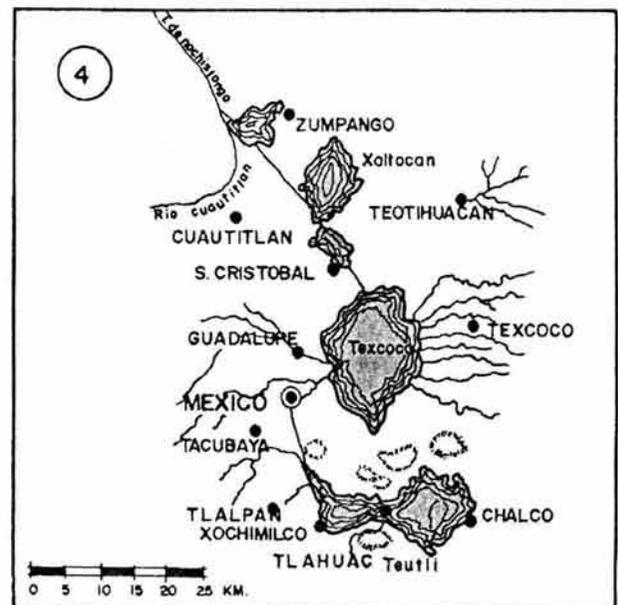
Los límites aproximados durante la época diluvial



A comienzo del siglo XVI



A comienzo del siglo XIX



En el año 1889

Fig. 2.12 Área ocupada por los lagos en diferentes épocas (Elizabeth Schling Kiel, 1938)

Años antes de la presencia española, Tenochtitlán había sufrido varias inundaciones, la más importante en 1449, con Moctezuma Ilhuicamina, quien solicitó a Netzahualcóyotl, señor de Texcoco, su asesoría para resolver el problema. Netzahualcóyotl construyó un dique, conocido como albaradón de Atzacolco a Iztapalapa, con el cual se evitaba que las crecientes del Lago de Texcoco inundaran la capital Azteca. Este dique se construyó con empalizadas de troncos y emplastamientos, apuntalados y revestidos con barro para impermeabilizarlo; se instalaron compuertas que permitían el paso entre los lagos, con el objeto de evitar la contaminación del agua dulce con la salada. Posteriormente se levantó otro albaradón, llamado de Ahuizotl o San Lázaro, que prácticamente circundaba la ciudad.

Con estos diques, calzadas y albarradones, la laguna de México quedó dividida en sectores que operaban como vasos comunicantes para regular las avenidas y controlar la calidad de las aguas. Como se mencionó, en la época prehispánica se registró una serie de inundaciones; una en 1498, durante el gobierno de Ahuizotl y otra en 1449.

A partir de 1499 transcurrieron más de 50 años sin problemas de esta naturaleza, hasta que en septiembre de 1555, una fuerte precipitación que duró más de 24 horas, causó severas inundaciones e innumerables destrozos en las casas habitación en grandes zonas de la ciudad (véase tabla de inundaciones).

Esta inundación obligó al gobierno virreinal a realizar la reparación de diques y calzadas a semejanza de los prehispánicos, con el mismo sistema que se siguió para el albarradón de San Lázaro, a imitación del de Netzahualcōyotl el que se había dejado destruir, utilizando sus materiales en otras obras. El español Francisco Gudiel propuso un desagüe general y aplicar las aguas para regadío y navegación, sin embargo, no se desarrolló ninguna obra; 21 años después, en 1586, se presentó otra gran inundación; esta vez se hicieron trabajos pero sólo en las albarradas, se nivelaron calzadas y desazolvaron ríos y canales. Lo curioso es que 24 años más tarde, en 1604, se registró otra gran inundación en la ciudad, tras la que se volvieron a reforzar calzadas y albarradones, principalmente las de Tepeyac a Guadalupe, el de San Cristóbal y la de Texcoco.

En 1607, al hacerse cargo del gobierno de la Nueva España el virrey Luis de Velasco, nuevamente se vio la ciudad amenazada por las lluvias e inundaciones. Ante eso, ordenó una reunión de notables y de los mejores técnicos disponibles para que buscaran solución al desagüe general de la cuenca de México; en ella se aprobó la idea de Enrico Martínez de construir una acequia y un socavón que condujeron los sobrantes de las lagunas de Citlaltépetl y Zumpango hasta el río Tula. Las excavaciones concluyeron en 1608, pero las obras complementarias quedaron inconclusas, produciéndose numerosos derrumbes que obstruyeron el desagüe.

Posteriormente se tomó la decisión de hacer todo el desagüe en tajo a cielo abierto (Fig 2.13), iniciando los trabajos en agosto de 1637, pero debido a la limitación de recursos estos se realizaron por tramos, terminando las obras en 1788, es decir, 151 años después. Sin embargo, por deficiencias de obras, canales-dique y vertederos, la Ciudad volvió a sufrir inundaciones varias veces.



Fig 2.13 Tajo de Nochistongo

En la época independiente se llevaron a cabo diversos estudios y trabajos, siempre interrumpidos por las guerras internas y las dos intervenciones extranjeras. En 1857, el Ing. Francisco de Garay realizó el proyecto más completo de las obras del desagüe general; consistía principalmente en la construcción de un gran canal que arrancaba desde la orilla occidental del Lago de Texcoco hasta un túnel, el de Tequixquiac que descargaba en el río de Tula de la vertiente del Golfo de México (Fig 2.14).

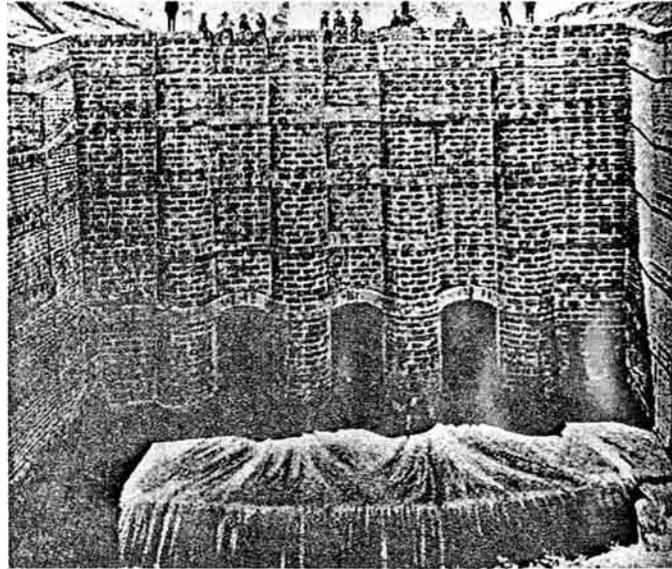


Fig 2.14 Presa y compuerta del túnel de Tequixquiac

El desagüe de Huehuetoca

El desagüe de Huehuetoca, del que vamos a tratar y cuyas noticias debemos al Sr. D. Manuel Berganzo, según un artículo relativo que se encuentra en el Diccionario de historia y geografía. Dicho artículo, entre otras cosas, dice:

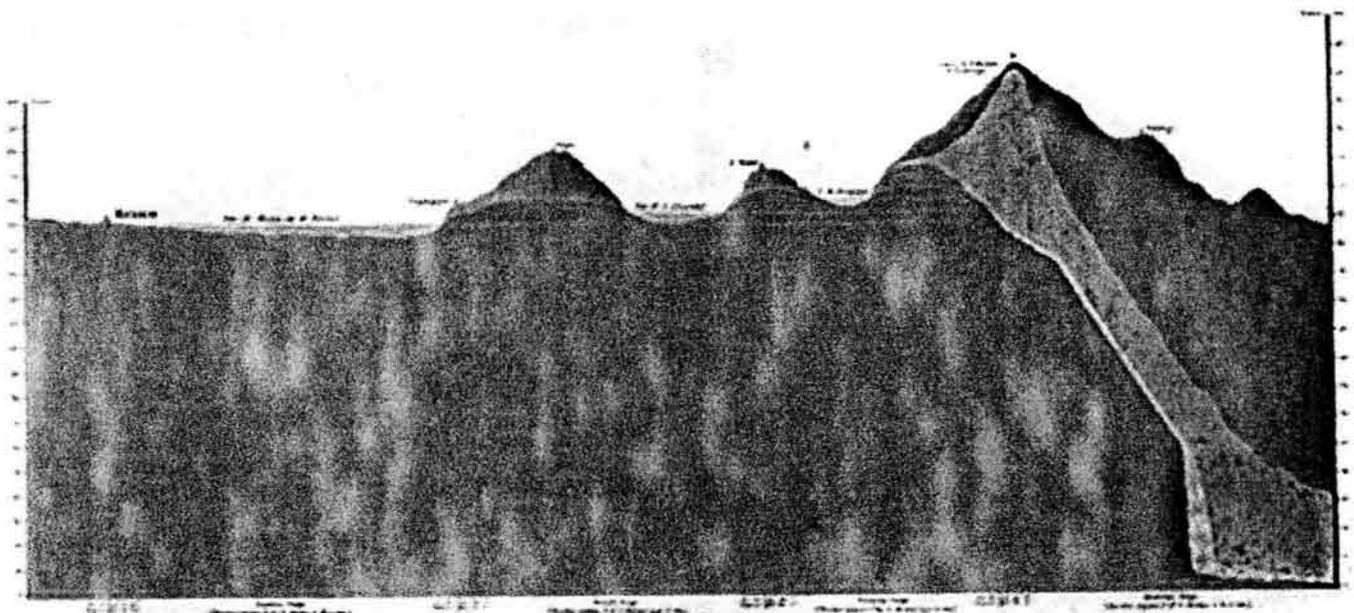


Fig 2.13a Desagüe Real, Huehuetoca, diseñado por Don. I. Castera y Don Luis Martín, 1808

"Las lagunas del Valle de México, ó más bien, las divisiones de una, son cuatros principales, Texcoco, San Cristóbal, Zumpango y Chalco, subdivididas algunas de éstas por calzadas construidas al efecto. Alimentan las aguas de estos lagos, en el de Chalco sus fuentes especiales, á diferencia de Texcoco que no las tiene, en opinión de grandes autores, aunque Valmont de Bomare opinaba que tenía comunicación con el mar; pero según los cálculos del barón de Humboldt que le da 2.277 metros de elevación sobre el nivel oceánico, no puede establecerse dicha comunicación. Las demás aguas que concurren á la formación de estos lagos son las muchas vertientes de la cordillera circular del Valle, ya por efecto de las lluvias, ya por el deshielo de las elevadas montañas volcánicas. Entre estas vertientes son notables en el lago de Texcoco, el de Coatepec, las fuentes de Chimalhuacán y el canal de Chalco, que atravesando la ciudad desde la garita de la Viga hasta la de San Lázaro, se continuá hasta él. El lago de Zumpango, es formado por los ríos de Pachuca y Cuautitlán, el más caudaloso de todos, y que según el citado Humboldt, vale él solo por todos. La laguna de Chalco recibe en su parte llamada de Xochimilco, el río de Coyoacán, formado de los de Mixcoac y San Ángel, y en la otra porción que lleva su nombre, los de Tenango y Acuatla, que vienen de los volcanes.

El agua de Texcoco es salada, conteniendo mucha proporción del carbonato é hidrociorato de Sosa; y la de Chalco, especialmente la parte de Xochimilco, es dulce. La extensión superficial de estos lagos es 1½ leguas cuadradas el de Zumpango, 4 1/10 leguas cuadradas San Cristóbal, 10 3/10 Texcoco, 6 1/3 Chalco. De todos, sólo el de Texcoco está más abajo su nivel que el de México en 1 vara, 1 pie. Los demás se encuentran en más elevado nivel. Zumpango 6 varas sobre San Cristóbal, y éste 4 varas, 8 pulgadas sobre Texcoco. Chalco lo está sobre la ciudad, 2 varas, 2 pies, según Castera, y 1 vara, 11 pulgadas, según Humboldt. De esta mayor elevación resultan necesariamente, como ya lo hemos dicho, el aflujo de todas las aguas del Valle hacia Texcoco, el cual siendo solo muy poco más bajo que la ciudad, llega á nivelarse con ella y aún á excederla, como la experiencia con tristes ejemplos lo ha probado.

Para obviar este inconveniente se han ejecutado obras de tres órdenes, unas á evitar el acrecentamiento de los lagos, otras á su desagüe, y otras que sirven de diques cuando vengán hacia la ciudad. Las de esta última clase, como era natural, fueron las primeras en ejecutarse, hasta que su insuficiencia hiciese apelar á las otras. A ella pertenecen la célebre albarrada de San Lázaro, construida por los aztecas en el reinado de Moctezuma I, y reedificada por el virrey Velasco, primero de este nombre; y las calzadas de Guadalupe, San Antonio Abad, etc., en que entendieron en su reparo por orden del marques de Montesclaros, los padres Torquemada y Zárate. Para impedir las creces de los lagos se han hecho diversas obras: la presa del Rey para detener las avenidas de Pachuca sobre Zumpango; la calzada de la Cruz del Rey, que hoy no existe, dividida el lago de Zumpango en dos, conocidos con los nombres Zitlaltepec y Coyotepec, para moderar el ímpetu de las avenidas del Cuautitlán, y el dique para detener su derrame sobre San Cristóbal. El lago de San Cristóbal está subdividida en dos, también por una calzada, y tiene las denominaciones de Xaltocan por un islote de Cristóbal está subdividido en dos, también por una calzada, y tiene las denominaciones de Xaltocan por un islote de este nombre y San Cristóbal. El dique de San Cristóbal fue obra del marques de Cerralvo en 1634; es una obra muy importante y que concluye en 11 meses, de la que con razón se admira Mora, pues se entiende á más de una lengua.

La presa de Oculman está destinada a los creces del río de Teotihuacan. El lago de Chalco está dividido en dos por la calzada de Tlahuac. La parte meridional toma el nombre de Chalco, y en ella está el hermoso islote de Xico, y la segunda de Xochimilco. La calzada de Mexicalcingo sirve también admirablemente á impedir el acrecentamiento del lago dulce en Texcoco. Estas dos últimas calzadas son construcción de los aztecas.

Todos los diques y las calzadas mencionadas tienen sus compuertas que se abren, tanto para surtir las lagunas, como para impedir que en una grande avenida se rompa el dique é inutilice. Las obras destinadas directamente al desagüe, son el canal de Huehuetoca, que da salida al río de Cuautitlán, al de Tula y el proyectado canal de desagüe general apenas principiado.

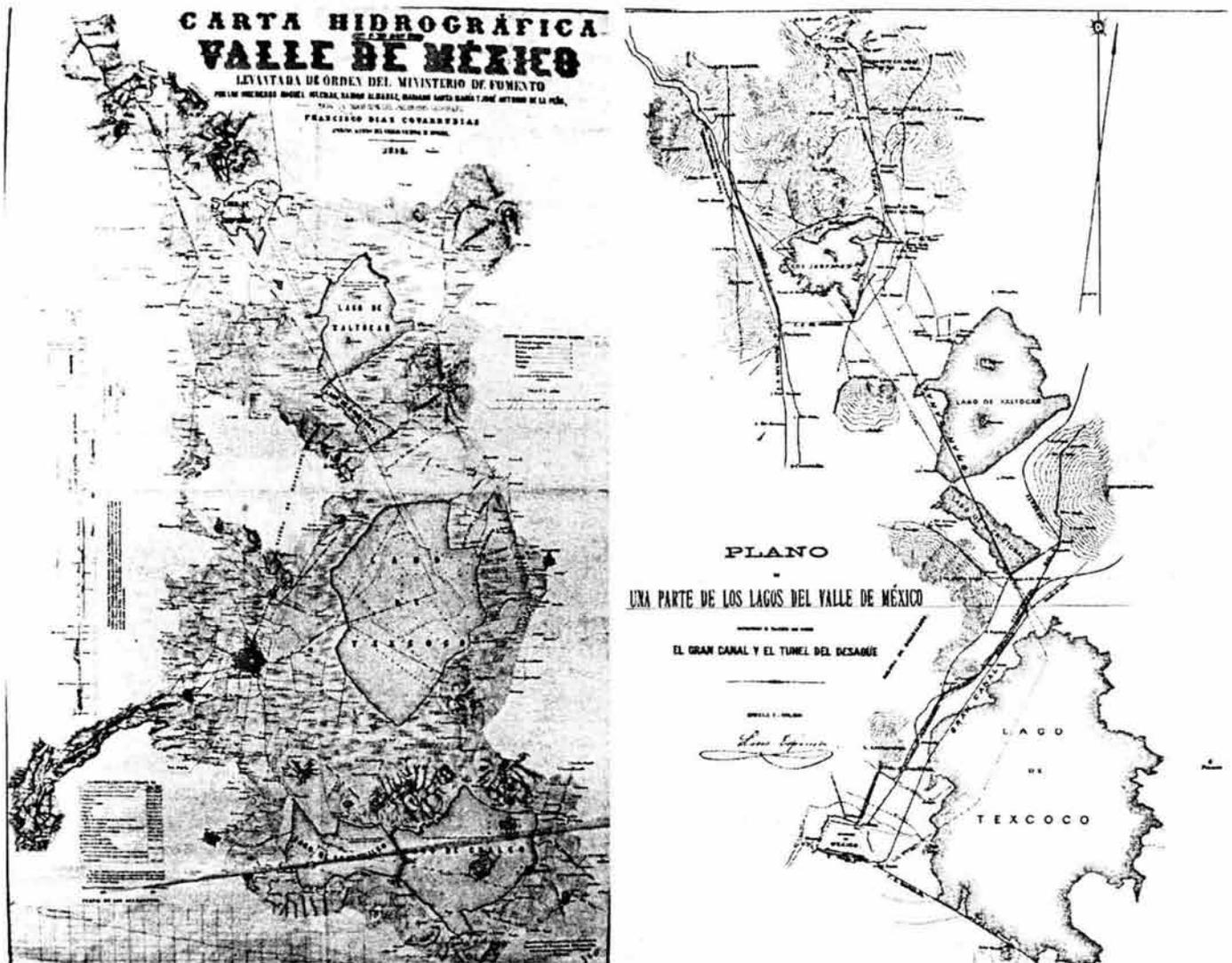
La admirable obra de este canal es uno de los monumentos más sorprendentes del trabajo humano que nos dejaron nuestros mayores. Desde Huehuetoca, en el punto llamado el Gavillero, hasta la boca de S. Gregorio en que termina, mide 9.810 varas, siendo su profundidad en bóveda real, punto el más elevado de la montaña, la enorme de 68 varas y 130 de anchura, cuyas dimensiones, en opinión del Sr. Rincón, son más que suficientes para el solo efecto de dar salida al río de Cuautitlán, y dejan de entrever el designio de constituirlo canal general de desagüe para todas las aguas del Valle.

Los cantiles del canal forman en algunas partes ángulos bastantes obtusos para remover el riesgo de los derrumbes; pero en algunas partes, como en la Guiñada, la disminución del ángulo produce el espectáculo aterrador de las masas que se ven prontas á desprenderse. En toda su extensión se advierten los restos de la antigua bóveda de Enrique Martínez, obra ingeniosa de albañilería, para soportar el peso enorme de la montaña cuando estaba el canal por socavón. Desde la boca de San Gregorio hasta el salto del río Tula, en que se precipita á la altura de 20 varas entre peñascos, corre 8.388 varas; y antes del Salto 430 varas, se ha edificado un puente que encajona las aguas. Del Salto sigue su curso á confluir con el Pánuco, que desemboca en el seno de México; célebre lugar de una de nuestras glorias militares, y en que por coincidencia se afirmó la independencia, que tres siglos antes se había perdido en el valle de México y á orillas de su famoso lago de Texcoco.

Con las obras relacionadas, si no se ha logrado preservar completamente á la ciudad de la terrible plaga de las inundaciones, ésta se ha alejado en gran manera, y aunque ha habido años muy pluviosos, los medios indicados han bastado. El año de 1772, por ejemplo, el 6 de septiembre, según el barón de Humboldt, cayó un tan fuerte aguacero, que inundo muchos terrenos con destrucción de algunos edificios, y el canal de Huehuetoca dio paso franco á tan considerable caudal de agua. En nuestros tiempos, el 24 de septiembre de 1851, la lluvia fue tal, que en la mayor parte de las calles subió el agua, en términos de penetrar á las habitaciones, y causó muchas averías en los almacenes del comercio.

Estas crecientes de lluvias, opina el citado Humboldt, se suceden en un período mas ó menos regular de 25 años, y sin embargo, solo ha sido temible una inundación en muy pocas, y esto á merced de la incuria en el desensolve de los ríos y canales. Sin embargo, como no todas las avenidas sean por parte del Norte hacía Zumpango, para lo que evidentemente es útil el canal, sino que muchas vengan directamente á Texcoco y otras por los vientos del Este indirectamente por los lagos de Xochimilco y Chalco, según que lo tenemos referido; en estos eventos México será envuelto aún por las aguas y sufrirá los desastres consiguientes á la impetuosidad de su curso.

Por todo esto es indispensable insistir en el desagüe general del Valle. Aun sin estos riesgos, la mejor fertilidad, la apropiación de los terrenos desecados por el erario público, el desagüe particular de las atarjeas que impida las anegaciones de las calles, que convierten en tiempo de aguas una de las más hermosas ciudades en un pantano asqueroso é incómodo, la más fácil conducción de los efectos del comercio y otras muchas ventajas; indemnizaran más que competentemente los sacrificios de cualquier género que se ejecuten”.



a) Carta hidrográfica, 1862

b) El Gran Canal y el túnel de desagüe, L. Espinosa

Fig 2.15 Trazo geométrico del desagüe general

Las obras se iniciaron durante el imperio de Maximiliano, pero realmente fueron realizadas durante la República restaurada por Benito Juárez y se concluyeron durante el Porfiriato, en 1900. Las obras estuvieron a cargo del Ing. Luis Espinosa (Fig 2.15).

Simultáneamente, el Ing. Roberto Gayol proyectó y estudió una red de alcantarillado, mediante colectores y atarjeas que permitieron el drenaje combinado de aguas negras y pluviales de la ciudad, que para entonces tenía 417,000 habitantes en un área de 1,700 Ha.

Aunque dichas obras mejoraron notablemente la situación y redujeron el problema de las inundaciones, los fenómenos se siguieron registrando aunque con menor intensidad hasta 1940; a partir de ese año, por los hundimientos del subsuelo, la ciudad empezó a sufrir inundaciones cada vez más graves. Cabe mencionar que entre 1942 y 1944 se produjeron grandes problemas en tiempo de lluvias; y a principios de la década de los cincuenta, debido a una fuerte tormenta (120 mm/h) se cubrieron con agua y lodo las dos terceras partes de la urbe, sufriendo severos y costosos daños las casas y las obras de infraestructura urbana.

2.3 Toponimia

La importancia que tienen los nombres geográficos para referir o designar un rasgo dentro del ámbito geográfico es indiscutible, pues estos nombres nos permiten, entre otras cosas, identificarlo en forma rápida y objetiva y, en ocasiones, incluso, lo describen. En forma general, los nombres geográficos, como elementos referenciales del paisaje geográfico, son creados y utilizados por el común de la gente; en ocasiones, también lo son por usuarios especializados en investigaciones geográficas, y forman parte importante de nuestro acervo cultural. Por otra parte, el contar con una serie de datos básicos acerca de las localidades, distribuidos a lo largo y ancho del territorio de la Cuenca, constituye una valiosa herramienta para el análisis integral de los fenómenos que se desarrollan en el espacio geográfico.

Por tal motivo, mención especial merece la toponimia de la época precolombina, la cual con frecuencia arroja luces interesantes sobre la topografía y la naturaleza del subsuelo en el sitio considerado (Tlalpan: tierra firme; Xaltepec: cerro de jales; Ixtapalapa: lugar de piedras blancas; Tepeyacac: nariz de la montaña, etc.). Lo anterior aparece con claridad en el fascinante mapa reconstitutivo elaborado por González Aparicio (1968), Figs 2.16 a 2.18.

La toponimia utilizada en la época Colonial, Novohispana y del México Independiente es menos ilustrativa pero puede ocasionalmente ser también de utilidad. La de los últimos cuarenta años, deja generalmente de arrojar luces interesantes sobre la topografía y naturaleza del subsuelo. Por ejemplo: "Bosques del Lago", nos advierte simplemente que probablemente dicha zona será deforestada con la posible contaminación o desecación del lago.

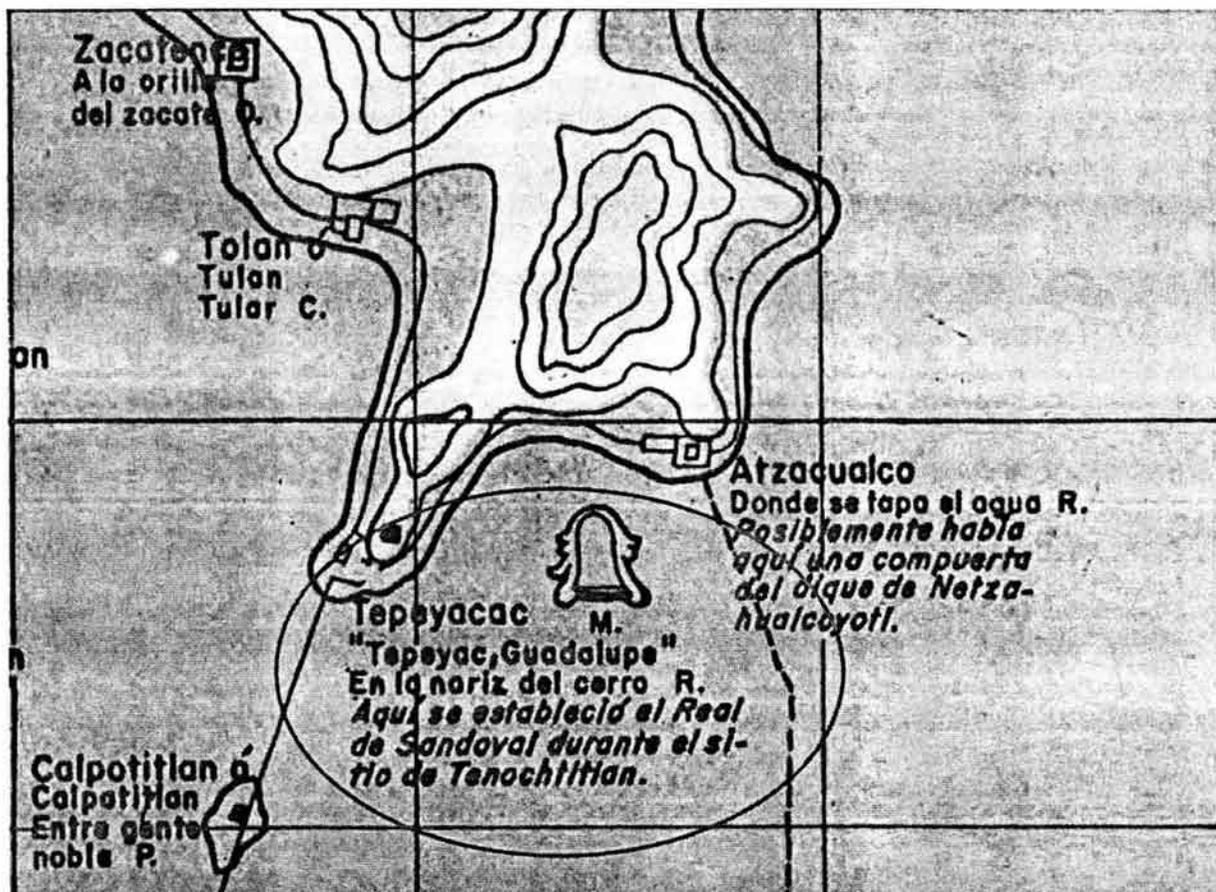


Fig 2.16 Tepeyac, en la nariz del cerro, Mapa Reconstitutivo (González Aparicio, 1968)

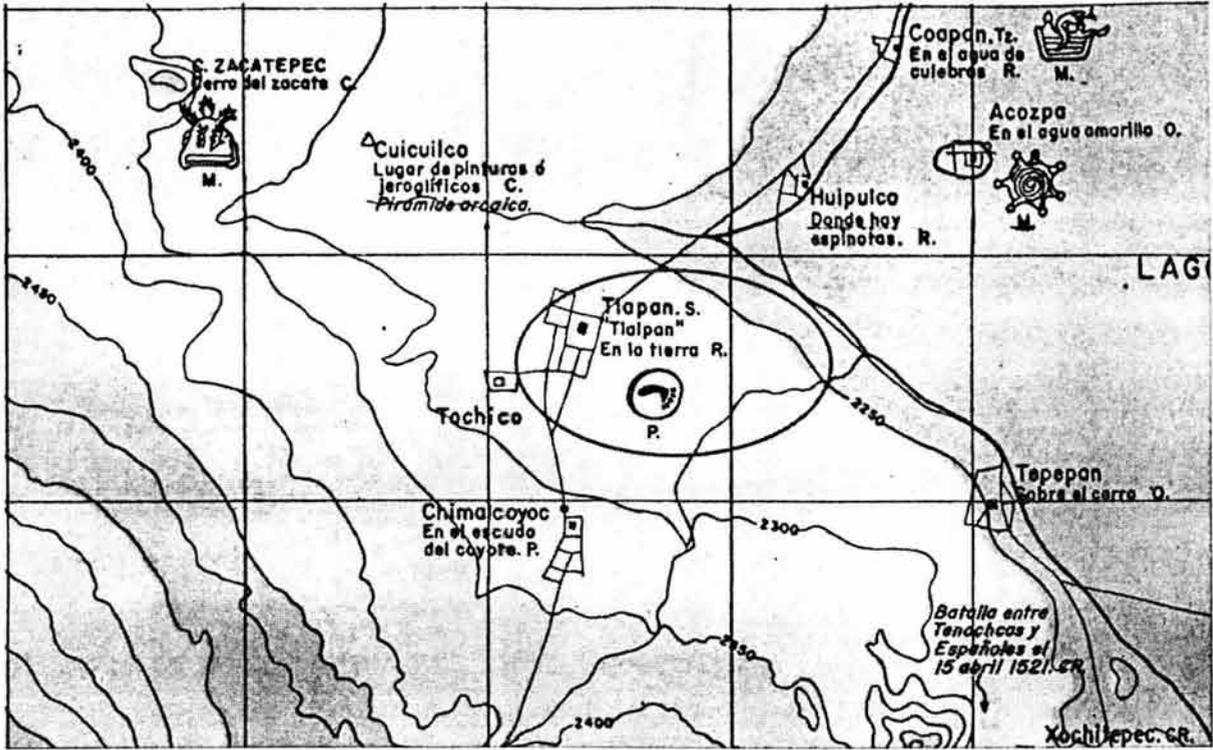


Fig 2.17 Tlalpan, en la tierra, Mapa Reconstructivo (González Aparicio, 1968)

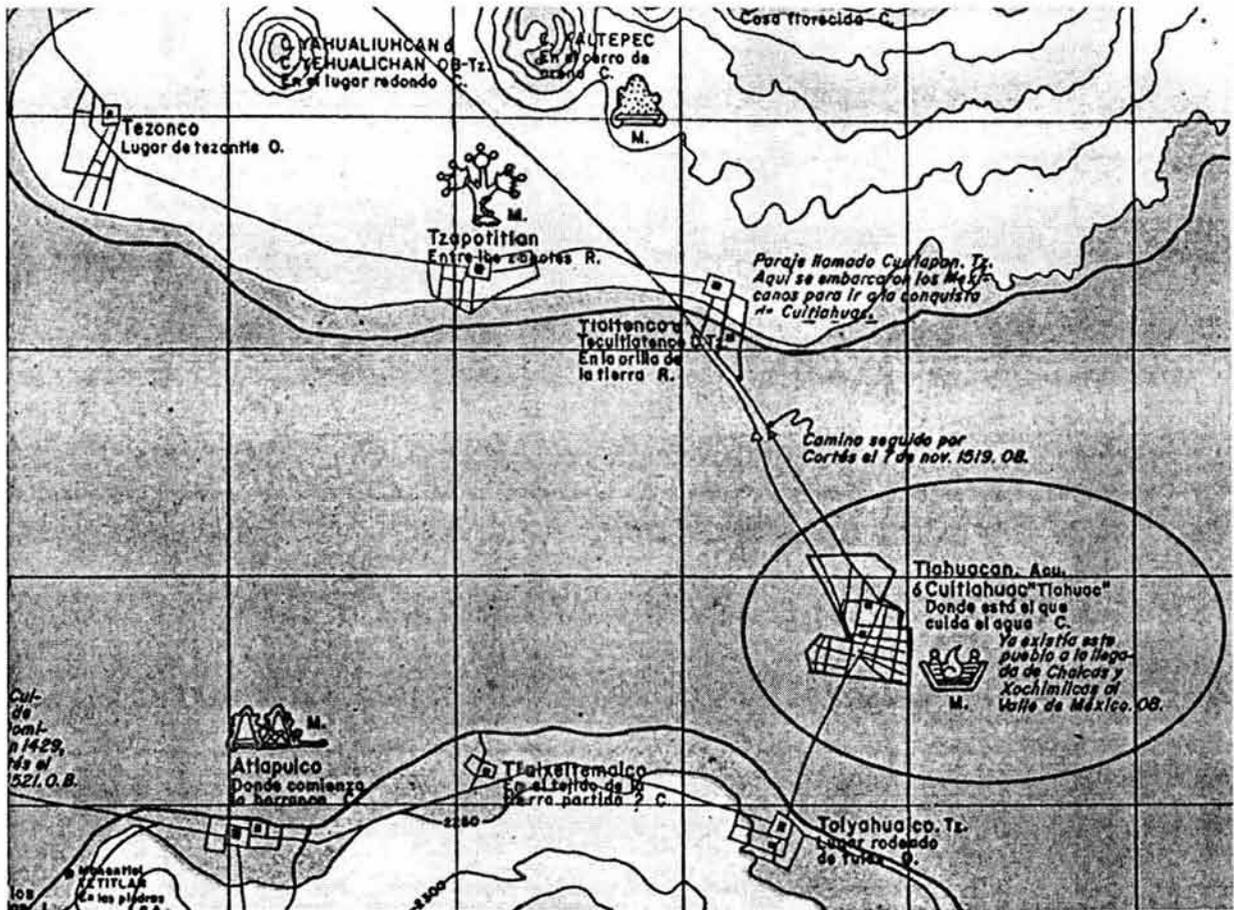


Fig 2.18 Tlahuac, donde está el que cuida el agua, Mapa Reconstructivo (González Aparicio, 1968).

2.4 Cartografía

Los documentos cartográficos proporcionan información acerca de la forma y dimensiones del entorno general de un territorio dado; es decir, consignan los rasgos u objetos geográficos mediante una representación de puntos y líneas que conforman áreas y se emplean diferentes colores y símbolos para facilitar su interpretación (conformados en un idioma clásico o universal). Estos documentos proporcionan un soporte de información y comunicación útil para enmarcar los estudios realizados por los especialistas de las distintas áreas o disciplinas de las Ciencias de la Tierra.

En este inciso, se describen los principales aspectos metodológicos en cuanto al procesamiento y tratamiento de la Información Geográfica; así como las características generales y cuantitativas de cada uno de los diversos datos que integran tanto al Marco Geográfico como al Sistema SIG-SG. Esta información abarca la totalidad del territorio de la Cuenca de México más una área tributaria que la envuelve.

El primer paso metodológico se inicia cuando se transforma la información analógica a formato digital estándar llamado DXF (Data Exchange File); el segundo paso consiste en la depuración de la información con el fin de personalizarla o arreglarla en capas o estratos para su correcta referenciación geográfica bajo un coherente Sistema de Proyección y sus correspondientes coordenadas geográficas. Este último aspecto es el que permite el manejo y despliegue simultáneo de dos o más capas o estratos de información, llamado integración vertical de datos.

Gran parte de los datos geográficos proviene de la información que produce el INEGI en discos compactos y actualizada hasta 1999, entre los que destacan los archivos de datos digitales que representan a su vez diversos objetos geográficos. Para fines prácticos, tales datos se agrupan en tres clases: vectoriales, raster y alfanuméricos (ver Fig 2.19)

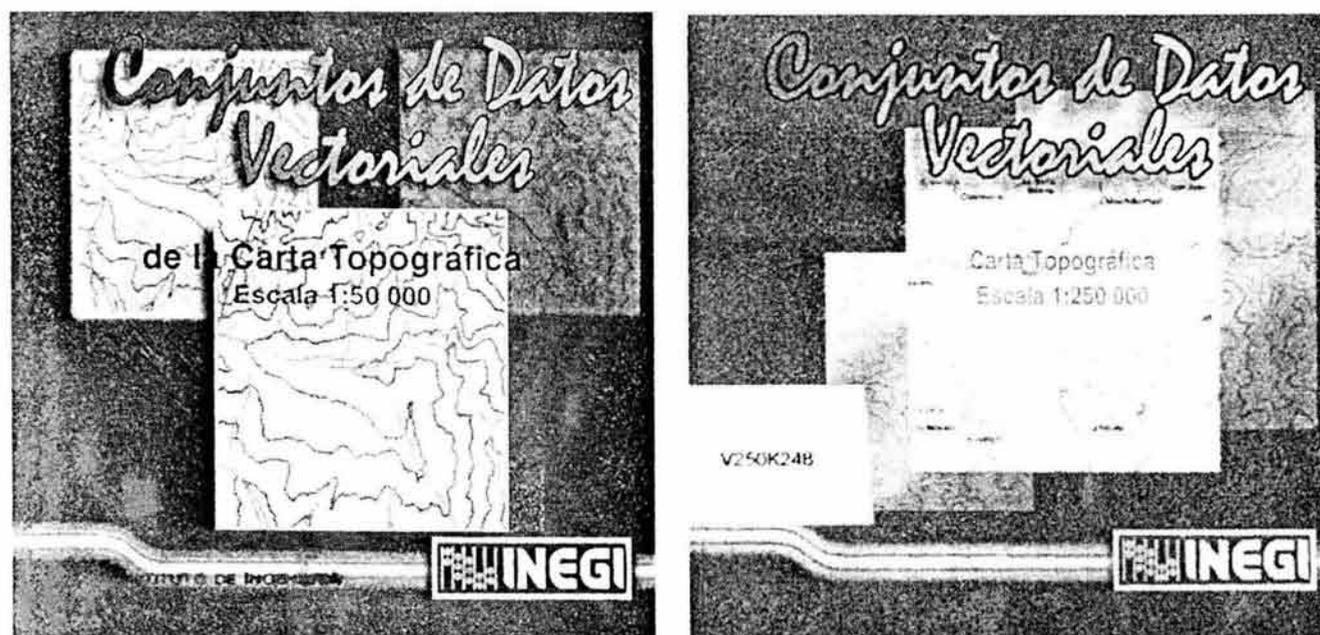


Fig 2.19 Conjunto de Datos Vectoriales, Raster y Alfanuméricos editados por el INEGI

La información está agrupada en cuatro escalas de representación simbólica (1:250,000; 1:50,000; 1:20,000 y 1:10,000), con el propósito de permitir pasar de una visión regional a local y viceversa en el territorio de la Cuenca de México. En zonas con gran densidad de datos, permite una representación simbólica de los datos a gran escala (Cartas Urbanas 1:10,000). En la Tabla 2.2 se presentan los formatos y cubrimientos en área de las respectivas escalas.

Tabla 2.2

ESCALA	FORMATO Grado, Minutos y Segundos de latitud por longitud	CUBRIMIENTO Aproximado en km ²
1:50,000	15' x 20'	940
1:20,000	7'30'' x 6'40''	156
1:10,000	3'45'' x 3'20''	39
1: 5,000	1'52.5'' x 1'40''	9.8

Se adoptó la división del territorio en secciones regulares y la nomenclatura del sistema estándar del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI, para el manejo de la información cartográfica.

Esta división tiene las ventajas siguientes:

- 1) permite sobreponer información para establecer una continuidad de una zona dada a un territorio más amplio.
- 2) permite pasar de una visión regional a una local dentro de los límites naturales del territorio de la Cuenca de México.
- 3) proporciona compatibilidad. Contar con una división del territorio de manera regular como el sistema estándar del INEGI, permite actualizar o agregar nueva información del INEGI y facilita la difusión. Además, permite compartir información con otras instituciones generadoras de información y facilita el tratamiento de la información por varias personas.
- 4) conduce a un tamaño de los documentos que resulta aceptable para la administración, monitoreo, etc.
- 5) facilita el intercambio de datos y la difusión de los mismos.

La nomenclatura de las claves de identificación (alfa-numéricas), tiene una connotación de ubicación geográfica para cada una de las cartas (ver Fig 2.20 y Tabla 2.3). Un mapa a escala de 1:50,000 cubre más o menos 30 por 50 km. Un mapa a escala de 1:250,000 abarca 16 unidades de 1:50,000.

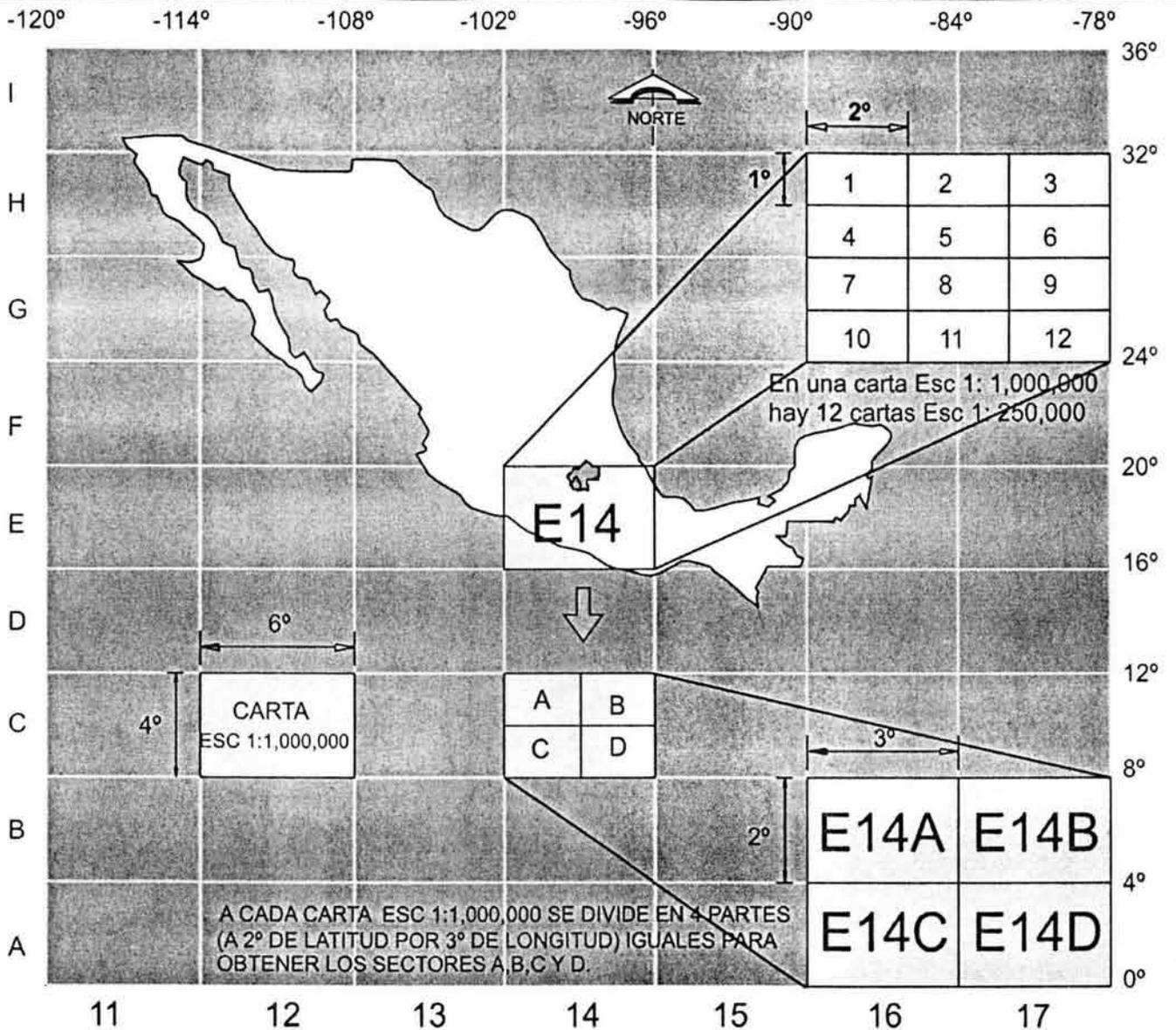


Fig 2.20 Nomenclatura de las claves de identificación del Sistema Nacional de Información Geográfica del INEGI

Tabla 2.3

ESCALA	CLAVE DEL CONJUNTO DE DATOS DIGITALES
1:50,000	Clave de escala 1:1,000,000 + Letra Mayúscula (A, B, C, D)+Dos números (11 al 89, excepto ceros). Ejemplo: G 13 D 89
1:20,000	Clave de escala 1:50 000 + Letra Minúscula (a, b, c, d, e, f). Ejemplo: G 13 D 89 f
1:10,000	Clave de escala 1:20 000 + Número (1 al 4). Ejemplo: G 13 D 89 f 4
1: 5,000	Clave de escala 1:10 000 + Letra Minúscula (a, b, c, d). Ejemplo: G 13 D 89 f 4 d

Como parte del presente trabajo, se elaboró el primer mosaico cartográfico digital (compuesto por 49 cartas topográficas, escala 1:50,000) que cubre una superficie de 46,060 km² (Fig 2.21) donde queda inscrita la Cuenca de México (16 cartas escala 1:50,000). Cada una de estas abarca un área de aproximadamente mil km² con un formato de 15' X 20' de latitud y longitud geográfica respectivamente, bajo la proyección Universal Transversa de Mercator, UTM con el Datum NAD27 (North American Datum of 1927).

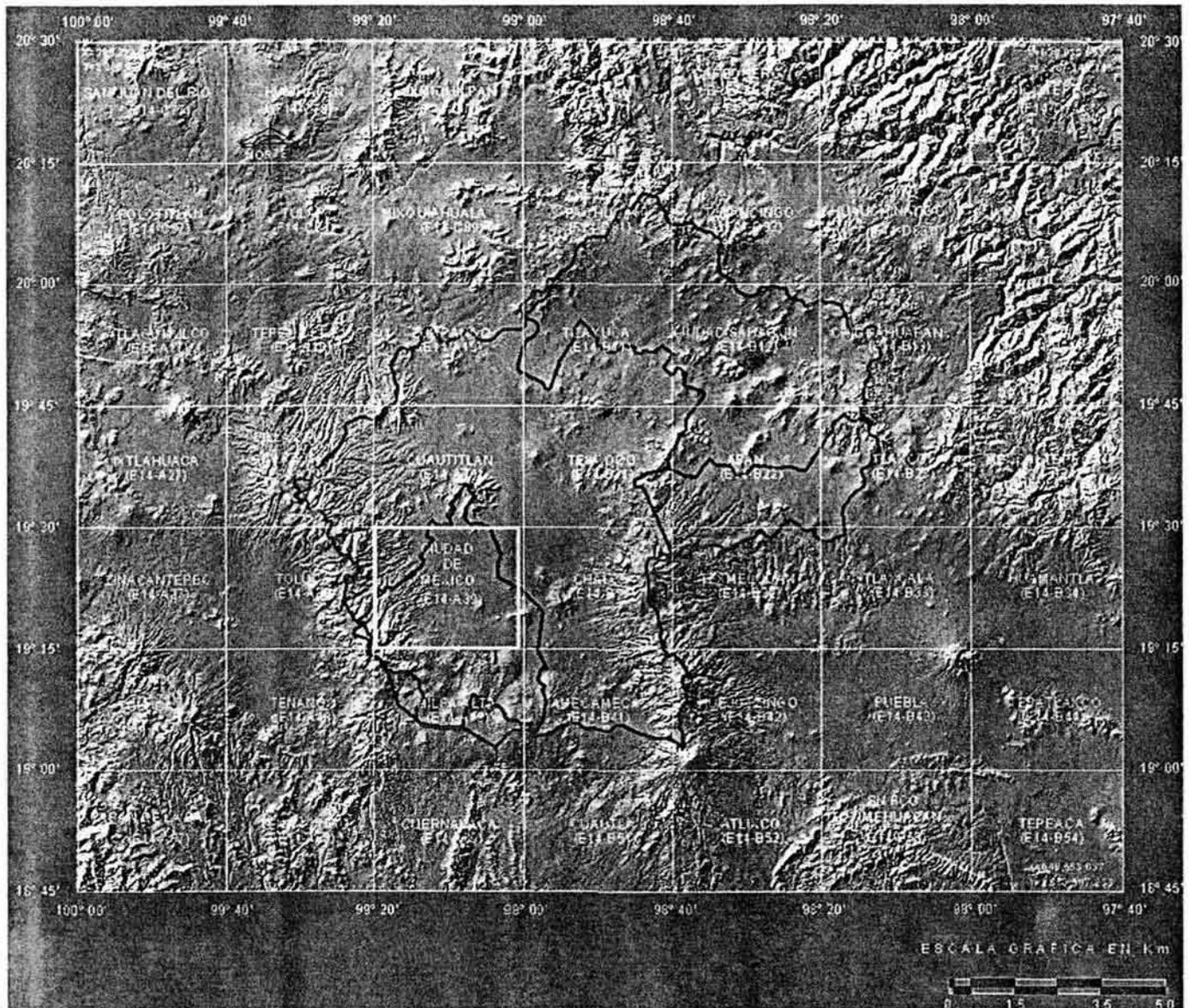


Fig 2.21 Mapa Llave o Índice del mosaico cartográfico digital

Cada carta topográfica contiene información relacionada con el relieve, rasgos hidrográficos, vegetación, áreas agrícolas, áreas urbanas, vías de comunicación y otros detalles (toponimia de las localidades o áreas urbanas), ver Fig 2.22 (*primer nivel jerárquico del sistema*).

La interpretación de las cartas se facilita mediante el empleo de diferentes colores y símbolos con el fin de diferenciar las capas o estratos de información.



Fig 2.22 Carta topográfica, Ciudad de México, esc. 1:50,000 (E14 A 39)

En color negro se indican las obras hechas por el hombre; los rasgos hidrográficos están representados en azul; el verde se utiliza para las zonas de vegetación y las formas del terreno se marcan mediante curvas de nivel en color sepia.

El color amarillo se emplea como fondo para las áreas urbanas y el gris para un sombreado que se genera a partir de los modelos digitales de elevación, con el fin de dar a las cartas una impresión tridimensional del relieve y así facilitar aún más la interpretación.

Se elaboró un segundo mosaico cartográfico digital (compuesto por 34 cartas urbanas, escala 1:10,000) que cubre una superficie de 1,320 km². Cada una de las cartas cubre un área rectangular de 6 x 6.5 km (39 km²), bajo la proyección Universal Transversa de Mercator, UTM con el Datum NAD27 (North American Datum of 1927).

Cabe destacar que la superficie del segundo mosaico cartográfico digital cubre a todo el tejido o mancha urbana que se extiende y reparte en los más de 85 municipios o localidades de cinco entidades federativas que integran la Cuenca de México; es decir, al desarrollo o crecimiento urbano poblacional que ya alcanza el 12 % del total del territorio en la Cuenca (ver Fig 2.23).

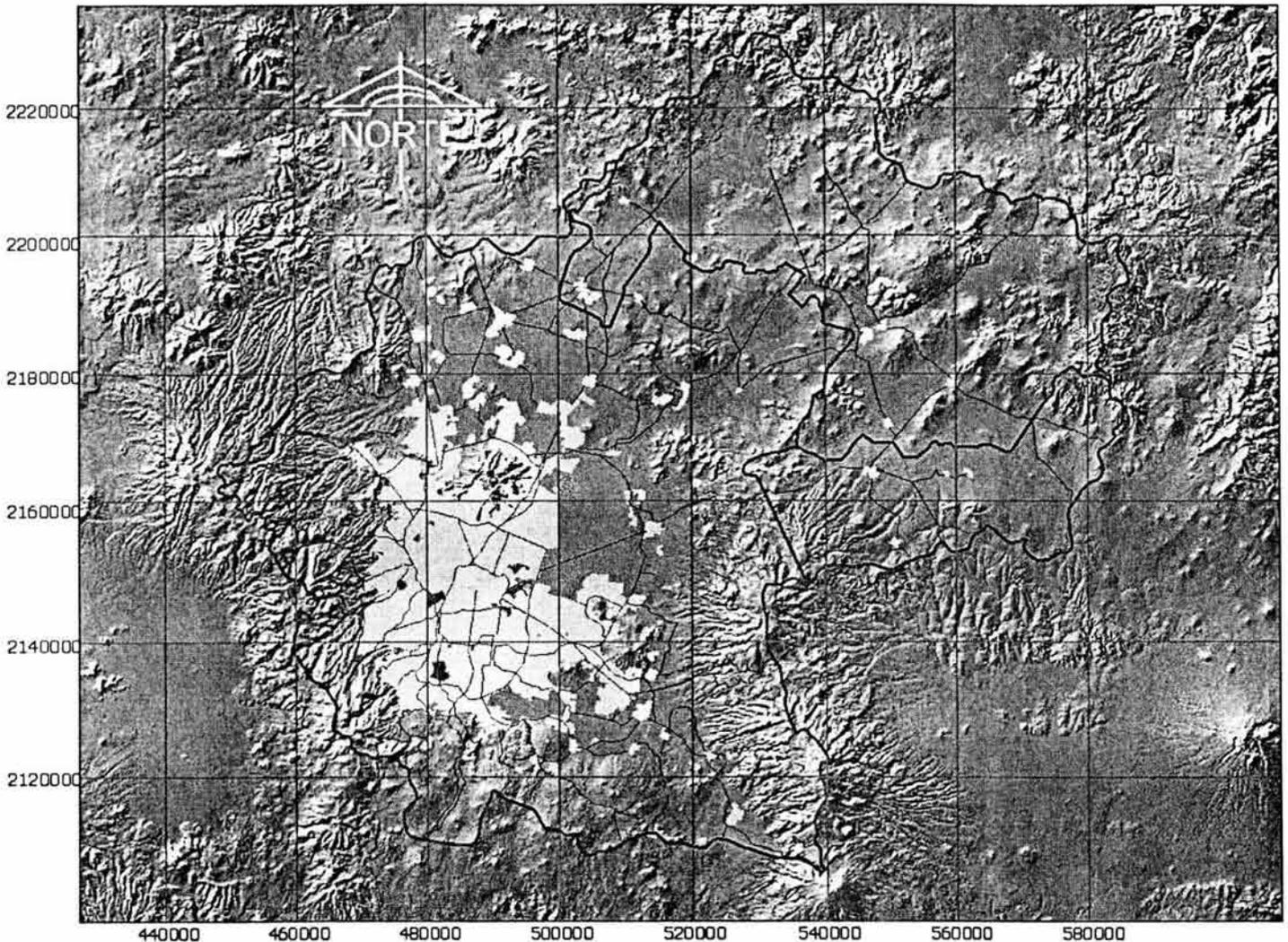


Fig 2.23 Superficie de la Mancha Urbana, Cuenca de México

Cada carta urbana define y contiene información relacionada con la traza de las localidades a nivel de calles, manzanas, plazas y parques. También contiene otros detalles (toponimia de las localidades o áreas urbanas), ver Fig 2.24 (*segundo nivel jerárquico del sistema*).

Estas cartas urbanas (escala 1:10,000) tienen la función de visualizar y manejar zonas con gran densidad de datos. Lo anterior permite al Sistema SIG-SG visualizar y manejar zonas con gran densidad de sondeos geotécnicos en él registrados (puntos color azul) y que hasta ahora han sido recopilados y que requieren una representación simbólica de gran escala.

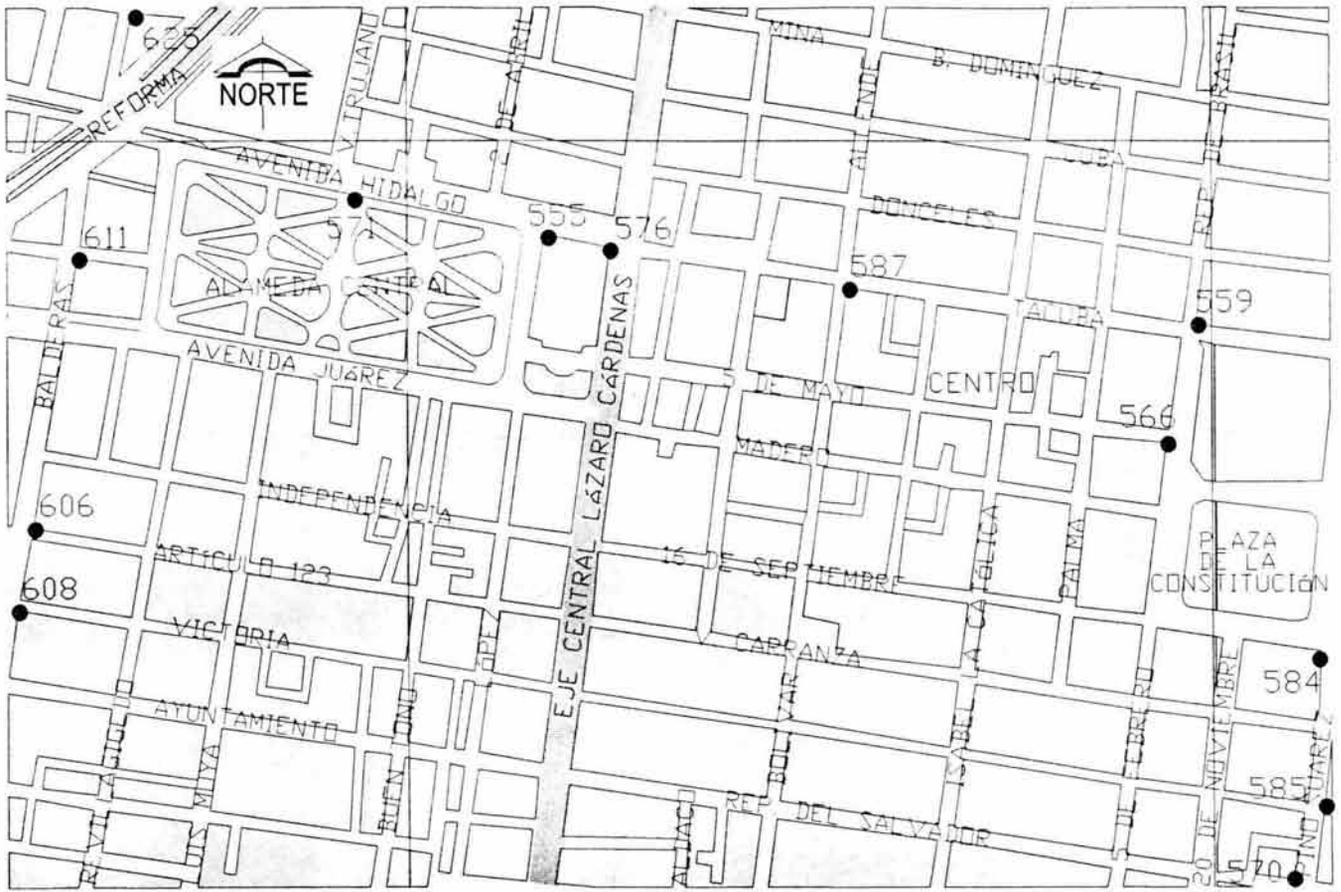


Fig 2.24 Carta urbana, México, D.F.

2.5 Topografía

La información topográfica es fundamental para casi todas las actividades relacionadas con un territorio dado, debido a que proporciona numerosos datos sobre la superficie física del terreno, útiles para elaborar cartas o mapas orográficos y geomorfológicos; ayuda a la interpretación de la geología estructural, etc. a través de las formas y dimensiones del relieve con base en la planimetría y altimetría. Esas formas y dimensiones del relieve se manifiestan como: laderas; ríos, volcanes; calderas; conos; fallas; grietas; líneas o superficies de contacto, discontinuidades, valles, cuencas, etc.

La información topográfica es básica para llevar a cabo la interpretación y el análisis de las características y rasgos generales del relieve (abrupto, medio, suave y plano), ayudando a definir la extensión en longitud y ancho de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas mediante la proyección horizontal en un plano. Generalmente se presenta a través de curvas de nivel indicando su cota, definida como su altura sobre el nivel del mar.

La topografía se encuentra descrita en cartas topográficas, que sirven de base cartográfica para llevar a cabo diferentes estudios que requieran el conocimiento de los rasgos generales de la superficie terrestre para elaborar y definir nuevos mapas temáticos (geomorfológicos, orográficos, etc.)

Esta información geográfica (topografía) la presenta también el INEGI en formato vectorial, con curvas a cada 10 m, 20 m y 100 m, que fueron tratadas, depuradas y personalizadas de acuerdo a las necesidades del presente trabajo para generar los Modelos Digitales de Terreno y sus derivados. A continuación se describen las especificaciones de la información topográfica que ofrece el INEGI.

A partir de 1994, el INEGI produce datos para Modelos Digitales de Elevación escala 1:50,000 con estas especificaciones:

Área de Cubrimiento: 15' de latitud por 20' de longitud, de manera consistente para todo el territorio nacional. *Sistema de Coordenadas de Referencia:* UTM (Proyección Universal Transversa de Mercator). *Datum Horizontal:* NAD27 (por sus siglas en inglés, *North American Datum of 1927*). o ITRF92 Época 1988,0 (por sus siglas en inglés, *International Terrestrial Reference Frame of 1992*), *Datum Vertical:* NAVD29 (por sus siglas en inglés, *North American Vertical Datum of 1929*). Elevaciones en metros referidas al nivel medio del mar. *Contenido:* Datos de altura, georreferenciados y espaciados a intervalo constante. *Estructura:* Archivo de datos representado gráficamente como estructura raster. *Resolución:* La resolución en "x, y" de la red regular de puntos de altura es de 50 metros, ajustada a valores cerrados en metros, en coordenadas UTM. *Formato:* El formato del Modelo es de tipo raster, llamado crudo binario de dos bytes por dato, sin encabezado. *Tamaño de Archivo:* La cantidad de información varía en función de la latitud y longitud geográfica del área representada; en promedio, el tamaño es de 750 Kb.

Exactitud: Los datos obtenidos a partir de la conversión de la carta topográfica escala 1:50,000 mantienen una exactitud relacionada con la precisión de los métodos fotogramétricos con que se elaboró esa carta. Es decir, la exactitud de los valores de altura es de \pm tres metros en elevación y \pm tres metros en posición horizontal. Para los datos que se generan actualmente por el método fotogramétrico de correlación de imágenes, se obtienen los mismos estándares de exactitud.

Bajo el nombre de Modelo Digital del Terreno, MDT, se entiende al conjunto de datos numéricos que describen las características del terreno. Los MDT son una versión digital de los mapas topográficos convencionales por lo que, en ocasiones, han sido denominados mapas virtuales. Un MDT puede definirse en forma más completa y precisa como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (altura o elevación, pendiente, etc.).

El análisis de un MDT permite evaluar las características generales de la superficie del terreno en tres dimensiones, ayudando así a obtener una mejor caracterización y clasificación del relieve a través de las formas y alturas del terreno. En efecto, la topografía tiene una notable influencia sobre las numerosas variables que intervienen en la dinámica de los procesos endógenos y exógenos, los cuales dan origen y modelan a través del tiempo al relieve. Por tal motivo, se ha generalizado el empleo de los MDT día con día en diversos temas de gran interés práctico. Las formas topográficas se expresan por medio de (Figs 2.25y 2.26):

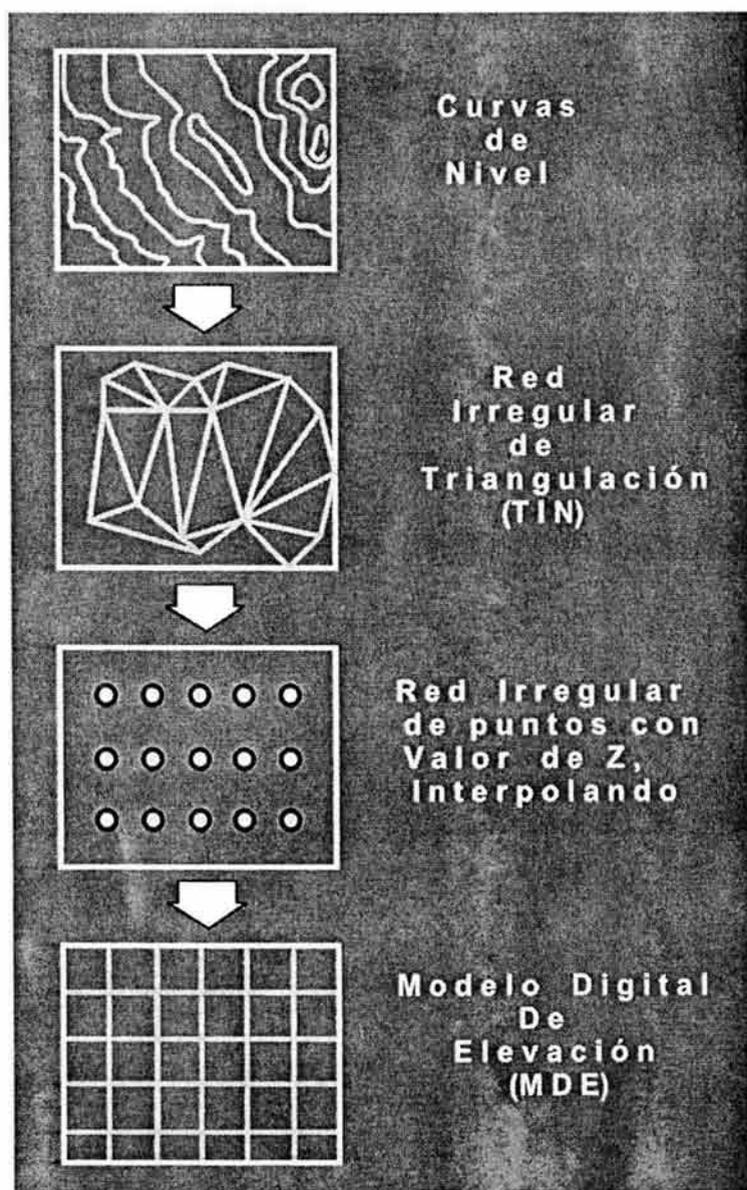
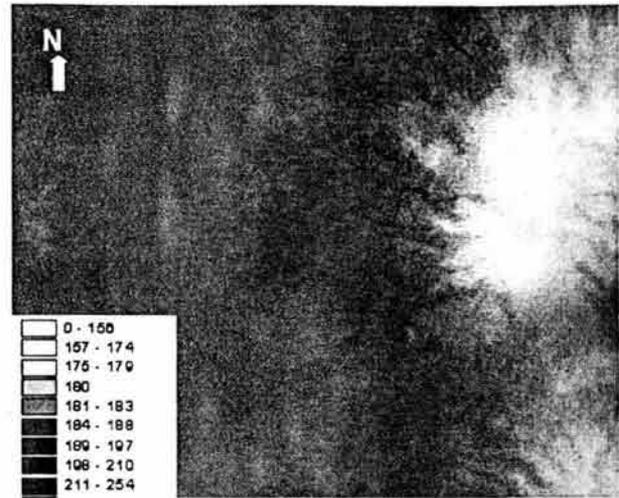


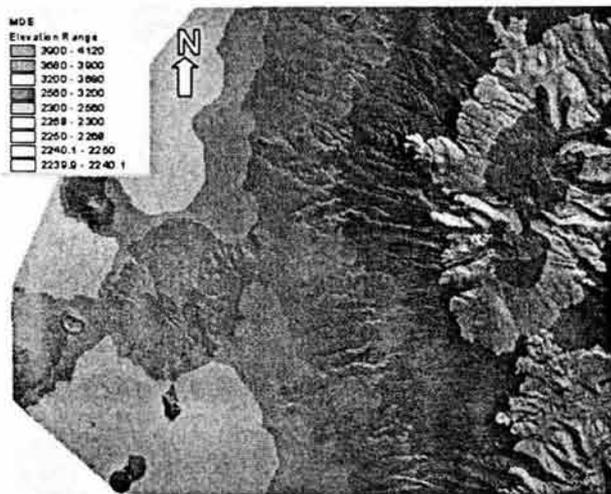
Fig 2.25 Procedimiento para la elaboración de un MDT



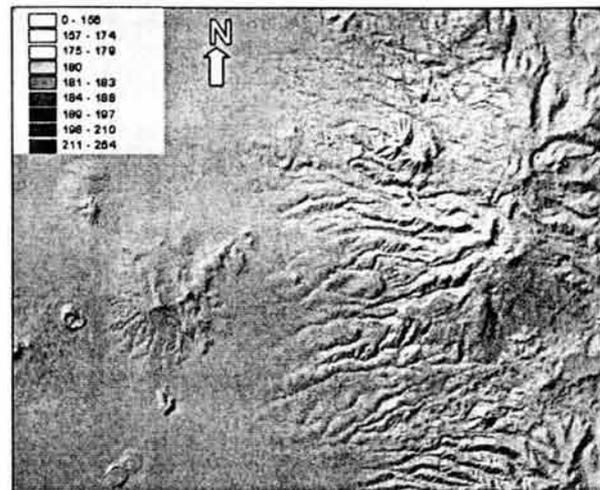
Curvas de Nivel



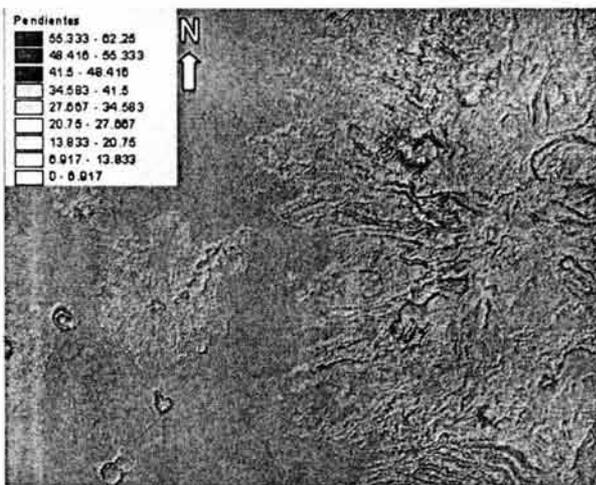
Modelo Digital de Terreno



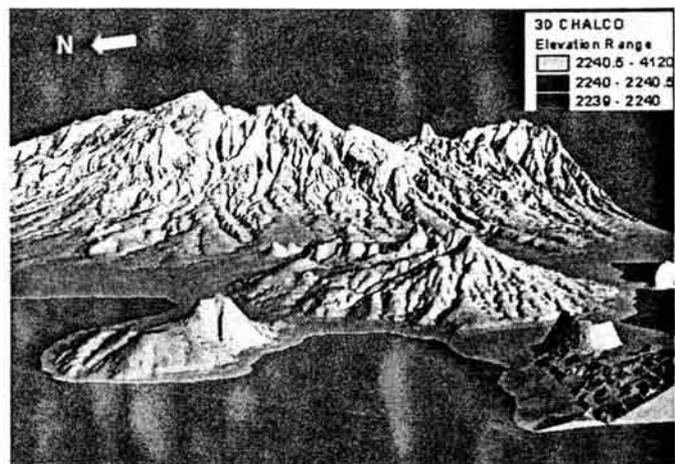
Modelo Digital de Altimetría



Modelo de Relieve Sombreado



Modelo Digital de Pendientes



Modelo de Relieve Sombreado, vista oblicua

Fig 2.26 Representaciones típicas de la información topográfica, zona de Chalco

2.6 Imágenes de satélite

Una imagen de satélite es un documento o recurso tecnológico relativamente novedoso y usado ampliamente hoy en día por los especialistas dedicados a las distintas áreas de las Ciencias de la Tierra (como un método de reconocimiento).

Estos documentos complementan y enriquecen las tareas de gabinete y campo encaminadas a conocer a lo largo y ancho las características y rasgos de las formas y dimensiones de los elementos naturales y artificiales de la superficie terrestre; así como su interrelación con otros objetos. Es decir, ayudan a obtener con mayor celeridad un conocimiento preliminar acerca de la envoltura del entorno o medio físico-geográfico mediante la imagen, logrando con ello obtener una síntesis más adecuada de un territorio dado mediante un simple análisis visual del documento (Fig 2.27).



Fig 2.27 Composición en falso color 1 2 3 de la cuenca de México, (Laboratorio de SIG y PR del Instituto de Geografía, UNAM)

También dan cuenta de los cambios (cuantitativos y cualitativos en tiempo real) provocados por fenómenos o desastres naturales o aquellos inducidos por la actividad humana a través del entorno captado por la imagen antes y después del fenómeno o desastres, con el fin de inventariar o cuantificar un aspecto de interés (Fig 2.28).



Fig 2.28 Acercamiento de la ciudad de México

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 elemento de escena, píxel), cuyas dimensiones en el terreno definen la resolución espacial de la imagen (ver Fig 2.29).

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.

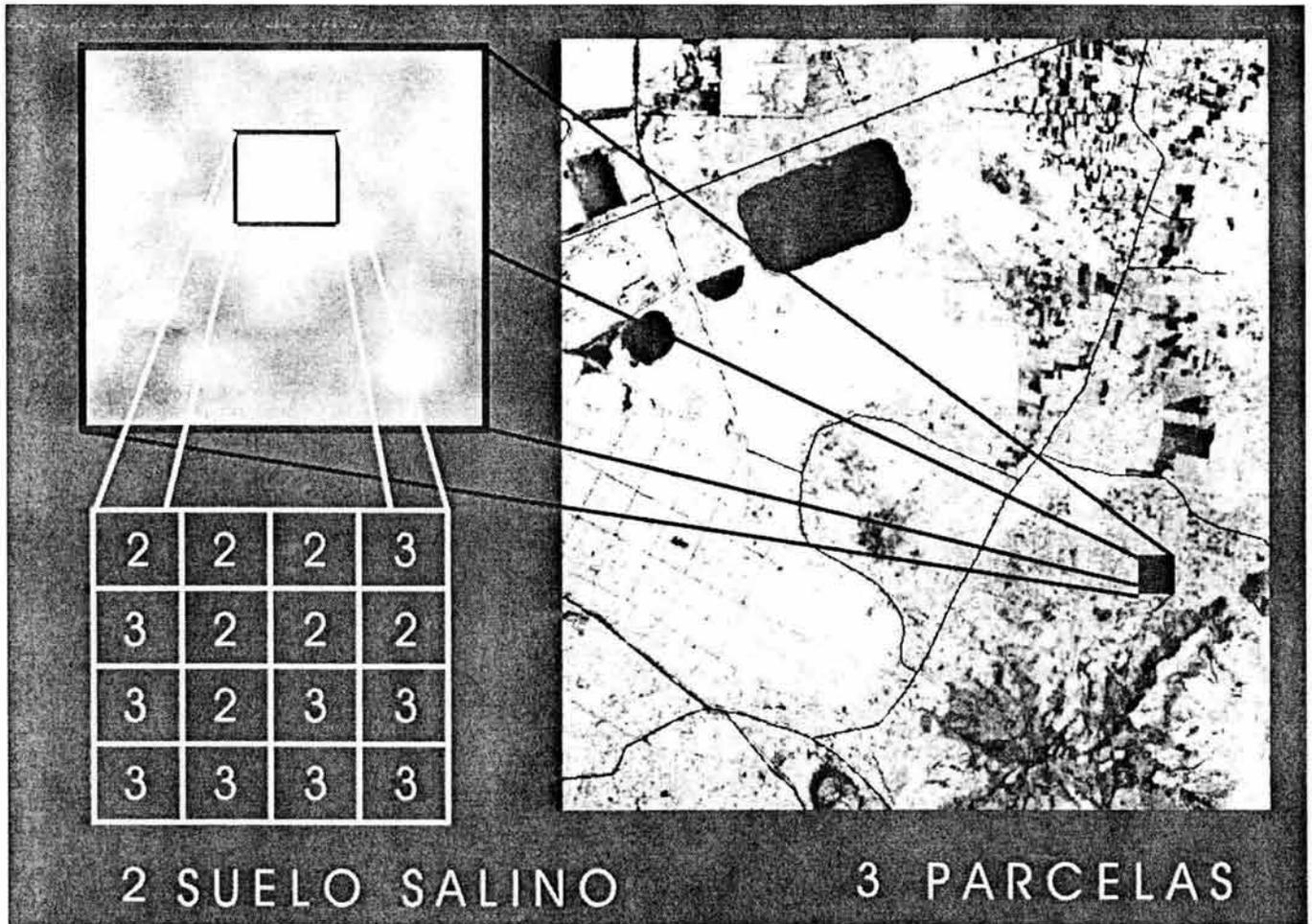


Fig 2.29 Matriz numérica

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 (gruesa, mediana y fina) sombras, patrón espacial, contorno, formas de la imagen.

Las características de la imagen de satélite de las figuras 2.28 y 2.29 (Sensor Remoto Landsat Mapeador Temático, LMT) que están contenidas en el Sistema SIG-SG se muestran en la Tabla 2.4 (Laboratorio de SIG y PR del Instituto de Geografía, UNAM)

Otros documentos que sirven de base para complementar y enriquecer el marco geográfico son las fotografías aéreas digitales.

Tabla 2.4 Principales características del Sensor Remoto LMT

SENSOR	BANDA	LONGITUD DE ONDA, en μ	RESOLUCIÓN (m)
Landsat Mapeador Temático	1	0.45-0.52 (azul)	30
	2	0.52-0.60 (verde)	30
	3	0.63-0.69 (rojo)	30
	4	0.76-0.90 (infrarrojo cercano)	30
	5	1.55-1.75 (infrarrojo medio)	30
	6	10.4-12.5 (infrarrojo termal)	120
	7	2.08-2.35 (infrarrojo medio)	30

2.7 Fotografías Aéreas Digitales

La fotografía aérea digital es otro de los documentos o insumo incluidos en el Sistema SIG-SG. La fotografía ha llegado a ser un documento objetivo, gráfico, fiel y de amplia cobertura sobre el terreno en el momento de la exposición, permitiendo ampliar los horizontes de observación del medio físico y satisfacer la curiosidad humana por comprender mejor el mundo que lo rodea y responder a las preguntas formuladas en torno al ambiente. Al igual que las imágenes de satélite, la fotografía aérea constituye un insumo fundamental para la elaboración de cartografía básica y temática.

Las herramientas informáticas han impactado en la generación de la fotografía aérea y los derivados fotogramétricos. En la actualidad, las tendencias tecnológicas en este sentido son cuatro:

- 1) La asociación de las tomas aerofotográficas al Sistema de Posicionamiento Global, lo cual redundará en la disponibilidad de coordenadas específicas para cada centro de foto.
- 2) La utilización de software de aplicaciones para las tareas de restitución fotogramétrica.
- 3) La consolidación de imágenes fotográficas geoméricamente corregidas, como son las ortofotos digitales, cuya producción está ligada a los modelos digitales de elevación.
- 4) La toma de fotografía digital

El proceso para la toma de fotografía aérea se ha modernizado al equipar las naves con cámaras que cuentan con microprocesadores para el control automático de sus funciones, incluyendo la compensación de movimiento de la imagen.

También se han instalado navegadores GPS para la conducción precisa de las aeronaves, lo que permite ubicar geográficamente el centro de cada fotografía al momento de la toma y con ello mejorar los procesos fotogramétricos que en la actualidad son digitales, ver Fig 2.30 (proceso similar que lleva a cabo el personal del Instituto de Geografía, UNAM).

Mediante este sistema, se generan y actualizan las cartas topográficas en diversas escalas. Estas fotografías se utilizan también para la realización de cartografía temática y estudios geográficos diversos (como en nuestro caso).



Fig 2.30 Equipo a bordo de aeronaves

El Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería, UNAM, cuenta actualmente con un acervo de fotografías aéreas digitales de aproximadamente 4,285 que cubre la zona o área metropolitana de la ciudad de México de aproximadamente 1,130 km². Este acervo fotográfico fue proporcionado por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía, UNAM.

En la Fig 2.31, se muestra uno de los mosaicos fotográficos que se elaboró y que corresponde a la carta Ciudad de México compuesta por 803 fotografías y 11 líneas de vuelo.



Fig 2.31 Mosaico fotográfico digital, correspondiente a la carta Ciudad de México

Cada fotografía aérea digital abarca un área de aproximadamente 3.50 x 2.0 km. En la Fig 2.32 se ilustra el traslape de dos fotografías aéreas de Ciudad Universitaria, México, D.F.



Fig 2.32 Traslape de dos fotografías aéreas de Ciudad Universitaria, México, D.F.

Cabe destacar, que debido a la gran cantidad de fotografías requeridas para formar el mosaico de cada una de las cartas que conforman a la zona o área metropolitana de la ciudad de México, se hizo necesario proponer un método práctico que facilitara y agilizara el traslape de fotografías para la formación de cada línea de vuelo hasta conformar cada carta topográfica 1: 50,000. Finalmente, se probó que el método propuesto brinda buenos resultados en lo que a precisión se refiere.

A continuación se describe el método propuesto para la formación de los mosaicos de fotografías aéreas. El cual emplea un paquete comercial para computadora llamado Adobe® Photoshop® 7.0 estándar edición profesional que permite trabajar de forma más eficaz con las imágenes ya que contiene un conjunto completo de herramientas para escalar, retocar y componer fotografías.

El primer paso consiste en transformar la carta topográfica 1: 50,000 a formato digital (escanear) con el fin de utilizarla como fondo de referencia para ubicar las fotos y hacer coincidir los rasgos cartográficos de la carta con los de la foto.

El segundo paso, se refiere al tratamiento de cada una de las fotografías y consiste en:

- Obtener un realce en cada fotografía, que ayude a observar mejor los rasgos
- Escalar la fotografía hasta obtener las dimensiones establecidas por la carta topográfica
- Rotar la fotografía hasta lograr hacer coincidir los rasgos de esta con la cartografía de la carta topográfica
- Repetir el procedimiento, para ir traslapando las fotografías hasta formar una línea de vuelo y a su vez integrar el mosaico
- Finalmente se guarda la imagen del mosaico en formato TIFF para posteriormente realizar la referenciación geográfica, y se pueda integrar al sistema SIG-SG.

En la Fig 2.33, se ilustra los pasos metodológicos anteriormente descritos; así como el traslape de fotografías aéreas de una línea de vuelo, haciendo uso del software antes mencionado.



Fig 2.33 Traslape de fotografías aéreas, haciendo uso del Photoshop

3. MARCO FÍSICO

3.1 Geología

3.1.1 Origen y conformación del relieve orográfico

La información descrita en los siguientes párrafos, esta basada principalmente en los trabajos de Mooser (1996). Resulta un tanto difícil pensar que hace casi cuarenta millones de años, a fines del Eoceno, la cuenca de México no existía como tal, y que el vulcanismo que dio origen a todas las montañas que actualmente la conforman, apenas hacía susurrar la corteza terrestre. Algunos plegamientos adornaban esta parte recién emergida, donde se habían formado sedimentos de piedras calizas y yeso.

Las primeras emisiones de lava ocurrieron en la parte norte de la cuenca, y durante cerca de diez millones de años la actividad volcánica generó una gran cantidad de lava ácida, con muchas ignimbritas y tobas, que junto con los abundantes depósitos fluviales conformaron un complejo de fosas y levantamientos, fuertemente fracturados, que se extendían en dirección suroeste-noreste. Las bases donde posteriormente se levantarían las sierras se formaron durante otro lapso igual, a base de emisiones de lavas ricas en cuarzos.

Las primeras formaciones montañosas, con una edad que pasa de los quince millones de años, fueron el Peñón de los Baños, el Cerro del Tigre y el de Santa Isabel, al norte del Tepeyac.

La presión de la placa de Cocos sobre el continente se hizo sentir en esta parte del Eje formándose una serie de fallas como las de Chinameca y de Jojutla, donde posteriormente se levantaría la Sierra Nevada. Para fines del Mioceno, esto es, hace unos catorce millones de años, como se puede apreciar en los esquemas de la Fig 3.1, la actividad volcánica rindió sus primeros frutos: la Sierra de Pachuca (1), la de Guadalupe (2), la de Tepozotlán (3), la del Tepozán (4) y la de las Pitillas (5).

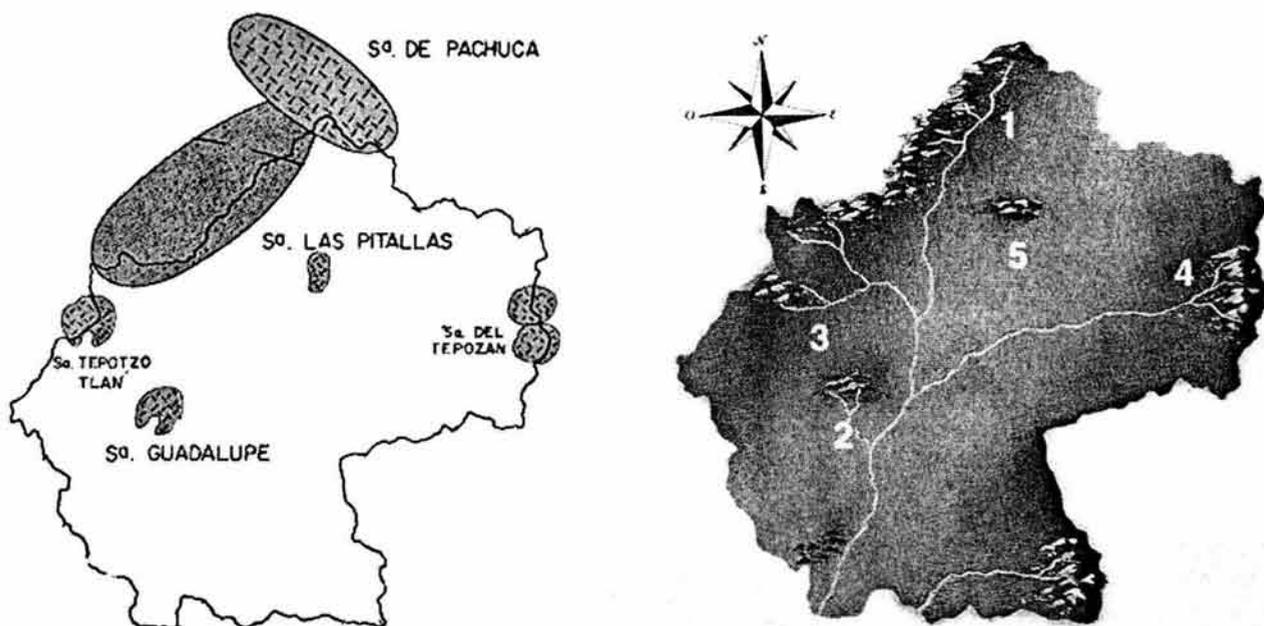


Fig 3.1 La cuenca de México a fines del Mioceno (14 millones de años)
Sierras: Pachuca (1), Guadalupe (2), Tepozotlán (3), Tepozán (4) y de las Pitillas (5)

Justo antes de entrar al Plioceno, hace diez millones de años, se levanta la Sierra de las Cruces (6), delimitando la parte occidental de lo que hoy es la cuenca de México y aparecen, al oriente, las primeras formaciones de la Sierra Nevada (7) y de la de Río Frío (8). El material volcánico arrojado durante estos procesos acentuó la diferencia de nivel ya existente entre la planicie y sus alrededores. Asimismo, la irrupción de las sierras provocó un cambio en la dirección de los ríos que cruzaban esta zona, desviándolos claramente hacia el sur, como se ilustra en los esquemas de la Fig 3.2.

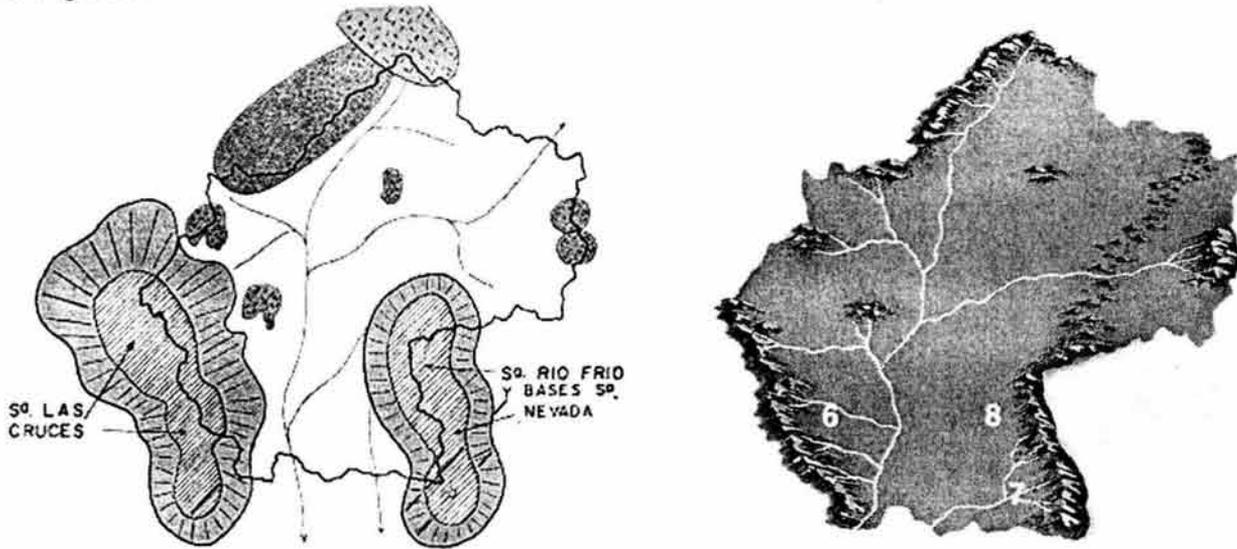


Fig 3.2 La cuenca de México a inicios de Plioceno (10 millones)
Sierras: Nevada (7) y de Río Frío (8)

La presión de la placa de Cocos se seguirá haciendo sentir en el valle, creando una fuerte fractura entre los dos extremos sur de las llamadas sierras mayores. Nuevamente el magma encontrará su curso en esta región de frágil corteza. Una intensa actividad volcánica dará origen a la Sierra de Chichinautzin (9), que cerrará el paso a los ríos, privando al río Balsas de un afluente y formando, hace unos 700 mil años, una cuenca cerrada de más de 9 000 km². Al oriente, fruto de una serie de erupciones intermitentes a lo largo del Cuaternario, concluía la formación de la Sierra Nevada, en donde se erguirán los conos del Popocatépetl y de la bella Iztaccíhuatl con sus fumarolas, dando a la cuenca de México el aspecto que se muestra en los esquemas de la Fig 3.3 y que es el que conocieron sus primeros pobladores.

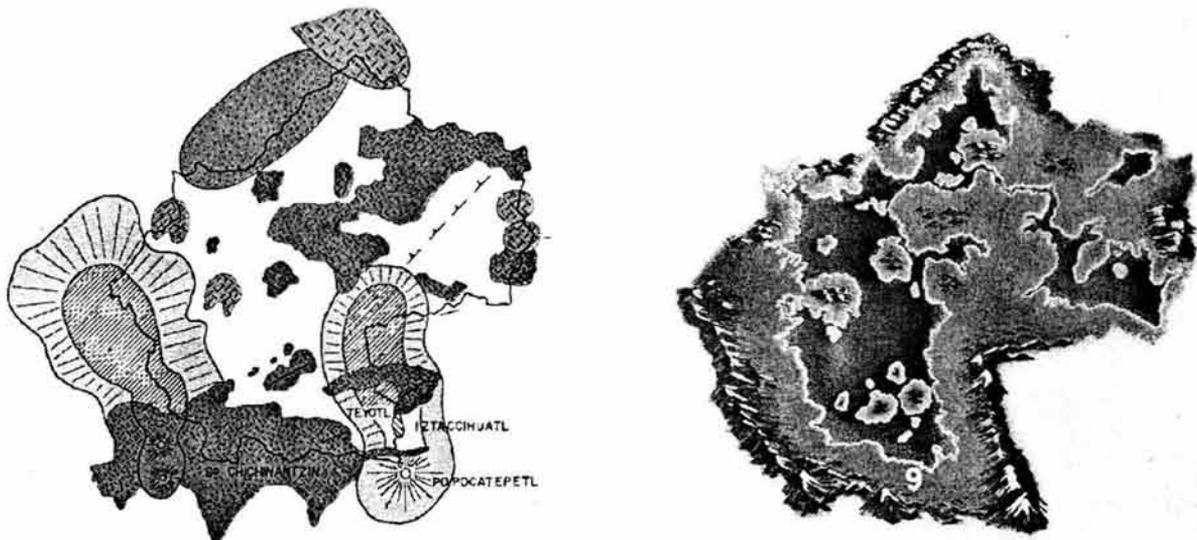


Fig 3.3 La cuenca de México en el Cuaternario (700 mil años)
Sierra de Chichinautzin (9)

3.1.2 Estructura

La Tierra se formó hará unos cuatro mil quinientos millones de años, sus primeros mares hace cuatro mil millones y la vida hacia los tres mil novecientos millones de años. La escala del tiempo geológico de la Tierra se mide en eras, periodos, épocas y edades. Dentro de este marco, los acontecimientos geológicos relacionados con la formación de la Cuenca de México apenas suceden en la era cenozoica, es decir, a partir de los últimos 60 millones de años, arrancando del tiempo cuando se plegó la Sierra Madre Oriental, cayo el asteroide Chicxulub y se extinguieron los dinosaurios (véase la tabla 3.1). Es también cuando ocurre, dentro de la escala geológica, la transición del Mesozoico al Cenozoico, o sea entre fines del Cretácico v principios del Terciario. A partir de ese tiempo emergió gran parte de la masa continental de México. Subsecuentemente, se inició un periodo casi ininterrumpido de vulcanismo continental que se extendió a lo largo de los últimos 45 millones de años. Su actividad se desarrolló en dos fases y produjo finalmente, lo que hoy conocemos como la Cuenca de México.

Tabla 3.1 Evolución geológica del planeta Tierra

Era	Periodo	Formación de algunas cadenas montañosas	Episodios de formación de México	Evolución de la vida	Millones de años	
Cenozoico	Cuaternario	Reciente		Hombre	a	
		Pleistoceno		Edad de los mamíferos	1.6	
	Terciario	Plioceno	Alpes	Vulcanitas de la Sierra Madre Occidental	Plantas angiospermas	5.3
		Mioceno		Sierra Madre Oriental		23.7
		Oligoceno				36.6
		Eoceno	Sierras Laramide			57.8
	Paleoceno				66.4	
Mesozoico	Cretácico		Cuencas entre plataformas marinas	Edad de los reptiles y dinosaurios	144	
	Jurásico	Sierra Nevada de Norteamérica	Las aguas marinas invaden el territorio	Plantas gimnospermas	208	
	Triásico		Sierras y bolsones con lechos rojos		245	
Paleozoico	Pérmico			Anfibios		
		Pensilvánico	Sierras Apalaches	Edad de los peces		
	carbonífero	Misisípico		Plantas pteridofitas	570	
	Devónico		Sierras caledonianas			
	Silurico		Sierras acadianas			
	Ordovícico					
	Cámbrico					
Precámbrico			Afloramientos dispersos de rocas sedimentarias y metamórficas en Baja California, Sonora, Tamaulipas, Hidalgo, Oaxaca y Puebla	invertebrados plantas marinas		
				Algas	2500	
Arcaico				Organismos unicelulares	3900	

Subducción, orogenia y vulcanismo

Siendo tan importante el vulcanismo en la formación de la cuenca, se impone explicar este fenómeno brevemente dentro del marco de los conocimientos actuales de la tectónica de placas. Los continentes se mueven por la renovación continua de la corteza marina y su migración, que avanza lentamente a zonas de subducción situadas frente a las márgenes de los continentes, hundiéndose debajo de éstos (véase la gráfica de la Fig 3.5 y Fig 3.6). En México ocurrieron en el Cenozoico dos subducciones: la primera fue la de la Placa Farallón, frente a la costa occidental; la segunda, la de la Placa de Cocos, frente a la costa meridional (véase el mapa de la Fig 3.4).

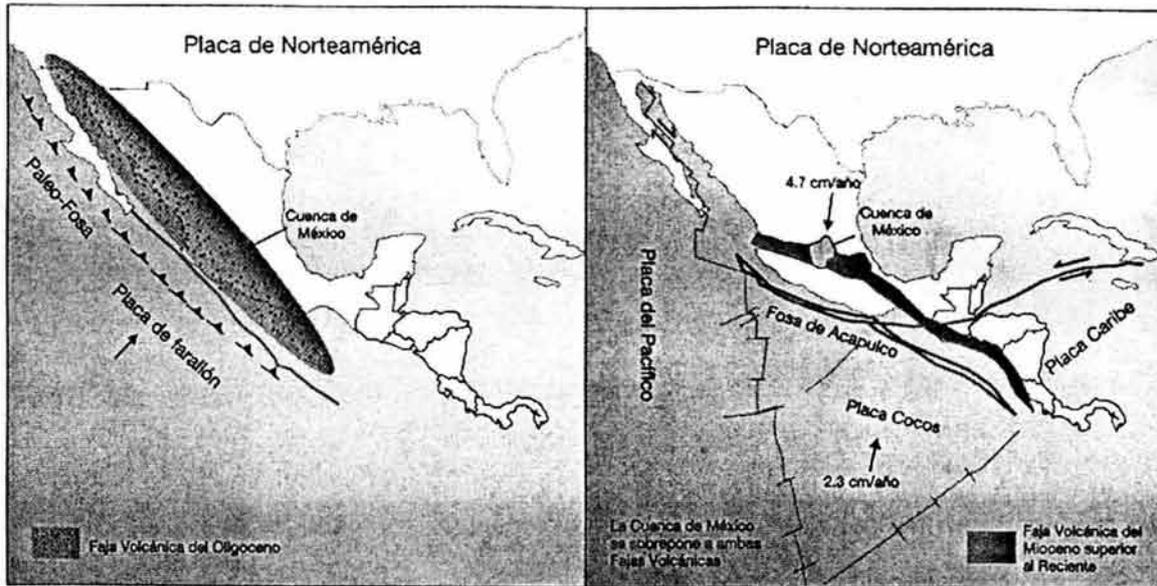


Fig 3.4 México: placas de Farallón y Cocos

Al chocar con el continente y hundirse debajo de él, la placa marina es empujada hasta profundidades de 2 00 a 3 00 km, a veces más, lo cual causa su disolución por el calor reinante. Así, el ascenso de vapor derivado de la desintegración de la placa produce la disolución de porciones rocosas del manto y la corteza. La roca líquida generada, o magma, asciende a través de la corteza en forma de burbujas con volúmenes de centenares y hasta miles de kilómetros cúbicos, dando origen a las cámaras magnéticas que nutren a los volcanes (véase la gráfica de la Fig 3.6).

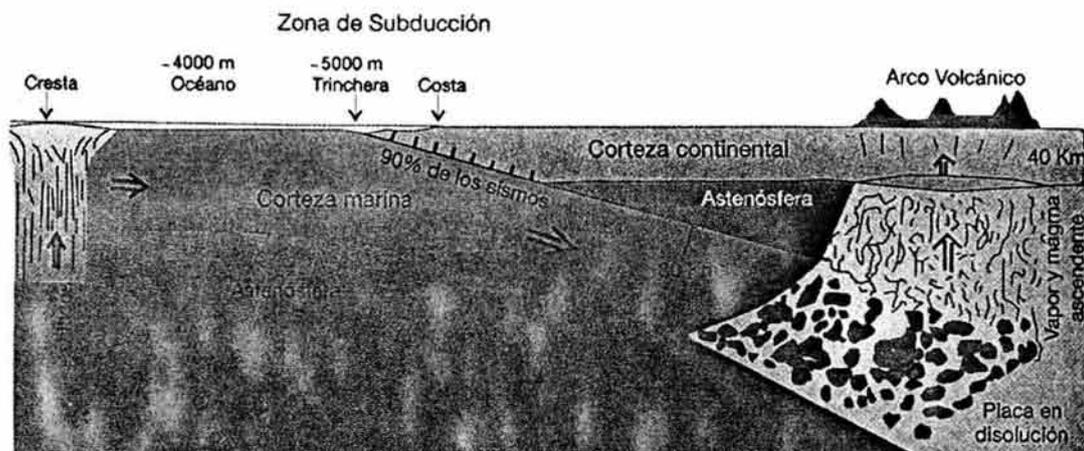


Fig 3.5 Esquema de zonas de subducción de la corteza marina y arco volcánico

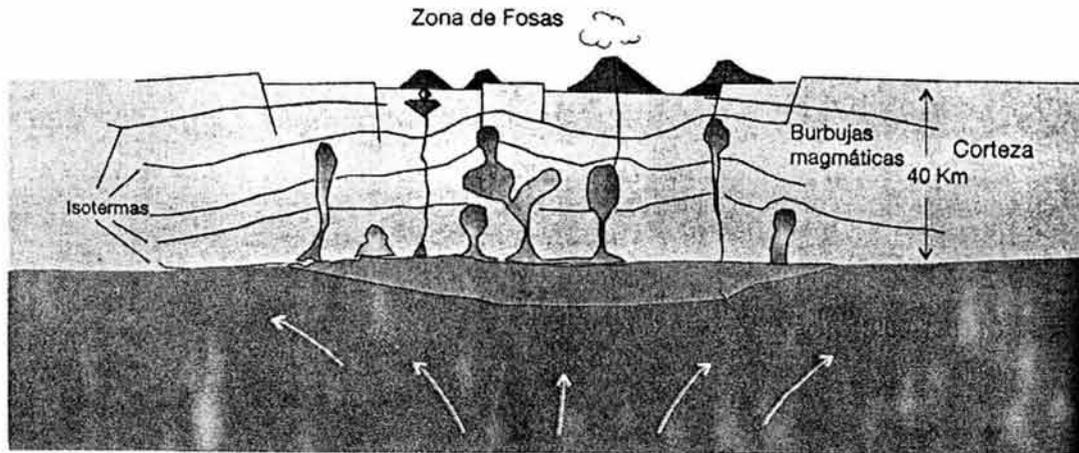


Fig 3.6 Detalle del arco volcánico, continuación de la gráfica de la Fig 3.5

Como consecuencia de este proceso surgen variados esfuerzos en la corteza: Primero, se forma un empuje horizontal a partir de la placa en movimiento contra el continente, el cual puede sufrir, según el caso, leves flexuras o plegamientos intensos (orogenia); segundo, ocurre un empuje vertical hacia arriba, desde la zona de disolución a la base de la corteza, produciendo en ella un hinchamiento, el cual se traduce eventualmente en hundimientos superficiales escalonados al irrumpir los magmas. Una zona de volcanes es, en última instancia, también una zona de tensiones y de formación de fosas por fallas normales. En esta zona se conjugan alternadamente empujes continentales horizontales con empujes verticales desde la profundidad hacia arriba por parte de los magmas en ascenso; éstos, a la vez, crean una franja de elevado flujo térmico y de relativa plasticidad en la corteza. No es extraño que en este juego de compresión y tensión se desarrolle un mecanismo de "bombeo pulsante" sobre los magmas en ascenso, dependiente finalmente de los empujes y cizalleo oscilantes de la placa marina: cuando el empuje horizontal disminuye el vertical prevalece. De tal manera quedan ligados subducción, orogenia y vulcanismo.

Principios prevolcánicos

Sepultado debajo de una potente capa de vulcanitas cenozoicas con espesor medio de 1,500 a 3,000 m yace enterrado el "fondo" de la Cuenca de México (véase la gráfica de la Fig 3.7). Este "basamento mesozoico" consiste principalmente en calizas marinas del Cretácico, plegadas en el Paleoceno a consecuencia de una subducción en el Pacífico. Cuatro perforaciones profundas, hechas después del macrosismo de 1985, sondearon el subsuelo del área de la ciudad: dos encontraron el fondo calizo, una a 1,250 m y la otra a 2,000 de profundidad; las otras dos, con profundidad, es de 2,500 y 3,000 m, nunca salieron de las vulcanitas, esto es, no alcanzaron dicho basamento calizo, de lo que se desprende que presenta una pronunciada topografía.

Los estudios de reflexión sísmica, hechos a través de 26 líneas en 1986, revelaron la estructura general del fondo calizo de la cuenca, que consiste en formaciones sedimentarias plegadas con ejes norte-sur y cabalgadas de poniente. Esta condición del basamento de la cuenca queda corroborada por su extensión al sur, donde al oriente de Cuernavaca, yacen calizas de la formación Morelos tectónicamente sobrepuestas a margas y areniscas de la formación Mezcala.

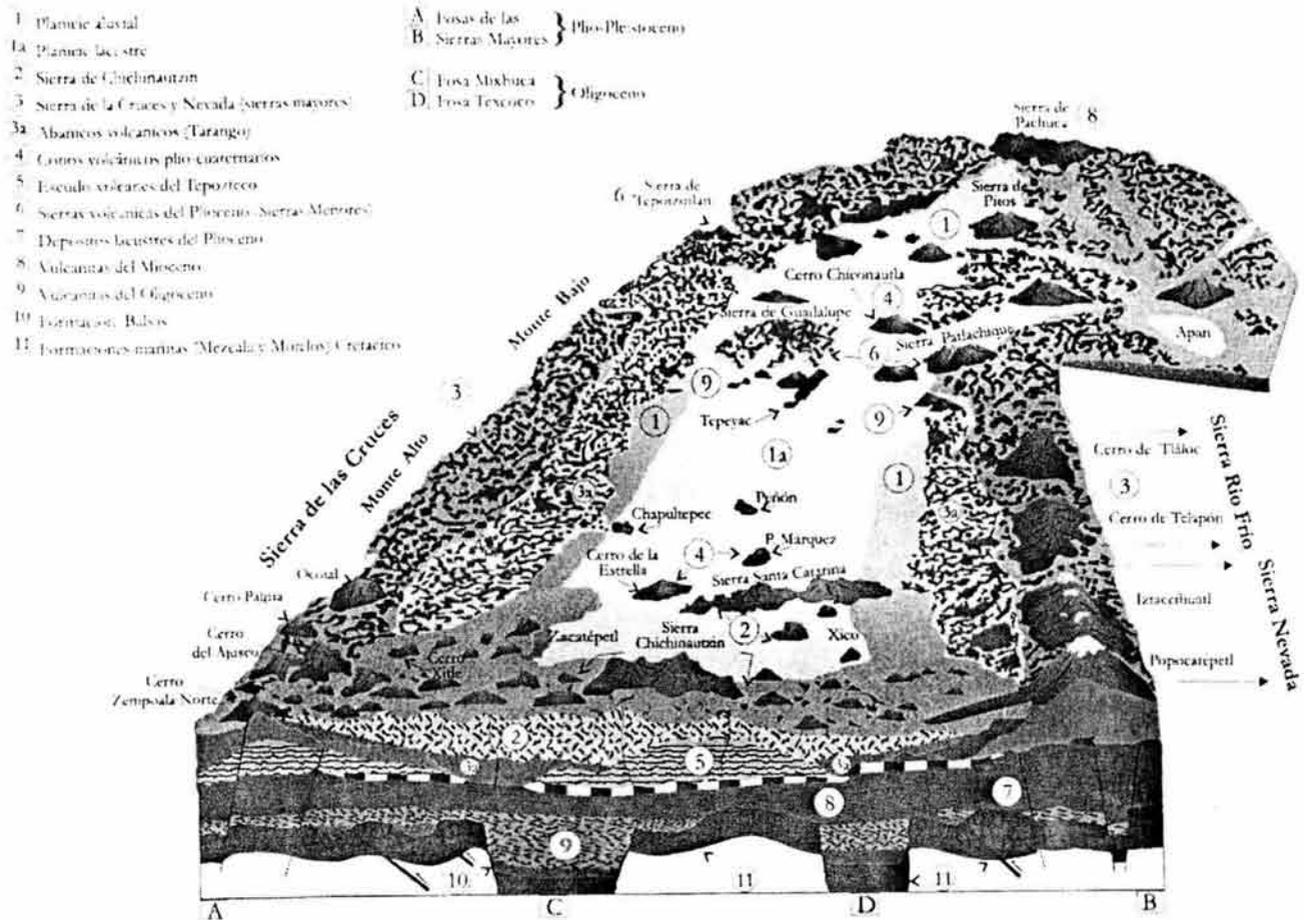


Fig 3.7 Cuenca de México: geología y morfología

Este estilo, aparentemente anómalo, de pliegues orogénicos laramídicos empujados al poniente, es característico del espacio meridional de México, comprendido entre Izúcar de Matamoros, en el oriente, e Ixtapan de la Sal en el poniente. Es probable que se deba al efecto de presiones tectónicas laterales causadas por la cabalgadura de la masa de Oaxaca hacia el norte, ocurrida un poco después de la orogenia larámide, la cual generó pliegues con cabalgaduras al oriente. Después de emerger del mar, en las partes bajas del nuevo paisaje de la tierra firme, se fueron depositando areniscas, conglomerados y sedimentos lacustres continentales, que se conocen como Grupo Balsas (véase estrato 10 de la Fig 3.7).

Primera fase de vulcanismo

El vulcanismo y tectonismo del Oligoceno se considera ligado a una antigua subducción, la de la Placa Farallón, que se fue hundiendo debajo de la costa occidental de México en un periodo anterior a 20 millones de años, en que estuvo activa y produjo un potente paquete de vulcanitas de más de 2 000 m de espesor en el área de la Cuenca de México especialmente en su centro y sur. Porciones de estas formaciones afloran en las calderas de Atizapán y Tlaixpan, así como en las bases de la sierra de Pachuca. En los perfiles sísmicos de reflexión fue posible detectar dentro de las vulcanitas del Oligoceno dos importantes fosas dirigidas al noroeste: la de Mixhuca y la de Texcoco. La primera con hundimientos máximos de 2000 m y una extensión al área de Cuernavaca. Hacia principios del Mioceno (Terciario medio) la subducción de la Placa Farallón cesó terminando así la primera fase de vulcanismo.

Segunda fase de vulcanismo

Sobrepuestas a las vulcanitas del Oligoceno yacen otras del Mioceno superior, Plioceno, Pleistoceno y Reciente. Representan el producto de una segunda subducción, la de la Placa de Cocos, ocurrida durante los últimos 1.5 millones de años debajo de la costa meridional de México, en la Fosa de Acapulco. Dichas -vulcanitas, con espesores de unos 1 000 a 1 500 m dan origen al "moderno" Eje Volcánico Transmexicano (véase la mapa de la Fig 3.4).

La nueva fase de vulcanismo modeló la Cuenca de México. Primero al norte creó la elevada sierra miocénica de Pachuca y, tiempo después, en el centro, surgieron las sierras de Guadalupe y Patlachique, las cuales nombramos "Sierras Menores del Plioceno" (véase la gráfica de la Fig 3.7). Para el Plioceno medio se formaron lagos en cuencas cerradas; éstos, aunque someros, fueron acumulando eventualmente espesores considerables de arcillas, formando depósitos lacustres y aluviales (véase el mapa de la Fig 3.8).

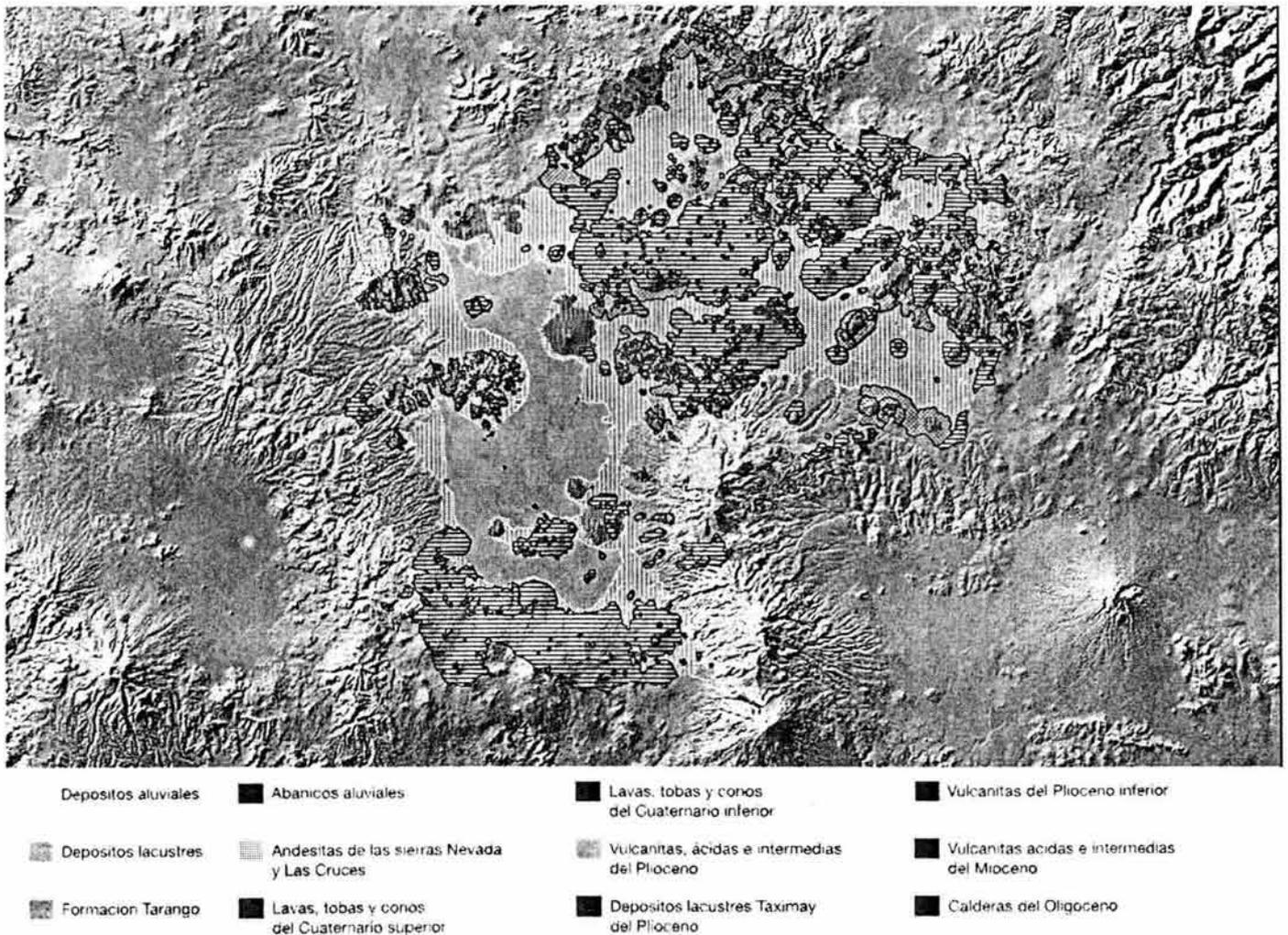


Fig 3.8 Geología de la cuenca de México, Mooser 1996

Éstos afloran en el borde noroeste de la cuenca, por Tequisquiác; se extienden en el subsuelo al sur por debajo de la Ciudad de México a unos 800 m de profundidad y reaparecen al sur del borde meridional de la cuenca bajo los potentes espesores de piroclastos de la formación del Tepozteco.

Los citados depósitos lacustres forman la base prácticamente impermeable del acuífero superior de la Cuenca de México. La sierra del Tepozteco representa los remanentes de grandes escudovolcanes del Plioceno superior, a los cuales se les debe el primer cierre de la Cuenca de México. Sus gruesas secuencias elásticas se extienden al norte debajo de la cuenca, constituyendo la "Serie Estratificada", claramente visible en los registros sísmicos; tiene espesores de 700 m debajo de Xochimilco y se adelgaza a unos 200 m en las cercanías del cerro del Tepeyac.

Hacia el Plio-Pleistoceno la Placa de Cocos debe haber sido sometida a esfuerzos compresionales laterales por angostamiento, al hundirse en la fosa de Acapulco; éstos la fueron "fragmentando", a su vez, en varias subplacas, las cuales por proyección a la superficie crearon arcos volcánicos individuales. Así, las vulcanitas de la cuenca se diferencian de las del norte, pertenecientes al Arco Tarasco, de origen algo más antiguo, y las del sur, pertenecientes al Arco Chichinautzin, de origen más reciente (véase la mapa de la Fig 3.9).

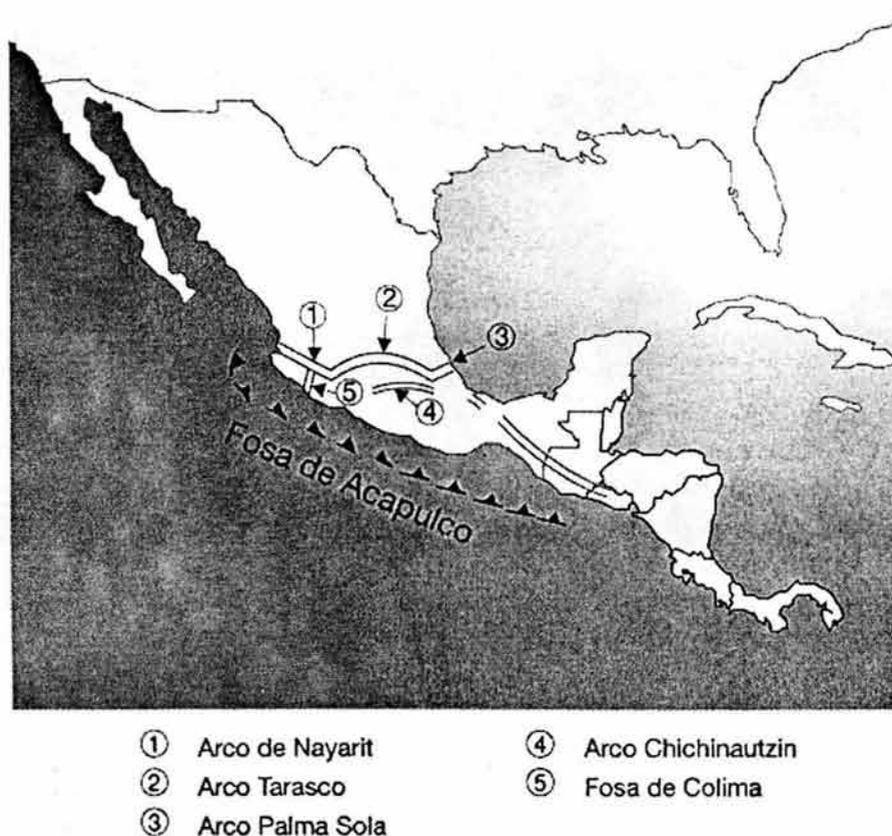


Fig 3.9 Arcos Volcánicos del Plio – Pleistoceno y la cuenca de México

Simultáneamente a la formación de los dos arcos, fueron creciendo las elevadas sierras mayores, que limitan la cuenca por el poniente y oriente: la sierra de Las Cruces y la sierra Nevada (véase la gráfica de la Fig 3.7). Ambas están dirigidas al noroeste, lo que las hace esencialmente paralelas a los antiguos fracturamientos oligocénicos.

Estas elevaciones se construyeron por sucesivas erupciones de grandes escudo-volcanes andesítico-dacíticos, provistos a menudo de calderas mayores. Sin embargo, los elementos meridionales de estas sierras mayores, como los dos conos de Zempoala y el cono complejo del Popocatepetl, son estrato-volcanes.

Es probable que las fosas sobre las cuales ambas sierras se formaron sean el producto de movimientos tectónicos lateral-derechos de cizalleo cortical, mientras que los fracturamientos dirigidos al noroeste, como los de la fosa central de la sierra de Guadalupe y la falla Tlálocapan, sean producto de cizalleos lateral-izquierdos.

Un rasgo característico de las sierras mayores lo constituyen los extensos abanicos, llamados lomas, y definidos como Formación Tarango (véanse los elementos 3a en la gráfica de la Fig 3.7). Son principalmente acumulaciones de flujos piroclásticos y erupciones pumíticas de formidables paroxismos volcánicos, originados en cámaras magmáticas someras, afectadas por las aguas freáticas.

El amplio corredor comprendido entre ambas sierras elevadas desaguaba en el Pleistoceno inferior y medio por dos valles al Alto Amacuzac, uno menor al área de Cuautla, el otro mayor al área de Cuernavaca, con cabeceras en Pachuca y Texcoco, respectivamente. Este complejo drenaje fue interrumpido en el Pleistoceno superior por las numerosas erupciones de conos de tezontle con sus lavas basáltico-andesíticas que conforman la gran sierra del Chichinautzin, elemento medular del Arco Chichinautzin, que causó finalmente el cierre de la Cuenca de México (véase la gráfica de la Fig 3.7). Éste fue el segundo cierre, iniciado según fechamientos paleomagnéticos hará unos 700 mil años. El volcán Xitle, con su extensa lava basáltica del pedregal de San Ángel, surgió hace algo más de 2 mil años, el último acontecimiento de la segunda fase de vulcanismo, como también lo es el volcán Popocatepetl, renovadamente activo desde el ocaso del siglo XX.

Relleno cuaternario

Conocemos este relleno con bastante exactitud gracias a los estudios de reflexión sísmica en el sur de la Cuenca, así como también por medio de centenares de perforaciones hechas en la ciudad de México. La mayoría se efectuaron con fines de aprovechamiento de agua; algunas con fines exploratorios para asegurar la cimentación adecuada de los edificios pesados de la ciudad en un subsuelo lacustre arcilloso y compresible, que además responde críticamente a la extracción de agua, produciendo hundimientos.

El rápido crecimiento de la sierra del Chichinautzin transformó al antiguo espacio desde la sierra de Pachuca hasta el sur, con sus dos sistemas fluviales, en una gran cuenca cerrada. La enorme acumulación de lavas, cenizas y conos de tezontle, con altura máxima de 3,500 m, se asemeja a una gran cortina que en su costado norte dio lugar a un vaso que se fue azolvando. Este azolve es el que hoy podemos definir como depósitos aluviales del Cuaternario de la cuenca de México (véase la gráfica de la Fig 3.10).

El azolve total de la cuenca consta aproximadamente de unos 30 km³ de gravas, arenas, limos, arcillas y cenizas, con espesor máximo de unos 350 m debajo del centro de la ciudad. Sus sedimentos descansan discordantemente sobre la Serie Estratificada, formada por los piroclastos de la formación Tepozteco, o de sedimentos aluviales derivados de ella después del primer cierre de la cuenca. El relleno cuaternario fue sepultando lentamente una red de valles que antes conducían al sur, formando primero lagos, que se colmaban de arcillas, y más arriba depósitos de arenas y gravas. Efectivamente, las perforaciones comprueban el predominio de arcillas lacustres con espesores hasta de 400 m al pie norte de la sierra del Chichinautzin. A medida que se avanza al norte los espesores de arcilla van disminuyendo, a la vez que aumentan aquellos de arenas y gravas.

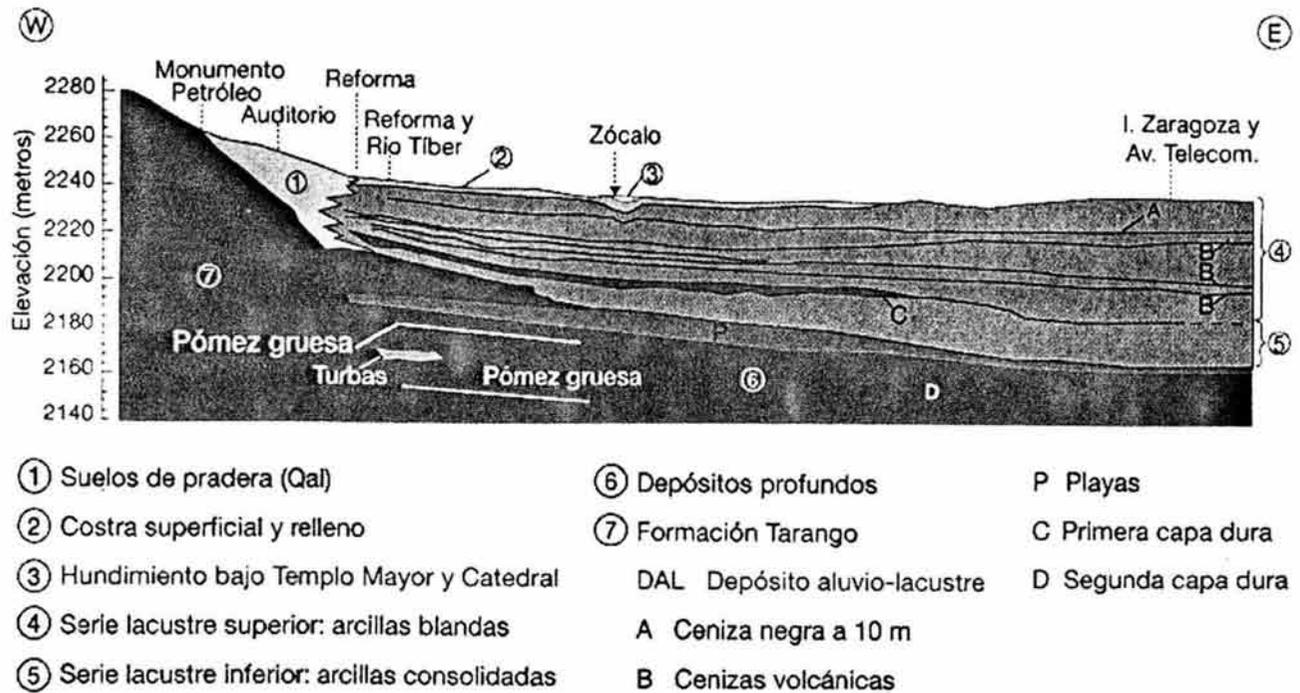


Fig 3.10 Estratigrafía aluvio – volcánica de la ciudad de México

En la fase final del relleno, los lagos fueron extendiéndose hasta cubrir mayores superficies de la planicie aluvial. Así, al final del Pleistoceno, se estima que debe de haber existido un solo lago central mayor, el cual a veces podía alcanzar con sus aguas máximas la cota de 2,248 m. En los últimos milenios, es decir en el periodo Reciente, la superficie del gran lago se redujo, desintegrándose en cinco remanentes lacustres someros de los cuales sólo dos sobreviven en los inicios del siglo XX el de Zumpango y el artificial llamado Nabor Carrillo en el ex lago de Texcoco. La sequía climática del periodo Reciente contribuyó en parte a la extinción de los lagos, pero en parte también puede culparse de ello al drenaje artificial de la Cuenca de México; el peligro de inundaciones en la ciudad propició la construcción de salidas del agua excedente, primero a través del Tajo de Nochistongo, después por los túneles de Tequisquiac y, finalmente, por el Emisor Central del Sistema de Drenaje Profundo.

Estratigrafía del subsuelo de la ciudad de México

Se conoce en detalle la secuencia estratigráfica del relleno aluvio – fluvio - lacustre y volcánico debajo de la ciudad de México. Éste se puede dividir en tres unidades principales (véase la gráfica de la Fig 3.10):

Serie Lacustre Superior. Depósitos arcillosos lacustres de 0 a 30 m de profundidad.

Serie Lacustre Inferior. Depósitos arcillosos lacustres de 35 a 45 m de profundidad.

Depósitos profundos. Arenas y gravas fluvio - aluviales de 45 m de profundidad en adelante.

Dentro de esta secuencia tripartita quedan intercaladas algunas capas de cenizas negras y otras de pómez, testigos de súbitas erupciones volcánicas ocurridas en los milenios transcurridos.

¹Antes del Presente (a.P). Abreviatura acuñada por Willard E Libby en los años cincuenta, que establece 1950 como año de referencia de una cronología absoluta para determinar la edad de rocas y minerales con los datos del análisis del carbono-14. Esta medición de la edad de los objetos se utiliza en arqueología, antropología, geología, etc., existiendo con la de a.C. y d.C. (antes y después de Cristo), ampliamente utilizada para referir hechos históricos (Libby, 1952).

3.2 Geomorfología

La información aquí descrita, fue tomada del trabajo de: Cervantes Borja y López Recéndez, 1994. La cuenca de México se extiende sobre el Eje Neovolcánico, una de las zonas tectónicas más complejas del país, por lo que su relieve actual es de montañas y depresiones afectadas por volcanes activos, como el Popocatepetl y el de Fuego en Colima (Fig 3.11). Tiene un origen tectónico¹, y constituye una de las mayores cuencas de la región oriental del Eje Neovolcánico, siendo vecina de las cuencas de Toluca y Puebla, depresiones que se inundaron de agua y sedimentos fluviales y lacustres durante el Cenozoico. Su desarrollo se produjo desde el Mioceno Plioceno y principalmente durante el Pleistoceno y Holoceno (Cuaternario), proceso que se comprueba por las características de disección del fondo de la cuenca, de las laderas y de las divisorias de las aguas que la delimitan.

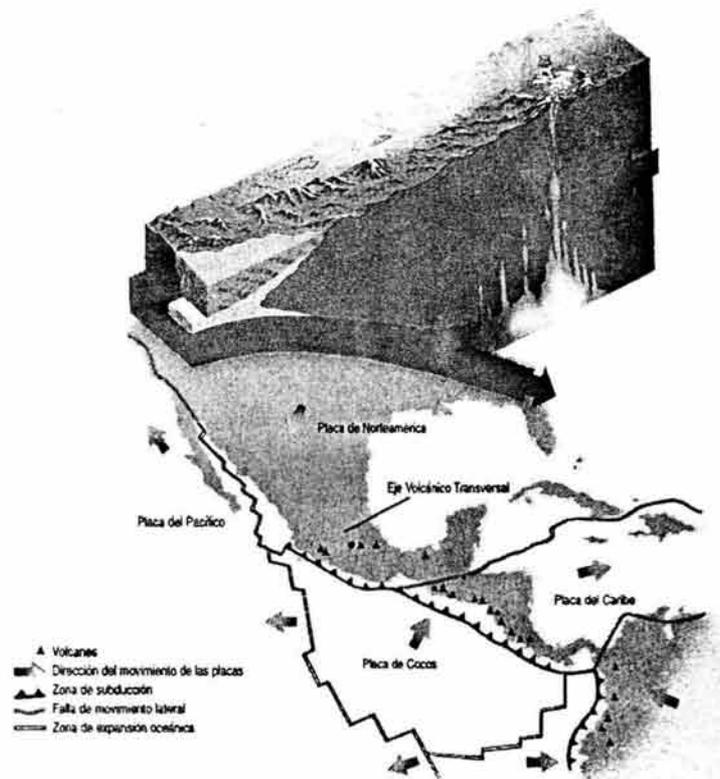


Fig 3.11 Eje Neovolcánico

Límites

La Cuenca se desmembra al oriente por la sierra Nevada, al poniente por la de Las Cruces y al sur por la de Chichinautzin. Su estructura permite determinar en las líneas divisorias de las aguas una antigua superficie de nivelación correspondiente a rocas sedimentarias y a un antiguo conjunto volcánico precuaternario. Esta superficie fue levantada sobre el fondo de la cuenca 1 o 1.5 km por un movimiento acompañado de reactivación volcánica que sepultó con lavas y conos cineríticos dicha superficie de denudación. Simultáneamente, este proceso de levantamiento afectó el centro de la cuenca y produjo la separación y el aislamiento de subcuencas a diferentes niveles. La porción central (México) está separada de la cuenca del extremo sur (Chalco-Xochimilco) por un levantamiento de dirección oriente-poniente (sierra de Santa Catarina), paralelo al levantamiento principal de la porción sur de la sierra de Chichinautzin.

¹ La correcta denominación de esta depresión debe ser la de cuenca y no la de valle, como comúnmente se la ha llamado. Cuenca y valle denotan depresiones topográficas de génesis diferentes: la cuenca es un hundimiento de orden tectónico (endógeno), en tanto que el valle corresponde a la depresión formada por la acción de un río (exógeno). Si bien la Cuenca de México tuvo un drenaje hacia el sur durante terciario, esta condición fue modificada por acciones tectónicas que cerraron las salidas hasta crear una cuenca o fosa endorreica y, por tanto, lacustre, al represar las aguas pluviales y fluviales.

La estructura moderna de la Cuenca de México representa, pues, un sistema muy complejo de sierras, depresiones y elevaciones que la atraviesan transversalmente, cuyas edades son muy variadas. Todo parece indicar que, por su dirección, los conjuntos diagonales de la cuenca son idénticos a los sistemas plegados del país ocurridos en el Mesozoico y el Cenozoico, y su persistencia en el relieve moderno indica que sien parcialmente activados.

Por otra parte, cabe mencionar que, en el actual relieve, las estructuras negativas comienzan a estrecharse pues sus partes periféricas entran paulatinamente en un sistema neotectónico. Sin embargo, tal estrechamiento no es uniforme, pues la elevación es más activa donde resultan más amplios los taludes y más débil donde son más estrechos. Esto explica que la sierra Nevada sea un levantamiento más activo que la sierra de Las Cruces, puesto que el talud transicional del primero es más amplio, y que el neotectonismo mencionado no sea multiforme en la región.

3.2.1 Unidades Geomorfológicas

Las unidades más representativas de la Cuenca de México son seis (véase el cuadro de la Tabla 3.2):

UNIDAD	NOMBRE
A. 1.	Cadenas montañosas mayores del Neógeno y Cuaternario
A. 2.	Cadenas montañosas menores del Paleógeno y Neógeno
B. 3.	Cadenas montañosas menores del Cuaternario
C.4.	Talud transicional piedemonte de las cadenas montañosas mayores
C.5.	Talud transicional pie de monte de las cadenas montañosas menores
D.6.	Planicies de la fosa tectónica

Tabla 3.2 Unidades Geomorfológicas de la Cuenca de México

Tipo de Morfogenia	Subconjunto Geomórfico	Tipo de Relieve	Sistemas Orográficos	Geomorfomas	Magnitud de la pendiente	Procesos Morfodinámicos	Tipo de Formaciones Superficiales	
Procesos endógenos tectovolcánicos del Paleógeno, Neógeno y Cuaternario. N1-2, Q1-3	1 Cadenas montañosas mayores (plazas)	1	Sierras: Nevada y Río Frio al este; Chichinautzin y Ajusco al sur; Las cruces y Monte Alto al oeste.	Paradas de cañadas y escarpes, cornisas, crestones, macizos y agujas rocosas, labios de oriteras, campos de arena, rocas y nieve, cimas alargadas (cabalones) y cimas agudas. Vallecitos con laderas abruptas y fondo plano o de concavidad.	<10°-35° <17%-70%	Termoclastismo, patricación, movimientos de masa, erosión glacial, nivtal, pluvial y deluvial. Acumulación coluvial, aluvial y deluvial.	Depósitos volcanocásticos con diferentes grados de interpermeismo. Localmente campos de rocas, arenas y tobas.	
		2	Sierras: Pachucos al norte; Nevada, Paletichique y Cuapalpan al oeste; Chichinautzin al sur; Las cruces y Monte Alto al oeste.	Paradas de escarpes de falla, mesas, cornisas, crestones, macizos rocosos de cima convexa, excepcionalmente agujas rocosas. Campos pequeños de acumulación coluvial. Cimas alargadas de ligera convexidad, vallecitos con laderas empinadas moderadas y profundas y de fondo cóncavo agudo.	<5°-20° <3%-40%	Movimientos de masa. Erosión fluvial y deluvial. Acumulación coluvial y deluvial.	Depósitos volcanocásticos de brechas y tobas. Capas arcillosas y calcáneas.	
	2 Cadenas montañosas menores	1	Sierras: Guadalupe y Paletichique al centro; Pinos al norte; Tepoztlán al noroeste; Tepoztlán al oeste; Tzotzilapan al noroeste.	Crestones y macizos rocosos que forman cimas agudas o ligeramente convexas. Valles profundos de laderas empinadas y fondo cóncavo agudo.	<5°-20° <3%-40%	Movimientos de masa. Erosión fluvial y deluvial. Acumulación coluvial y deluvial. Localmente deflación.	Depósitos heterogéneos y poligénicos, brechas, conglomerados, tobas y suelos con diferente composición y grado de interpermeismo.	
Procesos endógenos tectovolcánicos del Cuaternario Q1-3	3 Cadenas montañosas menores	1	Sierras: Chiconautla y Cerro Gordo al centro y norte; Chichinautzin y Tepoztlán al noroeste; Santa Caterina al centro-sur. Cerros aislados e agrupados en los lomeríos menores.	Cimas dómicas convexas y planas, excepcionalmente mesas y crestones de macizos rocosos, labios de oriteras y oriteras, conos y domos volcánicos menores, trinitas y coladas de lava, vallecitos y hornosadas dependientes, abruptas y empinadas con fondo amplio y/o concavidad aguda.	<5°-35° <8%-70%	Ligeros movimientos de masa. Erosión fluvial y deluvial, acumulación coluvial, proluvial y deluvial, deflación.	Depósitos heterogéneos de brechas volcanocásticas y conglomerados interdigitados y estratificados con capas de arena, arcilla y costras calcáneas.	
Procesos volcánicos acumulativos y procesos exógenos denudatorios y erosivos del Neógeno y Cuaternario. N1-2, Q1-3	4 Talus transicional base de las cadenas montañosas mayores.	1	Lomeríos y valles abruptos con cañadas y barrancos profundos en sierras de las Cruces, Monte Alto, Nevada, Río Frio, Paletichique y Cuapalpan. Lomeríos bajos, valles amplios, banuras y barrancos menores en sierras de Pachuca, Chichinautzin, Tepoztlán y Pinos.	Cimas alargadas semiconvexas, mesas y domos menores. Abruptos rocosos, cornisas y paredes con escarpes suavizados. Valles profundos con cirros de erosión y nichos de derrumbe, vallecitos semiabiertos con laderas de fuerte deslave y fondos cóncavos.	<5°-10° <3%-17%	Termoclastismo, movimientos de masa, erosión fluvial y deluvial, acumulación aluvial, coluvial y deluvial.	Depósitos volcanocásticos de tobas y brechas. Capas de lavas, conglomerados, arenas y suelos.	
		2	Relieve moderno que forme un pie de monte inferior, con relieve erosivo acumulativo, que se ubica entre los 2250 y los 2400 msnm.	Lomeríos bajos con banuras estrechas y discontinuos en Sierras Nevada, Paletichique y Monte Alto (locomente Monte Bajo). Lomeríos y valles amplios en sierras Cuapalpan y Río Frio.	Cabalones y cimas alargadas semiconvexas o planas. Barrancos y hondonadas profundas con laderas débiles a fuertes deslave, fondos planos a semiabiertos, terrazas fluviales y campos de coluvión.	<2°-8° <3%-8%	Termoclastismo, movimientos de masa, erosión pluvial, deluvial y aluvial, acumulación coluvial y deluvial.	Depósitos volcanocásticos de tobas y brechas. Capas de arcilla y vetas calcáneas. Afloramientos rocosos.
	5 Talus transicional base de las cadenas montañosas menores.	1	Relieve moderno que forme un pie de monte superior, con relieve erosivo acumulativo, que se ubica entre los 2300 y los 2800 msnm.	Lomeríos bajos con banuras estrechas y discontinuos en sierras Tepoztlán y Tzotzilapan. Lomeríos moderados con valles estrechos y banuras discontinuas en sierras Chiconautla, Cerro Gordo y Pinos. Lomeríos y valles amplios en sierras Chichinautzin y Tepoztlán.	Laderas de suave convexidad, vallecitos, barrancos moderados, terrazas fluviales, mesas de coluvionamiento, formas diversas de erosión hídrica y movimientos de masa.	<2°-8° <3%-8%	Movimientos de masa. Erosión pluvial, deluvial y aluvial. Acumulación coluvial y deluvial, excepcionalmente deflación.	Depósitos volcanocásticos de tobas y brechas. Localmente conglomerados. Capas potentes de arcilla, limas y vetas calcáneas. Afloramientos rocosos.
Procesos exógenos acumulativos del Cuaternario. Q3-4	6 Planicies formadas en el piso (graben) de la fosa tectónica.	1	Planicies recientes, proclivas, elevadas y básicamente acumulativas, situadas entre los 2300 y los 2500 msnm.	Llanuras débilmente onduladas en banos de Apan, Tocha y Teocomulco. Localmente depresiones de lagunas de Teocomulco y Tocha.	Planicies suavemente onduladas, terrazas fluviales menores, banos dómicos de coluviones.	>2° <3%	Erosión pluvial y deluvial. Deflación. Acumulación proluvial, aluvial y eólica.	Depósitos fluvioeólicos. Mantos de arena y suelos localmente conglomerados.
		2	Planicies recientes, proclivas, elevadas y básicamente acumulativas, situadas entre los 2300 y los 2500 msnm.	Llanuras extensas y amplias en banos de Cuautlán y Pachucos, depresiones de las lagunas de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco, Tláhuac y Chalco. Llanos de Texcoco y Teotihuacan. Llanos de Chalco.	Planicies de suave convexidad, banos de aluviales, depresiones sujetas a inundación permanente y temporal.	<2° <5%	Erosión pluvial. Deflación. Acumulación aluvial y eólica.	Depósitos pluvioeólicos con mantos de arena, arcilla y suelos.

Cadenas Montañosas Mayores (A. 1)

El relieve volcánico denudatorio levantado sobre los 3 500 msnm que forma las montañas mayores define también los límites de la Cuenca de México. Se constituye por cuatro grandes estructuras tectovolcánicas que se diferencian entre sí, tanto por su edad geológica como por sus características morfológicas y litológicas: la sierra del norte y noreste (Pachuca); sierra occidental (Las Cruces y Monte Alto); sierra del sur (Chichinautzin), y sierras orientales (Nevada y Río Frío).

La sierra de Las Cruces conforma un gran complejo volcánico, con alto grado de fracturamiento. Los ríos la han disectado intensamente, configurando valles estrechos y profundos que siguen una dirección noreste, causando que los procesos morfogenéticos gravitacionales y el tectonismo generen graves problemáticas de inestabilidad en las vertientes.

La sierra del sur (Chichinautzin), que durante el último millón de años cerró la cuenca por el sur con grandes cantidades de material efusivo, representa la estructura tectovolcánica más joven que continúa en proceso de desarrollo y presenta un grado de disección casi nulo. La presencia de numerosos aparatos volcánicos (más de 1 50), que se han mantenido activos en épocas recientes, demuestra que está aún activa y desarrollándose hacia el norte, estrechando gradualmente 1 á parte meridional de la cuenca. Las sierras Nevada y Río Frío delimitan la Cuenca de México por el oriente, separándola de la depresión de Puebla. En esta estructura se elevan las mayores alturas volcánicas, lo cual es significativo ya que se encuentran localizadas en el cruce de dos sistemas de fracturamiento, uno subparalelo y otro submeridional.

El relieve antiguo levantado entre 2 600 y 3 500 msnm se constituye por los basamentos de las sierras de Pachuca al norte; Río Frío, Patlachique, Nevada al oriente; Xochitepec y Ajusco al sur, y Las Cruces y Monte Alto al occidente. Se trata de estructuras muy viejas generadas desde el Oligoceno (Pachuca) y Mioceno, que se encuentran destruidas, fracturadas y cubiertas parcialmente por las efusiones volcánicas de periodos posteriores. Todo ello hace que actualmente presenten un relieve complejo de tipo denudatorio, acumulativo y erosivo (véase el cuadro de la Tabla 3.2).

Cadenas Montañosas Menores (A. 2)

En el relieve levantado entre 2 400 y 3 500 msnm sobresalen como montañas menores la sierra del norte y noreste de Pachuca, que es la más antigua de este grupo de estructuras; se encuentra profundamente disectada y atravesada por numerosas fracturas y fallas con orientación predominantemente al noroeste. A este grupo se agregan las sierras de Guadalupe y Patlachique, estructuras formadas en el Mioceno-Plioceno que se localizan al norte y noreste de la Ciudad de México y separan las depresiones de Pachuca y México. Otras montañas menores formadas por aparatos volcánicos pliocénicos y cuaternarios que siguen el alineamiento principal del fracturamiento diagonal se reparten extensivamente en el noreste, centro y norte de la cuenca de México.

Cadenas Montañosas Menores del Cuaternario (B. 3)

Éstas se constituyen por los pequeños sistemas tectovolcánicos y los aparatos aislados que se localizan dentro de la cuenca. Al sur de la Ciudad de México se extiende un pequeño levantamiento, con manifestaciones volcánicas del Cuaternario, sobre el que descansa la sierra de Santa Catarina, misma que separa las depresiones de la Ciudad de México y Xochimilco - Chalco. Al norte y noreste, la cuenca está limitada por una serie de elevaciones volcánicas con predominio del fracturamiento en dirección noroeste.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Talud Transicional de las Cadenas Montañosas (C. 4)

Constituye la transición superior entre el talud y las elevaciones de las cadenas montañosas mayores levantadas entre 2 400 y 3 000 msnm. El talud manifiesta fuerte disección fluvial que sigue el curso de los fracturamientos principales conformando valles estrechos y profundos. En dichos cursos la incisión ha propiciado en forma irregular la formación de terrazas, lo que demuestra levantamientos diferenciales en tiempo y extensión. En las vertientes abruptas el escalonamiento se marca sólo por rupturas de la pendiente. Los taludes principales corresponden a la vertiente oriental de las sierras de Las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y Ajusco, y a la occidental de las sierras Nevada y Río Frío.

En todas ellas la morfogenénesis se manifiesta por procesos de disección singenética y epigenética, así como por el desarrollo de planicies acumulativas, en lugares intradepresionales del levantamiento, ubicadas en las áreas de vulcanismo reciente (véase el cuadro de la Tabla 3.2).

Entre los 2 250 y los 2 400 msnm, esta unidad la forman taludes secundarios que corresponden a terrenos bajos que se extienden ampliamente formando lomeríos con una pendiente que disminuye notablemente en comparación con la de los taludes principales, aspectos que indican que la zona ha quedado sujeta a procesos acumulativos más intensos. Se manifiestan en las sierras Nevada, Patlachique, Monte Alto, Monte Bajo, Tepetzotlán y Calpulalpan.

Talud en las Cadenas Montañosas Menores (C. 5)

Entre los 2 300 y los 2 600 msnm existe esta estructura que constituye la transición entre las superficies casi planas de la cuenca y las montañas interiores y marginales menores (véase el cuadro de la Tabla 3.2). Tiene pendientes de 8 a 26 grados y, a diferencia de las partes casi planas, el talud presenta mayor grado de disección. Los taludes interiores son de carácter volcánico acumulativo secundario y en algunos casos se presentan como delantales proluviales modernos. Se ubican en las sierras de Tepetzotlán, Tezontlalpan, Chiconautla, Cerro Gordo, Pitos (Pitayas), Chichicautla y Tepozán.

Planicies (D.6)

La planicie aluvial situada entre los 2 300 a 2 500 msnm está poco disectada y en ella la intensidad de la hidrodinámica de tipo planar es débil. Su pendiente tiene un promedio menor de 2", siendo las unidades más importantes los llanos de Apan, de Tochac y de Tecocomulco. Están formadas principalmente por sedimentos proluviales de cubierta ligeramente discordante con los depósitos lacustres antiguos. Hacia las partes superiores de sus vertientes, los materiales proluviales se mezclan con cubiertas diluviales y coluviales que irrumpen en la planicie en forma extensiva. Finalmente, las planicies situadas a menos de 2 300 msnm constituyen el fondo de la Cuenca de México y representan el relieve acumulativo fluvial lacustre y proluvial de más reciente formación. En esta unidad se definen las siguientes tres depresiones principales separadas entre sí por elevaciones volcánicas orientadas hacia el noreste: al noroeste la de Pachuca, al centro sur la de México y al sur la de Xochimilco-Chalco.

En la sexta columna del cuadro de la Tabla 3.2 se presentan las magnitudes de las pendientes de todas las unidades geomorfológicas. Es importante mencionar que los valores, formas y orientación de la pendiente son de gran importancia, tanto desde el punto de vista geomorfológico como de la planeación de las construcciones.

En lo primero, la importancia surge porque va ligada al tipo e intensidad de los procesos que condicionan la estabilidad del suelo, la vegetación y la disponibilidad de recursos hídricos y, en lo segundo, porque restringen el uso y ocupación del suelo y el emplazamiento de las obras.

3.2.2 Dinámica geomorfológica externa

En la cuenca domina una morfogénesis dirigida tanto por procesos morfoclimáticos como por otros condicionados por acciones gravitacionales y hasta culturales. Estos procesos, al actuar por separado o en forma conjunta, determinan los cambios del modelado y condicionan con ello el aspecto físico del paisaje.

Tanto la dinámica de evolución natural como las acciones antrópicas (tala de bosques, actividades agrícolas, explotación de minerales pétreos, ganadería nómada, urbanización, etc.) han incrementado la dinámica morfogenética propiciando pérdidas en los recursos de suelo, agua, vegetación, así como graves riesgos para la población y las actividades económicas. Esto hace cada vez más costosa la inversión que se tiene que realizar cuando se trata de recuperar, regenerar o conservar los recursos perdidos, o bien para el simple mantenimiento de los servicios y la infraestructura.

Haciendo una síntesis de la actividad morfogenética encontramos dos grandes áreas con características diferentes: una corresponde a la zona de las sierras que circundan toda la cuenca de México, que incluye también las elevaciones menores aisladas del interior, lugares donde se presentan fuertes procesos hídricos, diluviales, gravitacionales y coluviales; la otra se ubica en la parte baja y llana de la depresión lacustre que forma el piso de la cuenca constituida en terrenos de los antiguos lagos con una tendencia a sufrir acciones eólicas, diluviales e hídricas.

La distinción de las dos zonas con condiciones morfogenéticas diferentes se debe al carácter topográfico que ha sido el elemento determinante en la distribución mesoclimática, ya que desde la depresión lacustre hasta las cimas de las sierras se presenta una gradación climática de subhúmedo a húmedo y de cálido a frío. Este hecho determina también la distribución de las formaciones vegetales, pero no del suelo que por su génesis reciente obedece al carácter geológico más que a la influencia climática.

En tales condiciones, una típica correspondencia de clima, suelo y vegetación, sólo aparece en las áreas de las sierras de Las Cruces, Nevada y Pachuca, puesto que en éstas se han conjugado la acción climática y el tiempo y, por tanto, han propiciado una evolución edáfica adecuada para soportar una densa formación boscosa que ya ha sido alterada sustancialmente por el hombre. Existen otros elementos topográficos, como las sierras de Guadalupe, Monte Bajo, Tepetzotlán, Tezontlalpan, Pítayas (Pitos), Xochitepec y Calpulalpan, que han sufrido intensas acciones destructivas, tanto naturales como culturales, de manera que ahora aparecen como estructuras intensamente denudadas.

Por lo que respecta a la depresión lacustre, ésta fue hasta muy recientemente el área de captación natural de las corrientes fluviales. Su desecación artificial progresiva ha determinado una acción eólica importante de los sedimentos aluviales y lacustres pero, además, la extracción de aguas subterráneas ha propiciado asentamientos continuos del suelo, que son más notables en las áreas edificadas.

Tomando en cuenta la consideración anterior, en la carta geomorfológica presentada en el mapa de la Fig 3.12 se muestra la zonificación de los procesos dinámicos expresada en términos de erosión, de la que resultan tres situaciones diferentes: los procesos hídricos en los que destaca la escorrentía como indicadores de la erosión producida por el agua; los movimientos de masa, indicadores de acciones complejas ocasionadas tanto por el agua como por la gravedad, y el proceso de deflacción ocasionado por el viento.

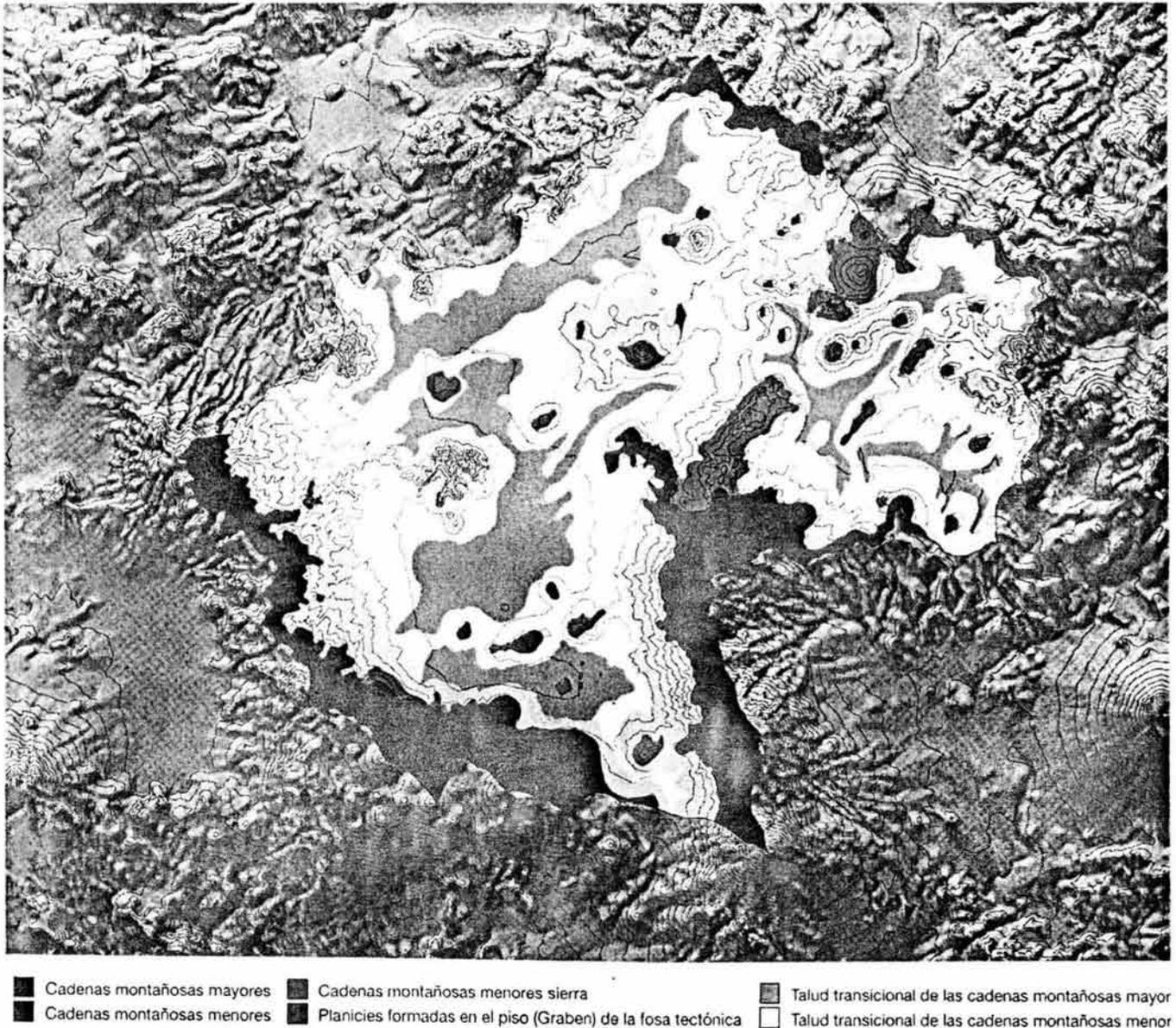


Fig 3.12 Geomorfología de la cuenca de México, C. Borja y L. Recéndez 1994.

La erosión ligera consiste en una desagregación pelicular del suelo provocada por la escorrentía discontinuo de tipo areolar, embrionario y difusa, por la que se transporta el material limoso y coloidal arcilloso. Se produce en áreas de buena a escasa cobertura vegetal con suelos poco profundos, medianamente permeables sujetos a lluvias poco intensas y de duración moderada. El proceso es eficaz en pendientes de 2° v se acentúa a partir de los 5° . La erosión moderada produce pérdidas totales o parciales de suelo por acción de las escorrentías continuas y difusas que afectan toda una vertiente, siendo más eficaz en terrenos con pendientes mayores de 5° .

La erosión fuerte que ocasiona pérdidas totales del suelo superficial y parte del subsuelo, se produce en áreas sujetas a escorrentía concentrada y a escurrimientos violentos en pendientes que oscilan entre 10 y 25°. Las zonas son de dos clases de acuerdo con sus orígenes.

La primera se presenta en las unidades estructurales antiguas que han sufrido fuertes procesos de erosión y que han eliminado todo o gran parte del material de cobertura, dejando el basamento rocoso al descubierto; ello sucede en las sierras de Guadalupe, Tepetzotlán, Pachuca, Pitos, Tepozán, Patlachique y Xochitepec. La segunda también se presenta en estructuras descubiertas que como son recientes no han sufrido intemperismo intenso, de manera que en ellas la corteza es escasa. Esta particularidad se presenta en las estructuras volcánicas recientes de la zona central, norte y noreste de la cuenca. Actualmente, en las dos situaciones expuestas la velocidad de remoción de los materiales es mayor que la de acumulación y ello determina que las estructuras se encuentren descubiertas o denudadas.

La acción eólica consiste en la remoción de sedimentos y materiales superficiales del suelo y se produce en dos áreas principales: la primera ocupa el fondo de la cuenca donde suelos y sedimentos salitrosos y pulverulentos son levantados por corrientes convectivas producidas por el sobrecalentamiento del aire. Dicha acción es más característica a finales del invierno, cuando el aire, y el suelo están más secos, y se producen de lagunas clásicas tolvaneras que levantan y transportan grandes cantidades de polvo. La segunda se presenta en la sierra de Chichinautzin, donde la deforestación y el laboreo agrícola han destruido la estructura de los agregados del suelo quedando en ellos una consistencia suelta y pulverulento. Esto favorece su remoción por acciones eólicas cada vez más intensas, al grado de que ya puede considerarse esta zona como el origen de las tolvaneras que afectan la parte sur de la Ciudad de México.

3.3 Geofísica

A pesar de que el alcance en los estudios geotécnicos, se centra a menos de los 100m de profundidad más superficiales de los depósitos de suelos, ya que desde el punto de vista de la Ingeniería de Cimentaciones estos primeros metros de suelos son los que determinan el comportamiento de las estructuras. Sin embargo, se recabó información de levantamientos geofísicos con el fin de conocer la estructura profunda que conforma el subsuelo que es objeto de estudio del presente trabajo.

La mayor parte de la información geofísica recabada proviene de los intensos programas de estudio entre los años de 1985 a 1986 por parte de PEMEX, CFE y DDF y consta de aproximadamente 400 sitios de Levantamientos de Resistividad por Sondeos Eléctricos Verticales Tendidos; 39 Tendidos de Refracción Sísmica: 19 de estudios de Cross-Hole y 2 Levantamientos Gravimétricos, uno realizado en el año de 1953 por la Compañía Servicios Geofísicos S.A. y otro realizado por JICA y publicado por CENAPRED. Por último, la integración y presentación de estos estudios se debe a la empresa CIGSA, 2000.

Los métodos geofísicos tales como el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), son de gran utilidad para la prospección del subsuelo. En la actualidad se han utilizado para diferentes objetivos. En la prospección de aguas subterráneas, se puede decir que en ausencia de información directa, los SEV son imprescindibles, ya que en muchos casos permiten detectar la elevación del nivel freático, la presencia de agua en estratos geológicos porosos, y da una idea del tipo de materiales que constituyen las capas del subsuelo.

Si bien estas propiedades no ayudan en mucho para estimar parámetros relacionados con la capacidad de carga y deformabilidad de los materiales, se tiene que recurrir a la Técnica del Tendido de Refracción Sísmica o algún método sísmico de Pozo, como el Cross-Hole, Up-Hole o Down-Hole. Las técnicas geofísicas, proveen información puntual del subsuelo, y al ir integrando un mayor número de éstas se puede construir modelos que muestren la distribución espacial de capas o estratos con ciertas características, si bien algunas de estas técnicas requieren de un mayor apoyo logístico, y equipos más sofisticados y pesados, es posible casi siempre encontrar por la gran versatilidad en la instrumentación geofísica, una técnica alterna que ayude a complementar el conocimiento del subsuelo en áreas de difícil acceso.

Así, por ejemplo tenemos el Mapeo Gravimétrico, que aporta información para poder delimitar cuencas y estructuras geológicas que actúan como barreras en el subsuelo, y que a la vez estas interactúan con el flujo del agua subterránea, hoy en día esta técnica resulta ser una de las que por utilizar los adelantos tecnológicos como el GPS alcanza grandes rendimientos de campo, proporcionando un mapeo regional primario para la valoración de una segunda técnica alterna en zonas de interés, de esta manera permite orientar los recursos de forma sistemática.

El alcance promedio de las investigaciones proveniente de los diferentes levantamientos geofísicos que aquí se presentan es de 400m de profundidad para datos de resistividad y tendidos de refracción y para gravimetría sólo a través de procesos es posible conocer la estructura profunda que conforma el subsuelo. La valoración de los datos para cada una de las técnicas geofísicas de las cuales fue posible obtener la información primaria, o datos de campo, fueron procesados con el software especializado; para la Información de SEV se utilizó el RESIX-P, para los Tendidos de Refracción Sísmica se procesaron con el GREMIX y SIP, posteriormente se ingresaron a la base de datos geofísicos formada en el Software WINGLINK que incluye información de Resistividad y Gravimetría, principalmente, y se utilizó el SURFER para la formación final de figuras y estos cumplen con errores de ajuste menores al 5%.

3.3.1 Pozos Profundos

Interpretación de secciones geológicas

Petróleos Mexicanos en 1986 y 1987 (Pérez-Cruz 1988) llevó a cabo un estudio sismológico de reflexión con apoyo de cuatro pozos profundos (Fig 3.13). En este trabajo se levantaron 26 líneas con longitudes variables entre 2 y 28 km, definiéndose cuatro reflectores cuya profundidad varía de acuerdo con el lugar. A partir del más profundo al más somero se distribuyen las siguientes unidades de rocas:

- (1) Unidad de rocas calcáreas basamentales
- (2) Unidad Volcánica Inferior (basaltos, andesitas, tobas y breccias)
- (3) Unidad Volcánica Superior (basaltos, aglomerados, tobas y breccias)
- (4) Unidad de Depósitos Lacustres Arcillosos

La Unidad (3) volcánica Superior, según datos de geo cronometría de una muestra de basalto colectada de un núcleo a 550 metros de profundidad. Proveniente del pozo Copilco, corresponde del Plioceno al Cuaternario. Su espesor varía de 435 metros en el pozo Tulyehualco a 1525 metros en el Copilco.

El espesor total de ambas unidades volcánicas, la inferior y la superior, es de 1375 metros en el Mixhuca hasta más de 3135 metros en el Roma-1.

El espesor de la Unidad (4) de sedimentos lacustres varía de cero metros en el pozo Copilco 1, 65 m en el Roma 200 m en el Mixhuca y 490 en el Tuyehualco. (Pérez-Cruz, 1988). Los resultados aquí comentados se muestran plasmados mediante 4 secciones geológicas en donde se observa la distribución de las unidades de rocas descritas. La Fig 3.14 muestra la sección litológica de los Pozos Profundos perforados en el cuenca de México.

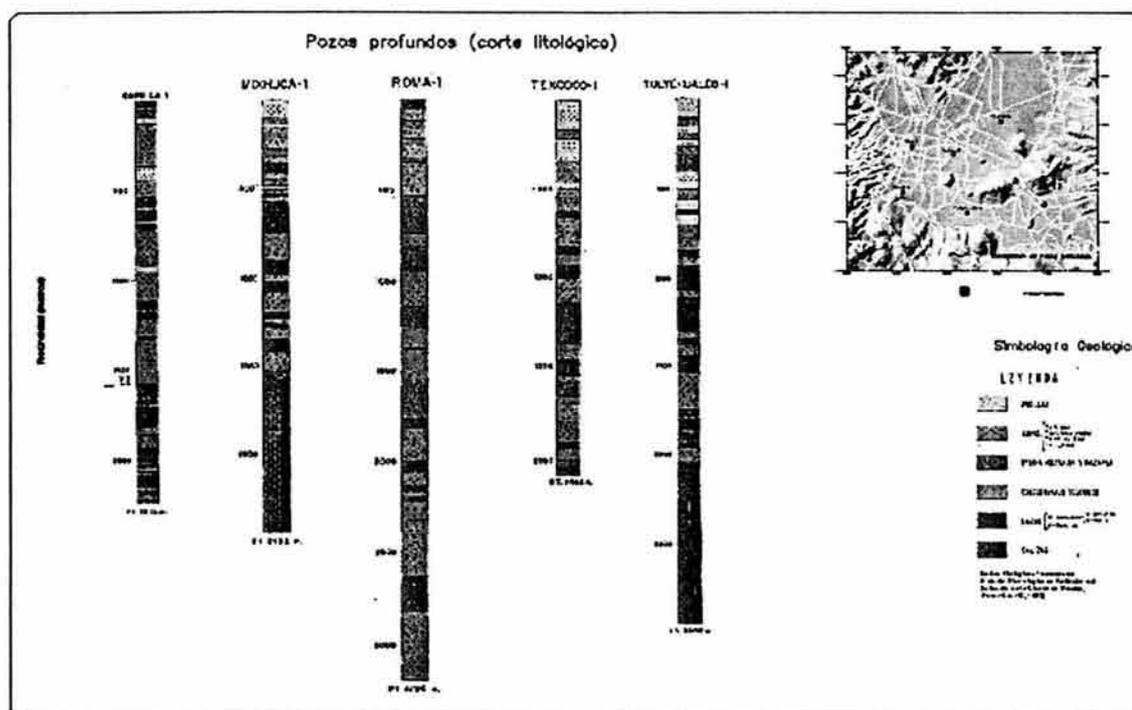


Fig 3.13 Pozos profundos perforados en la Cuenca del Valle de México.

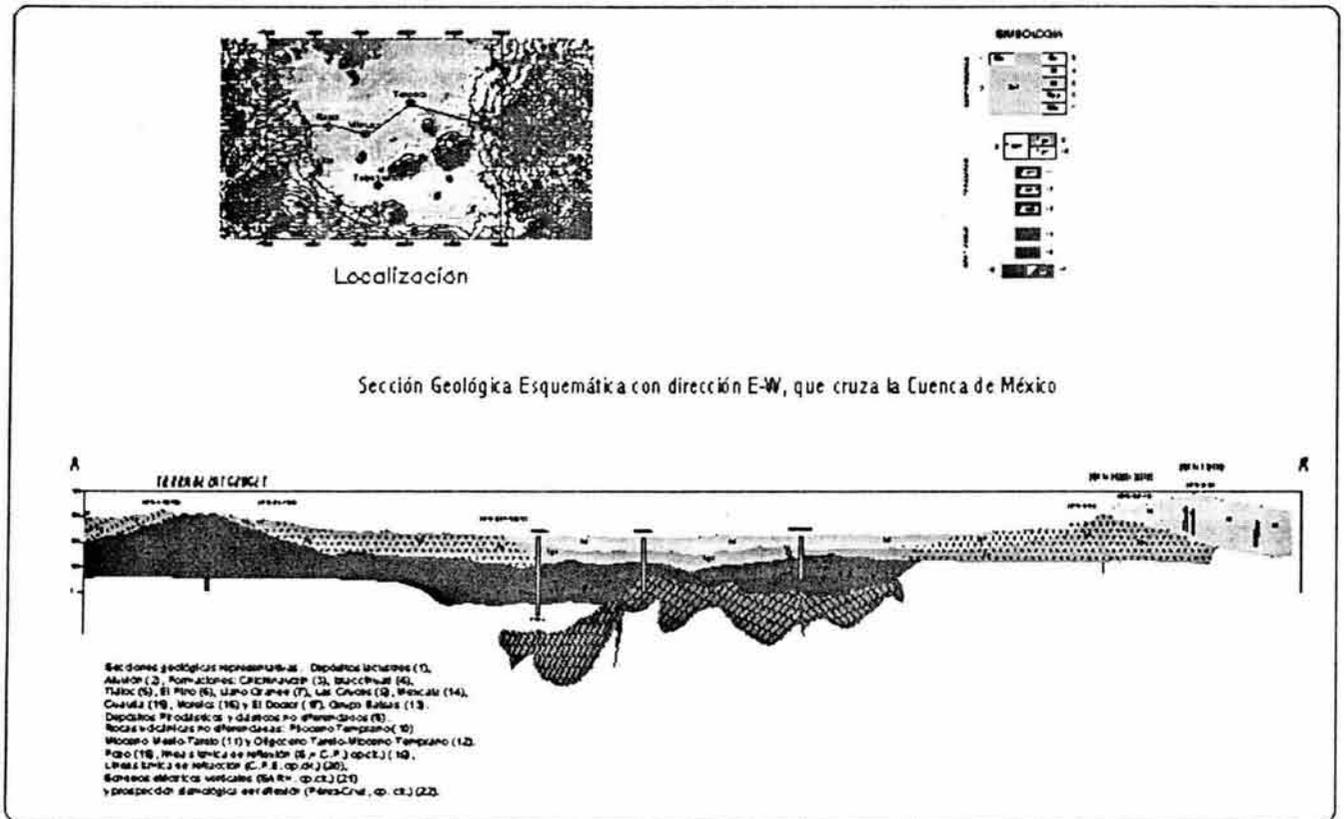


Fig 3.14 Sección Geológica de la Cuenca del Valle de México

3.3.2 Gravimetría

La información gravimétrica proviene del Levantamiento Gravimétrico efectuado para el Proyecto Texcoco, y realizado por la Compañía Servicios Geofísicos, S.A., en el año de 1953. Esta información corresponde a un Mapa de Anomalía de Bouguer. Otro Levantamiento Gravimétrico del que ha sido objeto la Cuenca, es el realizado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), mediante un convenio entre ambos países.

Se puede observar que en lo general se tiene una buena correlación en los rasgos e intensidad de las anomalías gravimétricas; cabe destacar, que esta información se emplea únicamente para fines cualitativos; es decir, Los valores, su forma y distribución son el resultado de la geometría y disposición de las masas de roca sepultadas en el subsuelo de la Cuenca.

El mapa de anomalía de Bouguer representa indirectamente a la distribución de las concentraciones anómalas de la densidad de masa en el subsuelo, es decir, muestra la tendencia de las curvas de igual valor de gravedad. Los valores, su forma y distribución son el resultado de la geometría y disposición de las masas de roca sepultadas.

En la Fig 3.15, se presenta el Mapa Gravimétrico de Anomalía de Bouguer, en el cual se identifica fundamentalmente un alto gradiente que desciende desde la porción N hacia la Porción S; el sector Norte de este mapa corresponde con un máximo gravimétrico que representa a las unidades de rocas volcánicas que afloran e este sector, del cual forma parte la Sierra de Guadalupe en su limite Sur.

En la parte Centro de la cuenca de México, se aprecian el desarrollo de mínimos gravimétricos que corresponden con los materiales de baja densidad constituidos por los depósitos aluvio-lacustre, y se muestran interrumpidos con algunos lineamientos de máximos gravimétricos, tanto en dirección N-S (desde la Sierra de Guadalupe hacia el Cerro de la Estrella), como en dirección E-W (que corresponde a la Sierra de Santa Catarina y se continua hacia el Cerro de la Estrella).

En la parte sur de este mapa se aprecia un incremento en los valores gravimétricos, que corresponden con las roca volcánica de la Sierra de Chichinautzin; la escasa información de esta porción, no permite apreciar la continuidad lateral de estas formaciones de roca, la cual se infiere que debe aparecer el máximo gravimétrico por el tipo de rocas que afloran en esta zona, al igual que el sector poniente de la ciudad, donde también no se alcanza apreciar el cierre de los máximos gravimétricos, observando que los mínimos gravimétricos, ligeramente muestran un incremento en los valores. Esto desde luego debiera complementarse con Levantamientos de campo para estas porciones, de tal manera de poder contar con un Mapa Gravimétrico, que muestre de manera completa la estructura de la cuenca de México.

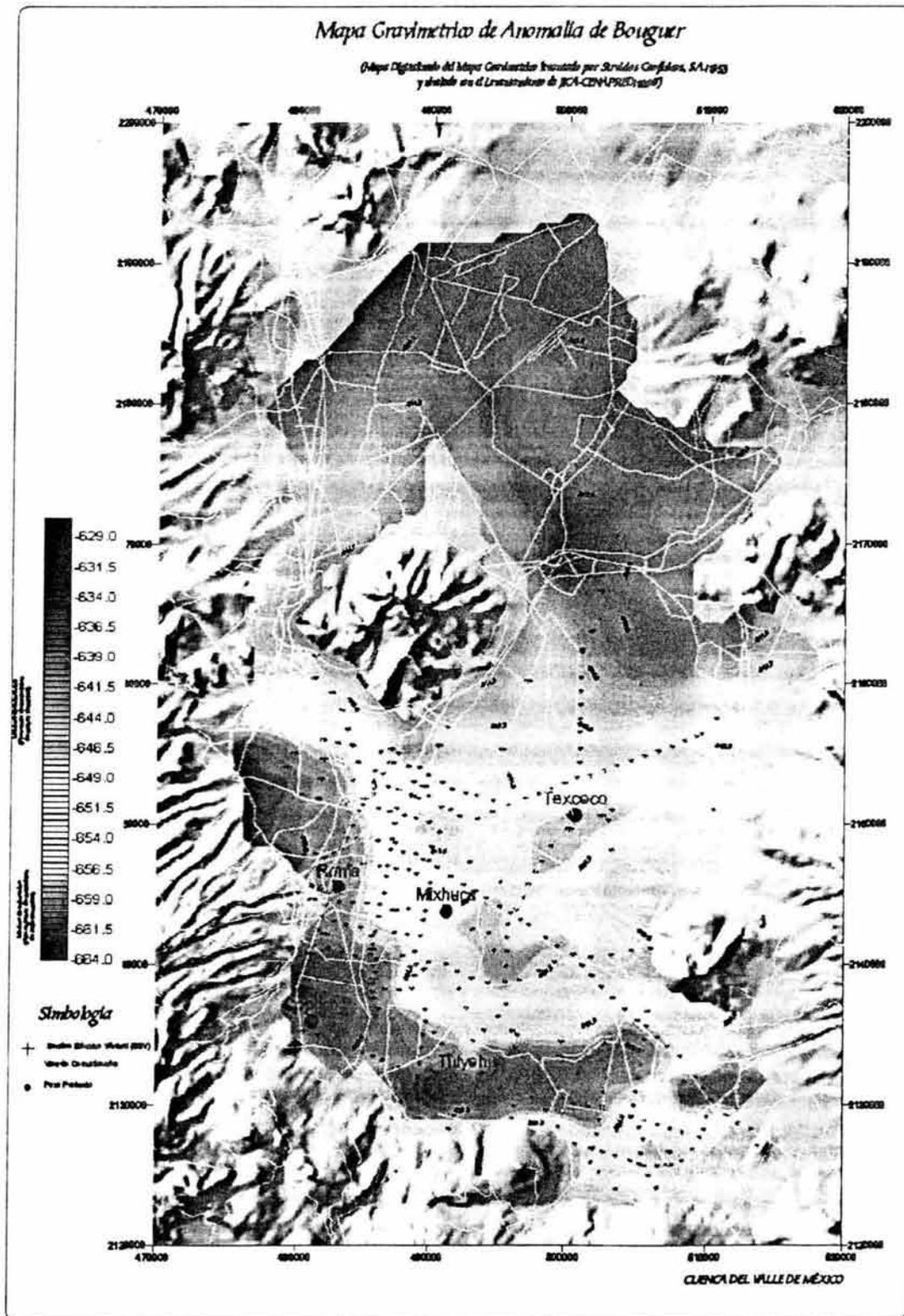


Figura 3.15 Mapa Gravimétrico de Anomalia de Bouguer

En lo general anomalías del tipo concéntricas que se observan corresponden con los aparatos Volcánicos, como son el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina, y a la vez evidencian la posición de cuerpos de mayor densidad, respecto de los materiales lacustres y aluviales que rodean estas estructuras. También se aprecian distorsiones o deflexiones en el comportamiento de las curvas isogales, con trayectorias N-S y E-W, que se analizan mas adelante.

Si bien el mapa de Anomalia de Bouguer refleja cambios importantes en la composición litológica del subsuelo, se realizó un proceso a estos datos, el cual consistió en obtener un Mapa Residual (Fig 3.16), donde el Mapa Regional utilizado para este proceso se obtuvo mediante un ajuste polinomial de segundo grado.

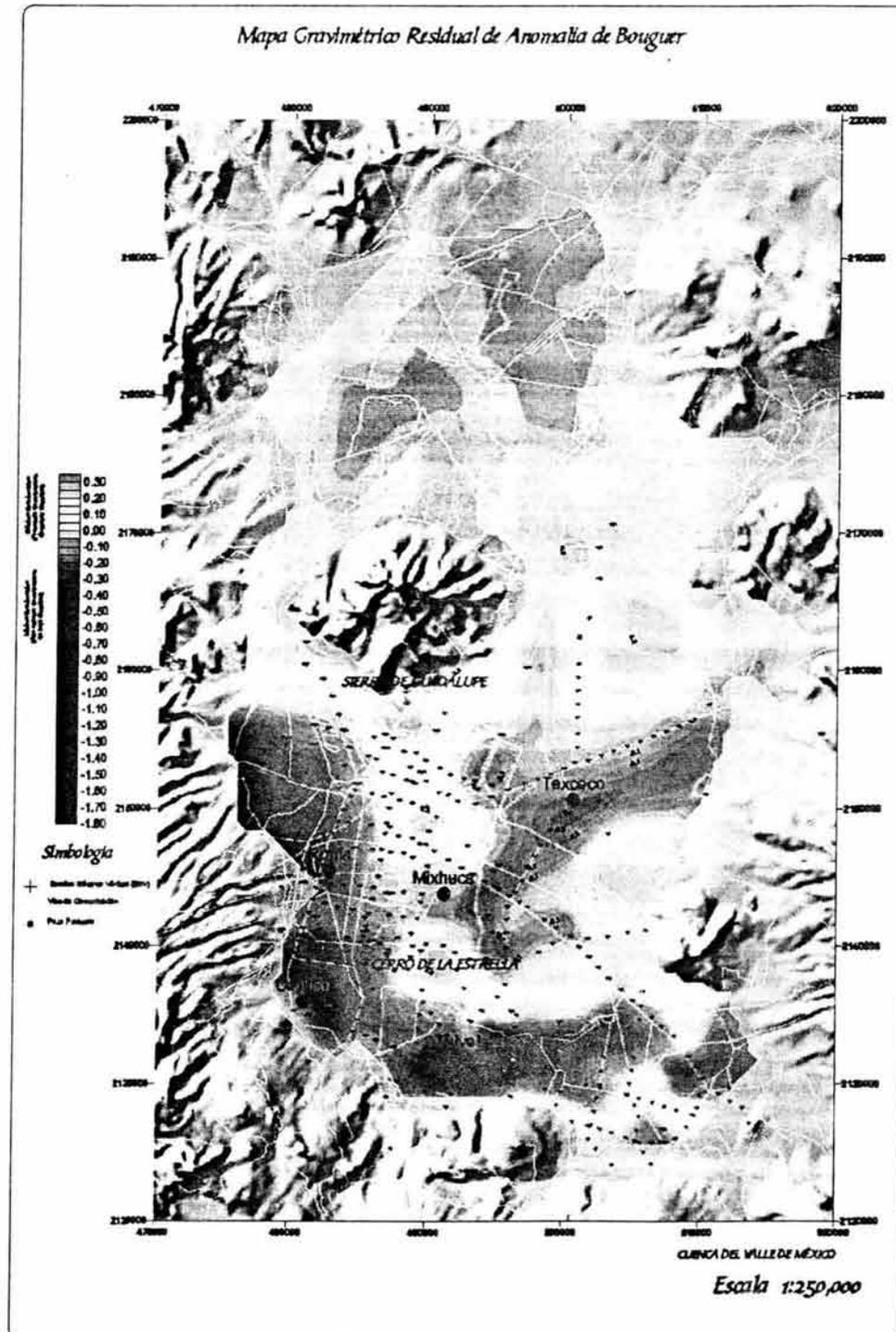


Figura 3.16 Mapa Residual de la Anomalia de Bouguer

La actitud que muestran las curvas isogales de este Mapa Residual, evidencia la zonificación de cuerpos someros que mostraban una deflexión suave en el Mapa de Anomalia de Bouguer, y que desde luego aquí ya se puede apreciar una distribución semi cuantitativa (2D) de estos cuerpos.

En lo que respecta al área de estudio de Resistividad por Sondeos Eléctricos Verticales, al observar su ubicación en el Mapa Residual, podemos ver que los sitios de medición se localizan en una porción muy importante, donde aparecen los mínimos gravimétricos y que a la vez, evidencian un mayor espesor de materiales lacustres, con lo cual se podrá complementar la definición en la distribución espacial de estos materiales, ya que representan propiedades importantes desde el punto de vista geohidrológico y geotécnico, y a la vez un especial interés debido a que las cimentaciones de las construcciones de la ciudad de México se encuentran alojadas en estos materiales.

Al efectuar un análisis cualitativo del Mapa Residual, resulta interesante observar el desarrollo de Anomalías Positivas (máximos gravimétricos) asociadas con masas de mayor densidad o que el basamento se encuentra mas somero.

Uno de estos rasgos sobresalientes es la traza de un máximo gravimétrico que se desarrolla casi N-S, que va desde la Sierra de Guadalupe hasta El cerro de la Estrella, mostrando a lo largo de este rasgo dos zonas con una disminución en los valores de gravedad; la de la parte norte se localiza casi sobre la Av. Eduardo Molina, y en la parte Sur, sobre el Eje 4 SUR y cruce con la Av. Churubusco, estas zonas representan las comunicaciones mas evidentes entre lo se considera a la Zona de ex Lago de Texcoco con el ex Lago de la ciudad de México.

Otro rasgo estructural aparece en dirección E-W, que va del Cerro de la Estrella, y se continua hasta la Sierra de Santa Catarina y Cerro de Chimalhuacán, esta estructura que corresponde también con un máximo gravimétrico, divide en la parte sur del Lago de Texcoco con el Lago de Xochimilco y Chalco, observando también a lo largo de esta estructura algunas disminuciones en los valores de gravedad, y que pueden ser algunas de las comunicaciones entre ambos lagos.

localiza del Cerro de la Estrella con dirección SW hacia la Sierra de Chichinautzin, y representa una estructura subterránea que muestra una división con respecto a los ex Lagos de Xochimilco-Chalco con el ex Lago de la ciudad de México. El segundo de estos rasgos se localiza en la Av. División del Norte entre los Ejes 4 y 6 SUR, y también puede corresponder con la presencia de roca de mayor densidad a menor profundidad, conformando alguna estructura profunda.

Las estructuras que conforman los mínimos gravimétricos, no son menos importantes que las anomalías que conforman máximos gravimétricos, ya que ambos son una de las respuestas más evidentes de las estructuras que conforman el subsuelo de la ciudad de México, cada uno de estos rasgos representa sobre la superficie del terreno, información muy valiosa que esta empacada, y que con las nuevas tecnologías se podrá analizar de manera científica para descifrar los diferentes paquetes de rocas que componen el subsuelo. También es importante señalar que por si sola una técnica geofísica, no puede dar respuesta a diversas inquietudes relacionadas con la composición litológica, características mecánicas, zonas saturadas, capas impermeables, etc., para esto se debe realizar una valoración integral mediante diferentes técnicas geofísicas, donde cada una aporta información del subsuelo, y ayudan a definir modelos mas representativos de las estructuras del subsuelo.

3.3.3 Resistividad

En 1985 y 1986, se levantaron 365 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), cubriendo una longitud total de exploración de 400 km, distribuidos en un área de aproximadamente 900 km² (Fig 3.17). Con la finalidad de investigar el subsuelo de la ciudad de México en los primeros 500 m de profundidad, se utilizó la Técnica del Sondeo Eléctrico Vertical conocido como SEV, mediante el arreglo tetra electrodo tipo Schlumberger, con aberturas en los electrodos de corriente AB/2 desde 1 a 1,000 m.

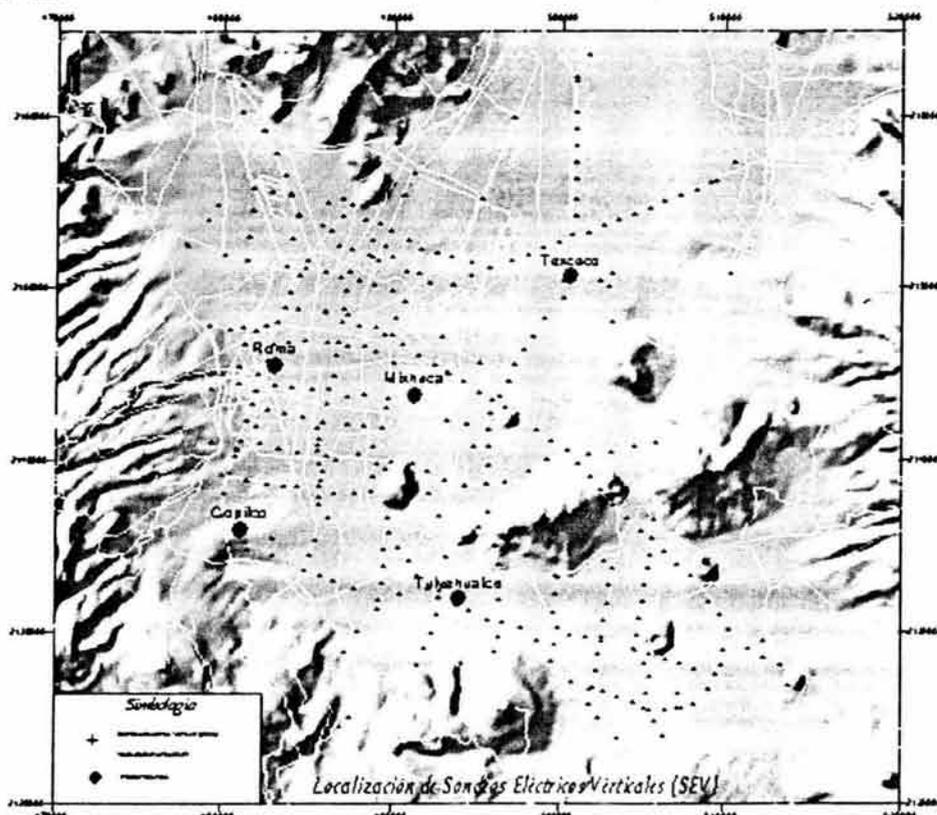


Fig 3.17 Localización de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

El método de resistividad consiste en analizar el comportamiento de la corriente eléctrica, que es introducida al subsuelo a través de dos electrodos que, generalmente, son dos varillas de acero que se entierran al terreno y se conectan al circuito transmisor, de tal manera que se puedan interpretar los cambios que se producen, debidos a la presencia de minerales, agua, estructuras, etc. (Fig 3.18).

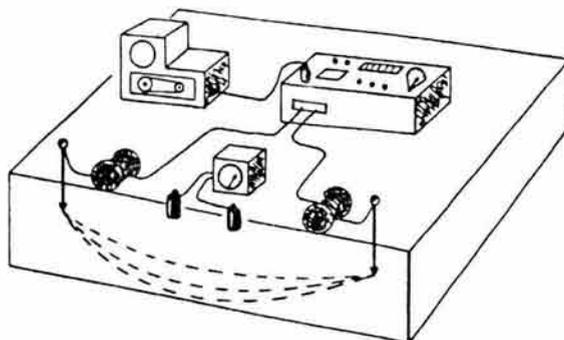


Fig 3.18 Sistema de Medición.

La geometría que se utilizó para realizar las mediciones fue el denominado arreglo Schlumberger (Fig 3.19). Que consiste en colocar los cuatro electrodos alineados y a una distancia, de tal manera que los dos de potencial (M y N) queden internos en el arreglo y los dos de corriente (A y B) externos.

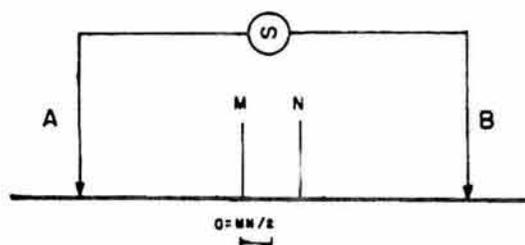


Fig 3.19 Arreglo Schlumberger

Donde los electrodos M y N representan los que miden la tensión y los electrodos A y B los que se utilizan para introducir la corriente, la distancia a es la separación interelectrodo. De acuerdo con la teoría electromagnética, a medida que la distancia (a) aumenta, la cantidad de terreno involucrado es mayor y por tanto la profundidad de investigación que se logra también lo es.

La información de campo que se obtiene, es una grafica de resistividad aparente contra aberturas semielectrodo $AB/2$, las cuales fueron interpretadas utilizando algoritmos que presuponen una variación continua de la resistividad mediante un ajuste por 20 capas, y se le conoce como inversión OCAMM (Modelo Suavizado) y también con el método de Capas Planas. A continuación se presenta una Curva de Resistividad Aparente modelada Fig 3.20.

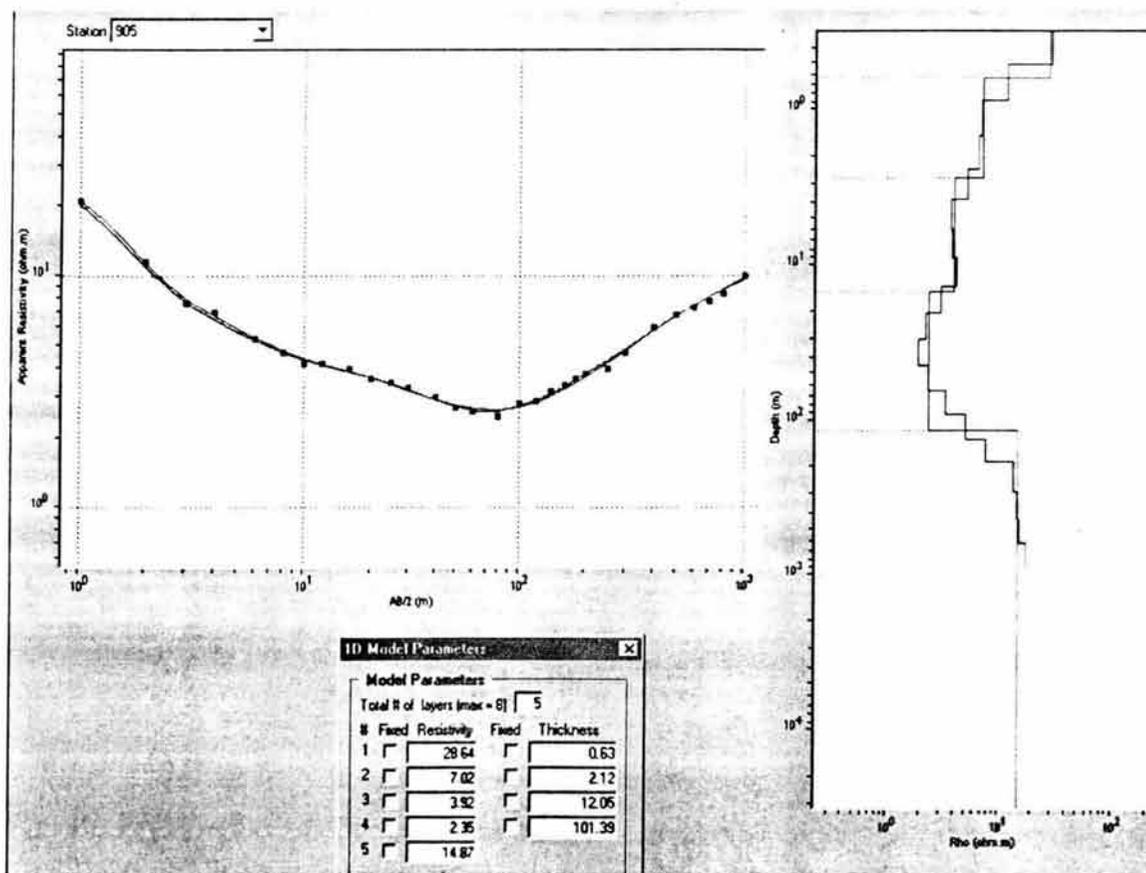


Fig 3.20 Curva de Resistividad Aparente con modelos Suavizados (Color magenta) y de Capas Planas (Color Verde).

3.3.4 Tendidos de refracción sísmica

En 1986, se levantaron aproximadamente 76 km lineales de exploración sísmica con la técnica de Tendidos de Refracción Sísmica (Fig 3.21), la ejecución de estos trabajos, requirió la integración de grupos expertos; en el uso y manejo de explosivos, apoyos con seguridad pública, técnicos para la adquisición y proceso de datos, entre otros.

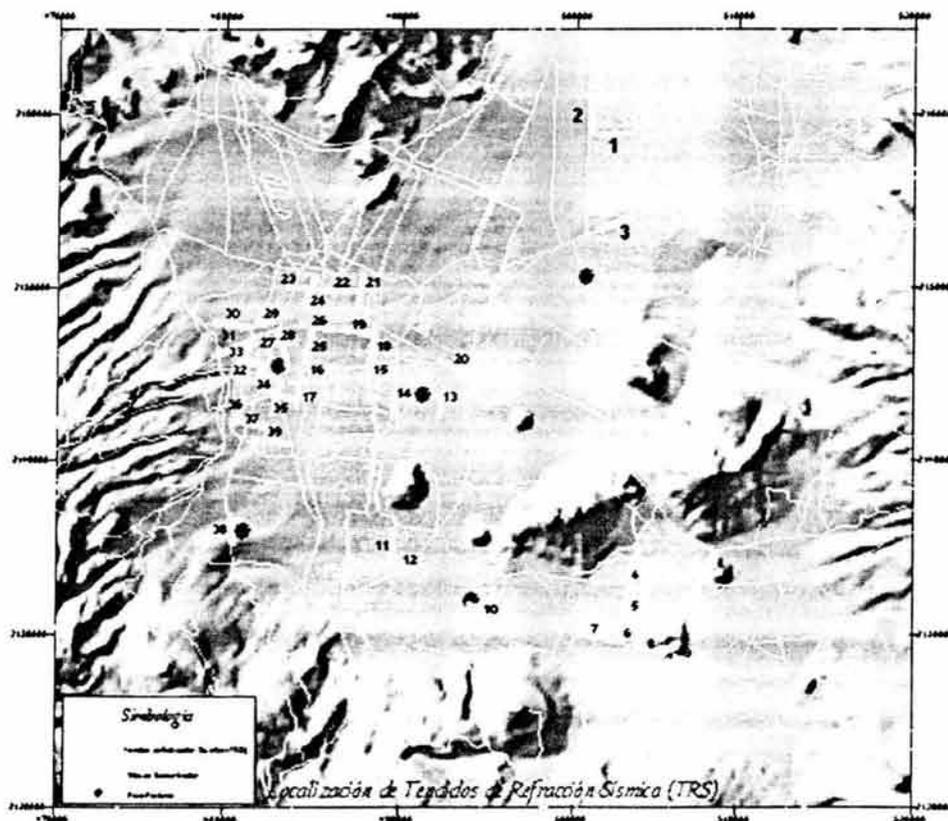


Fig 3.21 Localización de Tendidos de Refracción Sísmica en la cuenca de México

Para obtener información de los primeros 400 m, se diseñó un patrón de tendido con el que se cubrieron las zonas de interés, que consistió en 7 puntos de tiro, 48 geófonos separados a cada 30 m; y distribuidos en una longitud total de 2, 040 m. Para realizar este trabajo, era necesario el uso de una fuente de energía capaz de generar señales fuertes, por ello se recurrió al explosivo como fuente de energía con cargas de hasta 10 kg por punto de tiro y utilizando inicializadores de tiempo cero. La Fig 3.22, ilustra la técnica.

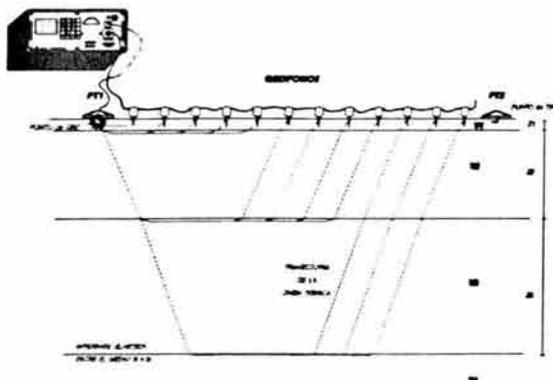


Fig 3.22 Arreglo del Tendido de Refracción Sísmica

Los sismo gramas obtenidos como resultado de estos trabajos se presentan en la Fig 3.23, y se consideran de buena calidad, estos representan la información de las trayectorias de las ondas sísmicas, hasta cada uno de los Geófonos colocados sobre la superficie del terreno. Hace 15 años, la tecnología de los equipos utilizaba para la impresión de los sismo gramas papel fotosensible, este trabajo es parte de esta recuperación de la información de campo.

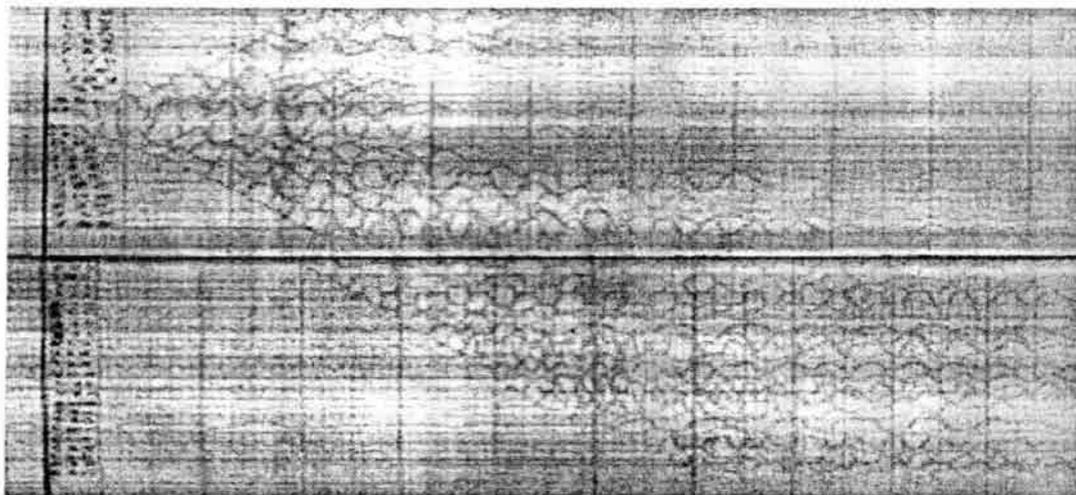


Fig 3.23 Sismo grama para el Punto de Tiro PT3.

En esta información fueron leídos los tiempos de arribo para formar Dromocrónicas, que corresponden a graficas tiempo distancia. A partir de estas dromocrónicas se generaron modelos de capas con velocidades de transmisión de la onda longitudinal P las cuales permiten conocer el grado de compatibilidad de los materiales y espesores de las capas. Los modelos fueron procesados, primeramente, por medio del programa GREMIX y se comprobaron los modelos con un segundo software que es el SIP. A continuación se presenta una grafica para un tendido típico de este trabajo (Fig 3.24).

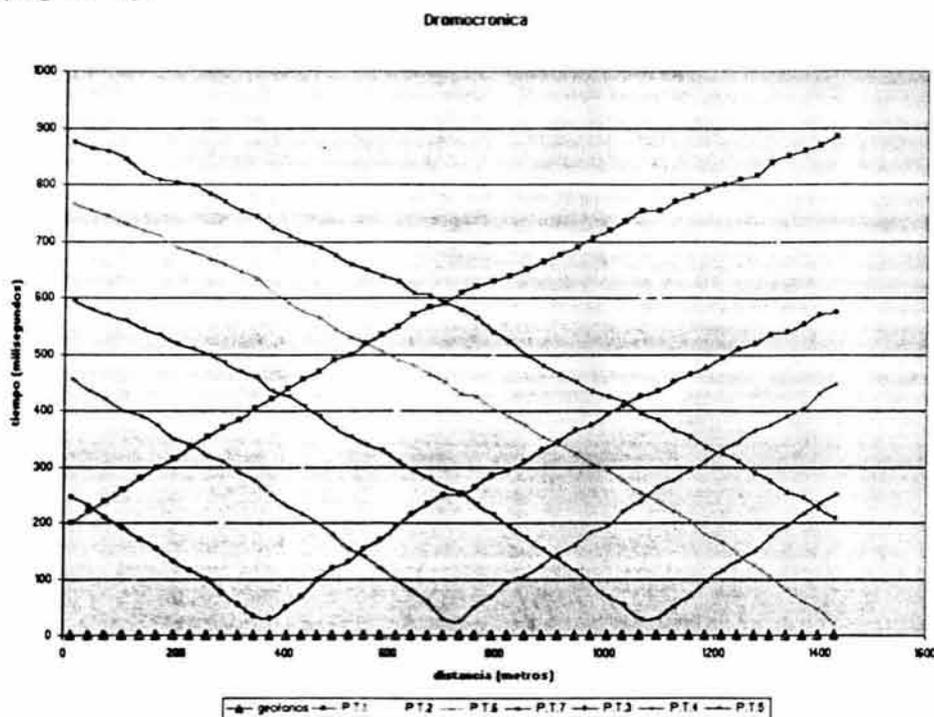


Fig 3.24 Grafica Distancia Tiempo (Dromocronica) para el Tendido M de la Torre (L-23)

3.3.5 Resultados geofísicos

3.3.5.1 Mapa de resistividad

La resistividad definida con sondeos eléctricos verticales, puede diferir del valor que se obtiene con las otras técnicas existentes para su determinación. Esto se debe a múltiples factores que van desde el tipo de señal producida y forma de registro, hasta las suposiciones y simplificaciones empleadas en la formulación físico matemática que define a la resistividad real. Las Secciones de Resistividad, que se obtuvieron de los modelos suavizados, son de gran utilidad pues conjunta las variaciones de la resistividad en el plano vertical, de donde es posible observar las diferentes características de los materiales.

El levantamiento de sondeos eléctricos verticales, consiste de aproximadamente 400, con separaciones a lo largo de las líneas de aproximadamente 1,000 m. La distribución de estos sitios se presenta en la Fig 3.25, y como referencias se tienen la ubicación de los 5 Pozos Profundos realizados en la cuenca de México.

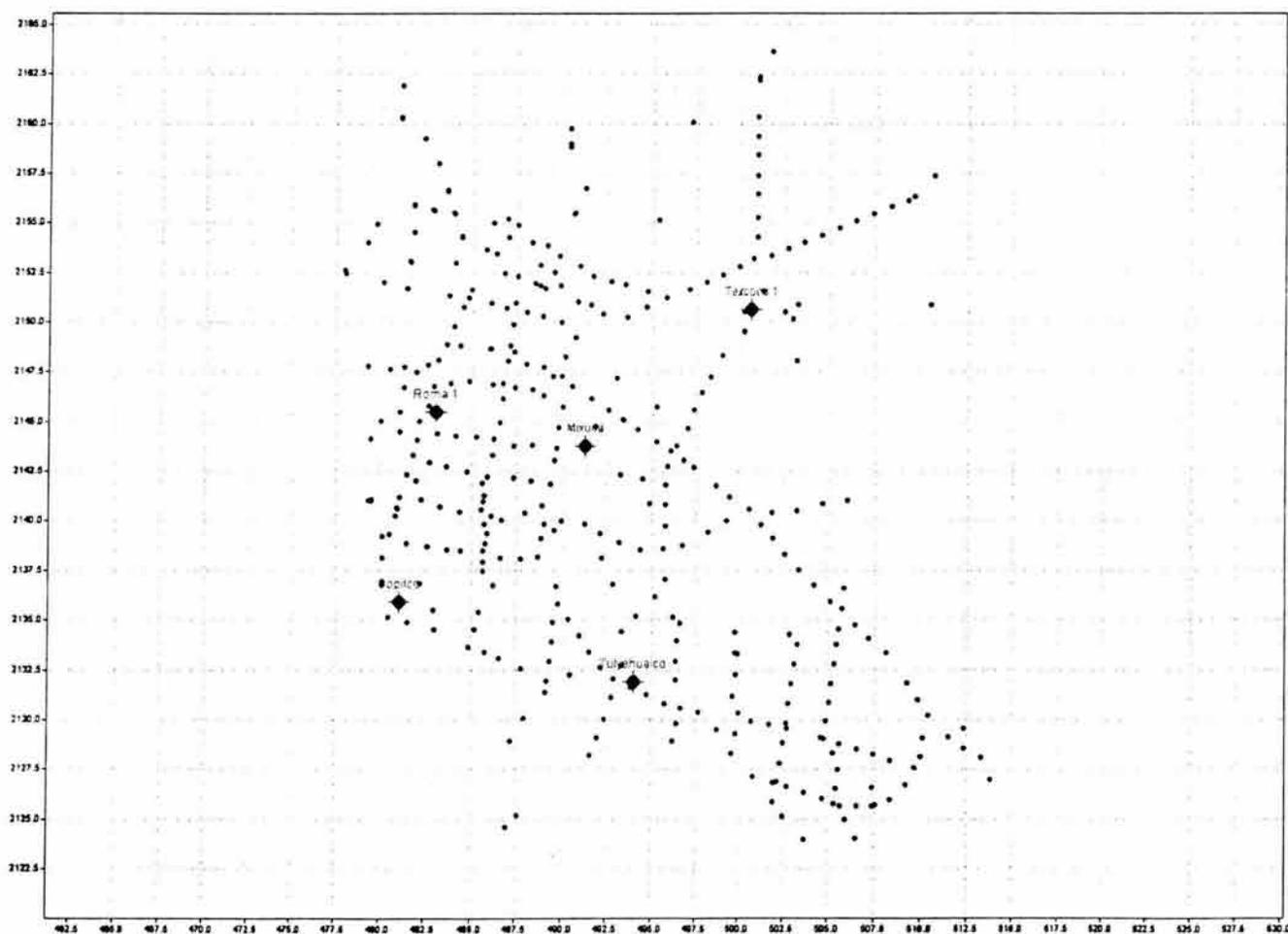


Fig 3.25 Ubicación de los sondeos eléctricos verticales

En general la distribución de las resistividades obtenidas se presentan en la Tabla 3.4. En la Zona se agrupan básicamente 3 Unidades Geoeléctricas o intervalos con algunas subdivisiones, tomando como base la Zonificación Geotécnica para la ciudad de México, que se describen en la siguiente tabla y se analizan más adelante.

Tabla 3.4 Zonificación Geoeléctrica

Zonificación Litológica	UNIDAD GEOFÍSICA (GEOELECTRICA)	Resistividad (ohm-m)	Correlación con Materiales
Lago	U1a	Menor de 2	Depósitos Lacustres (arcillas) muy compresibles con gran contenido de sal, contiene a la formación arcillosa superior)
	U1b	2 a 6	Depósitos Lacustres y Aluviales, materiales finos(arcillas, limos) en esta capa se encuentra la facie limo arcillosa denominada capa dura y la formación arcillosa inferior
	U1c	6 a 10	Depósitos Lacustres y Aluviales materiales Finos a Medianos (facies arcillosas, limo-arcillosas y arenosas saturadas) constituyen el paquete de depósitos lacustres profundos
Transición	U2a	10 a 22	Materiales medianos a gruesos (arcillas, arenas y gravas)
	U2b	22 a 40	Materiales granulares y/o roca alterada (gravas, arenas, Tobas con intercalaciones de arcilla)
Lomas	U3a	40 a 100	Rocas Igneas Fracturadas a poco Fracturadas (Tobas, Brecha Volcánica y basalto)
	U3b	Mayor de 100	Rocas Igneas poco Fracturadas

Para ilustrar el comportamiento integral de todos los sitios de los sondeos eléctricos verticales a diferentes cortes horizontales, se elaboraron Mapas de Resistividad, para las profundidades de 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200 y 300m y también se construyeron 12 secciones que son paralelas y perpendiculares entre si, para observar los cambios de resistividad en perfil, y su ubicación se indica en los mapas de resistividad.

El mapa de resistividad más somero para la profundidad de 10m (Figura 3.26), denota hacia las Zonas de Texcoco y Xochimilco-Chalco, la presencia de zonas muy conductoras (resistividades menores de 4 ohm-m) asociada con una alta conductividad del agua y/o características conductoras de los depósitos lacustre de cobertura, que se distribuyen ampliamente en estas zonas.

Hacia la Zona Centro de la ciudad de México, los valores de resistividad son del orden de los 8 a 15 ohm-m, y las isoclinas de resistividad siguen un comportamiento casi N-S, y denotando características mas arenosas, asociadas con la llamada Zona de Transición. Las zonas de color Rojo y amarillo, agrupan valores de resistividad mayor a los 75 ohm-m, y corresponden a las rocas volcánicas agrupadas en la Zona de Lomas.

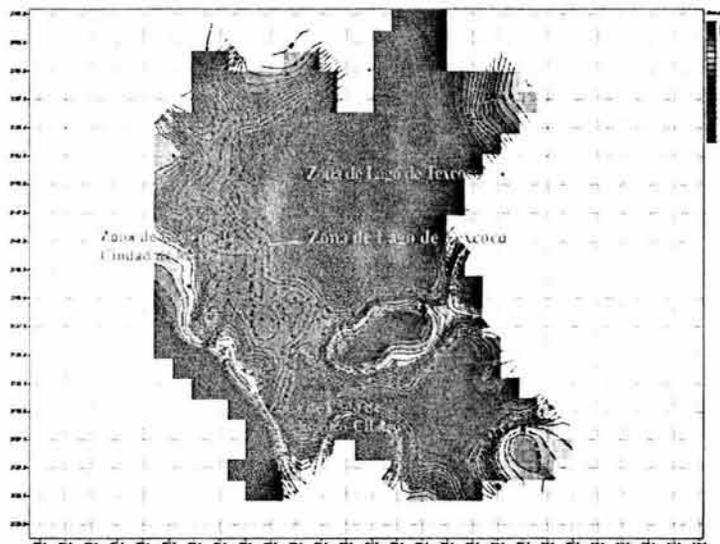


Fig 3.26 Mapa de resistividad para la profundidad de 10m

Además de la variación resistiva, agrupada en la zonificación Geotécnica conocida para la ciudad de México y la Zona Conurbana, es posible observar la definición de tres Zonas con características conductoras, y que de acuerdo a su distribución espacial es posible correlacionarlas con las subcuencas o subsistemas acuíferos conocidos como: Subsistema del ex Lago de Texcoco, Subsistema de Xochimilco Chalco y Subsistema de la ciudad de México, y que ambos se encuentran subdivididos por los aparatos volcánicos que aparecen en la Cuenca donde se asienta la ciudad de México.

Al construir el mapa de resistividad para la profundidad de 20m (Fig 3.27), se observan algunas zonas conductoras que aparecen en la Zona de la Subcuenca de la ciudad de México, estas se encuentran señaladas con las letras A y B, es evidente su distribución contrastando con materiales de mayor resistividad, y que por las características que presentan estos materiales deben estar constituidos por; arcillas, limos y arenas finas, y de acuerdo con las nuevas valoraciones para los modelos de la ciudad de México, reportadas por Federico Mooser, en una reinterpretación de los datos de Reflexión Sísmica levantados por PEMEX, encuentran relación con los Paleovalles de Chapultepec Reforma y el Culhuacan.

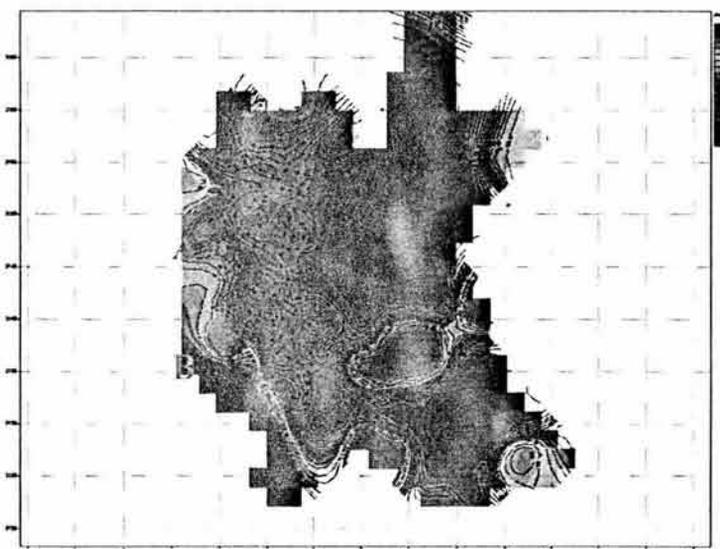


Fig 3.27 Mapa de resistividad para la profundidad de 20 m

Para las profundidades de 30 y 50m (Figs 3.28 y 3.29), estas Zonas reconocidas como Paleo valles, muestran una distribución importante denotando la presencia de materiales mas conductores, asociados con materiales finos, observando además cambios en la distribución espacial de estos.

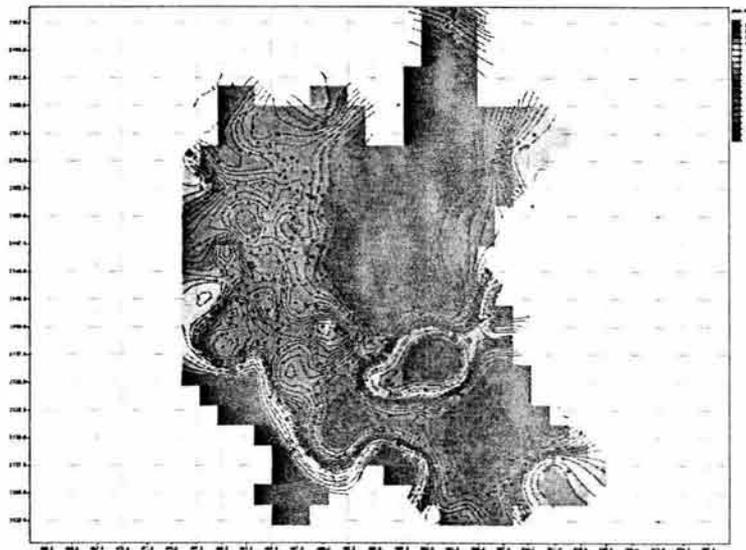


Fig 3.28 Mapa de resistividad para la profundidad de 30 m

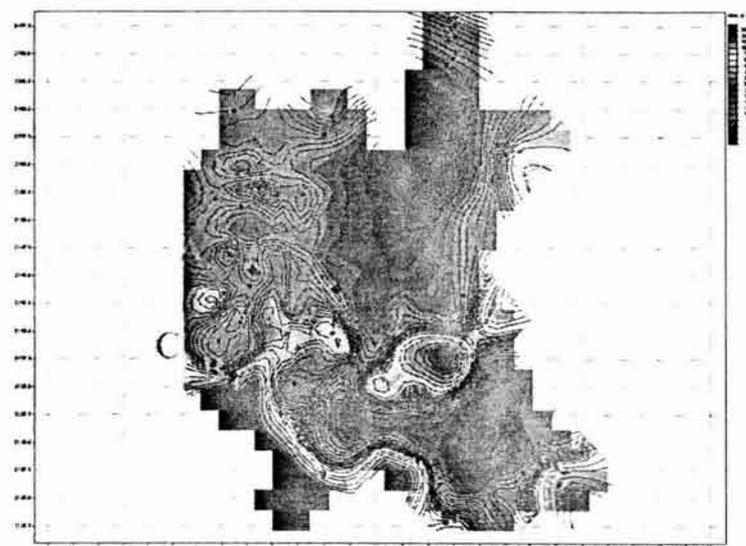


Fig 3.29 Mapa de resistividad para la profundidad de 50 m

Como puede notarse para la profundidad 50m (Fig 3.29), algunas de estas zonas conductoras empiezan a reducirse y aparece una nueva Zona Conductoras (C) que se desarrolla casi sobre la Av. Insurgentes, mostrando una mayor amplitud en el cruce con M. A de Quevedo y hasta Barraca del Muerto, es interesante observar la apertura de esta Zona C, mientras que la Zona B (Paleo valle Culhuacán), se muestra interrumpido por la traza de un horizonte resistivo, que puede corresponder con materiales aluviales gruesos y/o la presencia de un derrame volcánico proveniente de la Sierra de Chichinautzin, y que se encuentra intercalado en los materiales aluvión-lacustres. Mientras que también hacia la Zona A (Paleo valle Chapultepec-Reforma), tiende a estrecharse mas la zona, y manteniendo una orientación preferencial E-W, y alineando con la Barranca de Tacubaya, de la cual puede ser parte esta estructura.

Es importante señalar que la distribución resistiva ha ido variando, y es posible asociar estos cambios principalmente con las variaciones litológicas, que a la vez son el reflejo de condiciones complejas en el subsuelo, donde la actividad tectónica y depositación de materiales de origen aluvión lacustre, muestran la presencia de valles sepultados (Paleo valles), a la vez que fueron cerrados algunas comunicaciones del desagüe por la actividad volcánica en el valle, como fue la de la Sierra de Chichinautzin (Federico Mosser).

Para las profundidades de 100, 200 y 300m, empiezan hacer mas evidentes las zonas resistivas que corresponden a los aparatos volcánicos, que aparecen al centro de la Cuenca de México, y que desde luego controlan tanto el flujo del agua subterránea como el aspecto geotécnico del subsuelo de la ciudad de México.

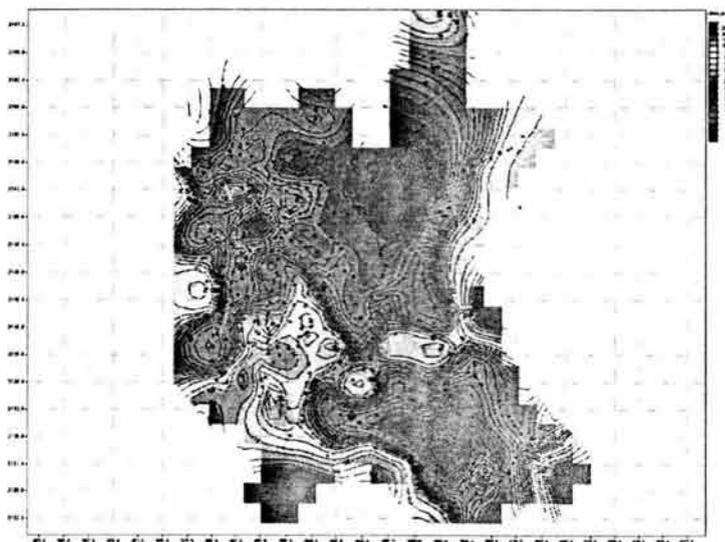


Fig 3.30 Mapa de resistividad para la profundidad de 100 m

Se observa en los bordes de los mapas, una distribución de valores de resistividad superiores a los 75 ohm-m, que se asocian con la presencia de las rocas volcánicas, lo cual le da un aspecto cerrado a la configuración resistiva, y a la vez a la Cuenca donde se asienta la ciudad de México, de aquí que se tenga catalogada como una cuenca endorreica, Fig(3.30).

Además, al centro de la Cuenca aparecen una serie de lineamientos resistivos, los cuales corresponden al Cerro de la Estrella y a la Sierra de Santa Catarina, mientras que resulta interesante una comunicación de una franja resistiva entre el Cerro de la Estrella, con la Sierra de Chichinautzin, y que cubre la Zona del Estadio Azteca, esta comunicación puede ser a través de un derrame que se encuentra intercalado en los depósitos aluvión lacustres, ya que para profundidades mayores esta franja ya no se observa.

La Fig 3.31, que corresponde a la profundidad de 200 m, indica aun la presencia de zonas conductoras que predominan para esta profundidad, como es la Zona A (Paleo valle Chapultepec-Reforma), algunas modificaciones importantes en la distribución espacial de las Zonas B y C, las cuales no han mantenido una distribución estable, observando que para ciertos niveles de profundidad se estrechan o se abren, este comportamiento desde luego es el reflejo de la actividad volcánica en la Cuenca, que muestra una mayor actividad en la porción sur asociados con la Sierra de Chichinautzin, observando la presencia de horizontes resistivos que corresponden con rocas de origen volcánico, intercalado en los depósitos aluvión-lacustres, con una distribución irregular tanto en el plano vertical (espesores), como horizontal. Con lo cual se dieron importantes modificaciones en los desagües originales de la Cuenca.

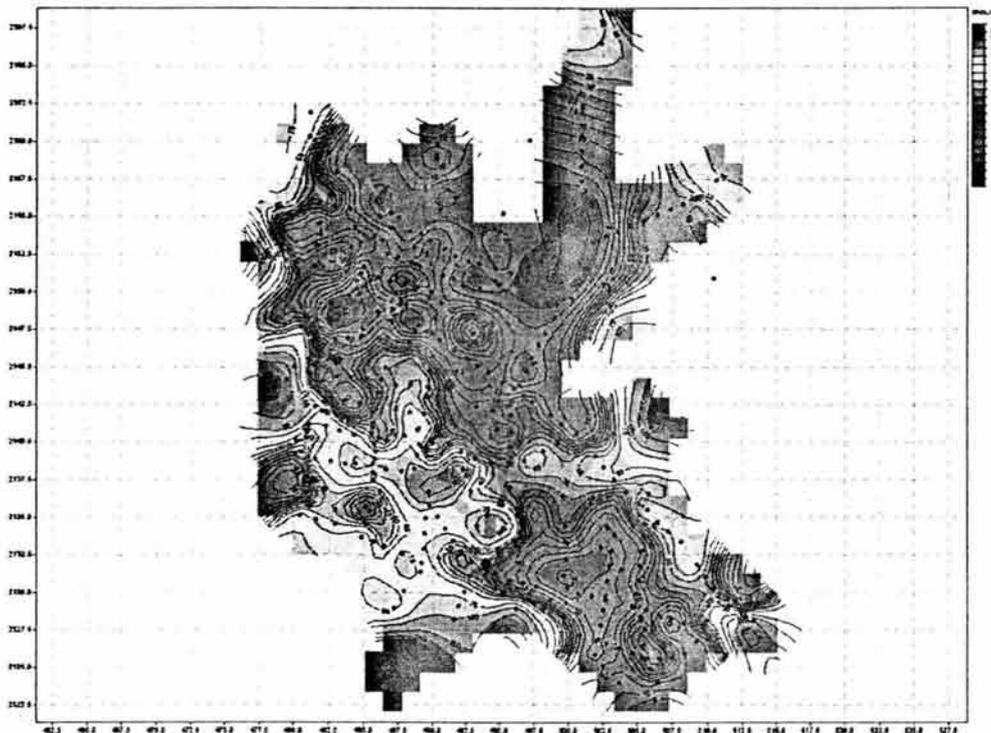


Fig 3.31 Mapa de resistividad para la profundidad de 200 m

Para el Mapa resistivo que corresponde con la profundidad de 300 m (Fig 3.32), se aprecia para la Zona A, una distribución importante, lo que significa que los espesores que constituyen este Paleovalle de Chapultepec-Reforma, supera los 300 m, como dato anexo a esta Zona, se reportaron daños importantes en las construcciones y gran numero de edificios se colapsaron, en el Sismo de Septiembre de 1985.

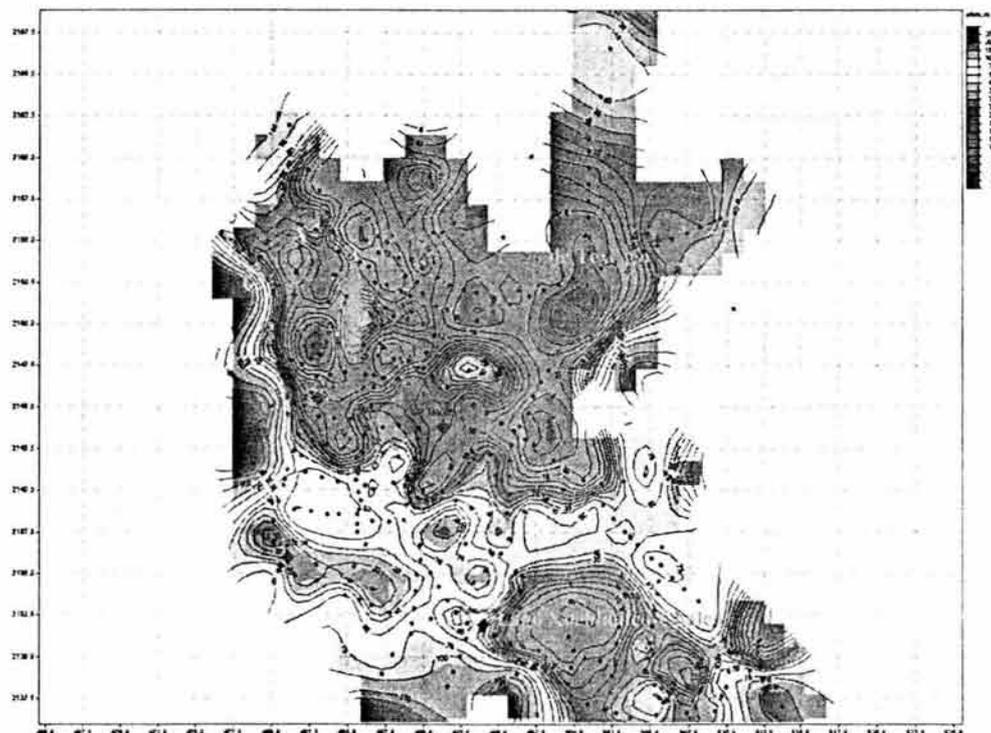


Fig 3.32 Mapa de resistividad para la profundidad de 300 m

3.3.5.2 Secciones de refracción sísmica

Los Resultados obtenidos en los 39 Tendidos de Refracción Sísmica, podemos resumirlos de la siguiente manera. Las Velocidades de Propagación de Onda P, se agruparon en Unidades Geosísmicas (Tabla 3.4), y se trataron de clasificar de acuerdo a la Zonificación Geotécnica que se conoce para el subsuelo de la ciudad de México. Como cualquier generalización la agrupación de estas Unidades Geosísmicas aquí definidas pueden presentar discrepancias en casos particulares, en ellos, las figuras respectivas presentan la explicación correspondiente.

Tabla 3.4 Unidades Geofísicas.

Zonificación Litológica	UNIDAD GEOSÍSMICA	Velocidad de Onda P (m/s)	Correlación con materiales
Lago	U1a	Menor de 600	Depósitos Lacustres (arcillas) muy compresibles con gran contenido de sal , contiene a la formación arcillosa superior)
	U1b	600 a 900	Depósitos Lacustres y Aluviales, materiales finos (arcillas, limos) en esta capa se encuentra la facies limo arcillosa denominada capa dura y la formación arcillosa inferior
	U1c	900 a 1300	Depósitos Lacustres y Aluviales materiales Finos a Medianos (facies arcillosas limo-arcillosas y arenosas saturadas) constituyen el paquete de depósitos lacustres profundos
Transición	U2a	1300 a 1900	Materiales medianos a gruesos (arcillas, arenas y gravas)
	U2b	1900 a 2500	Materiales granulares y/o roca alterada (gravas, arenas, Tobas con intercalaciones de arcilla)
Lomas	U3a	2500 a 300	Rocas Ígneas Fracturadas a poco Fracturadas (Tobas, Brecha Volcánica y basalto)
	U3b	Mayor de 3000	Rocas Ígneas poco Fracturadas

A continuación presentaremos modelos geosísmicos para algunos de los Tendidos de Refracción Sísmica; de estos podemos observar que en la parte superior se tienen un intervalo de velocidades promedio entre 800 y 1200 m/s (U1), con espesores que van de 30 a 250m; y corresponden con los materiales lacustres de baja compacidad. Este horizonte representa un especial interés geotécnico ya que gran número de las cimentaciones de la ciudad de México y su Zona Conurbana se encuentran desplantadas en esta capa.

Un segundo Horizonte que subyace al anterior, presenta velocidades entre 1400 y 2300 m/s (U2), y que corresponde a los materiales con mayor grado de compacidad, y esta constituido principalmente por depósitos aluviales, que alcanzan espesores mayores de 300m, y muestra una amplia distribución en los perfiles geosísmicos.

El Horizonte de mayor velocidad encontrado en los perfiles geosísmicos, reporta un intervalo entre 2600 y 3500 m/s(U3), y corresponde principalmente con rocas de origen volcánico, como tobas arenosas. A continuación se presentan algunos modelos de los TRS(Fig 3.33,3.34 y 3.35).

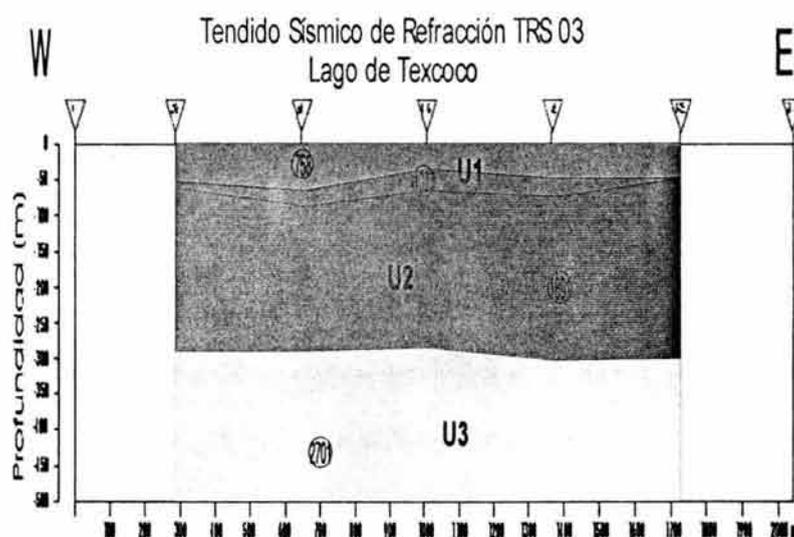


Fig 3.33 Modelo Geosísmico para el Tendido de Refracción Sísmica TRS 03 (Lago de Texcoco)

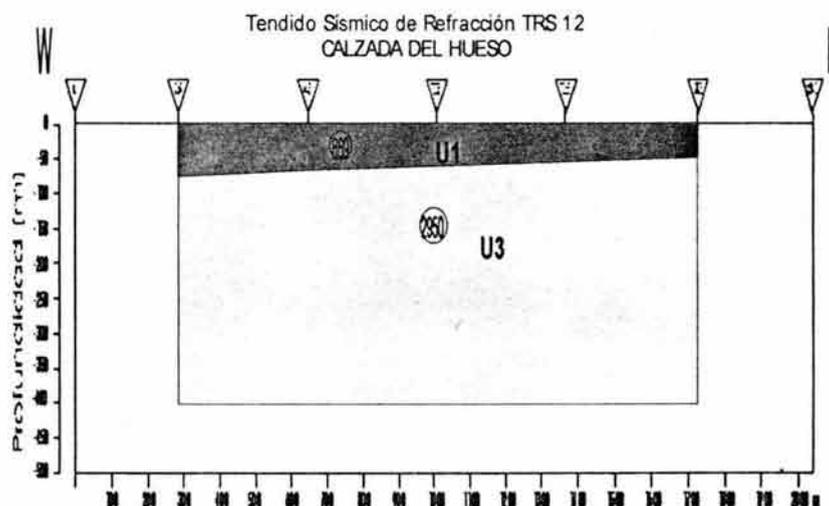


Fig 3.34 Modelo Geosísmico para el Tendido de Refracción Sísmica TRS 2 (Calzada del Hueso)

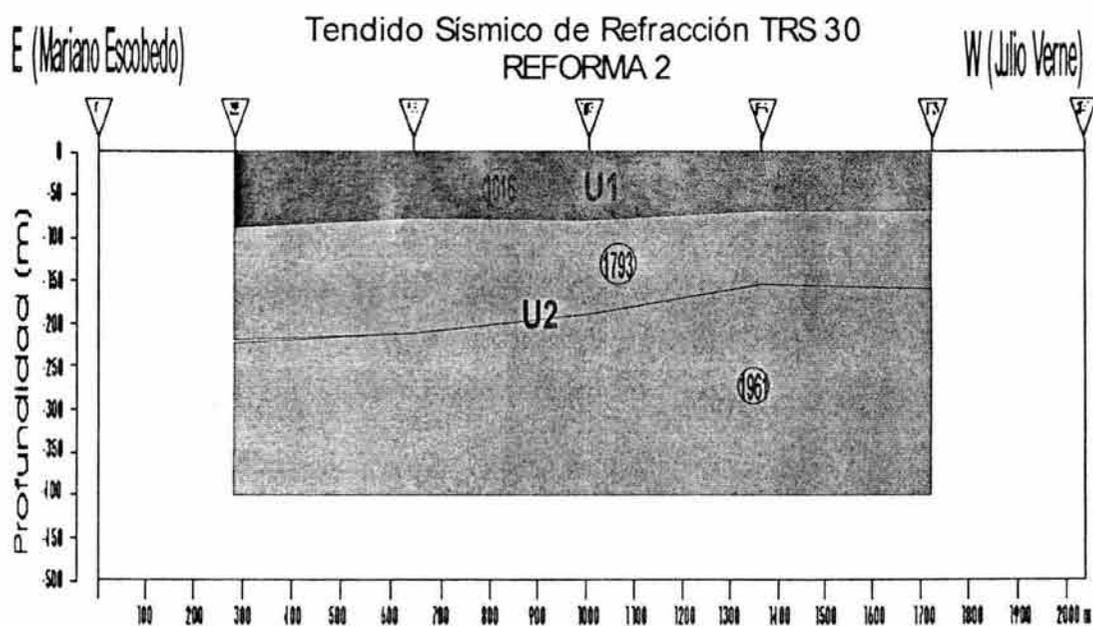


Fig 3.35 Modelo Geosísmico para el Tendido de Refracción Sísmica TRS 30 (Calzada de la REFORMA)

3.4 Hidrografía

El conocimiento adecuado de las características hidráulicas y de los cambios que ha experimentado el relieve a causa de la interacción de procesos geológicos y por actividad humana en cuanto a la ubicación de las trayectorias de los cauces de ríos, canales y cuerpos de agua en general alojados en la Cuenca de México es de gran relevancia y valor geotécnico como lo describen los dos siguientes párrafos.

La comprensión adecuada de las condiciones hidrográficas proporciona un elemento de juicio para identificar zonas que experimentan procesos de erosión y sedimentación fluvial. Por ejemplo, los rellenos aluviales localizados al pie de las laderas pueden clasificarse en abanicos, terrazas, llanuras e incluso subcuencas aluviales.

Otro aspecto de valor geotécnico se refiere a que también este conocimiento, puede anticipar para alertar e incluso explicar las causas del mal comportamiento de las cimentaciones. Por ejemplo, cuando una parte de su área en planta queda alojada en un antiguo cause y la otra restante en depósitos de suelos blandos de alta compresibilidad y sujetas al bombeo profundo (por ejemplo las obras o vías de comunicación del viaducto piedrad en la ciudad de México).

Finalmente, de lo anterior resulta particularmente obvio, que el contenido informativo que proporciona la hidrografía y su interacción simultánea con la orografía y planimetría constituyó otro elemento de juicio tomado en cuenta e incluido para fundamentar y definir a la zonificación geotécnica. En los siguientes párrafos se describirán las características hidrológicas principales; así como, la división de la Cuenca de México en once zonas hidrológicas.

La información aquí presentada, es una síntesis de los múltiples estudios llevados a cabo por la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.

3.4.1 Hidrografía de la Cuenca de México

Los ríos Remedios y Churubusco drenaban hacia al interior de la llanura o planicie del lecho del lago de la ciudad de México desde la sierra de las Cruces; ahora están confinados en canales artificiales viaductos y avenidas principales han sido aprovechados en su lugar para facilitar el tránsito vehicular. La mayoría de los ríos eran efímeros al llegar a la llanura o planicie de la Cuenca y su flujo casi desaparecía durante el estío. Todos los ríos se desbordaban cuando el flujo alcanzaba al nivel del lago y en vastas áreas de la llanura o planicie de la Cuenca y en la ciudad de México ocurrían inundaciones.

Por sus principales características hidrológicas que presentan las corrientes superficiales de la Cuenca de México, se ha dividido ésta en las siguientes once fracciones, que convencionalmente se les designa como zonas hidrológicas y que en los siguientes párrafos se describen. En la Fig 3.36 se muestra la ubicación de las trayectorias de las corrientes superficiales y su interacción con la orografía y planimetría de la Cuenca de México.

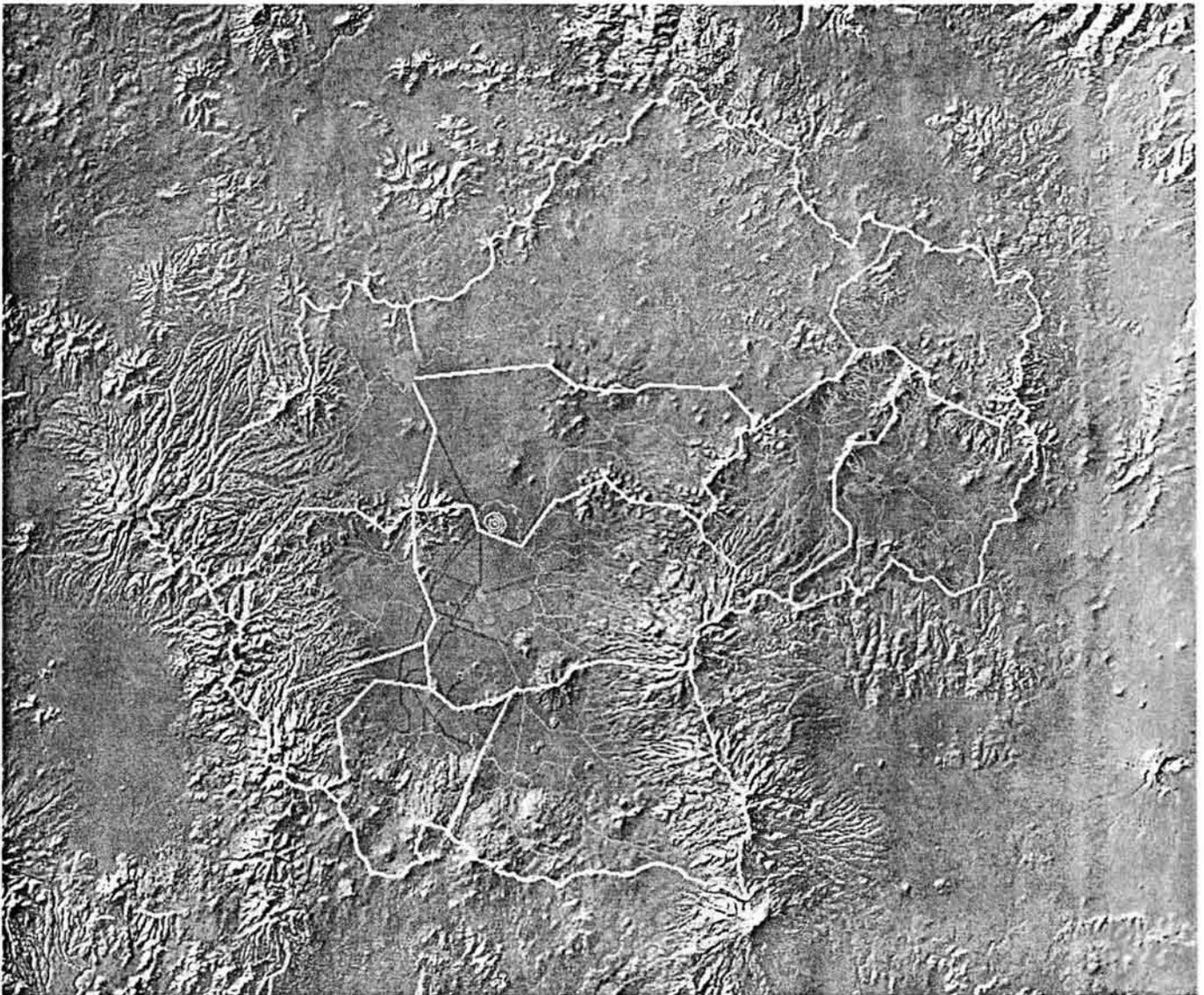
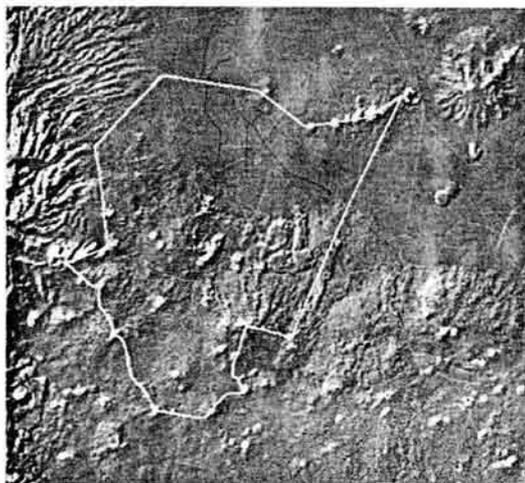


Fig 3.36 Hidrografía de la Cuenca de México
(Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1964)

Zona I

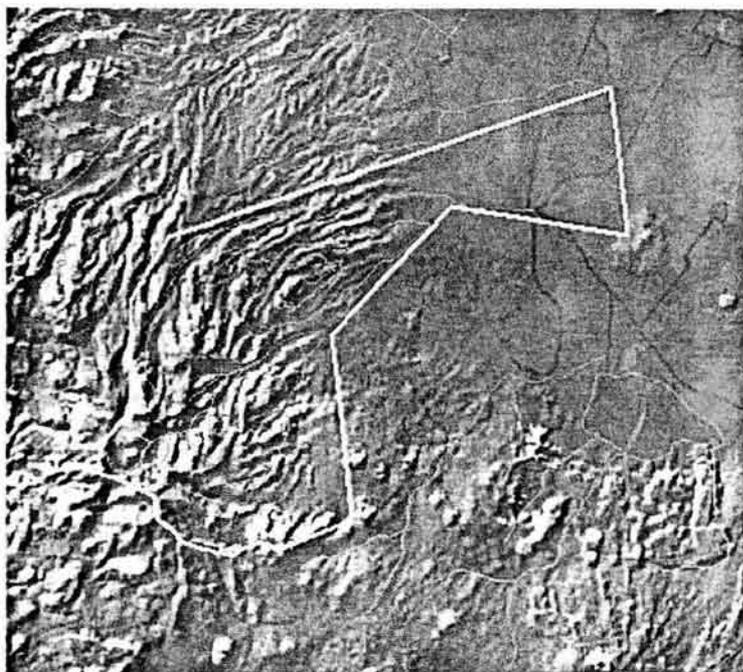
Comprende la cuenca de los ríos San Gregorio, San Lucas, Santiago y San Buenaventura; estas corrientes bajan de la sierra de Chichinautzin, cuyas formaciones basálticas tienen gran permeabilidad, por lo que el escurrimiento superficial anual es solamente de 1.2 millones de m³ (36 l/s). Sin embargo, durante las tormentas excepcionales se presentan grandes avenidas, particularmente en el río San Buenaventura, donde se estima que han llegado a generarse gastos hasta de 100 ms/s.



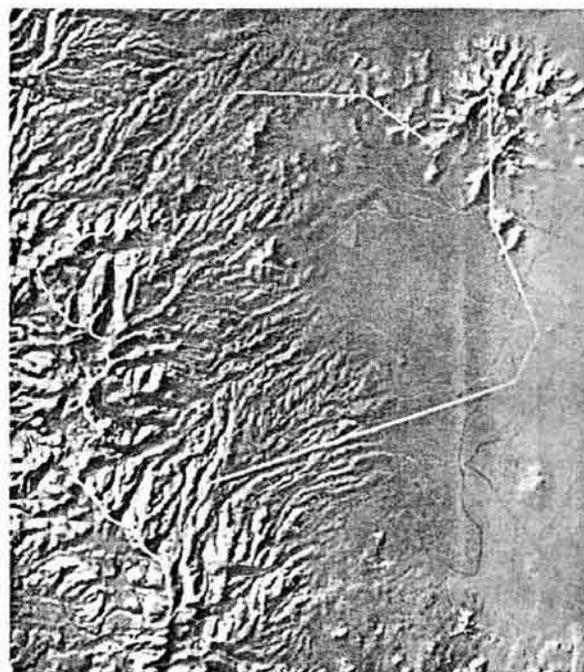
Zona I

Zonas II y III

Comprenden el área urbanizada de la ciudad de México y los ríos que desde el poniente de la Cuenca bajan hacia ella; éstos son también intermitentes, salvo los ríos Magdalena, Mixcoac, Tacubaya, Hondo y Tlalnepantla que tienen escurrimientos perennes.



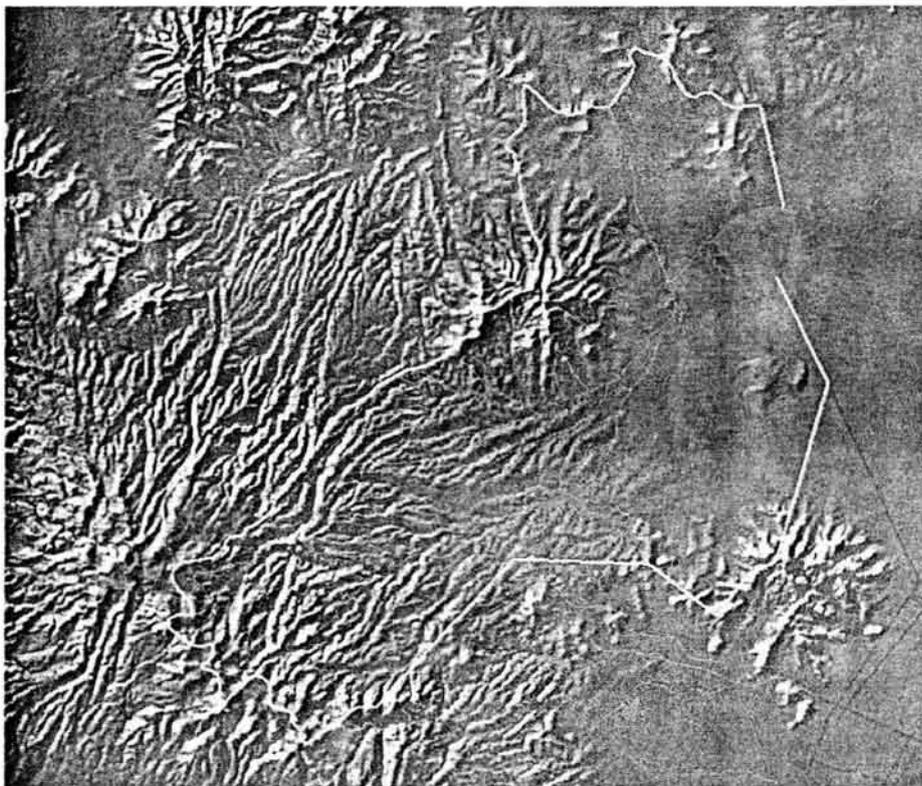
Zona II



Zona III

Zona IV

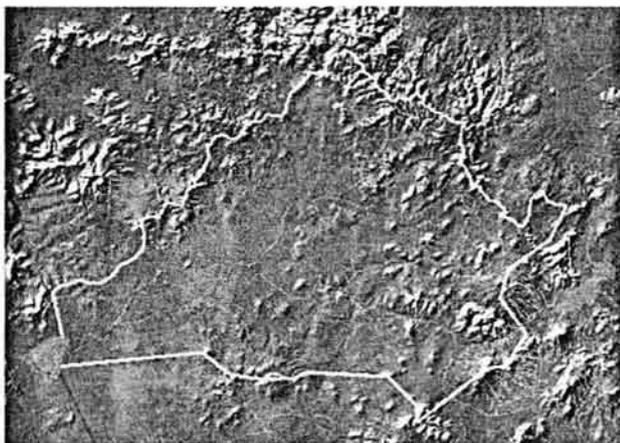
Abarca las sub cuencas de los ríos Tepozotlán y Cuautitlán, que se originan en el noroeste de la cuenca.



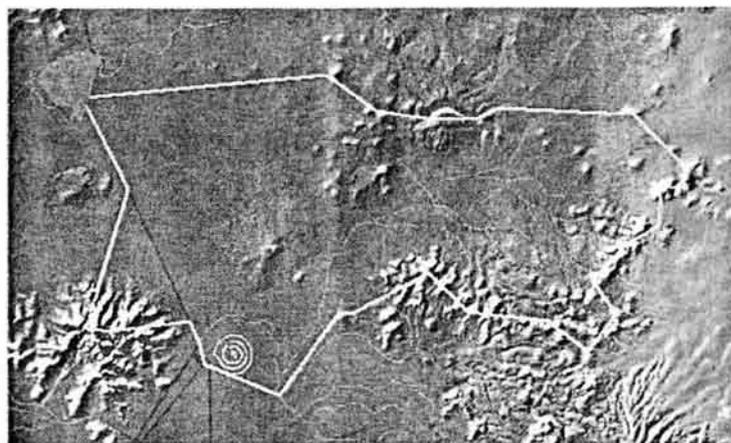
Zona IV

Zonas V y VI

Corresponden básicamente a la sub cuenca de los ríos provenientes de Pachuca y San Juan Teotihuacán, respectivamente.



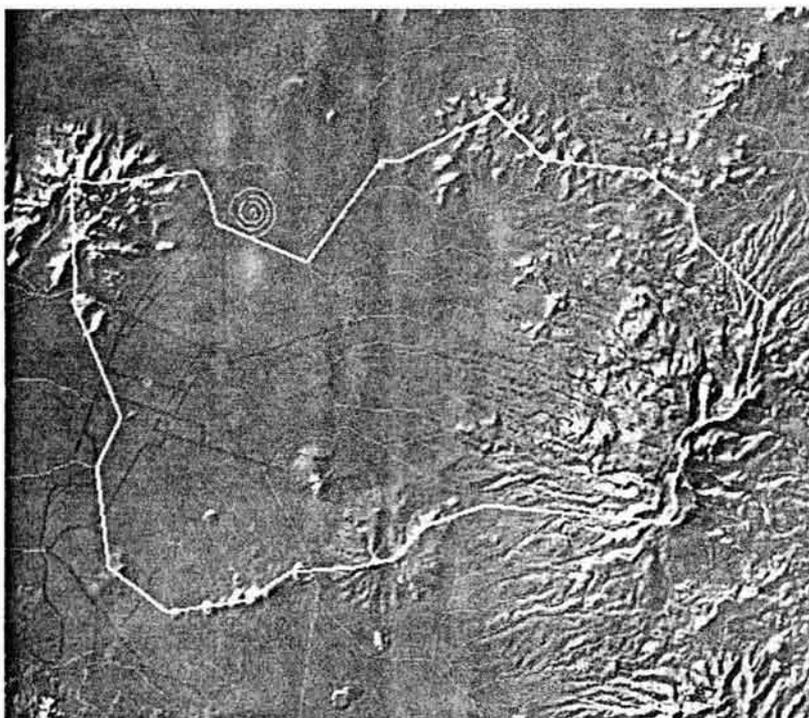
Zona V



Zona VI

Zona VII

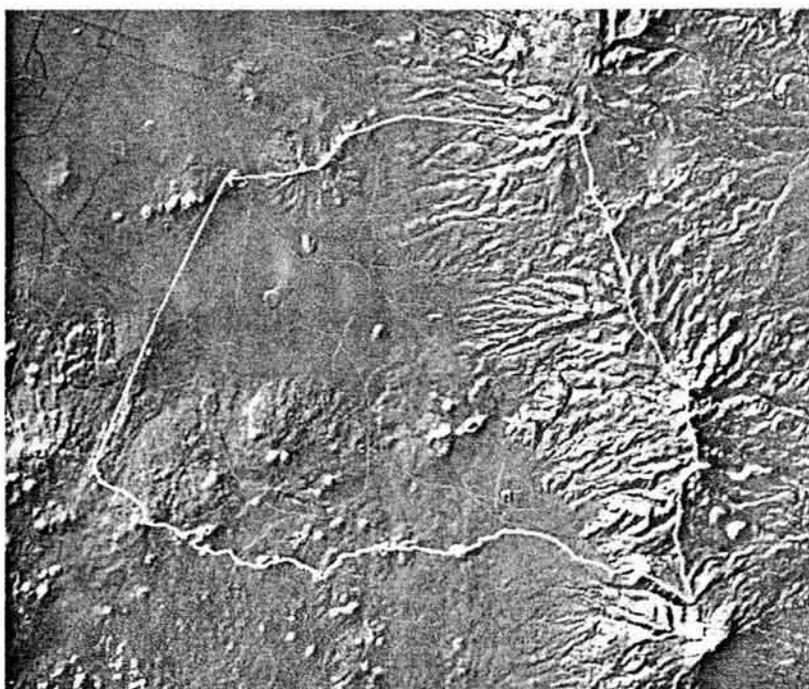
Incluye los ríos que descargan en el lago de Texcoco por el oriente.



Zona VII

Zona VIII

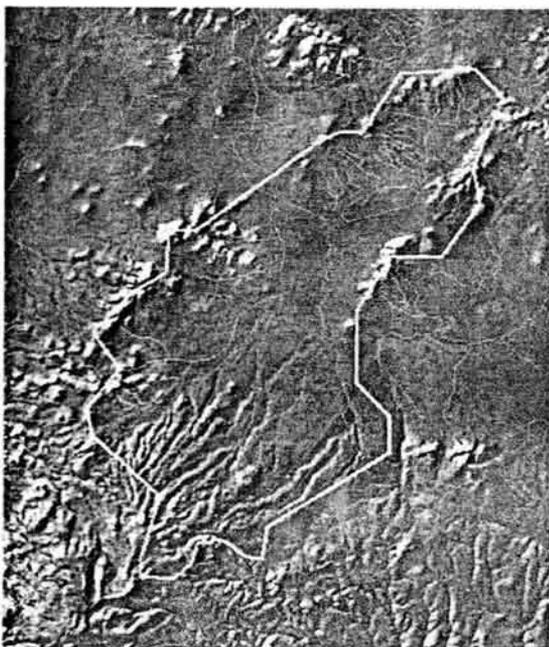
Está limitada por los ríos San Francisco y Milpa Alta, al oriente de la Cuenca. En esta zona el gasto medio es de 0.6 m³/s.



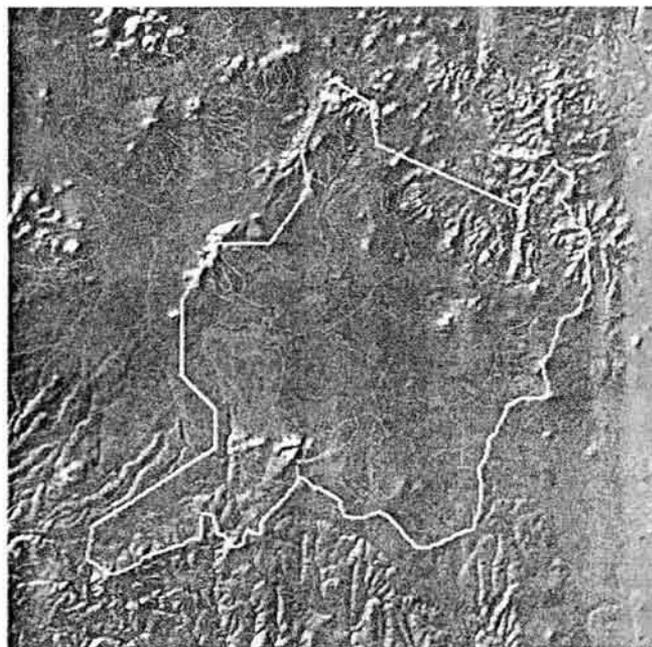
Zona VIII

Zonas IX, X y XI

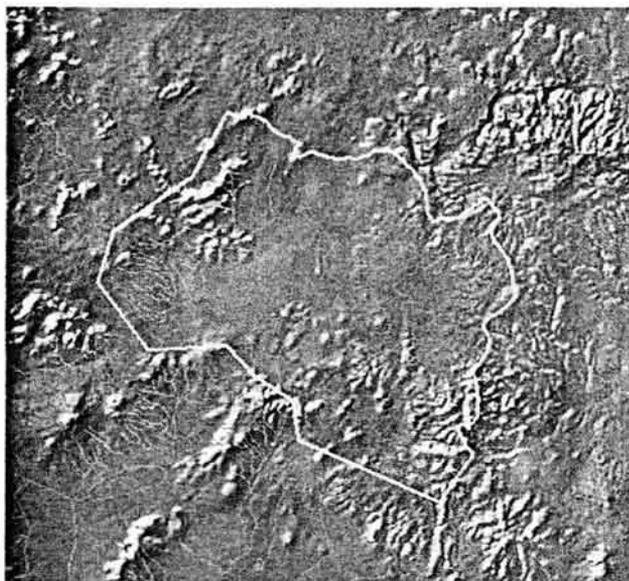
Que originalmente no formaban parte de la Cuenca, han sido incorporadas a ella artificialmente. Comprenden desde la sub cuenca del río Tizar hasta las corrientes alimentadoras de la laguna de Tecocomulco, y producen un gasto de 1.6 m³/s.



Zona IX



Zona X



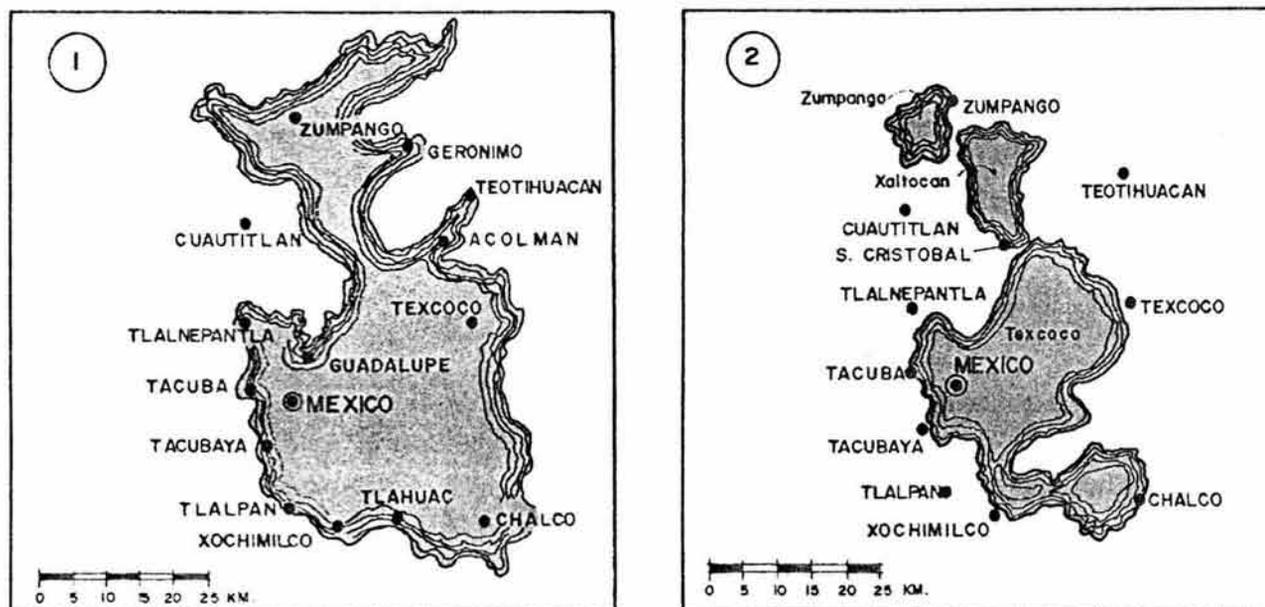
Zona XI

En el Valle de México existieron gran cantidad de lagos, ríos y manantiales. Sin embargo, debido al drenaje de la Cuenca, a la urbanización y a la explotación del acuífero, la disponibilidad de agua superficial ha disminuido de manera drástica. En conjunto, los cursos de agua de la cuenca de México producen un gasto medio de 19 m³/s, que equivale a 9.0% de la precipitación pluvial media anual. De ellos se aprovechan solamente 1.4 m³/s. La mayor parte de los ríos de la Cuenca son de carácter torrencial con avenidas de corta duración, a veces peligrosas. Durante la temporada de estiaje sus cauces permanecen secos.

Sólo los siguientes ríos de la Cuenca tienen escurrimientos perennes: Magdalena, Mixcoac, Tacubaya, Hondo, Tlalnepantla, Cuautitlán, Tepozotlan, San Juan Teotihuacan y de la Compañía.

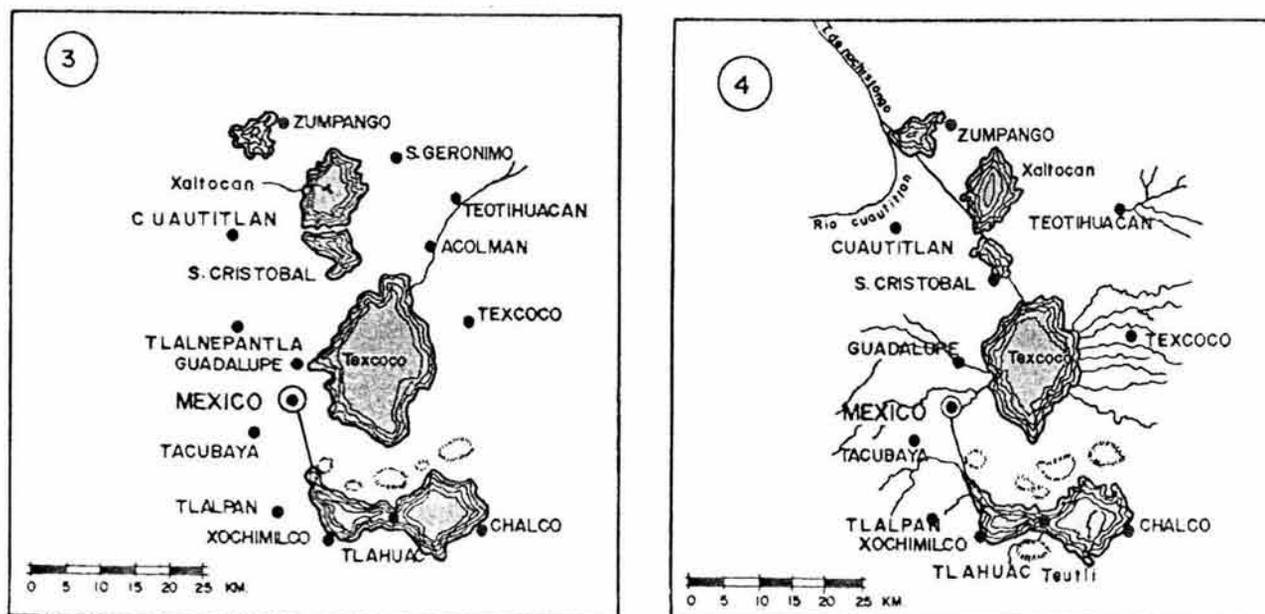
Lagos

En la Fig.3.37, se muestra el plano según Shilling Kiel, el retroceso de los lagos en la Cuenca, desde la época diluvial, en la cual su fondo constituía un solo gran lago hasta principios el siglo XV en que, por fenómenos físicos de diversa índole, aparece fraccionado el mismo lago. Este fraccionamiento se acentuó al principiar el siglo XIX.



Los límites aproximados durante la época diluvial

A comienzo del siglo XVI



A comienzo del siglo XIX

En el año 1889

Fig. 3.37 Área ocupada por los lagos en diferentes épocas (Schling Kiel, 1938)

Principalmente por el funcionamiento de las obras del desagüe en la Cuenca conocidas con los nombres de Tajo de Nochistingo, Gran Canal de Desagüe y Túneles de Tequixquiac, han descendido los niveles de agua en lagos y varios de éstos se han secado. Quedan aún en lo que fue la Cuenca original de los lagos de Texcoco, Xochimilco y la Laguna de Zumpango en las condiciones siguientes:

Lago de Texcoco

La curva de embalse que corresponde a la elevación 2237.48 msnm es el límite del lago al norte y oriente; al poniente y sur limitan los bordos de contención denominadas "Poniente" y "Xochiaca". Según los datos disponibles se estima que aproximadamente almacena unos 101 millones de metros cúbicos sobre una superficie de 14,000 Ha.

El lago de Texcoco regula los caudales de los siguientes ríos: San Juan Teotihuacan, Papalotla, Xalapango, Coaxacoaca, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec, San Francisco, de la compañía, Churubusco, Amecameca y parte de los ríos al poniente de la Cuenca, que desaguan por el sistema que se ha denominado Desviación Combinada. El lago de Texcoco vierte sus aguas al Gran Canal del Desagüe, que es emisario de la Cuenca.

Lago de Xochimilco

El lago de Xochimilco se ha reducido, según se aprecia nota, en la imagen de satélite Fig 2.27, a una serie de canales con aguas libres que circundan a las chinampas, a terrenos de cultivo y aún área urbana, con las siguientes superficies:

	Ha
Superficie con canales	199
Chinampas	764
Terrenos de cultivo	835
Superficie urbana	116
Total.....	1,914

La capacidad calculada para el almacenamiento útil del lago de Xochimilco es de unos 11 millones de metros cúbicos, varían las altitudes de sus niveles de agua máximo y mínimo entre 2239.16 y 2237.81; el primero registrado en octubre de 1954 y el último, en mayo 1958.

Alimenta el lago de Xochimilco los arroyos de San Gregorio, San Lucas, Santiago, San Buenaventura y el río Churubusco que fue desviado artificialmente para alimentarlo, a fin de conservar un nivel de agua aceptable. El promedio anual de los volúmenes aportados en el lapso 1920 a 1985 fue de unos 5 millones de metros cúbicos. El volumen máximo anual aportado en 1958 fue de 22.6 millones de metros cúbicos.

Laguna de Zumpango

Los últimos bordos construidos en 1951 redujeron la capacidad de almacenamiento de la laguna de Zumpango a 27 millones de metros cúbicos.

3.5 GEOTECNIA

El elemento de información más significativo tomado encuentra para fundamentar la definición o actualización de la zonificación geotécnica de cualquier ciudad, siempre han sido los diferentes tipos de sondeos geotécnicos que provienen de exploraciones directas y puntuales del subsuelo. Ello se debe primeramente a que proporcionan la información de detalle sobre la variación con la profundidad de la estratigráfica y propiedades índice, mecánicas y dinámicas.

El segundo aspecto de importancia se refiere; a que los sondeos geotécnicos, sirven de base para afinar las líneas de frontera preliminares definidas a partir de la geología, geomorfología y topografía a escala 1:50,000. Estas líneas de frontera preliminares separan la clásica división en tres zonas: Lago, transición y lomas. Y a partir de ellas, se emprende la definición definitiva de las líneas de frontera con el detalle o precisión que proporciona la cartografía simbólica de gran escala cuya función es visualizar y manejar zonas con gran densidad de datos como la cartografía urbana a nivel de calles, manzanas, plazas y parques escala 1:10,000 que se muestra en la Fig 3.38

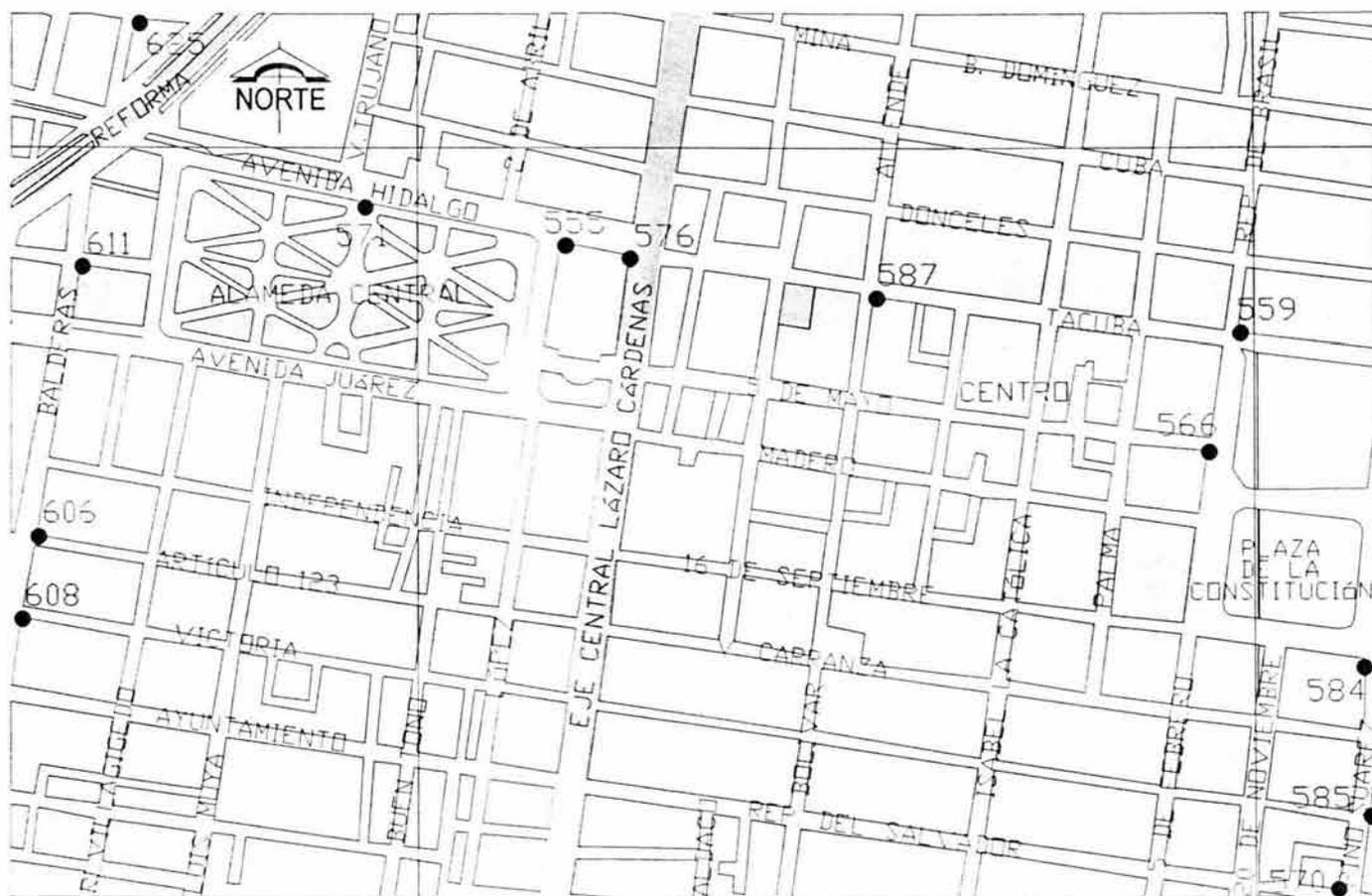


Fig 3.38 Carta urbana Zócalo, México, D.F.

Otro aspecto, se refiere a que el conocimiento de las condiciones geotécnicas del subsuelo, es decir de las características y rasgos generales de la distribución de los materiales, espesor de los estratos u horizontes típicos y de la variación con la profundidad de las propiedades de los suelos se adquiere a través de exploraciones directas de detalle como son los sondeos geotécnicos.

Por ser los sondeos geotécnicos el elemento de información más significativo tomado encuentra para fundamentar la definición, actualización y extensión de la zonificación geotécnica de la ciudad de México; y aunado, a que el tratamiento manual de la información geotécnica sobre el territorio de la Cuenca de México ha dejado de ser práctico, se consideró adecuado e imprescindible desde hace ya varios años emprender un nuevo esfuerzo encaminado a un cambio tecnológico en los métodos de tratamiento del enorme volumen de información sobre los múltiples estudios de los que ha sido objeto la Cuenca de México.

En este y en los anteriores aspectos, fue que se diseñó y se puso en servicio un Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnico denominado SIG-SG antes CATSON, Catalogo de Sondeos (1989 –1992). Ahora es posible contar con un Sistema dedicado a ordenar y almacenar de manera sistemática y permanente la información obtenida mediante sondeos geotécnicos en zonas amplias (9, 600 km²) como la Cuenca de México (Fig 3.39). Este sistema constituye una herramienta que permite actualizar y generar nuevos conocimientos sobre las propiedades y características geotécnicas del subsuelo. Sus posibilidades de aplicación son muy numerosas. Y que en los diez incisos siguientes se describe ampliamente.

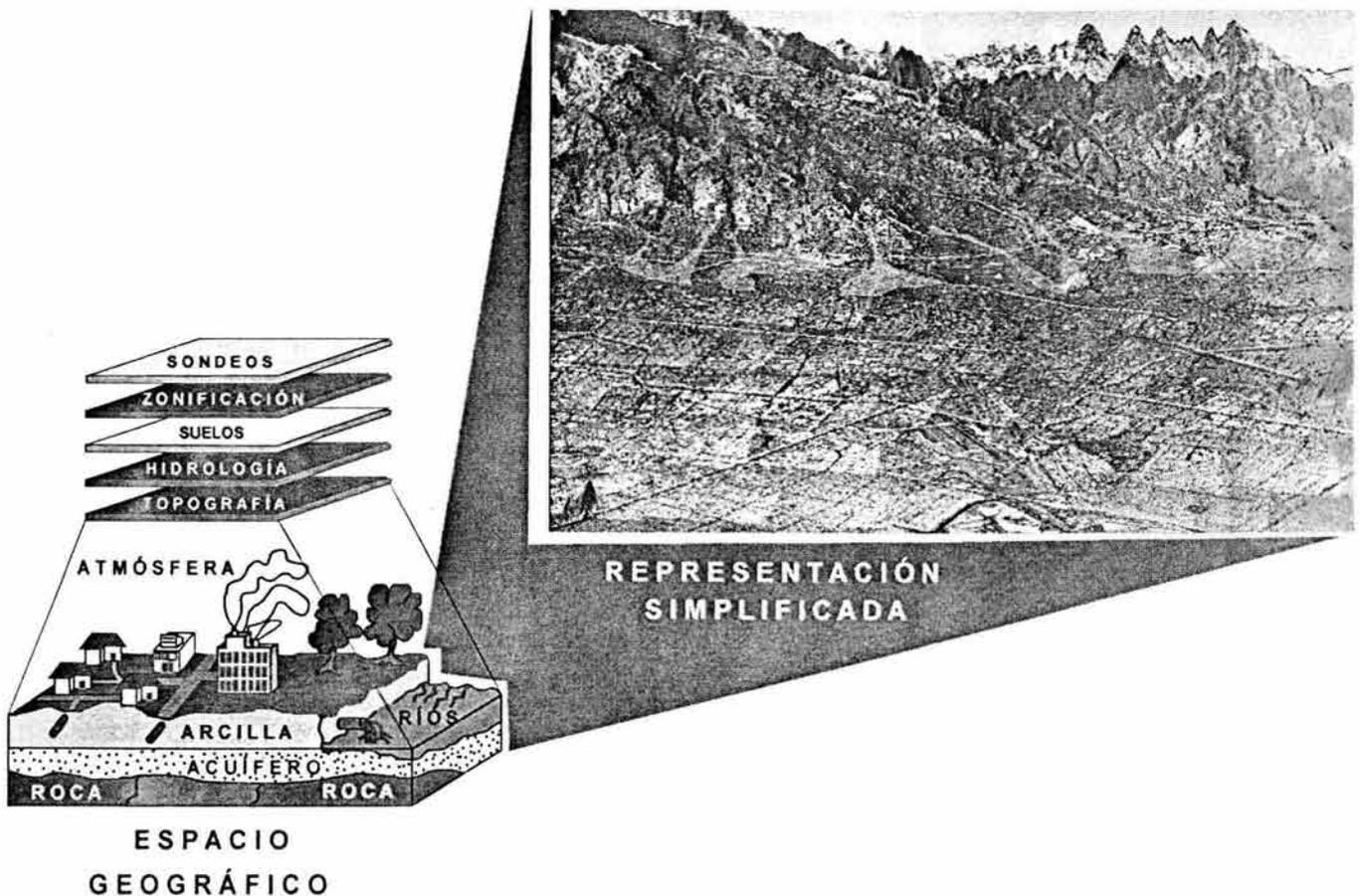


Fig 3.39 Modelo del mundo real, organizado a partir de capas o estratos de información clasificados por temas a partir de un Sistema de Información Geográfica

3.5.1 Introducción

En el pasado, cada sociedad en su momento, supo utilizar las herramientas más avanzadas de su época para almacenar, ordenar y manejar grandes volúmenes de información. Ordenaba su información mediante listas o registros tabulares en formato analógico y los almacenaba clasificándolos en orden alfabético por año, temas o materias empleando carpetas que se guardaban en archiveros, hasta llegar a conformar un cuarto o inmueble llamado archivo muerto o banco de información (por ejemplo: Archivo de la Nación). Estos archivos nos limitaban a buscar un solo dato a la vez, lo que tomaba tiempo y esfuerzo.

Actualmente, se cuenta con novedosas herramientas de análisis espacial basadas en la modelación espacial; la cual, se ocupa de construir modelos o representaciones simplificadas de cualquier medio geográfico de algún territorio.

Estas herramientas presentan un gran potencial pero que se han usado poco hasta ahora en geotecnia y quedan inscritas en el contexto general de las tecnologías de la Geoinformática; la cual, se apoya del aporte de diversas ciencias y técnicas tales como la Geografía, Geodesia, técnicas y metodologías del Análisis Espacial y la Informática. En la Geoinformática, destacan tres importantes tecnologías:

La primera se refiere al desarrollo que han alcanzado los bancos o manejadores de base de datos de índole espacial; los cuales, permiten integrar y manejar información relacionada con entidades geográficas de un territorio dado. Estos bancos se denominan Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG están orientados a la administración de grandes volúmenes de información con carácter espacial (como los empleados en proyectos y estudios sobre algún territorio dado) es decir, información referenciada geográficamente bajo un sistema de coordenadas proveniente de una proyección. Esta administración implica contar con sistemas que contengan funciones o capacidades tales como capturar, almacenar, manejar, procesar y recuperar eficientemente la información espacial.

3.5.2 Antecedentes

Durante el último medio siglo, se han realizado diversos trabajos de recopilación y análisis de información geotécnica con el fin de conocer y actualizar el estado del conocimiento del subsuelo de las principales ciudades del país. Entre estos trabajos destacan los siguientes:

1949 -1959	El primer esfuerzo de recopilación y análisis, en el que se comienza a tener información de la distribución de los materiales y sus propiedades mecánicas, lo constituye el libro: "El Subsuelo de la Ciudad de México".	Marsal y Mazari
1970 -1988	A través de sus Reuniones Nacionales y de algunos Simposios, la SMMS ha logrado ordenar información relativa al subsuelo de más de cuarenta ciudades de primer orden en la República Mexicana (véanse, por ejemplo, las memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos; Jaime et al. 1989; Reséndiz et al. 1970; etc.).	Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, SMMS
1971 -1976	Otro esfuerzo por recopilar y ordenar perfiles geotécnicos de los estudios de mecánica de suelos en el Distrito Federal, es la publicación elaborada por la Dirección General de Obras Públicas del Departamento del Distrito Federal, durante el sexenio.	DDF
1985 -1988	A raíz de los sismos de septiembre de 1985, las autoridades del Departamento del Distrito Federal, en cooperación con la Organización de las Naciones Unidas, patrocinaron la creación del primer banco de datos computarizado para la ciudad de México en materia de sondeos geotécnicos, realizado por el Centro de Investigación Sísmica, de la Fundación Javier Barrios Sierra. Este trabajo se concentró principalmente en sondeos localizados dentro de la antigua traza de la ciudad (Ovando et al., 1988).	ONU-DDF
1989 -1993	Banco de Datos denominado Catálogo de Sondeos, CATSON. (G. Rocha A., E. Méndez S. et al., 1989)	SMMS
1994 -	Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, SIG-SG. (Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería, UNAM)	I. de I., UNAM

A pesar de todo este esfuerzo, el estado actual del conocimiento sobre el subsuelo de la Cuenca de México no puede considerarse como satisfactorio por lo que es necesario profundizar aún más en su estudio mediante el análisis de la información disponible, la instrumentación, la observación y el monitoreo permanente de los procesos de fenómenos locales y distantes del entorno natural de la Cuenca de México.

El laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia, del Instituto de Ingeniería, UNAM, surge con el propósito de atender y mitigar las urgentes necesidades en materia de generación, organización, actualización e interpretación de los datos geotécnicos relativos a la Cuenca de México.

3.5.3 Objetivo y alcance

El objetivo principal de este trabajo es diseñar y poner en servicio un Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, denominado SIG-SG antes CATSON, Catálogo de Sondeos (1989–1992).

El Sistema SIG-SG tiene como objetivo almacenar sistemática y permanentemente la información puntual disponible de exploraciones directas sobre el subsuelo, a través de los datos contenidos en los sondeos geotécnicos de diferentes tipos (es decir, datos de la variación con la profundidad de la estratigráfica y propiedades índice, mecánicas y dinámicas) Por ahora y desde hace ya varios años, la información de los sondeos geotécnicos se toma únicamente de estudios de Mecánica de Suelos, efectuados en diferentes épocas por dependencias o empresas que laboran en la Cuenca de México.

La utilización de la información almacenada en la base de datos como de los informes o reportes impresos por el SIG-SG no pretenden, bajo ningún motivo, sustitución o reducción de la ejecución de futuros estudios de Mecánica de Suelos. Tampoco servir de base para la elaboración de recomendaciones preliminares o definitivas para proyectos de cimentaciones o geotécnicos.

3.5.4 Modelo conceptual

En este capítulo se presentan los conceptos que constituyen el esqueleto fundamental del banco o base de datos denominado SIG-SG. Cabe señalar, que este modelo conceptual del banco es relativamente flexible capaz de ser adaptado sin grandes cambios a necesidades futuras, algunas previsibles, pero por ahora no incluidas.

Estructura

El SIG-SG fue ideado como un conjunto de bloques de información, contenidos unos dentro de otros, conforme a principios de programación estructurada. Dado que un bloque puede anidar a otros, es posible asignar a cada uno de ellos un nivel de anidamiento. De tal forma que, si se conviene en designar como 1 al nivel de bloques mas exterior posible, entonces a un bloque anidado inmediato dentro de este le corresponderá el nivel 2, y así sucesivamente.

Para su mejor identificación y referencia, los bloques hasta ahora contemplados son los mostrados en el diagrama de la Fig 3.40.

El primer nivel de bloques corresponde a las 16 Cartas Topográficas Esc.1:50,000 del Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Al unir estas cartas, se forma el bloque denominado Mosaico Cartográfico que se empleará como mapa llave o índice.

Una Carta Urbana (1:10,000) comprende a los "n" sondeos en ella registrados (segundo nivel). A un sondeo se asocia el bloque la Entidad 1 "Datos generales, Localización y Características de los Sondeos" (tercer nivel). La Entidad 1 contiene a la Entidad 2 "Variación de las Propiedades con la Profundidad" (cuarto y ultimo nivel).

La estructura del banco así definida facilita el manejo de la información, eliminando la posibilidad de confusión de la misma, pues solo existe subordinación directa de un determinado bloque respecto a los otros de nivel superior que lo contengan. Por ejemplo una vez declarada una Carta Topográfica, solo se tendrá acceso a los bloques de los sondeos en ella registrados. Por el contrario, los datos de un sondeo solo tendrán significación dentro del bloque de la Carta Topográfica que los aloje.

La agrupación de la información a través de las Cartas Topográficas en el primer nivel, obedece a que el subsuelo de una cierta área urbana no tiene relación con el de ninguna otra en el ámbito regional integrado por las 16 Cartas Topográficas que abarcan a la Cuenca de México. De este modo, la unidad fundamental de concentración de la información es el área urbana en su sentido más amplio de núcleo de población integrado, independiente de la división política. Por caso, la Zona Metropolitana de la ciudad de México abarca las 16 delegaciones del DF y los municipios conurbados del Estado de México e Hidalgo.

Cabe señalar que, por lógica, existirá una relación estrecha entre la estratigrafía típica de un área urbana y la estratigrafía particular o específica de un sondeo en ella efectuado. Esto se explica ya que la estratigrafía típica de un área urbana se va conformando y se modifica a partir de la información resultante de los sondeos. En otras palabras, la estratigrafía de los sondeos debe corresponder a la estratigrafía típica de un área urbana en puntos discretos.

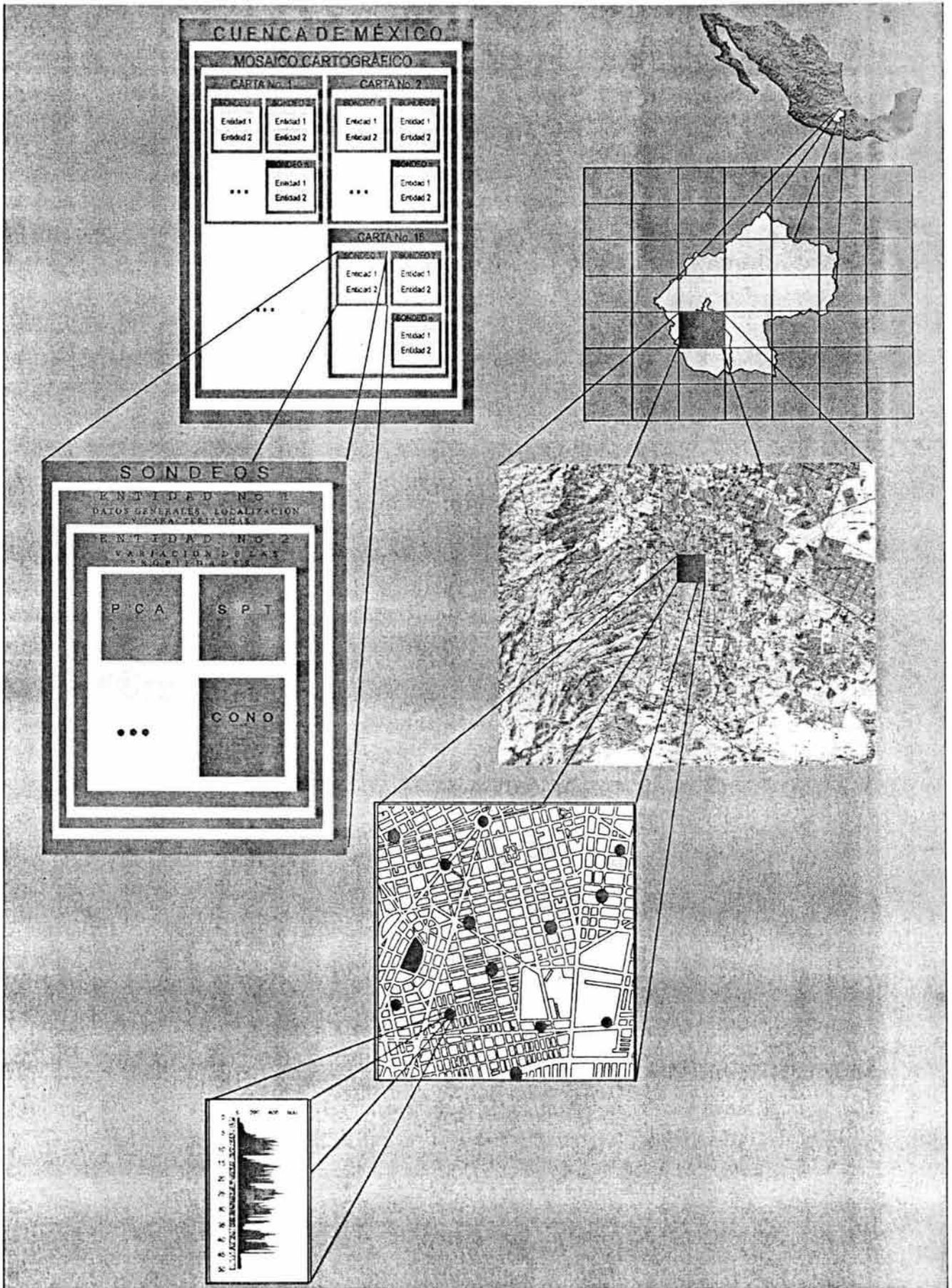


Fig 3.40 Estructura de bloques

Base de datos

El SIG-SG se compone de una serie de bases de datos, interrelacionadas entre sí en forma jerárquica. La liga entre dos bases de datos diferentes se estableció a partir de un cierto campo clave denominado "No. de Sondeo", que se repite en ambas bases.

Estas bases contienen la información de los sondeos, agrupando los datos convenientemente de acuerdo a sus características propias.

Los campos que integran la base de datos del SIG- SG pueden ser de tres tipos:

- 1) *Campo Alfanumérico*: Permite capturar caracteres, incluyendo letras, números, símbolos o espacios en blanco.
- 2) *Campo Alfabético*: Permite capturar cualquier tipo de texto al igual que espacios en blanco, no acepta el acento.
- 3) *Campo Numérico*: Permite capturar números enteros o decimales. Se pueden introducir el signo menos (guión) y punto decimal.

La ENTIDAD No. 1

Contiene la información sobre el sondeo (ventana de texto o cedula de captura y visualización), agrupándola en tres grupos: Datos generales, Localización y Características. Esta entidad, además, integra una ruta, es decir, despliega un conjunto de campos (por ejemplo, *Nombre de la carta*) que permite la correcta y completa localización del sondeo (Fig 3.41).

La ENTIDAD No. 2

Contiene la información sobre la variación de las propiedades con la profundidad de los sondeos (ventana de imagen o de visualización). Esto es posible debido a que el perfil del sondeo se transforma o convierte de formato analógico a digital (imagen) mediante la técnica de barrido o escaneo (Fig 3.42).

SONDEOS

DATOS GENERALES

CLAVE MES AÑO

EJECUTOR

LOCALIZACION

CALLE Y NUM.

ENTRE CALLES

COLONIA ENTIDAD

DELG. o MUN.

COORD. X COORD. Y COORD. Z

CARACTERISTICAS

TIPO ZONA

PROFUNDIDAD PROF. NAF

OBSERVACIONES

IMAGEN SONDEO IMPRIMIR CERRAR

Fig 3.41 Información sobre el sondeo. Agrupándola en tres grupos: Datos generales, Localización y Características

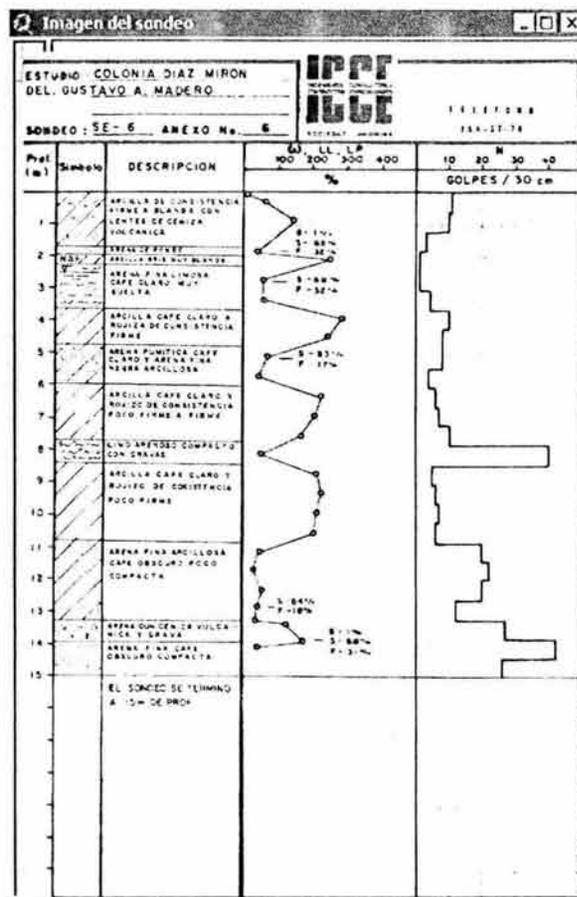


Fig 3.42 Información sobre la variación de las propiedades con la profundidad del sondeo.

3.5.5 Procesamiento de datos

Procesamiento de datos

Los pasos que deben seguirse para procesar la información procedente de sondeos, posterior a la captura en el banco o base de datos SIG-SG, son los siguientes:

° *Pre-requisitos*

1. El personal encargado de procesar y obtener la información debe tener experiencia o los conocimientos suficientes en Mecánica de Suelos, con un nivel de estudios equivalente a pasante de la carrera de Ingeniero Civil, o de preferencia estudiante de posgrado en mecánica de suelos.
2. No debe perderse de vista el hecho de que la información por sistematizar procederá de estudios de mecánica de suelos diversos, efectuados en diferentes épocas por dependencias o empresas disímbricas, que aplicaron procedimientos variados de exploración y muestreo en campo, así como de ensaye en laboratorio. Por tanto, es necesario presuponer que esos procedimientos de campo y de laboratorio se apegaron, al menos en lo sustancial, a las normas o estándares correspondientes. En caso de duda sobre este aspecto básico, la información del sondeo en cuestión se descartará, o bien podrá ser capturada a discreción, pero marcando el sondeo con una bandera indicativa de dudosa confiabilidad (bueno, regular o malo).
3. La información mínima necesaria de un sondeo para poder incluirlo dentro del banco de datos SIG-SG consiste en: los datos generales y de localización del sondeo; el perfil estratigráfico y propiedades del subsuelo a lo largo del mismo; lo mas claro y completo posible. La ubicación del sondeo deberá ilustrarse, de preferencia, con un croquis acotado o dibujo a escala, referido a las intersecciones de calles más próximas. Adicionalmente, la información de laboratorio que se desee agregar, como: gráficas de granulometría, curvas de compresibilidad en consolidación unidimensional, o de esfuerzo-deformación en compresión simple o triaxial. Lo anterior con carácter complementario de utilidad, pero no indispensable.
4. Es lógico que el estado del arte del conocimiento del subsuelo de una localidad, y por tanto su zonificación para fines de Ingeniería, no sea el mismo en todas las ciudades, sino que dependerá de su importancia, antigüedad o desarrollo. Así ciudades como México, Guadalajara y Monterrey, ya han sido objeto de recopilación de información del subsuelo, zonificaciones, y estudios de gran visión geológicos, geofísicos y de Mecánica de Suelos; en otras ciudades medias o de desarrollo reciente como Ixtapa, Guerrero; la información disponible relacionada con el subsuelo será escasa y de carácter general, como planos topográficos y geológicos a gran escala.
5. En aquellas ciudades de las que se disponga de información geotécnica suficiente ya recopilada, así como la zonificación del subsuelo, es muy importante que el personal de captura se familiarice con esa información antes de seguir adelante con el procesamiento y captura de sondeos para que sirva como marco de referencia básica, a fin de lograr día a día un mejor conocimiento de la distribución de los materiales del subsuelo.

6. Cuando los antecedentes geotécnicos de la totalidad o parte de una ciudad sean escasos o generales, además de estudiarlos, será necesario que el personal de captura ponga especial atención en la interpretación de la estratigrafía y propiedades de los suelos en los primeros sondeos que se procesen. En estos casos es de mayor importancia la supervisión estrecha en esta tarea del personal o de ingenieros geotecnistas experimentados de ser posible que hayan efectuado estudios en la localidad.

° *Secuencia*

1. Una vez recibida la información de un sondeo, se abrirá un expediente dentro del archivo de la ciudad que corresponda, asignándole al sondeo una clave numérica secuencial, única e irrepetible en dicha ciudad, con la cual se identificará en lo sucesivo.
2. Para cada sondeo se definirán los datos generales y de localización siguientes:
 - Nombre de la dependencia o empresa que lo ejecutó.
 - Fecha de ejecución (año, mes).
 - Nombre y número de la calle donde se ejecutó, y nombre de las calles entre las que se situó.
 - Otros datos locales que ayuden a la mejor ubicación del sitio, como colonia, sector, unidad habitacional, barrio, etc.; delegación o municipio, etc.
 - Coordenadas. Las coordenadas en planta X y Y se obtendrán de su posición en las cartas de INEGI, debiendo ser las correspondientes a una cuadrícula a cada 2000 m, con Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM). La coordenada Z será la altitud del brocal del sondeo al tiempo de su ejecución, medida respecto al nivel medio del mar. Esta coordenada Z será difícil de determinar en la mayoría de los casos, y podrá omitirse si no se tiene seguridad en el dato, sobre todo porque en ciudades afectadas por hundimientos regionales (como México y Toluca) podrá variar con el tiempo.
3. Se estudiara cuidadosamente el perfil del sondeo, para definir sus características:
 - Profundidad hasta la que se llevó.
 - Profundidad a la que se detectó el nivel de agua freática (NAF).
 - Tipo. En lo referente a procedimientos de exploración y muestreo aplicados.
4. Se transforma la información analógica (perfiles: estratigráfico, litológico, vs profundidad) a digital. Se procederá a localizar en planta al sondeo en la cartografía digital del área urbana que se trate, con la mejor aproximación posible, marcando su posición con su clave numérica adyacente. A fin de referir los sondeos de todas las ciudades respecto a un mismo marco de alcance nacional, se usaran las cartas urbanas (escalas 1:20,000 y 1:10 000) o, cuando estas no estén disponibles, las cartas topográficas (escala 1:50,000), editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Como ayuda, pueden ser de utilidad planos de las ciudades elaboradas localmente.
5. Integración del banco de datos (información tabular), con la información grafica (mapas).

Se presenta en la Fig 3.43 el procesamiento de datos de un sondeo, en lo que se refiere a Mecánica de Suelos. Los aspectos de información general y localización del sondeo, son claros por si mismos y no requieren mayor explicación.

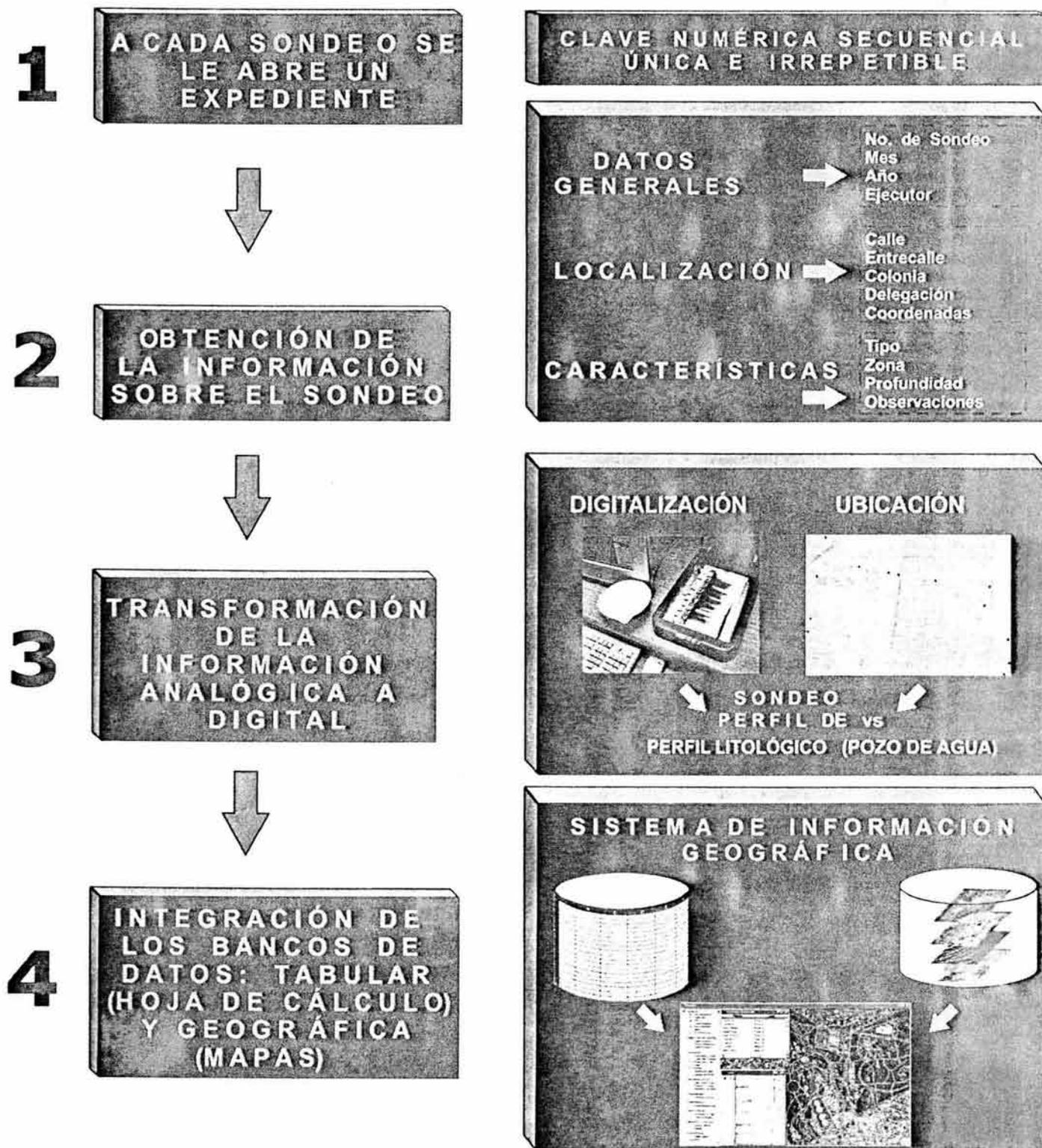


Fig 3.43 Procesamiento de datos

3.5.6 Operación del sistema

En este inciso, se resume los principales aspectos relacionados con el funcionamiento del Sistema SIG-SG. También se incluye una breve descripción del estado actual que guarda el SIG-SG, así como las futuras extensiones, en cuanto a declarar nuevas cédulas de captura sobre otros datos que puedan incluirse al Sistema y sus posibles adecuaciones o adaptaciones de acuerdo con el avance y desarrollo vertiginoso de la informática; se describen al final de este inciso.

El Sistema de Información Geográfica para sondeos Geotécnicos (SIG-SG) fue desarrollado aprovechando las ventajas que ofrece la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la eficiencia de las nuevas computadoras que al combinarse facilitan el manejo de una gran cantidad de datos; así como, el despliegue simultáneo de dos o más capas o estratos de información de diferente índole o clase.

El sistema cuenta con un menú sencillo compuesto por un conjunto de botones que alojan un símbolo o gráfico alusivo a su función. Los submenús están integrados por una lista de ordenes a cumplir. El diseño de las consultas al SIG-SG, fue ideado para que fueran utilizadas por usuarios no expertos en informática, a los cuales, se les brinda la oportunidad de interactuar de manera amigable con un mínimo esfuerzo (con simples clicks del ratón); es decir, bajo la arquitectura de ventanas, persianas, botones y otros (Windows).

Las primera opción de búsqueda para la consulta que ofrece el SIG-SG al usuario se refiere a discriminar o filtrar información por medio de atributos (municipio o delegación, colonia, calle, año, etc). La segunda es la más amigable e interactiva con el usuario por el despliegue y la visualización de diversas composiciones o arreglos relacionados con el entorno natural de la Cuenca de México; la cual se ilustra a continuación en los siguientes párrafos.

Para utilizar el sistema, primeramente se abre el archivo "sig-sg.apr" que carga al Sistema SIG-SG (ver Fig 3.44); automáticamente se despliega la ventana del menú gráfico principal; el cual consta de un mapa llave o índice (a manera de una malla tipo guía roji) conformado por diecisiete Cartas Topográficas esc 1:50,000, el cual tiene como fondo el relieve que sirve de guía para ubicar o identificar la zona de interés para el usuario con base en la visualización de los rasgos naturales del terreno y la mancha urbana. A partir de este menú principal, se inicia la consulta mediante acercamientos graduales que van de lo regional hasta llegar a lo local y al sitio de interés (ver Fig 3.45).

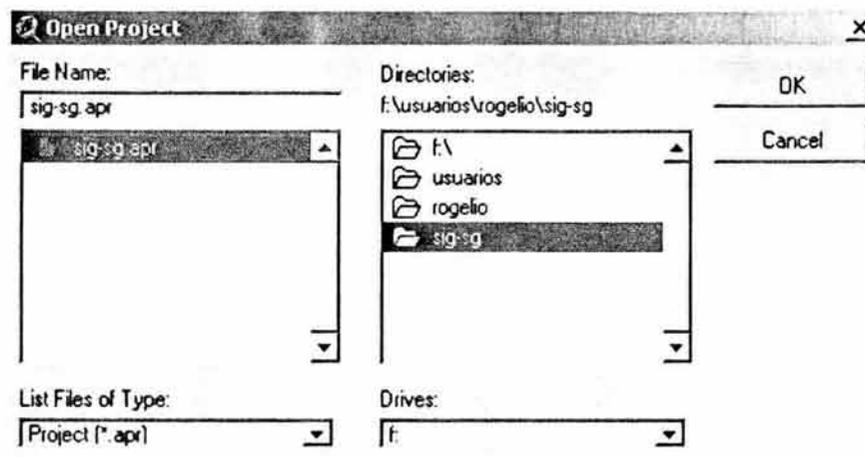


Fig 3.44 Ventana que ilustra como se abre el archivo "sig-sg.apr" que carga al SIG-SG

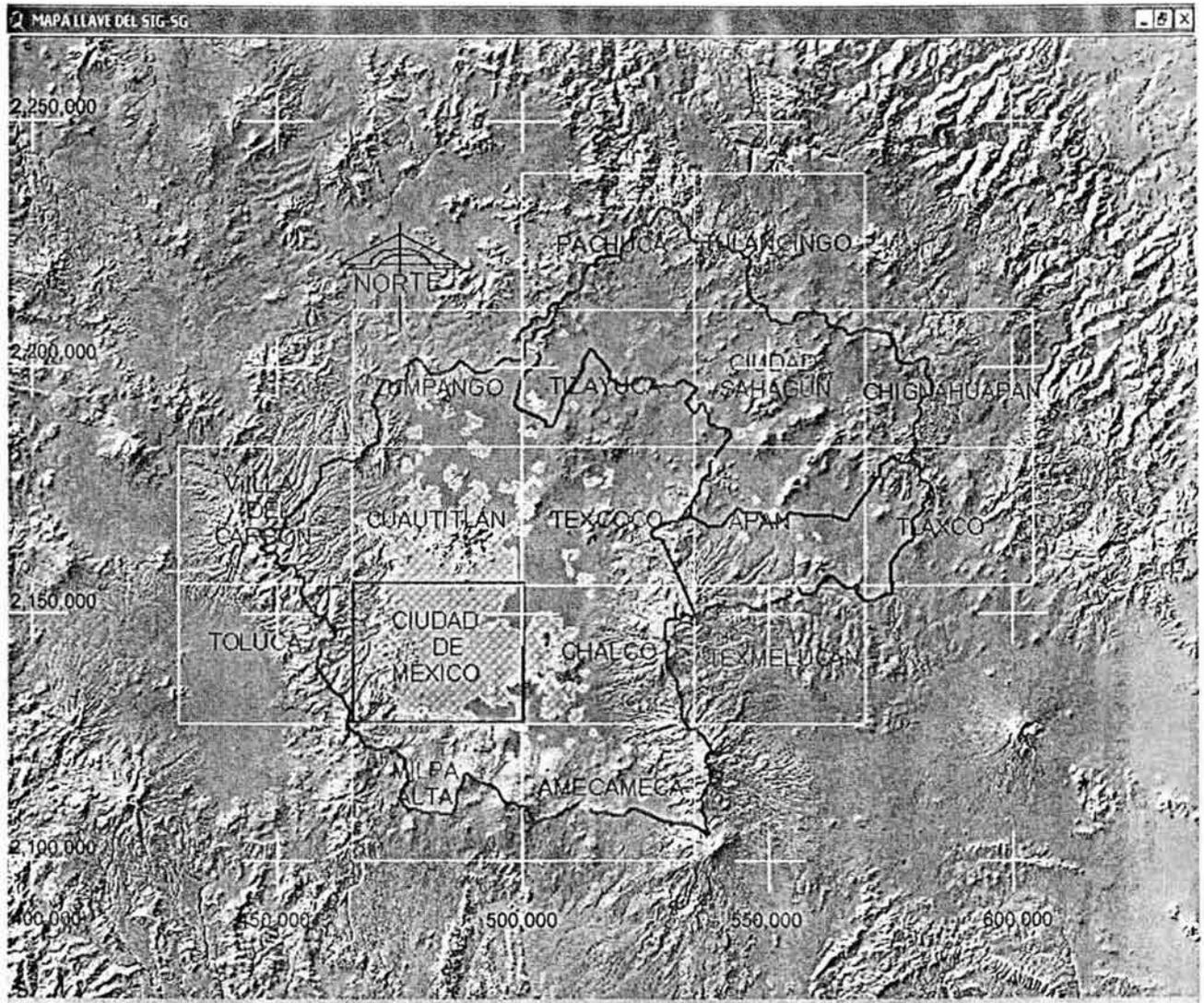


Fig 3.45 Mapa llave o índice del Sistema SIG-SG

A partir de la ventana que muestra el menú principal, se puede elegir cualquier carta; por ejemplo, si el usuario elige mediante un click a la carta ciudad de México (enmarcada en azul, Fig 3.45), automáticamente ingresa al submenú gráfico correspondiente a la carta ciudad de México (ver Fig 3.46). Si ahora, el usuario elige del submenú "ciudad de México" a la carta Chapultepec, automáticamente ingresa al submenú gráfico correspondiente (ver Fig 3.47). Es decir, se inicia de lo regional (menú principal) a lo local (submenú) mediante una sucesión de acercamientos.

Cabe destacar que los submenús subsecuentes tendrán diferentes fondos: 1. Imagen de Satélite Lansat TM (composición 1-2-3 en falso color); 2. Mosaico de fotografías aéreas digitales; 3. Cartografía urbana a nivel de manzanas, calles, parques, etc. En cambio el menú principal, tendrá al Modelo Digital de Relieve Sombreado como fondo.

En la figura 3.47, se muestra el mapa base o fondo de los submenús de orden inferior al principal. Una imagen es una excelente guía para ubicar o identificar la zona de interés para el usuario con base en la visualización de los rasgos naturales del terreno y los construidos por la mano del hombre.



Fig 3.46 Vista de los rasgos naturales y de la mancha urbana de la Ciudad de México usando como fondo la imagen de Satélite.

En la Fig 3.47 se muestra la ventana del submenú ciudad de México, donde el usuario ha elegido mediante un click a la carta Chapultepec de la ciudad de México (enmarcada en verde).

En la Fig 3.48 se muestra la ventana correspondiente a la carta Chapultepec de la ciudad de México cuyo fondo se compone tanto de la capa del mosaico formado a partir de fotografías aéreas digitales como de la capa de cartografía urbana a nivel de manzanas, calles, parques. Además; a este nivel de submenú, se empieza a visualizar la distribución espacial y densidad o volumen de los sondeos geotécnicos hasta ahora incluidos en el SIG-SG.

En las últimas dos láminas de las Figuras 3.49 y 3.50, se muestra el último fondo que permite al usuario visualizar los nombres de municipios, delegaciones, colonias, y calles. Este fondo constituye también el nivel de acercamiento más adecuado para visualizar y consultar los sondeos geotécnicos representados por puntos de diversos colores con la intención de diferenciar el tipo de exploración del sondeo.



Fig 3.47 Vista de la Ciudad de México



Fig 3.48 Ubicación de los sondeos geotécnicos en la zona de Chapultepec.

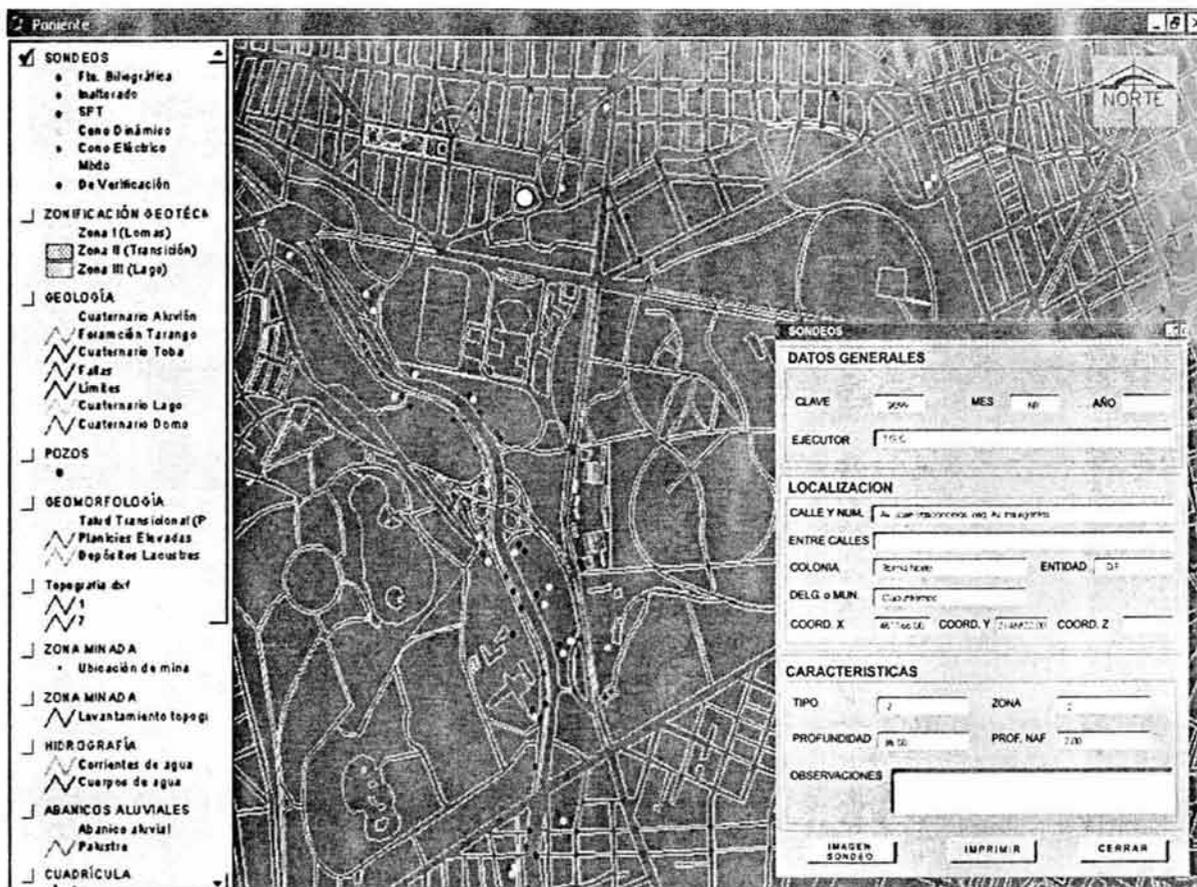


Fig 3.49 Datos generales de un sondeo específico, zona de Chapultepec

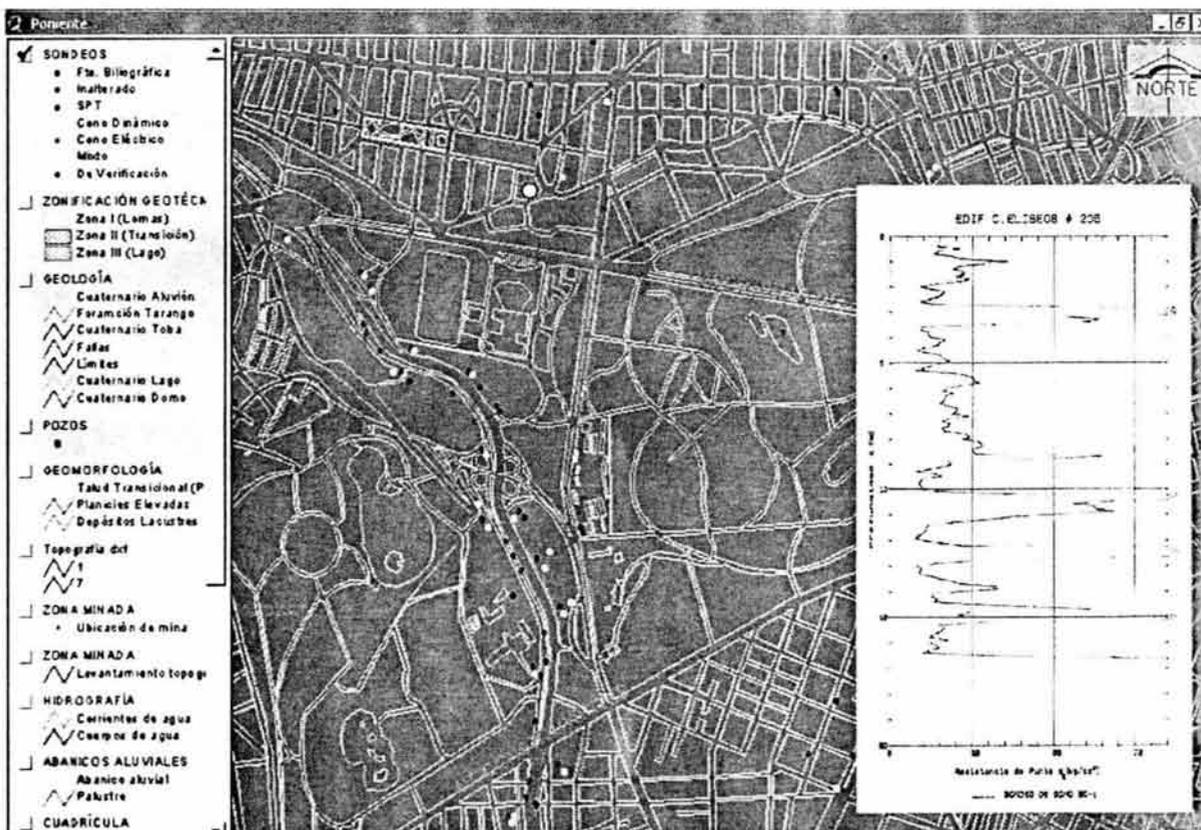


Fig 3.50 Imagen de un sondeo geotécnico, zona de Chapultepec

Existen tres opciones para obtener informes impresos de la información contenida o almacenada en el Sistema SIG-SG. La primera se refiere a los perfiles que contienen a los valores de la variación con la profundidad de las propiedades índice, mecánicas y dinámicas de los suelos. La segunda se refiere a los mapas o documentos cartográficos que sirven para identificar la ubicación en planta de los sondeos geotécnicos elegidos en la primera opción para obtener informes impresos. Cabe destacar, que los mapas o documentos cartográficos pueden tener uno o más capas de fondo para su integración. Por ejemplo, Imagen de Satélite, Modelo Digital de Relieve Sombreadado, Cartografía Urbana, etc. La tercera y última opción para obtener informes impresos, consiste en elegir de manera independiente cualquiera de las dos opciones antes mencionadas (ver Fig 3.51).

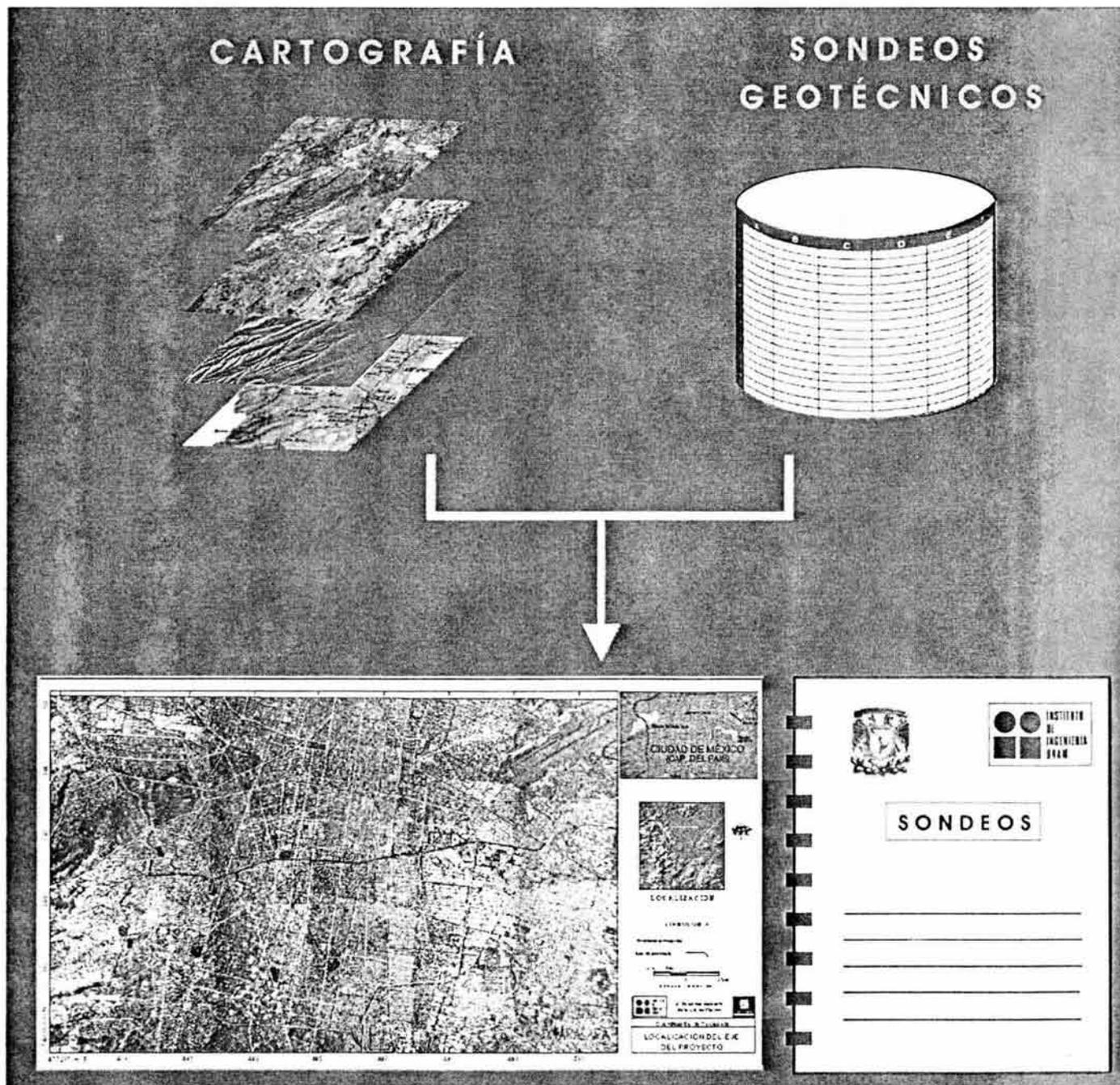


Fig 3.51 Informes obtenidos a partir del SIG-SG.

3.5.7 Estado actual

En su etapa actual, el sistema se enfoca a recopilar y capturar los resultados de estudios de Mecánica de Suelos efectuados en diferentes épocas por dependencias o empresas que laboran en la Cuenca de México.

Actualmente, el SIG-SG, cuenta con un poco más de cinco mil sondeos geotécnicos que corresponden a la ciudad de México y zonas conurbadas del Estado de México (Fig 3.52), que se obtuvieron de empresas, dependencias e instituciones de investigación y enseñanza, que han contribuido hasta ahora a incrementar el banco de datos del SIG-SG con dicha información geotécnica (Tabla 3.5).

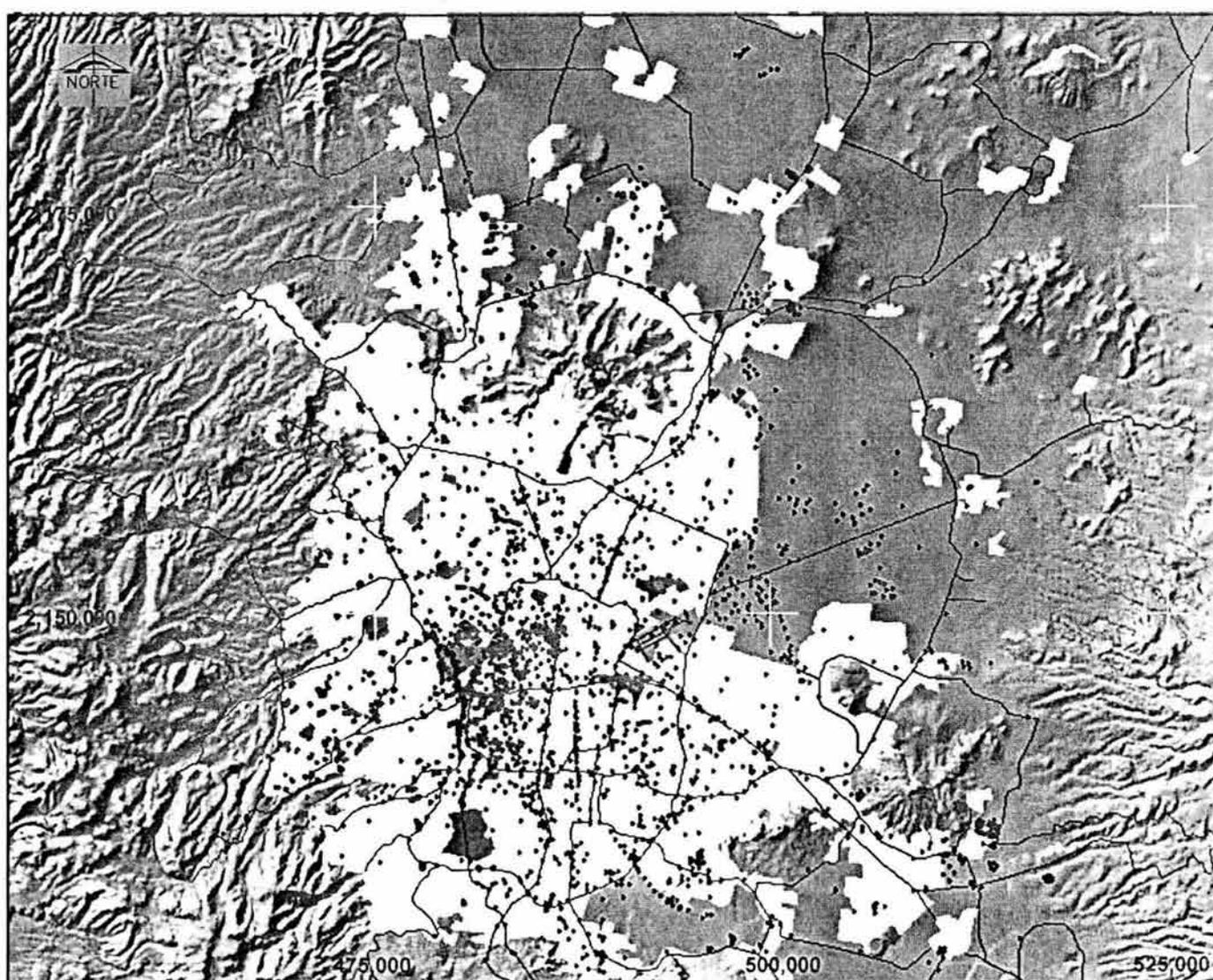


Fig 3.52 Volumen y distribución espacial de la información de sondeos geotécnicos almacenados en el SIG-SG

Tabla 3.5 Empresas, Dependencias e Instituciones que han aportado información para el sistema SIG-SG

FUENTES DE INFORMACIÓN DE SONDEOS GEOTÉCNICOS
INSTITUCIONES
Instituto de Ingeniería, UNAM Instituto de Geografía, UNAM Instituto de Ecología, UNAM Facultad de Ingeniería, UNAM
DEPENDENCIAS GUBERNAMENTALES
SCT, Servicios Técnicos DGCOSTC, Secretaría de Obras y Servicios, Gob. del D.F. DGCOH, Secretaría de Obras y Servicios, Gob. del D.F. CENAPRED Comisión Nacional del Agua, CNA Comisión Federal de Electricidad, CFE PEMEX, Ingeniería experimental Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, INFONAVIT Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, SEDUVI
EMPRESAS PRIVADAS
Perforaciones y Cimentaciones, S.A. de C.V. ICATEC, S.A. de C.V. Solum (Ingeniería Geotécnica) Geosistemas, S.A. Geotec, S.A. Grupo Dirac, Ingenieros constructores Geosol S.A. de C.V. ACI Consultores TGC Geotecnia, S.A. de C. V. Proyectos Especializados de Ingeniería Ingenieros. Especialistas en Cimentaciones Pilotec, Cimentaciones Profundas ICCE, Ing. Consultores Contratistas Especializados CONIISA Laboratorios Tlalli, S.A. de C. V. ISTME Mecánica de Suelos y Cimentaciones, S.A. de C. V. Triada, S.A. de C. V. Grupo Trial, S.A. de C.V.
OTROS
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos

3.5.8 Utilidad del acervo contenido en el banco del Sistema SIG-SG

En los siguientes párrafos se describen las principales posibilidades que surgen al emplear de manera inmediata la extensa información del acervo almacenado en el banco de datos del Sistema de Información SIG-SG. De hecho durante los últimos cinco años el sistema ha probado ser útil en múltiples proyectos públicos y privados relacionados con el subsuelo de la Cuenca de México. Estos proyectos se han emprendido en las coordinaciones de Geotecnia, Sísmica y otras del Instituto de Ingeniería, UNAM.

La información contenida en el Sistema SIG-SG, permite hoy en día orientar al ingeniero respecto a la naturaleza de los problemas geotécnicos que se pueden presentar en un predio determinado y ayudarlo a definir la exploración geotécnica de detalle, incluyendo el tipo de exploración, el número y la profundidad de los sondeos así como las pruebas de campo y laboratorio más adecuadas para determinar las características esfuerzo-deformación-resistencia del suelo. La consulta al SIG-SG, la exploración geotécnica de detalle y la realización de las pruebas necesarias de laboratorio resultan estar, así, estrechamente ligadas.

Por otra parte, la información contenida en el SIG-SG, permite hoy en día auxiliar a las autoridades competentes para que tengan un conocimiento adecuado de la problemática general de la Ingeniería de Cimentaciones a nivel regional o local. Este conocimiento ha permitido en el pasado adecuar y actualizar los Códigos de Construcción en la República Mexicana, en lo que se refiere al diseño de cimentaciones y a las zonificaciones geotécnicas. En el futuro, habrá de seguir tomándose en cuenta como hasta ahora la información reciente sobre las condiciones del subsuelo para emprender nuevas y permanentes revisiones a la reglamentación vigente.

En general, el SIG-SG será de gran utilidad en los siguientes rubros o actividades:

- a) Obtención de información geotécnica preliminar para considerar al nivel de anteproyecto de determinada obra. La consulta al SIG-SG constituye un procedimiento simple y económico para adquirir información preliminar acerca del subsuelo, permitiendo formarse una idea clara de los diversos e importantes problemas planteados por el subsuelo en cada caso particular.
- b) Obtención de información para planeación regional. Contar con la base de datos del sistema evitará la costosa duplicidad de esfuerzos para la obtención de información geotécnica para diferentes fines tal como ocurre comúnmente en la actualidad, lográndose un importante beneficio para la sociedad en su conjunto. Las dependencias, Instituciones de investigación y enseñanza, empresas, etc. podrán contar con información necesaria sobre el subsuelo a un costo razonablemente bajo comparado con el tiempo y costo de la realización de estudios de Mecánica de Suelos y/o recopilación de información para la elaboración de: Manuales técnicos (excavación, exploración, etc.), informes geotécnicos por delegaciones o municipios para efecto de facilitar la planeación de la infraestructura en materia de vivienda, transporte, bienes y servicios en general, normas para ajustar la política de crecimiento urbano en términos de uso del suelo, con atención a las zonas urbano industriales y Zonación de áreas de alto riesgo en términos de fenómenos naturales como temblores, inundaciones, o por su vecindad con industrias peligrosas o agresivas ecológicamente.

- c) Planeación de campañas de exploración geotécnicas para proyectos urbanos públicos y particulares. La información contenida en el banco o base de datos del SIG-SG no pretende, bajo ningún motivo, sustituir o reducir la ejecución de futuros estudios de Mecánica de Suelos, sino por el contrario, orientar su enfoque y aplicación para que estos rindan más y mejores resultados.

- d) Zonificaciones desde el punto de vista geotécnico de las áreas urbanas existentes y posibles conurbaciones futuras para fines de la definición de uso del suelo, reglamentación de la construcción y evaluación del riesgo sísmico, etc. Esto es posible debido a que se puede hacer uso inmediato de los datos recopilados y contenidos en banco de datos del SIG-SG. Los datos del banco pueden ser aprovechados en forma óptima recurriendo para su procesamiento a técnicas como la geoestadística.

- e) Desarrollo de programas de cómputo que hagan uso del banco de datos del sistema SIG-SG el que, por ejemplo, servirán como soporte de Sistemas Expertos para el Diseño Preliminar de Cimentaciones para el Distrito Federal (Proy. DGAPA IN-303292-UNAM).

3.5.9 Extensiones

El banco de datos del Sistema SIG-SG tiene contemplado abrir nuevas bases de datos, con el objetivo de ampliar las aplicaciones del sistema dentro de la ingeniería de cimentaciones. A continuación se enumeran las futuras extensiones del banco.

1) Abrir nuevas bases:

- a. Datos con diferente cobertura temática tales como piezometría, nivelaciones, datos geofísicos, etc.
- b. Datos que resulten de la utilización de procedimientos de exploración o ensaye novedosos.

- 2) Abrir nuevas bases de captura de información de propiedades dinámicas conforme aumente el volumen de este tipo de información.
- 3) Instalar funciones para correlacionar entre sí la información contenida en diversos campos de la base de datos, incluyendo la posibilidad de evaluar algunas funciones estadísticas.
- 4) Incluir la capacidad para dibujar planos de curvas de igual profundidad de capas típicas del subsuelo.
- 5) Desarrollar e instalar funciones que permitan elaborar perfiles estratigráficos del terreno, a lo largo de ejes seleccionados por el usuario.

Por último se propone seguir desarrollando y elevando el nivel o grado de complejidad en los análisis recurriendo a los avances tecnológicos de los Sistemas de Información Geográfica; así como afinando la zonificación geotécnica del valle de México, recurriendo a las técnicas de la geoestadística, con énfasis en las zonas hasta ahora poco estudiadas.

3.5.10 Conclusiones

La organización y la disponibilidad de la información tienen un papel más y más importante. La información juega, por otra parte, un papel fundamental en la toma de decisiones. La información tiene un valor y un precio, como cualquier otro recurso. Los que la manejan adecuadamente están en ventaja respecto a los que no la toman en cuenta.

El tratamiento manual de la información geotécnica sobre el territorio de la Cuenca de México ha dejado de ser práctico. Un cambio tecnológico en los métodos de tratamiento del enorme volumen de información sobre los múltiples estudios de la que ha sido objeto la Cuenca es imprescindible. En este aspecto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota (PR), son útiles a los especialistas para ordenar, procesar e interpretar la información existente y también para sugerir y motivar nuevos estudios que aporten nuevos conocimientos. Hoy en día estas herramientas constituyen uno de los ingredientes que más falta hacen para compartir la abundante información que ha sido obtenida a través del tiempo y que actualmente se encuentra diseminada.

El uso de estas tecnologías tiene sus defensores intransigentes y sus acérrimos detractores. Ni unos ni otros tienen la razón absoluta. Ninguna técnica automatizada de informática, ni ningún método matemático, es capaz de sustituir totalmente la experiencia y el poder cognoscitivo de un especialista experimentado. Sin embargo, el empleo de la tecnología computacional y de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), Percepción Remota (PR) y los Sistemas de Posicionamiento Global (SPG), aporta un gran beneficio a las tareas desarrolladas en las investigaciones y a los mismos investigadores.

La mejor estrategia consiste, por tanto, en la aplicación combinada, racional y lógica del trabajo científico de las nuevas herramientas tecnológicas de información y de los métodos tradicionales de investigación y, antes de todo, de las observaciones de campo in situ, que complementan la intuición científica y la capacidad profesional de los investigadores con el fin de asimilar la información sobre el espacio físico geográfico.

El gran volumen de la información contenida y dispuesta en un medio digital en el Banco de Datos del Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG), ha probado ser útil en los últimos cinco años y hoy en día constituye un elemento básico que ayuda a complementar y enriquecer el desarrollo de múltiples investigaciones encaminadas a describir la distribución espacial de los materiales del subsuelo (rellenos aluviales; depósitos de suelo, afloramientos rocosos y definición estratigráfica). También, ha tenido implicaciones inmediatas en una decena de proyectos para infraestructura pública y privada que se han emprendido en las coordinaciones de Geotecnia, Sísmica y otras del Instituto de Ingeniería, UNAM, relacionados con el subsuelo de la Cuenca de México.

Los resultados de las aplicaciones muestran que la metodología empleada para el diseño, construcción y puesta en servicio del Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG), y que se encuentra extensamente descrita en el cuerpo del presente inciso es lo suficientemente flexible para ser adaptada sin grandes cambios a otras necesidades futuras, algunas previsibles, pero por ahora no incluidas. En el futuro, la metodología podrá extenderse hacia otras disciplinas o áreas de las Ciencias de la Tierra e incluso a otros territorios y ofrecerá un medio práctico para visualizar y explorar de lo regional a local o viceversa.

4 SÍNTESIS

Con el propósito de facilitar e ilustrar la síntesis, se ha considerado conveniente presentarla en los tres siguientes apartados:

4.1 Descripción espacial

En este primer apartado de la síntesis, se ilustra los resultados obtenidos en las múltiples investigaciones encaminadas a describir la distribución espacial de las características geométricas de los diferentes materiales del subsuelo como son la definición de los extensos espacios cubiertos por los rellenos aluviales (los cuales se clasifican en: subcuencas, llanuras, terrazas y abanicos aluviales), depósitos de suelo, afloramientos superficiales de masas rocosas, así como de formaciones geológicas previamente documentadas de la corteza terrestre; y por último, permite definir la potencia o espesor de estratos u horizontes típicos. Esta descripción se apoya en los modelos efectuados en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

A continuación, se presenta dos ejemplos que ilustra la modelación espacial apoyada en un Sistema SIG y que ayudo a proporcionar una idea más correcta de la distribución de los materiales y que a nuestro juicio probó ser una herramienta útil para describir el subsuelo de la Cuenca de México. Estos trabajos de descripción deben finalmente ser presentados en forma sintética en el mapa zonificación geotécnica; por tal motivo, no se incluyen en el mapa.

4.1.1 Zona sur, Sierra de Chichinautzin

Las laderas de las Sierra de Chichinautzin, para muchos de nosotros representaba una gran mole resistente a la erosión. Además no es tarea común de un geotecnista describir afloramientos de masas de roca o formaciones geológicas. Por tal motivo, se decidió efectuar una descripción simple y cualitativa de las laderas de la Sierra de Chichinautzin a partir de la geología propuesta por el ingeniero Mooser, 1996 (Fig 4.2) y la antigua propuesta por el ingeniero Ezequiel Ordoñez, 1893 (Fig 4.1).

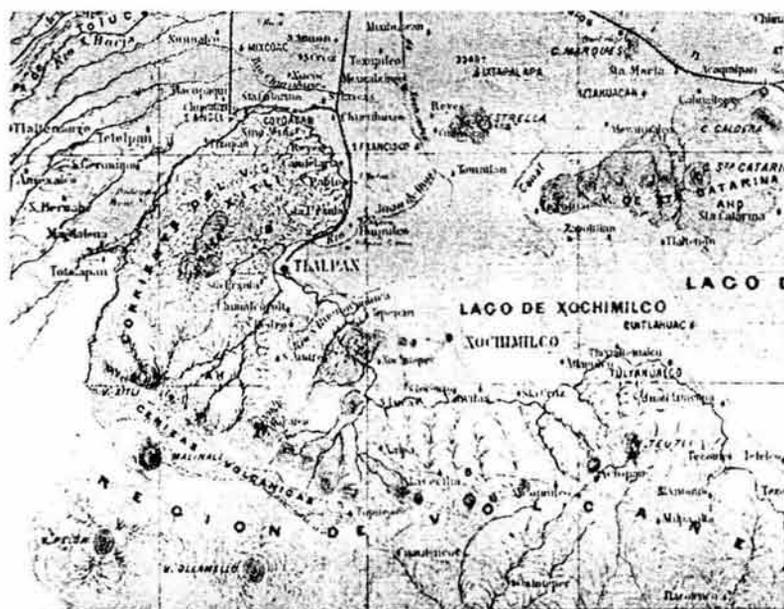


Fig 4.1 Geología de la Sierra de Chichinautzin, Ezequiel Ordoñez, 1893



Fig 4.2 Distribución espacial de las coladas lávicas de la Sierra de Chichinautzin, Mooser,1996

La zona de mayor interés geotécnico de la Sierra de Chichinautzin, es la colada lávica del Xitle debido a la extensa área ocupada por asentamientos urbanos. Obligándonos a determinar su descripción espacial con el fin de identificar los posibles problemas planteados por las coladas lávica de la zona(Fig 4.3).

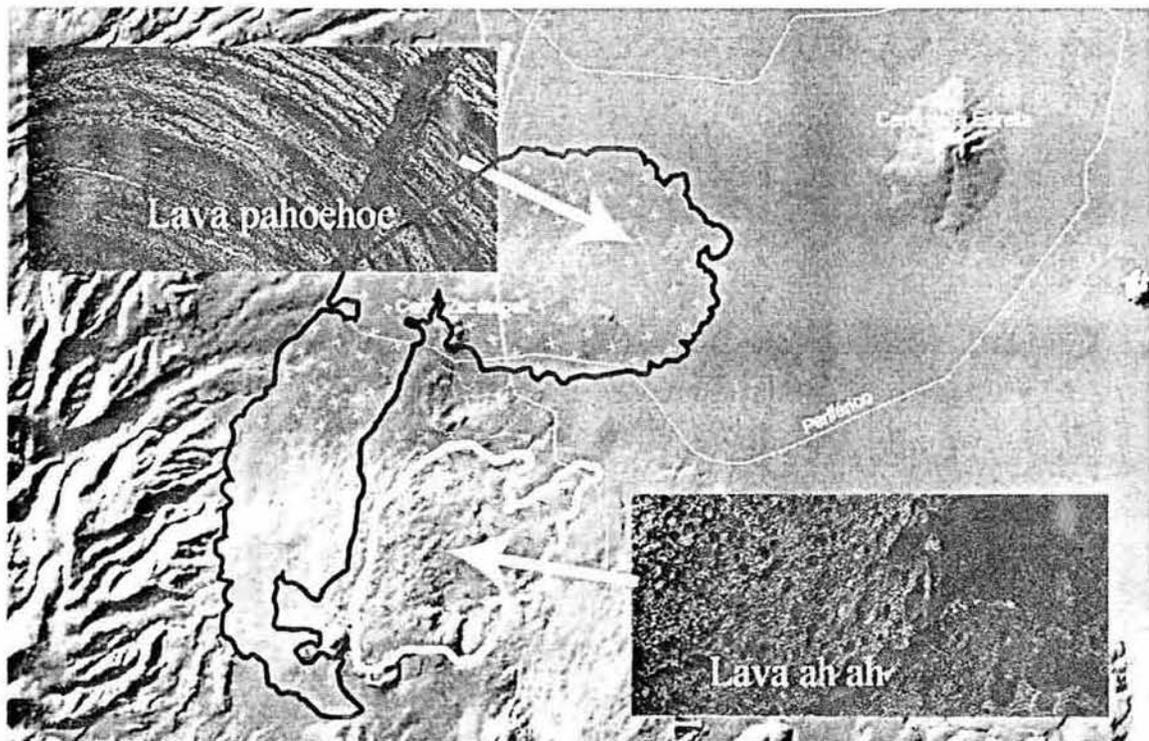


Fig 4.3 Tipos de coladas lávicas que integran al Xitle, Trueba, 1995

Desde el punto de vista geomorfológico, el relieve de la Sierra de Chichinautzin puede interpretarse como resultado de la interacción entre procesos endógenos y exógenos bajo una óptica morfo-crono-genética. Los procesos endógenos constituyeron la componente más significativa en la conformación de su relieve.

A pesar de que los materiales alojados en esta zona son indeformables y por consiguiente su capacidad de carga varía de alta a muy alta; se recomienda estar seguros de no sembrar estructuras en la que puedan existir oquedades o galeras formadas durante y después del evento que origina la colada lávica del Xitle. Tiene más valor el reconocimiento geológico detallado y la perforación con martillos que las exploraciones directas y puntuales realizadas en la geotecnia.

4.1.2 Zona poniente, los rellenos aluviales que circundan el pie de la Sierra de las Cruces

Es bien sabido que la complejidad que reviste la zona poniente se debe a la distribución caótica de los materiales de rellenos con estratigrafía compleja difíciles de caracterizar; por tal motivo, se decidió emprender un nuevo esfuerzo basado en una interpretación geomorfológica de los rellenos aluviales de la Sierra de las Cruces.

Desde el punto de vista geomorfológico, las formas del relieve de la zona de los rellenos aluviales que circundan el pie de la Sierra de las Cruces (franja o ancho de banda de color verde, Fig 4.4) pueden interpretarse como resultado de la interacción entre procesos endógenos y exógenos bajo una óptica morfo-crono-genética.



Fig 4.4 Interpretación geomorfológica de los rellenos aluviales de la Sierra de las Cruces

Los procesos externos, constituyeron la componente más significativa o determinante para la modelación del relieve al pie de la Sierra de las Cruces. Los factores más importantes que intervinieron en los procesos externos son: el factor climático (temperatura, precipitaciones, viento, etc.) y el hidrológico superficial (corrientes fluviales, erosión, intemperismo físico y químico y denudación superficial).

Análisis morfogenético

Cuando la Cuenca de México era un Valle (Justo antes de iniciar al Plioceno, hace diez millones de años), las laderas de la Sierra de las Cruces estuvieron sometidas a procesos fluviales que modelaron su relieve.

Los procesos gravitacionales y eólicos favorecieron la remoción de la cubierta o capa superficial de materiales no consolidados hasta desplazarlos al pie de la Sierra, originando la sedimentación y formación de erráticos depósitos de rellenos aluviales. Estos rellenos aluviales localizados al pie de la Sierra constituyen una unidad en la cual se pueden distinguir las subunidades siguientes: llanuras, terrazas y abanicos o conos aluviales respectivamente.

Tiempo después, se hace sentir la presión de la Placa de Cocos en el Valle provocando que el magma encontrará su curso en esta región de frágil corteza e iniciándose una intensa actividad volcánica que dio origen en particular a la Sierra del Chichinautzin. Esta sierra formó una presa natural cerrando el paso de los ríos y dando lugar a la formación de lagos, hace unos 700 mil años. El valle se transformó entonces en la cuenca cerrada tal y como la conocieron sus primeros pobladores.

Finalmente, con el cierre del Valle se inicia la sedimentación y formación de los depósitos lacustres que rellenan o azolvan el antiguo Valle. Estos rellenos o azolves sepultan el fondo de la mayoría de los cauces en sus desembocaduras; y por consiguiente, a los conos o abanicos aluviales (estrato de color café, Fig. 4.5).

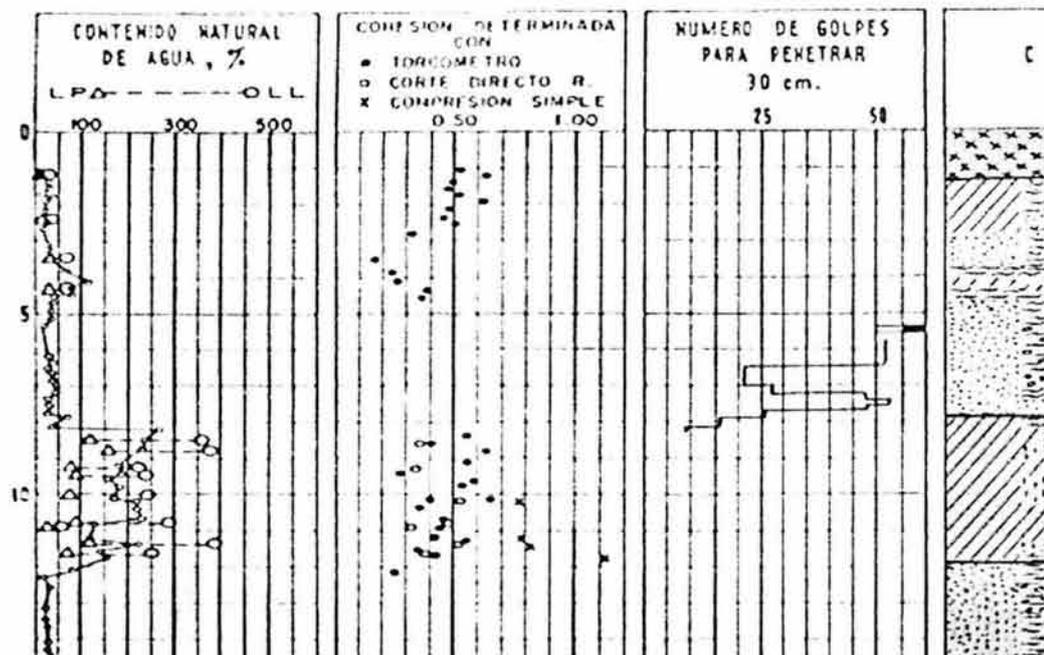


Fig. 4.5 Sondeo típico de la zona poniente de la ciudad de México

La Cartografía geomorfológica donde se plasman los resultados del análisis geomorfológico se muestra en las Figs 4.6 y 4.7.



Fig. 4.6 Vista en planta de la zona poniente de la ciudad de México

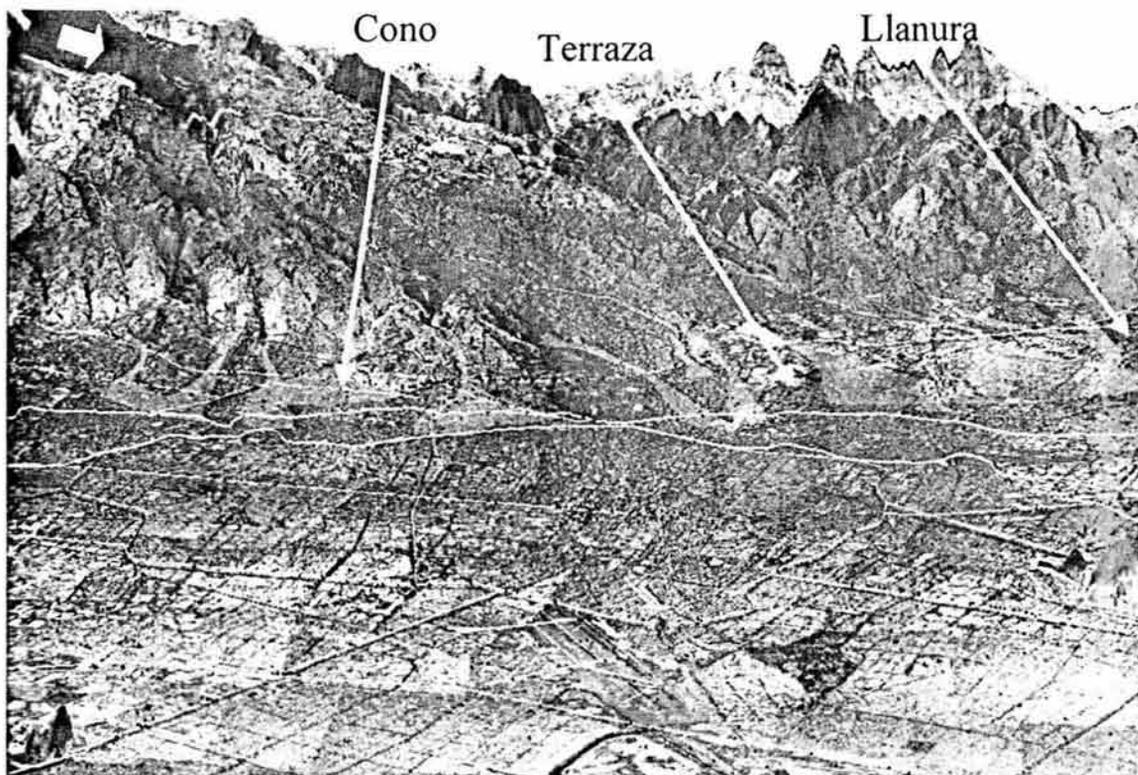


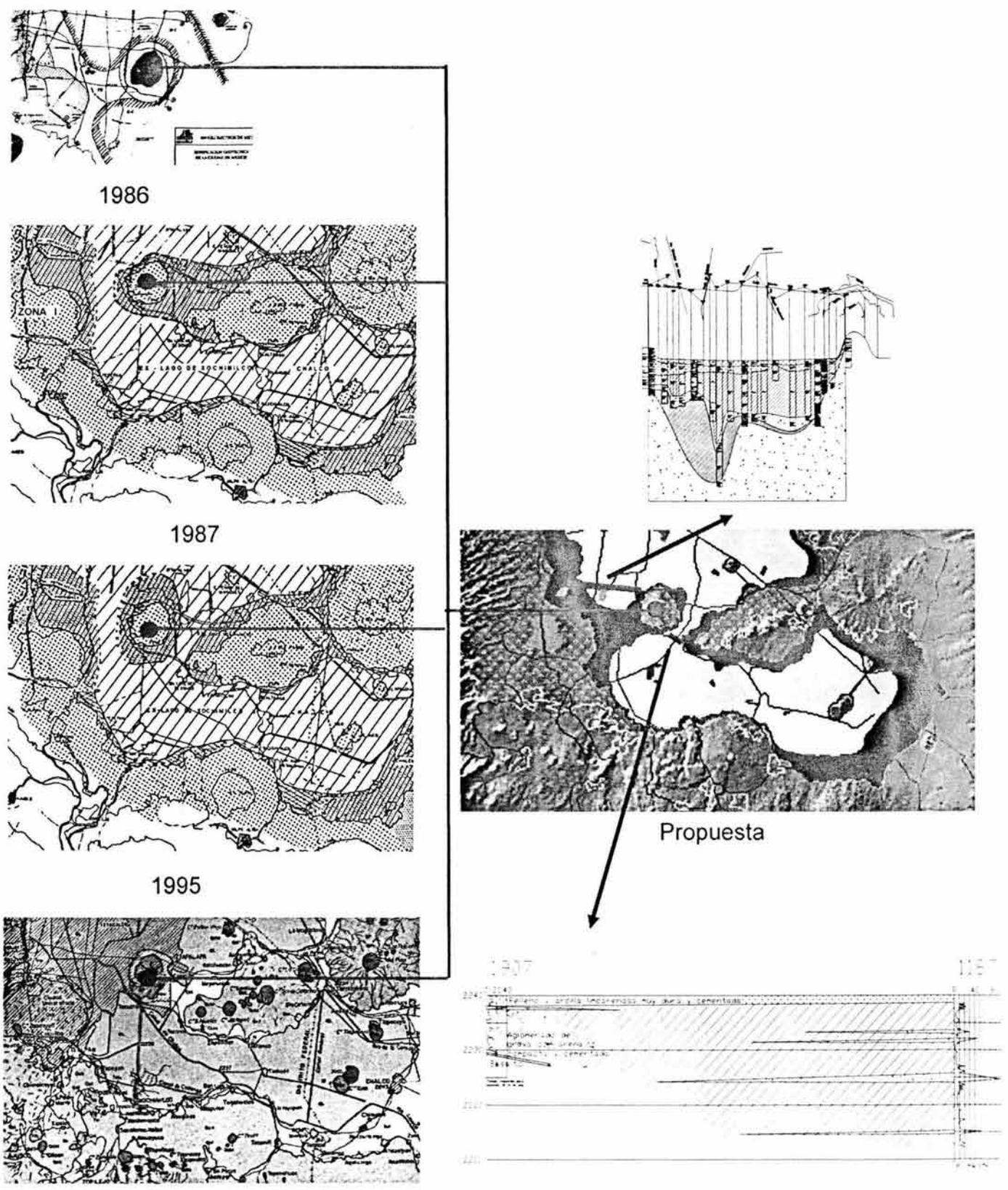
Fig. 4.7 Vista oblicua de la zona poniente de la ciudad de México

En la Fig 4.6, se muestra la superposición en planta de la Zonificación Geotécnica (representada por las líneas de color blanco y magenta de la división clásica de tres zonas) interactuando con la Zonificación Geomorfológica (propuesta por F. Mooser, 1988). Esta Zonificación clasifica el relieve al pie de la Sierra de las Cruces mediante una división en unidades o elementos geomorfológicos tales como: llanuras, terrazas, abanicos o cono aluviales y depósitos palustres. **Nota:** Los puntos de color rojo, representan la distribución espacial de los sondeos geotécnicos que se emplearon para la elaboración de secciones transversales.

La Fig. 4.7 (Vista oblicua de la zona poniente de la ciudad de México), muestra la clasificación del relieve al pie de la Sierra de las Cruces, es decir, los elementos geomorfológicos tales como: llanuras, terrazas, abanicos o conos aluviales y depósitos palustres interactuando con la Zonificación Geotécnica.

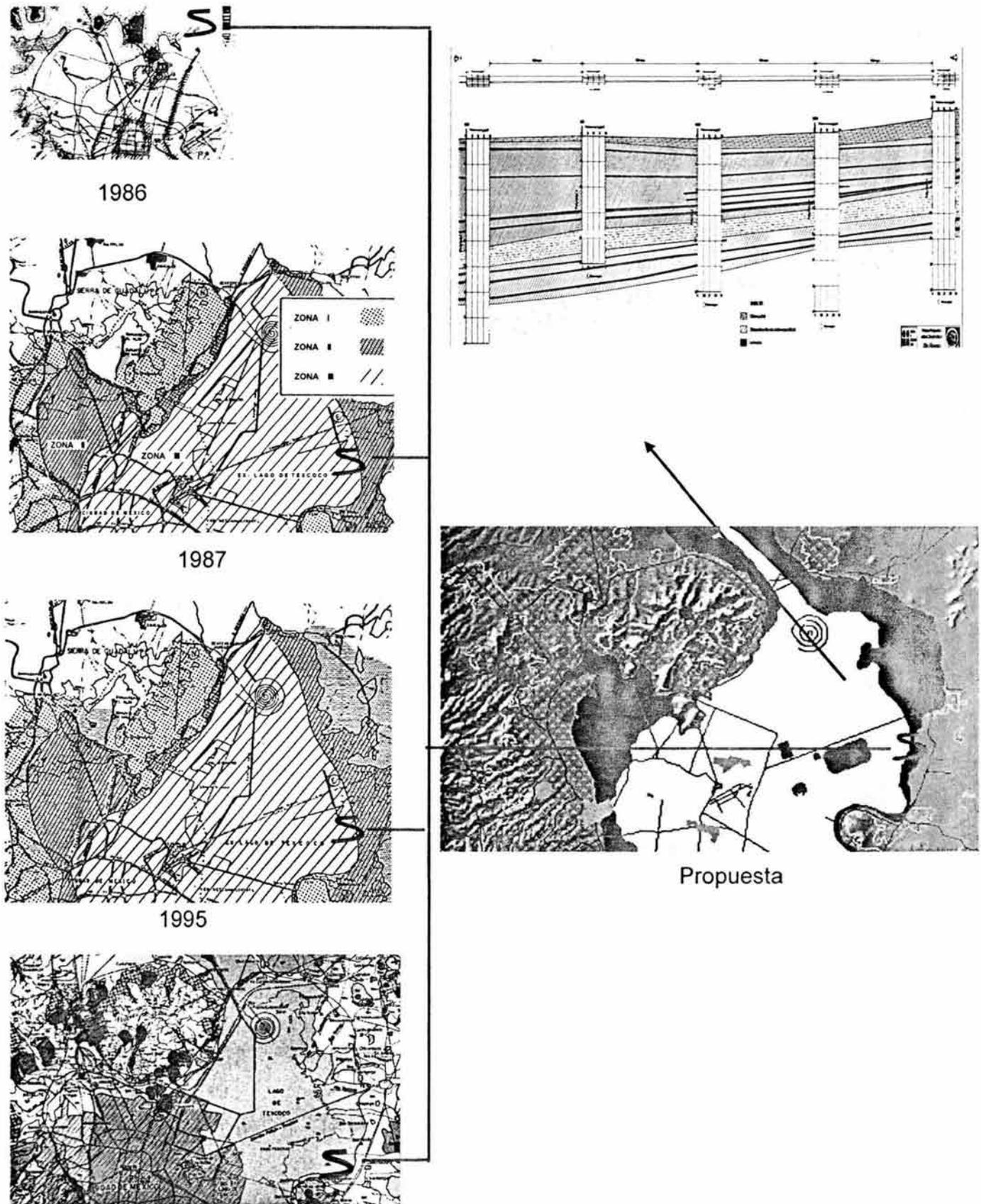
4.2 Contribuciones a la zonificación

A continuación se presenta el resumen de las principales contribuciones obtenidas en la parte correspondiente al análisis final que permitió precisar las líneas que dividen a la zonificación en tres zonas (Fig 4.8 y Fig 4.9) y extender la zonificación a las localidades del norte de la ciudad de México (Fig 4.10).



Geología, Mooser, 1996

Fig 4.8 Cerro de la estrella y sus alrededores



Geología, Mooser 1996

Fig 4.9 Zona nororiente, ex lago de Texcoco y alrededores

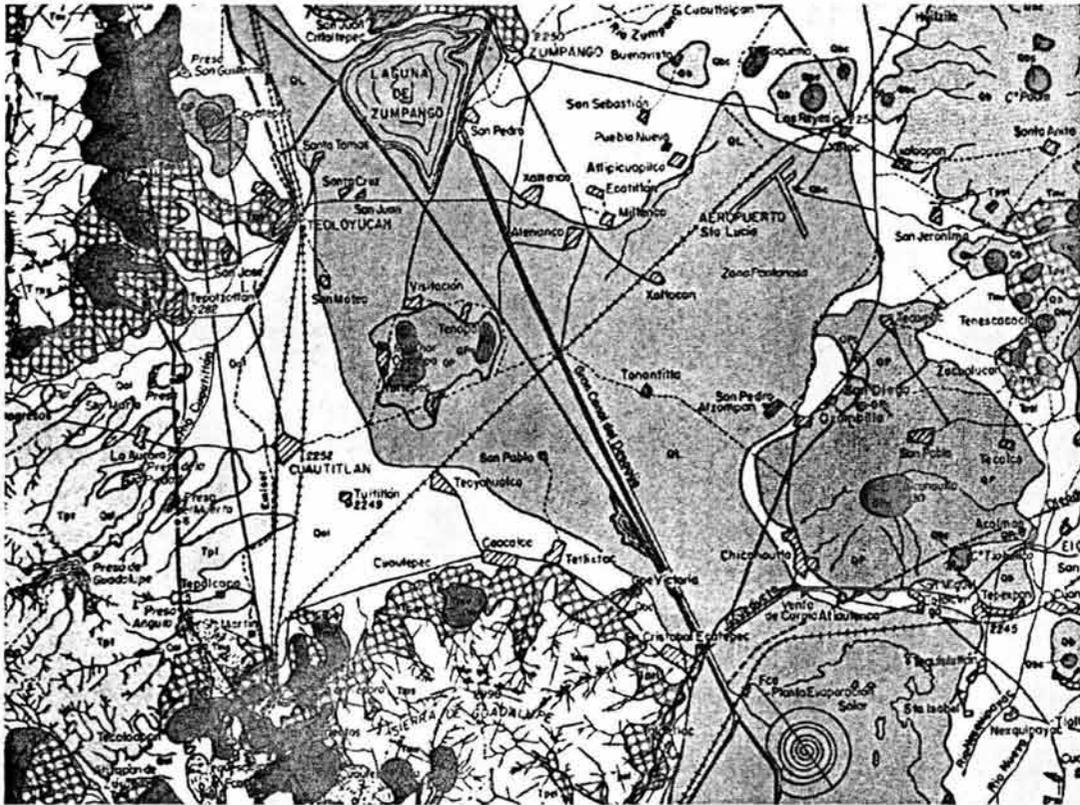


Fig 4.10 Ampliación de la zonificación, ex lagos de Xaltocan y San Cristóbal

Nota: La zona ampliada de la zonificación de los ex lagos de Xaltocan y San Cristóbal es una primera propuesta cualitativa de zonificación y conforme se tenga información mas profunda sobre el subsuelo, se podrá contar con una mejor propuesta.

4.3. Propuesta de zonificación geotécnica

La abundante información recopilada, procesada, e interpretada debe finalmente ser presentada en forma sintética. Se presenta en las Fig 4.10 y 4.11 la zonificación actualmente propuesta para fines de zonificación reglamentaria para el Distrito Federal y la ampliada. Obviamente, una representación de este tipo refleja solamente una pequeña parte de la información disponible, lo que indica que es necesario proceder simultáneamente a un trabajo de descripción y zonificación geotécnica y de mapeo de riesgos mucho más detallado para apoyo a estudios específicos del subsuelo en proyectos públicos y particulares. Se está realizando actualmente esta labor. En este último trabajo, resulta de gran utilidad el uso de la geoestadística (Juárez, 2003) para realizar estimaciones, interpolaciones y simulaciones estratigráficas en forma racional.

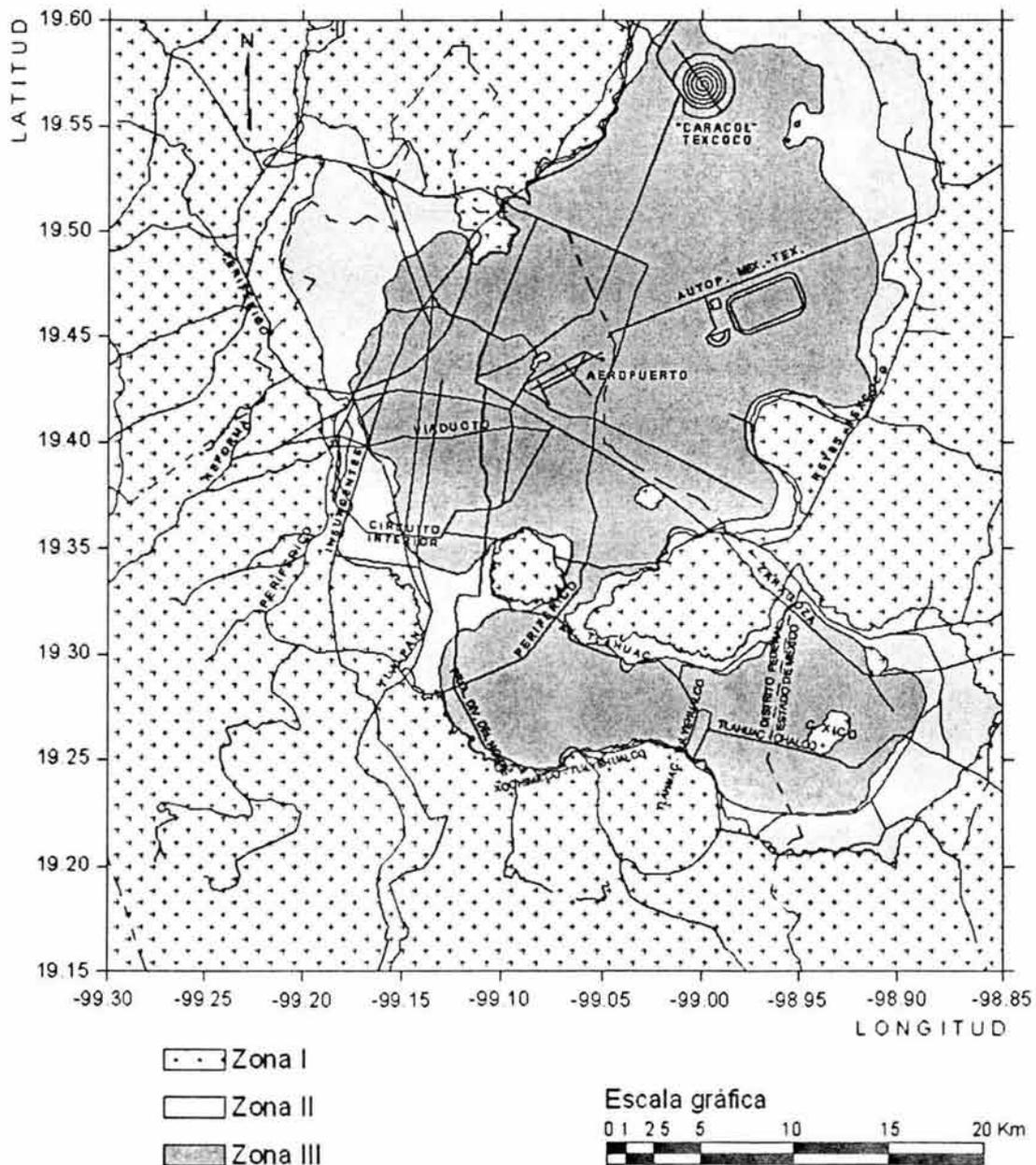


Fig 4.10 Propuesta de zonificación geotécnica del Distrito Federal y del Valle de México (Auvinet, Méndez, y Juárez, 2002)

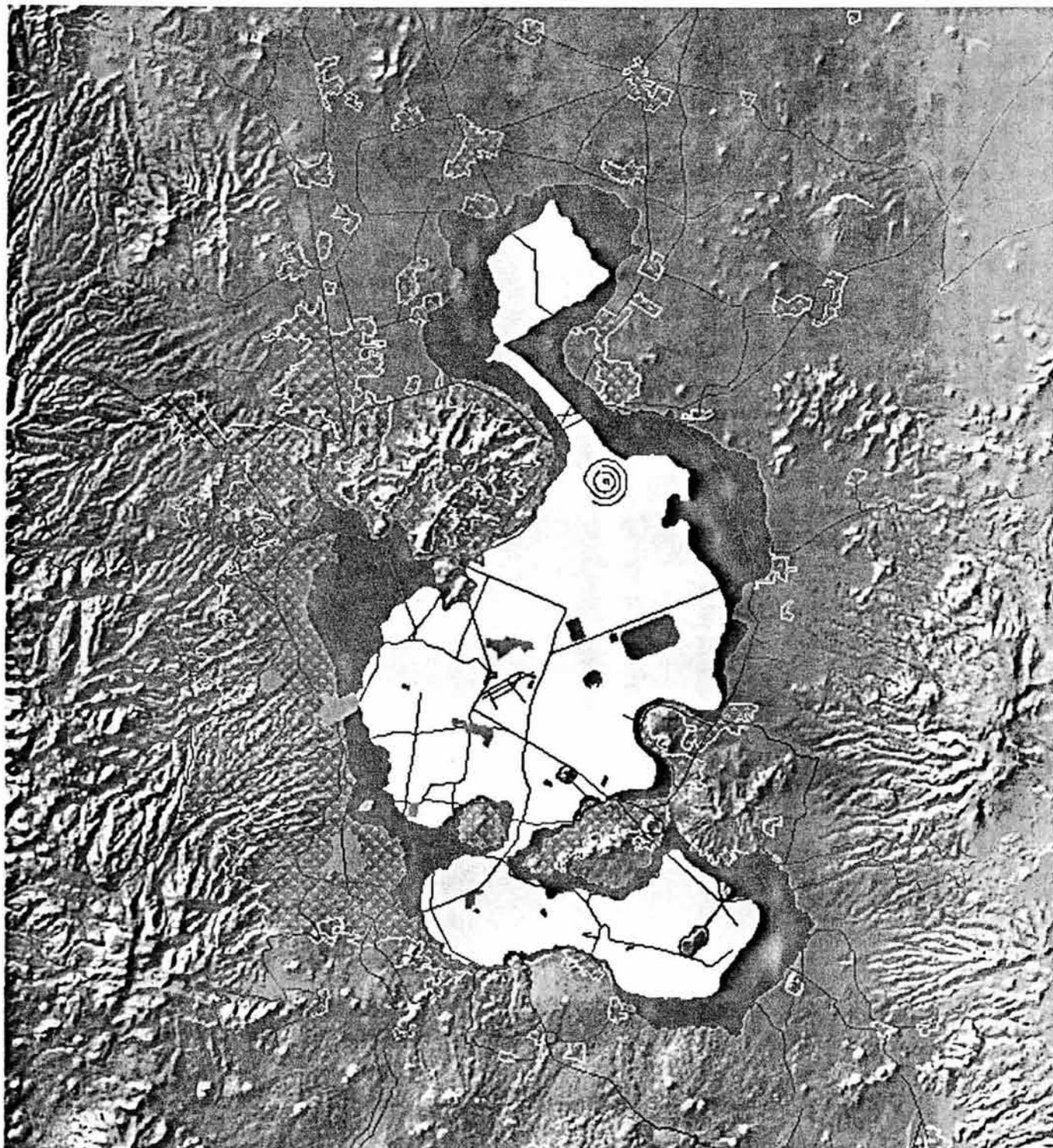


Fig 4.11 Propuesta ampliada de zonificación geotécnica
(Auvinet, Méndez, y Juárez, 2002)

5. CONCLUSIONES

Con base en la extensa descripción del cuerpo de este trabajo se desprenden las siguientes conclusiones:

La elaboración y actualización de zonificaciones geotécnicas para fines de reglamentación y como apoyo a proyectos públicos y particulares es una tarea que debe realizarse en forma continua. Se demuestra que las nuevas tecnologías de la Geoinformática es la herramienta poderosa para realizar esta tarea.

Uno de los resultados de este trabajo, es haber contribuido a actualizar el estado del arte del conocimiento sobre la distribución de los materiales del subsuelo de la ciudad de México y extenderlo hacia toda la estructura del territorio de la cuenca de México a través del mapa de zonificación geotécnica y con base en la automatización de más de cinco mil perfiles de sondeos geotécnicos, veinticinco perfiles de velocidad de onda al corte y cuatrocientos pozos profundos para agua que se encuentran almacenados en formato digital en el banco de datos del Sistema SIG-SG.

Esto implicó emprender desde hace ya varios años, a una campaña sistemática e intensa de recopilación de documentos y estudios de muy distinto índole con el fin de sintetizar y describir la distribución de los materiales del subsuelo a través de dos Marcos de Referencia: el Físico y Geográfico. El Marco Físico permitió fundamentar los estudios de interpretación y análisis general y de detalle para la definición del mapa de zonificación bajo el contexto proporcionado por la Geología, Geofísica, Geomorfología, Hidrografía, Orografía y Geotecnia. Estos estudios se apoyaron en el Marco Geográfico (Topografía, Imágenes de Satélites Artificiales, etc.) para hacer resaltar las características físicas como la de los rasgos geométricos generales del entorno natural del territorio de la Cuenca y así, definir la naturaleza y distribución espacial de los depósitos de suelo, rellenos aluviales, afloramientos de masas rocosas y estructuras geológicas y definición de la potencia o espesor de estratos u horizontes típicos.

Con estas herramientas de análisis espacial provenientes de la Geoinformática, es y será posible avanzar rápidamente hacia un conocimiento y descripción cada vez mas detallado del subsuelo de la cuenca de México. Para ello, es recomendable extender y elevar el nivel o grado en la modelación espacial encaminada a la determinación de la potencia o espesor de estratos para consolidar una descripción geométrica del subsuelo de la Cuenca de México.

Cabe destacar, que la zona ampliada de la zonificación de los ex lagos de Xaltocan y San Cristóbal es una primera propuesta cualitativa de zonificación y conforme se tenga información mas profunda sobre el subsuelo, se podrá contar con una mejor propuesta.

Puede decirse; que a lo largo del desarrollo de las tareas emprendidas en cada etapa del trabajo, se identificaron nuevas e interesantes líneas o campos de investigación, las cuales se desarrollaron más allá de las metas propuestas y algunas avanzaron mucho más rápido que lo previsto.

El objetivo final del análisis espacial que llevo a sintetizar y describir la distribución de los materiales del subsuelo y que se incorpora en forma sintética en el mapa de zonificación geotécnica, es ponerla a la disposición de la comunidad científica y técnica. Este mapa y su continua actualización, contribuirá a evitar incertidumbres en los trabajos preliminares de reconocimiento del subsuelo útiles en los programas de exploración y factibilidad para obras públicas y particulares.

El gran volumen de la información contenida y dispuesta en el banco de datos del Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG), ha probado ser útil en los últimos cinco años y hoy en día constituye un elemento básico que ayuda a complementar y enriquecer el desarrollo de múltiples investigaciones encaminadas a describir la distribución espacial de los materiales del subsuelo (rellenos aluviales; depósitos de suelo, afloramientos rocosos y definición estratigráfica). También, ha tenido implicaciones inmediatas en una decena de proyectos para infraestructura pública y privada que se han emprendido en las coordinaciones de Geotecnia, Sísmica y otras del Instituto de Ingeniería, UNAM, relacionados con el subsuelo de la Cuenca de México.

La organización y la disponibilidad de la información tienen un papel más y más importante. La información juega, por otra parte, un papel muy importante en la toma de decisiones. La información tiene un valor y un precio, como cualquier otro recurso. Los que la manejan adecuadamente están en ventaja respecto a los que no la toman en cuenta.

El uso de estas tecnologías tiene sus defensores intransigentes y sus acérrimos detractores. Ni unos ni otros tienen la razón absoluta. Ninguna técnica automatizada de informática, ni ningún método matemático, es capaz de sustituir totalmente la experiencia y el poder cognoscitivo de un especialista experimentado. Sin embargo, el empleo de la tecnología computacional y los SIG, SPR y SPG, aportan un gran beneficio a las tareas desarrolladas en las investigaciones y a los mismos investigadores.

La tarea consiste, por tanto, en la aplicación combinada, racional y lógica del trabajo científico mediante las Tecnologías de Información con los métodos tradicionales de investigación y, antes de todo, con las observaciones de campo in situ, que complementan la intuición científica y la capacidad profesional de los investigadores con el fin de asimilar la información sobre el espacio físico geográfico.

6. REFERENCIAS

Con el propósito de facilitar la identificar y consulta de las referencia, se consideró adecuado agruparlas en los tres siguientes apartados:

6.1 Geotecnia

Auvinet, G., Juárez, M., Méndez, E., Ovando, E., 1995 "*Sistema de información Geográfica para Sondeos Geotécnicos*", Proceedings, Xth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol 1, pp. 312-324, Guadalajara, México.

Auvinet, G., Medina, Z. & Juárez, M., 2000, "*Interpretación geoestadística de exploraciones geotécnicas*", Publicación Instituto de Ingeniería-SMMS, México (en preparación).

Bowles, J. E., 1970, "*Engineering properties of soils*", 3a Ed, New York: Mac-Graw Hill.

Carrillo Flores, N., 1948, "*Influence of Artesian Wells on the Sinking of México City*", Memorias del II Congreso Internacional de Mecánica de suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Holanda

Comisión Federal de Electricidad, 1988, "*Estudios geofísicos del valle de México*", México, D.F.

Departamento del Distrito Federal, 1975, "*Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal*", México , D.F.

Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras, 1988, "*Manual de Exploración Geotécnica*", México , D.F.

Gayol, R., 1929, "*Breves apuntes relativos a las obras de saneamiento y desagüe de la Capital de la República y las que, del mismo género necesita con urgencia*", Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, Vol. VII, México

Gurría Lacroix, J., "*El desagüe del valle de México durante la época novohispana*", Instituto de Investigaciones Históricas, Cuaderno serie histórica, número 19, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ingenieros Civiles Asociados, S.A. de C.V. , 1946 a 1956, "*Ediciones sobre el subsuelo de la Ciudad de México, el hundimiento y comportamiento de edificios*", México

Jaime, A., Reséndiz, D. y Romo, M.P. (1989), "*El subsuelo del Valle de México: Propiedades dinámicas y zonificación*". Revista Ingeniería de la FI, UNAM, Vol. LVIII, No. 2.

Juárez, M. y Auvinet, G., 2000, "*Caracterización geoestadística del subsuelo del Valle de México*", XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Oaxaca, México.

Marsal, R.J. y Mazari, M., 1959, "*El subsuelo de la ciudad de México*", Contribución al I^{er} Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, México. Reeditado (español-inglés) en 1969.

- Marsal, R.J., 1975, "*The lacustrine clays of the valley of México*", Contribution of Instituto de Ingeniería to the 1975 International Clay Conference, Publicación E16, Instituto de Ingeniería, UNAM
- Medina, Z. y Auvinet, G., 2000, "*Aplicación del análisis geoestadístico a la interpretación de los resultados de campañas de exploración geotécnica*", XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Oaxaca, México.
- Méndez, E., Juárez, M., Ovando, E. y Auvinet, G., 1994, "*Sistema de información geográfica para sondeos geotécnicos (SIG-SG)*", informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Méndez, E., Juárez, M., Ovando, E. y Auvinet, G., 1995 "*Sistema de información geográfica para sondeos geotécnicos*", Proceedings, Xth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol 1, pp. 312-324, Guadalajara, México.
- Méndez, E., 1991, "*Evolución de las propiedades de la arcilla de la ciudad de México*", Tesis profesional, ESIA -IPN, México.
- Mooser, Federico. "Historia geológica de la cuenca de México", en Memoria de las Obras del Sistema del Drenaje Profundo del Distrito Federal, Departamento del Distrito Federal, México, 1975.
- Mooser, F., 1978, "*Geología del relleno cuaternario de la cuenca de México*", Memoria, Simposio "El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México", SMMS, México, D.F.
- Mooser, F. et al. , 1986, "*Características Geológicas y Geotécnicas del Valle de México*". COVITUR, DDF, Pub. No. 1.
- Ovando E., Vieitez L. y Jurado T., 1988, "*Características geotécnicas de la cuenca del Valle de México*", 1a parte, Capítulo III, de "*Estudios sobre sismicidad en el Valle de México*", Secretaría General de Obras, DDF. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Centro de las Naciones Unidas para los asentamientos humanos, México.
- Palerm Ángel, 1973, "*Obras Hidráulicas prehispánicas*", SEP./INAH, 1973
- Reséndiz, D., Springall, G., Rodríguez, J.M. y Esquivel R., 1970, "*Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la ingeniería de cimentaciones en la Ciudad de México*", Memoria de la V^a Reunión nacional de Mecánica de Suelos, Tomo I, México.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Boletines de la Comisión hidrológica de la Cuenca del Valle de México* de 1953 a 1958.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976, "*Cimentaciones en zonas minadas de la Ciudad de México*", Memoria del simposio celebrado el 10 de marzo de 1976, México
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976, "*El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México*", Memoria del simposio celebrado el 10 de marzo de 1978, México

6.2 Históricas

Almanaque Bouret para el año 1897, Colección Fascílmiles, Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora, México, 1992.

Archivo General de la Nación. Ramo Alcaldes Mayores, volumen 5, f. 132.

Archivo General de la Nación. Ramo Ayuntamientos, volumen 195.

Atlas de la Ciudad de México, Departamento del Distrito Federal-El Colegio de México, México, 1987.

Baz, Gustavo. Historia del Ferrocarril Mexicano, Gallo y Compañía, México, 1874.

Benítez, Fernando. Historia de la Ciudad de México, volúmenes 4, 5 y 6, Salvat, México, 1984.

Beyer, Hermann. "Sobre antigüedades del Pedregal", en Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate, volumen 37(1), pp. 1-16, 1917.

Córdova, Carlos, Ana Lillian Martín del Pozzo y Javier López. "Paleoland forms and volcanic impact on the environment of prehistoric Cuicuilco Southern México City", en journal of Archaeological Science (prensa).

Cummings, Byron. "Cuicuilco and the Archaic Culture of México", o en University of Arizona Bulletin, volumen IV(8), pp. 1-56, 1933.

Durán, Fray Diego. Historia de las Indias de Nueva España e islas de la tierra firme (1867-1880), 2 tomos, Banco Santander, Madrid, 1990.

Espinasa Pereña, Ramón. "Tubos de lava y formas asociadas en el pedregal del Xitle", en Memorias del XIII Congreso Nacional de Geografía, "México ante el siglo XXI", tomo I, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, México, 1992.

Espíndola, J.M. "Las catástrofes geológicas", en Cuadernos del Instituto de Geofísica, número 3, 1990.

Fernández del Castillo, Francisco. Apuntes para la historia de San Ángel y sus alrededores, Porrúa, México, 1987.

Gamio, Manuel. Las excavaciones del Pedregal San Ángel y la cultura del Valle de México, Publicaciones de la Secretaría de Educación Pública, volumen XXII(2), pp. 1-21, México, 1929.

García Cubas, Antonio. Diccionario geográfico, histórico y biográfico de la República Mexicana, tomo V, Antigua Imprenta de las Escalerillas, México, 1897.

Heizer, Robert F. y James A. Bennyhoff. "Archeological excavations at Cuicuilco, México, 1957", en Research Reports, National Geographic Society, pp. 203-220.

- León-Portilla, Miguel y Carmen Aguilera. Mapa de México Tenochtitlan y sus contornos hacia 1550. Celanese Mexicana, México, 1986.
- Libby, W.F. Geoquímica y Paleomagnetismo de la Sierra Chichinautzin, tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1975.
- Manzanilla, Linda y Leonardo López L.(coords). Atlas histórico de Mesoamérica, Larousse, México, 1990.
- Martín del Pozzo, Ana Lillian. "Monogenetic vulcanism in Sierra Chichinautzin, México", en Bulletin Vulcanologique, 45(1), pp. 9-24, 1982.
- Martín del Pozzo, Ana Lillian. "Morfoestratigrafía volcánica del monogenético de Chichinautzin", en Memorias del XIII Congreso Nacional de Geografía, "México ante el siglo XXI", tomo I, pp. 1-14, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, México, 1992.
- Martín del Pozzo, Ana Lillian, Carlos Córdova y Javier López. "Volcanic impact on the southern basin of México during the Helocene" (en prensa).
- Moreno de los Arcos, Roberto. Joaquín Velásquez de León y sus trabajos científicos sobre el Valle de México, 1773-1775, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1977.
- Novo, Salvador. Breve historia de Coyoacán, Era, México, 1962.
- Palerm, Ángel. México prehispánico. Ensayos sobre evaluación y ecología, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, México, 1990.
- Pérez Rosales, Laura. "Chimalistac y San Ángel durante el siglo XIX: un puente entre la tradición y la modernidad", en Manuel Ramos Medina (coord.), Historia de un huerto, Condumex, México, 1992.
- Rojo, Ariel (comp.). Reserva ecológica "El Pedregal" de San Ángel: ecología, historia natural y manejo, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1994.
- Sanders, W.T. Fletcher y Ch. Marino J. The Formative Occupation of the Valley. The teotihuacan Valley Project, Department of Anthropology, State University of Pennsylvania, 2(10), 1975.
- Schávelzon, Daniel. La pirámide de Cuicuilco. Álbum fotográfico, 1992-1980, Fondo de Cultura Económica, México, 1983.
- Schmitter, Eduardo. "Investigación petrológica en las lavas del Pedregal de San Ángel", en Memoria del Congreso Científico Mexicano, volumen III, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1953.
- Serra Pucho, Mari Carmen. Los recursos lacustres de la cuenca de México durante el Formativo, Instituto de Investigaciones Antropológicas-UNAM, México, 1988.

- Seyfert, P. "Historical Geology", en Cuadernos del Instituto de Geofísica, número 3, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1990.
- Sosa, Francisco. Bosquejo histórico de Coyoacán, México, 1890.
- Torquemada, Fray Juan de. Monarquía indiana, Porrúa, México.
- Wolf, Eric. Pueblos y culturales de Mesoamérica, Era, México, 1967.
- Yarza de la Torre, Esperanza. Volcanes de México, Instituto de Geografía-UNAM, México, 1992

6.3 Informática

- Antonin Guttman, 1991, R-Trees: A Dinamic Index Structure For Spatial Searching. University of California, Berkeley.
- Auvinet, G., Ovando, E., Méndez, E. y Juárez, M., 1994, "*Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG)*", Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Bertalanfy, L. Von, 1968, General Systems Theory, New York: George Braziller.
- Bocco, G., Palacio, J. L. y Valenzuela, C. R., 1991, "*Integración de la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica*", Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Cabrales Barajas, Luis Felipe 1998, "*La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al Ordenamiento Territorial*", Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- Cressie, N.A.C., 1993, Statistics for Spatial Data, John Wiley & Sons Inc.
- Date C. J., 1990 An Introduction to Database Systems, Vol. I, 5th edition, Addison-Wesley.
- Environmental Systems Research Institute Inc. July 1998, "*ESRI Shapefile Technical Description*", Redlands, California.
- Environmental Systems Research Institute Inc. 1999, Building Applications with Map Objects, Redlands, California.
- Environmental Systems Research Institute Inc. 1999, Programmer's Reference Map Objects. Redlands, California.
- ESRI, 1993, Understanding GIS, The ARC/INFO Method, Environmental systems Research Institute Inc.
- Gersting. J.L., 1992, Mathematical Structures for Computer Science, 3rd edn. Computer Science Press.

- Hadzilacos, T. And Tryfona, N., 1996, Logical Data Modelling for geographic applications. International Journal of Geographical Information Systems.
- Hugget, R., 1980, Systems Analysis in Geography, Oxford: Clarendon Press.
- Ibrahim Kanel & Christos Faloutsos, 1993, On Packing R-Trees. Department of CS, University of Maryland.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI, 2000, "*Información Geográfica hacia el Tercer Milenio*", Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI, 2000, "*Series Cartográficas, Nomenclatura*", Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI, 2000, "*Modelos Digitales de Elevación, Generalidades y especificaciones*", Aguascalientes, México.
- Joaquín Bosque Sendra, 1992, "*Sistemas de Información Geográfica*", Ediciones Rialp, S.A. Madrid, España.
- Luis Rafael Díaz Cisneros, 1991, "*Sistemas de Información Geográfica*", Universidad Autónoma del Edo. de México.
- Maguire, David J. Geographical Information Systems: Principles and Applications. HDM.
- Masser, I. and Blackmore M., 1991, Handling Geographical Information, Longman.
- Méndez, E., 2002, "*Aplicación de la Geoinformática a la Zonificación del Subsuelo de la Cuenca de México*", División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Méndez, E., 1990, "*Banco Nacional CATSON*". Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, SMMS, pp. 43-45, México.
- Michael F. Worboys, 1994, Innovations in GIS Selected paper from the First National Conference on GIS Research UK Editorial GME.
- Openshaw, S., Brundson, C., 1991, A spatial analysis toolkit for GIS. EGIS 91, Proceeding Second European Conference on Geographical Information Systems.
- Pressman Roger S. 1998, Ingeniería de Software, Un enfoque práctico. Mc Graw Hill, Madrid, España.
- Richard Markham & David Rix, 1999, Component Based Software Development. A Case of Study. MVM House Consultant.
- Rod D. Kuhns, 1998, Strategies for Designing and Building Reusable GIS Application Components. University of California, Berkeley.

- Thomas Brinkhoff, Hans Peter Kriegel & Bernhard Seeger, 1993, Efficient Processing of Spatial Joins Using R-Trees. Institute of Computer Science, University of Munich.
- Torres, M. J., 2001, "*Herramienta SIG de escritorio para la recuperación, manejo y análisis de datos espaciales*", Instituto Politécnico Nacional, IPN, México.
- Tomlin, C. D., 1990, "*Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*", Prentice Hall.
- Volker Gaede & Oliver Gunther, 1998, Multidimensional Access Methods. Imperial College, London.
- Worboys M.F., 1995, GIS- A computing Perspective, Taylor & Francis.

ANEXO A, Glosario de Informática

En este glosario se propone un conjunto de definiciones breves y sintéticas de conceptos que, aunque son conocidos, a veces se han descrito de formas muy diferentes.

NOTA: Los significados que aquí se atribuyen se deben interpretar en el contexto apropiado (Sistemas de Información Geográfica); en otros campos del conocimiento la cuestión puede ser muy distinta (por ejemplo, no se pretende convencer a un matemático de que topología es lo que aquí se define).

A

- Administración de los datos.- La función de controlar la adquisición análisis, almacenamiento, recuperación y distribución de los datos.

- Administrador de la base de datos.- 1. Persona o grupo de personas responsable de la definición, protección y eficiencia de la base de datos de una empresa, al ser colocada en una computadora. 2. (SISTEMA) Un sistema que permite que múltiples usuarios independientes tengan acceso concurrente a la información.

- Algoritmo.- Secuencia explícita y finita de operaciones que conduce a la solución de un problema, aplicado a los SIG suele tratarse de un conjunto de operaciones de álgebra de mapas y/o sobre bases de datos que permiten obtener un resultado mediante combinación de información espacial y alfanumérica.

- Almacenamiento espacio físico.- La acción de colocar datos en algún dispositivo.

- Almacenamiento principal.- Almacenamiento direccionable por un programa desde el cual las instrucciones y otros datos pueden ser cargados directamente en los registros para su subsecuente ejecución o procesamiento.

- Altimetría.- Medida de la altitud o elevación, la altitud se mide sobre una superficie de referencia (datum); la medida de profundidades bajo el agua se denomina batimetría.

- Anillo.- Estructura formada por un conjunto ordenado de líneas que se cierra sobre sí mismo sin cruces ni solapamientos, un anillo define una superficie poligonal y puede estar formado por una única línea o por varias unidas secuencialmente; en cualquier caso, los nodos iniciales y finales de un anillo coinciden y queda definida la propiedad topológica de interioridad (dentro/fuera).

- Atributo.- Propiedad o característica de una clase de elementos geográficos en una base de datos; por ejemplo, la superficie, la población, la renta media...; pueden ser atributos de la clase municipios en una base de datos.

- Azimut o Acimut.- Angulo formado entre una línea y un meridiano normalmente nos referimos con este término a la orientación geográfica; en este caso, la primera línea sería la proyección sobre el plano XY del vector perpendicular al terreno en el punto problema; también se puede definir como el ángulo entre la dirección norte y la dirección al objeto (girando como las manecillas del reloj).

B

- Banda.- Rango de frecuencias del espectro electromagnético por ejemplo, la banda 1 del sensor TM se define en el rango 0.45-0.52 μm .
- Base de datos.- Conjunto de datos estructurado que permite su almacenamiento, consulta y actualización en un sistema informático.
- Base de datos relacional.- Son un caso concreto en el que la información se organiza en relaciones (llamadas "tablas") que son conjuntos de "registros", cada una de las cuales integra información de un elemento en un conjunto de campos (uno por atributo del elemento); si dos tablas comparten un campo con valores dentro del mismo dominio, puede aplicarse una operación de unión mediante la cual los registros se enlazan en función de los valores del campo de enlace.

C

- Cad/Cam (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing) Diseño/Manufactura auxiliados por computadora.
- Canevá.- La red de meridianos y paralelos en un mapa.
- Capa.- 1. Subconjunto de la información espacial que trata de un tópico o tema. 2. Función del sistema de cómputo gráfico que permite representar distintas clases de atributos pudiendo sobreponer o remover cada clase como si se dibujara en hojas transparentes.
- Carta.- 1. Usualmente un mapa usado para navegación aérea o marina. 2. Mapa.
- Cartografía.- Ciencia y arte de hacer mapas y cartas.
- Catastro.- Registro público o levantamiento que define los límites de la propiedad.
- Celda.- Elemento básico de información en una estructura raster matricial representa el valor medio de un área rectangular superpuesta al terreno (es un concepto análogo al de píxel en una imagen digital).
- Cenit.- Con origen en el centro de la Tierra, lugar al que apunta el vector normal a la superficie terrestre en un punto de observación el punto de observación se supone sobre la superficie de la Tierra; punto donde la vertical toca la esfera celeste, exactamente arriba.
- Coberturas.- La extensión de la superficie terrestre representada en un mapa o imagen.
- Compresión.- Técnica de reducción del número de bits necesario para almacenar o transmitir una información concreta existen técnicas de compresión sin pérdida de la información original (por ejemplo, GIF en la compresión de imágenes digitales) o con pérdida controlada de información (por ejemplo, JPG en el mismo caso).

- Coordenada.- Cantidad usada para definir una posición en un sistema de referencia; las coordenadas pueden ser lineales (cartesianas) o angulares (esféricas), según el sistema de referencia.
- Coordenadas Geográficas.- Un sistema de coordenadas curvas definido sobre el elipsoide de referencia. Se expresan como Longitud (*long*), Latitud (*lat*) y Altura (*h*) donde la *long* y la *lat* son medidas angulares desde el meridiano origen y el ecuador respectivamente; *h* es la altura sobre el elipsoide de referencia.
- Cota.- Altitud asociada a un punto habitualmente, un mapa de elevaciones está formado por curvas de nivel o isohipsas y por puntos acotados.

D

- Dato.- Hecho verificable sobre la realidad un dato puede ser una medida, una ecuación o cualquier tipo de información que pueda ser verificada.
- Datum.- Sistema geométrico de referencia empleado para expresar numéricamente la posición geodésica de un punto sobre el terreno; cada datum se define en función de un elipsoide y por un punto en el que el elipsoide y la Tierra son tangentes.
- Digitalizadora.- (Tableta, mesa) Dispositivo que permite digitalizar manualmente. Consiste de una superficie plana y un retículo con teclas o botones.
- Digitalizar.- Convertir a formato digital la información analógica de un mapa, fotografía o dibujo ya sea automáticamente mediante un scanner o manualmente usando una digitalizadora.
- DTM.- (Digital Terrain Model) Modelo Digital de Terreno.

E

- Elipsoide.- 1. Modelo matemático de la Tierra empleado para los cálculos geodésicos. 2. Superficie generada al hacer girar una elipse sobre uno de sus ejes. Ya que la forma de la Tierra es distinta de un área geográfica a otra, para obtener el mejor ajuste, se usan distintos elipsoides para describir áreas particulares; los elipsoides se definen en función de un radio ecuatorial y de un radio polar.
- Error.- Diferencia entre el valor medido o estimado y el valor real en un modelo, el error representa la desviación entre lo predicho por el modelo y la realidad; el error es una estimación de la calidad de la información de un mapa y suele distinguirse del concepto de precisión, que hace referencia a la calidad del método de medida utilizado.
- Escáner.- Sensor óptico acoplado a un dispositivo de barrido para la digitalización de documentos con un escáner se recorre un documento mediante un sensor óptico que mide la reflectancia general (tonos de gris) o la de cada color primario (RGB) para formar una imagen digital procedente del inglés scanner, el neologismo ha sido aceptado por la RAE aunque con una definición compleja y poco afortunada.

- Escala.- Razón entre la distancia medida en un mapa, fotografía o imagen y la distancia correspondiente en el terreno.
- Escala real en un punto.- La escala del mapa en el punto A en dirección a B, es la razón entre la distancia AB en el mapa y la distancia AB en el elipsoide adoptado cuando B se acerca a A. La escala real del mapa puede calcularse como el producto del factor por la escala nominal del mapa.
- Escala de grises.- Ordenamiento de los tonos de gris entre el blanco y el negro.
- Escala gráfica.- Línea graduada en un mapa o plano empleada para relacionar las distancias en este con las distancias en el terreno.
- Escalar.- 1. Aumentar o reducir las dimensiones de un objeto sin modificar sus proporciones. 2. Magnitud no vectorial.
- Estereoscopio.- Aparato que produce el efecto de profundidad (tres dimensiones) al observar con el dos fotografías del mismo objeto (estéreo par) tomadas desde puntos ligeramente separados.
- Etiqueta.- 1. Nombre o descripción textual del objeto geográfico representado en el mapa. 2. identificador del objeto.
- Exportar.- Proceso de transferir información de un sistema o plataforma a otro.

F

- Factor de escala.- La razón entre la escala a lo largo de un meridiano (paralelo) en un punto dado y la escala en un punto estándar o a lo largo de una línea estándar con escala real. El factor de escala es "h" para los meridianos y "k" para los paralelos. Reflejan la distorsión en el punto dado. El factor de escala "s" es la distorsión en el área alrededor del punto dado. Las ecuaciones de los factores de escala son parte de la definición de la proyección.
- Fiducial (Marca).- Marca en los límites de las fotografías aéreas hechas en el momento de la exposición por la cámara que sirven para encontrar el punto central de la fotografía.
- Filtro.- Matriz de coeficientes aplicados en un proceso de convolución sobre una estructura raster por ejemplo, los coeficientes usados para generar la curvatura general a partir de un MDE son:

$$\begin{matrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & 4 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{matrix}$$
- Fotografía aérea.- Usualmente fotografía de formato grande tomada desde un avión con cámaras especiales que registran en las márgenes las marcas fiduciales, fecha y hora, y otras características que permiten la identificación de la foto y las circunstancias en las que se tomó.

- Fotogrametría.- Conjunto de técnicas implicadas en la obtención de datos métricos a partir de fotografías; la fotogrametría es la forma más usual de generar modelos digitales de elevaciones, usando pares estereoscópicos y apoyos sobre el terreno.

G

- Geocodificar.- Asignar una ubicación geográfica a los objetos.

- Geoprocesamiento.- Manipulación y análisis de la información con referencia geográfica.

- Georeferenciar.- Asignar coordenadas geográficas a un objeto o estructura, el concepto aplicado a una imagen digital implica un conjunto de operaciones geométricas que permiten asignar a cada píxel de la imagen un par de coordenadas (x, y) en un sistema de proyección.

- GPS.- Acrónimo de Global Positioning System, o sistema de localización global hace referencia a un sistema mediante el cual es posible estimar las coordenadas actuales de una estación en tierra mediante la recepción simultánea de señales emitidas por varios satélites (llamados en conjunto constelación GPS).

- Grid.- Red Ortogonal, retícula.

H

- Hardware.- Componentes físicos y equipos periféricos de una computadora. Es toda componente física involucrada en el funcionamiento de equipo informático.

- Hipsometría.- Altimetría.

I

- Imagen digital.- Representación gráfica de un objeto mediante una matriz regular que obtiene valores de reflectancia, estos valores suelen medirse mediante sensores sensibles a ciertos rangos de longitudes de onda de la luz; ejemplos de estos sensores son los transportados por plataformas aéreas (aviones o satélites) o los integrados en un escáner para la digitalización de documentos impresos.

- Información.- Es un conjunto de datos que al relacionarse adquieren sentido o un valor de contexto o de cambio.

-Interpolación.- Estimación del valor de una variable en un punto a partir de otros datos próximos se entiende que el punto problema está dentro del rango de variación de los datos disponibles; en caso contrario se habla de extrapolación.

- Intersección.- Operación de combinación de dos mapas en la cual se conservan las zonas incluidas en el dominio espacial común a los dos mapas.

-Intervisibilidad.-Propiedad de dos puntos en los que el vector que los une no está interrumpido por la superficie topográfica el punto origen del vector se denomina foco o punto de vista; el vector entre el foco y el punto objetivo se denomina línea visual.

-Isla.- Polígono dentro de otro, agujero (island, hole).

-Isopleta.- Curva que une puntos de igual valor en altimetría, isopleta es equivalente a curva de nivel o isophipsa.

- Item.- (Párrafo) Objeto, elemento de una base de datos.

L

- Label.- Etiqueta.

- Landsat.- Satélite artificial (EEUU) que recoge, registra y transmite imágenes digitales de la Tierra. Tiene un sistema de escaneo multiespectral (MSS) de cuatro bandas (0.5-0.6, 0.6-0.7, 0.7-0.8 y 0.8- 1.1 micras) con una resolución nominal de 80 m. Cuenta con el mapeador temático (thematic mapper) con una resolución de 30 m y siete canales: 1: 0.45-0.52, 2: 0.52-0.60, 3: 0.63-0.69, 4: 0.76-0.90, 5:1.55-1-75, 6: 10.4-12.5, 7: 2.08-2.46 (micras).

- Latitud.- Posición norte-sur medida como el ángulo entre (la normal a) el punto y el plano del ecuador.

- Leyenda.- Listado ordenado y estructurado de las relaciones símbolo/valor para las variables representadas en un mapa, la leyenda debe permitir interpretar los significados de los recursos gráficos usados en el mapa, tanto para las variables cuantitativas (por ejemplo, altitud) como nominales (por ejemplo, vegetación).

- Línea.- Conjunto ordenado de vectores encadenados en el modelo de datos vectorial, la línea se usa para representar objetos geográficos como carreteras, líneas eléctricas, etc. En una estructura topológica, las líneas tienen un sentido y están definidos los lados izquierdo y derecho.

- Link.- (Eslabón) Es una cadena. Segmento entre dos nodos sucesivos.

- Longitud.- Posición este-oeste. Se define como el ángulo entre el plano del meridiano local y el plano del meridiano de referencia.

M

- Manejador de base de datos.- Interfase con el usuario en el software de la base de datos.

- Mapa.- Modelo gráfico de la superficie terrestre donde se representan objetos espaciales y sus propiedades métricas, topológicas y atributivas.

Un mapa puede ser analógico (impreso sobre papel, por ejemplo) o digital (codificado en cifras, almacenado en un ordenador y presentado en una pantalla) existen mapas métricos, diseñados para representar distancias, superficies o ángulos y mapa topológicos, diseñados para representar vecindad, inclusión, conectividad y orden en el contexto de los SIG, un mapa es la presentación de cualquier estructura de datos usada para reflejar cartográficamente una variable espacial (nominal o cuantitativa) independientemente del modelo de datos utilizado (vectorial o raster).

- Mapa analógico.- Mapa en papel u otro material similar.
- Mapa base.- Mapa de referencia sobre el que se ubica la nueva información geográfica.
- Mapa derivado.- Mapa creado a través de la depuración o la combinación o el análisis de la información de otros mapas.
- Mapa Digital.- Mapa en memoria.
- Mapa Índice.- Mapa de referencia que representa el entorno del área estudiada e identifica los mapas componentes o los mapas adyacentes.
- Mapa Temático.- Mapa que ilustra las características de clase de una variable espacial en particular.
- Mapa Virtual.- Mapa en pantalla.
- Matriz.- Estructura de datos formada por elementos (celdas) dispuestos regularmente en filas y columnas; la matriz es la estructura más usada para la construcción de modelos digitales del terreno e imágenes digitales; en este último caso, cada elemento de una matriz se denomina píxel; se habla de matriz regular cuando filas y columnas están separadas por la misma distancia.
- Medios tonos.- Técnica para representar una imagen continua por medio de líneas o puntos discretos.
- Meridiano.- Círculo máximo perpendicular al plano del ecuador.
- Metadatos.- Información sobre las características de un conjunto de datos típicamente, los metadatos incluyen información anexa al cuerpo de datos principal (por ejemplo, un modelo digital de elevaciones) sobre extensión geográfica, estadísticas, autoría, metodología, calidad de la información, etc.
- Modelo.- Representación simplificada de un objeto o proceso en la que se representan algunas de sus propiedades, un modelo reproduce solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda, por tanto, representado por otro objeto o sistema de menor complejidad; los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real.
- Modelo Icónico.- Modelo construido como una copia morfológica del objeto real; por ejemplo, una maqueta.

- Modelo de color.- Esquema utilizado para definir los colores sin ambigüedad RGB: modelo de color en el que los colores se definen según la cantidad utilizada de los colores rojo (red), verde (green) y azul (blue) CMYK: modelo de color en el que los colores se definen según la cantidad utilizada de los colores cian (cyan), magenta (magenta), amarillo (yellow) y negro (black).

- Modelo Digital de Terreno.- Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa se trata, por tanto, de un modelo digital que representa una propiedad cuantitativa topográfica (por ejemplo, elevación, pendiente).

- Modo puntual.- Digitalización en la que el operador incorpora explícitamente cada uno de los puntos.

- Multiespectral.- Que tiene o emplea dos o más bandas espectrales.

N

- NAD.- (North American Datum) Datum Norteamericano (es el que se usa en México).

- Node.- Nodo.

- Nodo.- Vértice inicial o final de una línea se aplica por extensión a las entidades puntuales que están interconectadas en una estructura en red. El orden de los nodos (inicial→final) permite asignar a la línea un sentido y dejar definidos los conceptos topológicos de izquierda/derecha.

O

- Objeto.- 1. En base de datos, fenómeno caracterizado por un conjunto de atributos; 2. En cartografía, la representación digital de una entidad o rasgo.

- Ortogonal.- Perpendicular, se aplica también a variables que son mutuamente independientes en el sentido estadístico (no correlacionadas).

- Ortofoto.- Fotografía aérea modificada geométricamente para ajustarla a un sistema de proyección geográfica en una ortofotografía se han eliminado las distorsiones debidas a la perspectiva, al movimiento de la cámara y al relieve de forma que posee las mismas propiedades métricas que un mapa.

- Ortofotografía.- Fotografía área o mosaico en la que se han quitado las distorsiones producidas por la inclinación y el relieve del terreno.

P

- Pancromático.- Sensor sensible a un amplio rango de frecuencias en el espectro visible se opone a ortocromático, término aplicado en fotografía a los materiales insensibles a la luz de longitud de onda más larga (rojo).

- Paralelo.- Línea de intersección de la superficie de la Tierra con un plano paralelo al ecuador.
- Par estereoscópico.- Conjunto de dos imágenes del mismo lugar tomadas desde diferentes puntos de vista, las imágenes pueden ser analógicas o digitales; los pares estereoscópicos se utilizan en fotogrametría para restituir el relieve.
- Pendiente.- Ángulo entre la línea normal a la superficie del terreno y la vertical, la pendiente o inclinación del terreno es la primera derivada de la altitud y puede estimarse directamente a partir del modelo digital de elevaciones mediante filtros.
- Percepción Remota.- Adquisición de información sobre las propiedades de un objeto empleando instrumentos que no están en contacto directo con el objeto estudiado; usualmente cuando el instrumento está a bordo de un avión o un satélite.
- Pixel.- Cada elemento discreto en los que se divide una imagen digital, tecnicismo de origen inglés que procede de la contracción de picture element.
- Planimetría.- La representación de la posición horizontal.
- Plataforma.- Genéricamente, cualquier medio de transporte que lleva un sensor o instrumento de medida.
- Polígono.- Representación de rasgos lineales por una cadena de segmentos rectos.
- Polígono de Thiessen.- Método de división del plano en polígonos que utiliza como criterio la distancia mínima a un conjunto de puntos previo dado un conjunto de n puntos origen, la división del plano genera un polígono alrededor de cada uno de ellos; cada polígono representa el lugar geométrico de los puntos del plano más cercanos al punto interior original; una línea frontera entre dos polígonos representa el lugar geométrico de los puntos del plano equidistantes a los puntos origen respectivos es sinónimo de polígonos de Voronoi y de teselación de Dirichlet.
- Procesamiento de datos.- Las operaciones realizadas en los datos por la computadora.
- Proyección.- Conjunto de transformaciones métricas definidas para representar la superficie de la Tierra sobre un plano Existe un gran número de proyecciones, cada una de las cuales posee propiedades diferentes en cuanto a las métricas del objeto real y de su representación plana; por ejemplo, en una proyección conforme se conservan los ángulos (los paralelos y meridianos se cortan en ángulo recto) y en una equivalente se conservan las superficies.
- Punto.- Objeto de área nula representado por sus coordenadas.
- Punto de control.- Un punto cuya localización es conocida. Punto de ubicación en el terreno conocida que puede identificarse en la imagen o mapa y por tanto emplearse para hacer las transformaciones para la georreferenciación de la imagen o mapa.

R

- Raster.- Modelo de datos en el que la realidad se representa mediante teselas elementales que forman un mosaico regular cada tesela del mosaico es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud, reflectancia...); las teselas pueden ser cuadradas (celdas) o no (triangulares, hexagonales...) un modelo de datos raster está basado en localizaciones.
- Rectificaciones.- Conjunto de técnicas empleadas para eliminar deformaciones o errores en aerofotografías, imágenes de satélite o mapas.
- Reflectancia.- Razón entre la radiación recibida y la reflejada por un objeto.
- Región.- Área continua con alguna característica uniforme. Polígono.
- Remote Sensing.- Percepción remota.
- Resolución.- Distancia mínima entre dos objetos que puede ser distinguida por un sensor.
- RGB .-(Red, Green, Blue) Rojo, Verde y azul. Monitor de color.

S

- Símbolo.- Representación gráfica de una entidad geográfica. Las clases de símbolos son líneas y polígonos (áreas).
- Sistema.- Es un conjunto de elemento o subsistemas interrelacionados entre si con un objetivo común.
- Sistema cartesiano.- Usualmente, un sistema coordinado donde la posición de un punto se mide a lo largo de dos (tres) ejes X y Y (y Z) ortogonales.
- Sistema de coordenadas.- Marco de referencia espacial que permite la definición de localizaciones mediante coordenadas, éstas pueden ser lineales (sistemas cartesianos, con ejes ortogonales) o esféricas (donde se utilizan como coordenadas el acimut y elevación angular).
- Sistema de Información Geográfica.- Sistema de gestión de bases de datos (SGBD) con herramientas específicas para el manejo de información espacial y sus propiedades los tipos de propiedades que un SIG debe poder analizar tanto independiente como conjuntamente son tres: métricas, topológicas y atributivas.
- Spot.- (Satélite Probatorio pour l'Observation de la Terre) Satélite de percepción remota Francés.

T

- Tabla.- Objeto constituido por registros en una base de datos relacional.
- Teledetección.- Proceso de captura de información a distancia, sin contacto entre el aparato de medida y el objeto se aplica habitualmente en un sentido más restringido a las imágenes o datos captados mediante sensores transportados por aviones o satélites; es común la extensión del concepto al análisis y la interpretación de la información, y no sólo a su captura.
- Tesela.- Cada unidad elemental del modelo de datos raster puede considerarse sinónimo de celda, aunque esta última denominación suele reservarse para las teselas rectangulares.
- Tics.- Puntos de control. Puntos de ubicación conocida usados para definir la transformación de un sistema de referencia o proyección a otro.
- TIN.- Estructura vectorial usada para construir modelos digitales del terreno TIN son las siglas de Triangulated Irregular Network; se trata de una estructura de datos que representa el relieve mediante una red irregular de triángulos adosada al terreno, sin solapamientos y donde cada vértice se define por sus coordenadas espaciales (x, y, z).
- Topografía.- Arte y ciencia de representar las formas del terreno y los principales detalles naturales o artificiales del mismo; también se define como la descripción de las formas del terreno, es frecuente, aunque erróneo, considerar sinónimos topografía y altimetría.
- Topología.- Referencia a las propiedades no métricas de un mapa en el contexto de los SIG, topología hace referencia a las propiedades de vecindad o adyacencia, inclusión, conectividad y orden, es decir, propiedades no métricas y que permanecen invariables ante cambios morfológicos, de escala o de proyección se dice que una estructura de datos es 'topológica' cuando incluye información explícita sobre estas propiedades; en este caso, es posible realizar análisis y consultas "topológicas" sin necesidad de acudir a las tablas de coordenadas.
- Torsión.- Se dice cuando los ejes coordenados no son perfectamente ortogonales.
- Transformación.- Proceso de conversión de coordenadas desde un sistema cartesiano a otro típicamente, la digitalización de un mapa implica una transformación desde las coordenadas tablero a las coordenadas usadas en un sistema de proyección transformación afín: aquella donde se usan ecuaciones de primer grado que permiten exclusivamente rotaciones, traslaciones y cambios de escala; en esta transformación se conserva la propiedad de paralelismo.
- Transformación de Datum.- Procedimiento computacional para convertir las coordenadas de un punto del sistema definido con un datum al sistema definido con otro.
- Transformación Geométrica.- Georeferenciar una imagen digital.
- Transformación Lineal.- Escalamiento, rotación, reflexión, traslación etc.

U

- UTM.- Universal Transversa de Mercator (Proyección), la retícula UTM se extiende desde los 84 grados norte a los 80 grados sur. Se inicia en el meridiano 180, dividiéndose hacia el este en 60 zonas de 6 grados. Se emplea en mapas topográficos y en imágenes de satélite.

V

- Vector.- Entidad geométrica definida por una magnitud y un sentido un vector está formado por un par de puntos ordenados; el orden define el sentido del vector y la distancia entre origen y final su magnitud; si la magnitud es nula, el vector se reduce a un punto y el sentido queda indefinido.

- Vectorial.- Modelo de datos en el que la realidad se representa mediante vectores o estructuras de vectores, una estructura vectorial puede ser compleja: una cadena de vectores forma un arco; una cadena de arcos forma un anillo; uno o varios anillos definen un polígono se trata de un modelo de datos basado en objetos (geométricos) frente al modelo raster, basado en localizaciones.

- Vectorizar.- Transformación de una estructura raster en una vectorial suele aplicarse a la operación de "rescatar" líneas a partir de documentos escaneados (mapas o planos).

ANEXO D, Sistema de Posicionamiento Global

¿ QUE ES EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL ?

El Sistema de Posicionamiento Global GPS, es un método de posicionamiento y navegación basado en las señales transmitidas por la constelación de satélites NAVSTAR (siglas en inglés de Navigation Satellite Timing And Ranging), que son recibidas por receptores portátiles en Tierra. Las señales múltiples que se reciben simultáneamente provenientes de las sucesivas posiciones de los satélites, se utilizan para resolver las ambigüedades y permitir con esto, la determinación de la posición tridimensional del punto por conocer.

El GPS fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con el objetivo de mejorar la exactitud para la navegación terrestre, marina y aérea, para de esta manera proveer posicionamiento geográfico preciso en cualquier parte del mundo a usuarios en Tierra por medio del uso de receptores portátiles. De esta manera, el 22 de febrero de 1978 se puso en órbita el primero de los satélites NAVSTAR, fecha que marcó un nuevo hito en la historia de la Navegación y Geodesia en todo el mundo.

El proyecto GPS determinó en un principio el lanzamiento de un grupo de 10 satélites o bloque experimental, que tuvo como objetivo determinar la efectividad del sistema. Después de estos trabajos de investigación, se puso en marcha el bloque operativo, que el 26 de junio de 1993 colocó en órbita el satélite número 24, con lo cual quedó completa la constelación que permite un cubrimiento espacial de 24 horas en cualquier parte del mundo. Actualmente la precisión de un levantamiento GPS está cifrada en el rango de los 3-10 metros en tiempo real, esto es en el momento de la observación, sin embargo, la exactitud puede mejorar por medio de una técnica llamada corrección diferencial, la cual se comentará más adelante.

¿CÓMO FUNCIONA EL GPS ?

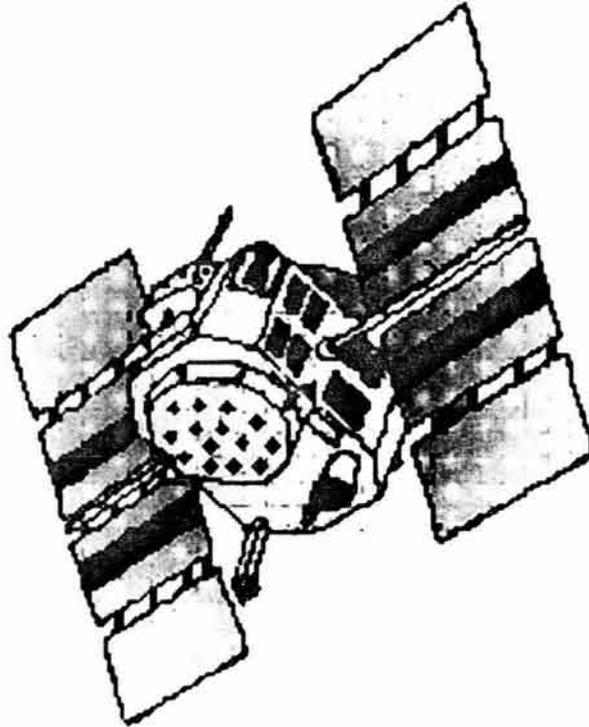
Saber que una señal electromagnética viaja a la velocidad de la luz ($C = 300,000 \text{ km/s}$) en el vacío es la clave para comprender el funcionamiento del GPS. Determinando cuánto tiempo (Δt) toma a la señal viajar desde el satélite al receptor, puede calcularse la distancia (d) que existe entre ambos. La posición del receptor en un sistema cartesiano X,Y podría calcularse por intersección cuando se tengan calculadas las distancias precisas hacia por lo menos tres satélites de posición conocida. En realidad el posicionamiento GPS no es tan sencillo, pero el planteamiento anterior anticipa la base teórica del sistema.

SUBSISTEMAS DEL GPS

El Sistema GPS está definido para su estudio por tres grandes Subsistemas: el Subsistema Satelitario también llamado Espacial, el Subsistema de Control y el Subsistema del Usuario.

SUBSISTEMA SATELITARIO

Este subsistema lo constituyen los 24 satélites operativos de la constelación NAVSTAR, los cuales se hallan distribuidos en 6 órbitas elípticas, cada una con 55 grados de inclinación con respecto al Ecuador, los satélites tienen un período de casi 12 horas y orbitan aproximadamente a 20,000 km. de altitud.



La configuración de la constelación asegura que, con pocas excepciones, siempre haya un mínimo de cuatro satélites visibles desde cualquier punto de la Tierra. Existen orbitando más de 24 satélites NAVSTAR (a la fecha 31 satélites), sin embargo sólo 24 operan en forma permanente; algunos ya terminaron su vida útil o entran en acción cuando los operativos presentan problemas.

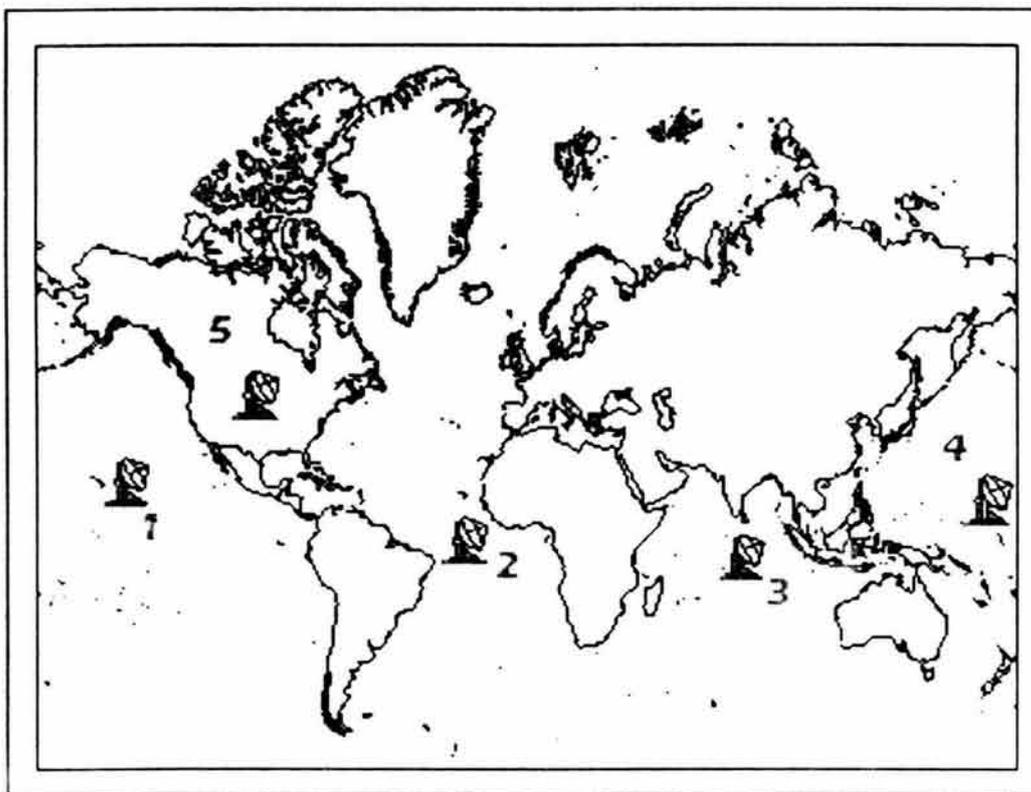
Estos satélites están equipados con relojes atómicos activados por osciladores de Cesio o Rubidio, que permiten al satélite transmitir ondas electromagnéticas en dos frecuencias distintas, L1 con $\nu_1 = 1,575.42$ MHz y L2 con $\nu_2 = 1,227.6$ MHz, indicando su tiempo exacto de transmisión, mismas que son captadas por los receptores utilizados para la observación. La ilustración anterior corresponde a un satélite NAVSTAR del primer bloque, cuentan con 7 m² de paneles solares y baterías de 27 V de Níquel-Cadmio. El peso aproximado de uno de estos satélites es de 450 kg.

Los satélites de GPS se diferencian por medio de un ruido específico en su señal, de modo que el receptor pueda identificarlos, dicho identificador se conoce como PRN y con este identificador son reportados en las pantallas de los receptores cuando se capta su señal.

Este subsistema consiste en una Estación Maestra de Control, localizada en Colorado Springs, California E.U., y cuatro estaciones más, distribuidas a lo largo del ecuador alrededor del mundo.

Cada estación de control rastrea los satélites GPS mediante radiotelescopios y envía la información hacia la estación maestra, donde se llevan a cabo complicados cálculos para determinar las efemérides precisas de cada satélite y el error de reloj correspondiente. La estación maestra genera la actualización de la información de navegación de cada satélite y la transmite a los satélites, esta información a su vez es retransmitida por los satélites como parte de su mensaje de navegación al Subsistema del Usuario. En el mensaje de navegación se encuentra la siguiente información:

- *ALMANAQUE DE LOS SATÉLITES
- * EFEMÉRIDES PRECISAS
- * PARÁMETROS DE LAS ÓRBITAS SATELITALES
- * DATOS DE LA CORRECCIÓN IONOSFÉRICA
- * DATOS DE CORRECCIÓN DEL RELOJ
- * ESTADO DE LOS SATÉLITES



Estaciones del Subsistema de Control:

1. Hawai
2. Ascensión
3. Diego García
4. Kwajalein
5. Colorado Springs

El Subsistema de Control es operado por las fuerzas armadas norteamericanas.

SUBSISTEMA DEL USUARIO

Este subsistema lo componemos todos los usuarios de señales de la constelación NAVSTAR, que como quedó establecido al inicio de esta exposición, no pagamos derechos por el uso de las mismas. La información que recibimos como usuarios GPS es el código de precisión "P" que está colocado parte en L1 y parte en L2, sin embargo, el algoritmo que permite decodificarlo en tiempo real no está disponible para los receptores que usamos los civiles. De este modo se tiene una distinción entre los usuarios que hacen utilidad del código C/A y aquellos cuyos receptores tienen acceso al código de precisión P, que como su nombre lo indica, permite un rango de precisión mucho más alto en tiempo real.

Todos los receptores obtienen la información que requieren del Subsistema Satelitario por medio del mensaje de navegación, entre otros el archivo de almanaque, que permite al receptor conocer la posición aproximada (efemérides de baja precisión) de los satélites en la bóveda celeste para lograr una rápida localización de los mismos y consecuentemente un rápido posicionamiento. Este archivo se actualiza cada vez que el receptor se enciende y capta la señal de al menos un satélite.

ESTRUCTURA DE LA SEÑAL

Corrección Diferencial

Las señales que emiten los satélites NAVSTAR son ondas electromagnéticas que entran en la banda L del espectro electromagnético, entre las microondas, las ondas de radio y de radar, se emiten como se mencionó anteriormente en dos frecuencias, L1 y L2 y moduladas por los códigos P y C/A de acuerdo con la siguiente tabla:

FRECUENCIA FUNDAMENTAL :	$f_0 = 10.23$	MHz
FRECUENCIAS PORTADORAS :	$L1 = 154 \times f_0 = 1,575.42$	MHz
	$L2 = 120 \times f_0 = 1,227.60$	MHz
CÓDIGO C/A	$C/A = f_0 / 10 = 1.023$	MHz
CÓDIGO P	$P = f_0 = 10.23$	MHz
CÓDIGO Y	Código P encriptado	

El código de acceso claro (C/A) está sobrepuesto en la banda L1 únicamente. El código de precisión (P) aparece sobrepuesto tanto en L1 como en L2.

La función de los códigos es por un lado establecer una diferencia entre los usuarios, pero primordialmente sirven como marcas de tiempo. Los receptores GPS tienen relojes que aunque no son tan precisos, los consideraremos por el momento como "sincronizados" con los relojes de los satélites.

La parte más difícil de medir el tiempo que toma a las señales viajar desde el satélite al receptor es determinar cuando la señal salió del satélite. El sistema GPS logra esto por medio de la sincronización de los satélites y los receptores GPS, para generar el mismo código al mismo tiempo, es decir, el receptor genera una réplica del código generado por el satélite, una vez que el receptor recibe la señal del satélite, compara el código que acaba de recibir con un código idéntico generado por el propio receptor.

La diferencia en tiempo entre una sección particular del código recibido y el generado por el receptor es el tiempo que requirió la señal en su viaje (Δt). El dato (Δt) al multiplicarse por la velocidad de la luz C , resulta en una distancia, $d = C * (\Delta t)$, la distancia a la que se encuentra el satélite con relación al receptor.

Ahora bien, todo el sistema GPS se apoya en un modelo geométrico denominado sistema geocéntrico cartesiano, que es un dátum geodésico particular, el WGS84 con un elipsoide específico y cuyo origen hipotético se encuentra en el centro de masa de la Tierra, de manera que los satélites NAVSTAR tienen coordenadas X,Y,Z en este sistema, calculadas por parte del subsistema de control y retransmitidas continuamente como efemérides a los usuarios en el mensaje de navegación.

Si el receptor calcula la "distancia" a varios satélites cuya posición es conocida, por simple geometría puede calcular sus propias coordenadas en el mismo sistema, sin embargo, hay una serie de simplificaciones que ya no son sostenibles, por un lado la teoría de la relatividad entra en juego, porque la pretendida simultaneidad en la generación del código no existe, el reloj del satélite se mueve con relación al reloj del receptor y se encuentra en un sitio donde la fuerza de atracción gravitacional es mucho más débil, condiciones ambas que implican una variación en la medida del tiempo por parte del reloj que se encuentra en el espacio, aun en el caso de que ambos relojes fueran atómicos y se sincronizaran perfectamente en Tierra antes de poner uno de ellos en órbita, bastarían solo unos días para que el error por sincronización de relojes impidiera el funcionamiento del sistema, una centésima de segundo implica un error de 3,000 km. en el cálculo de la distancia satélite- receptor :

$$d = (300,000 \text{ km/s})(10^{-2}\text{s}) = 3,000 \text{ km.}$$

Esta operación muestra el grado de precisión que se requiere en la medida del tiempo, de modo que el subsistema de control debe calcular las correcciones necesarias de acuerdo con la teoría de la relatividad, al nivel de nanosegundos 10^{-9} s para permitir una adecuada comparación del tiempo.

Las atenuaciones que sufre la señal al atravesar la ionosfera, implican que la distancia así calculada no corresponda a la precisión requerida y por lo cual se le denomina pseudodistancia y se indicará como Pd en este apunte. Las siguientes deducciones son más realistas, en ellas el cálculo de la distancia satélite - receptor se deduce por principio desde el punto de vista geométrico, como la distancia entre dos puntos en un sistema cartesiano tridimensional y posteriormente como una magnitud física a partir de parámetros medidos como son la comparación de fases (interferometría) entre el código generado en el satélite y en el receptor para calcular el tiempo de viaje de la señal, multiplicando por la velocidad de la luz y agregando la corrección en el reloj del receptor

Finalmente las ecuaciones se igualen puesto que se refieren a la misma variable, sin embargo el objetivo final no es calcular la distancia entre el satélite y el receptor, sino las coordenadas del receptor en el sistema geocéntrico cartesiano, lo cual se logra planteando el mismo procedimiento a otros satélites de la constelación NAVSTAR, hasta obtener un sistema determinado, de igual número de ecuaciones que de incógnitas.

$$\text{Geoméricamente: } d1 = (X1-XP)^2 + (Y1-YP)^2 + (Z1-ZP)^2 \text{_____ (I)}$$

Desde el punto de vista físico, el receptor calcula una pseudodistancia, multiplicando el tiempo de viaje de la señal (Δt_1) por la velocidad de la luz "C".

$$Pd_1 = C * (\Delta t_1) \quad (II)$$

Pero en el cálculo de este valor, están implicados varios factores, la distancia entre el satélite y el receptor, la corrección del reloj del satélite, la corrección del reloj del receptor, el retraso atmosférico y el ruido en la señal. La corrección en el reloj del satélite, los retrasos debidos a la atmósfera y el ruido en la señal, son compensados por la incorporación de correcciones relativistas y determinísticas, antes de incluirlas en el cálculo de la posición; pero la corrección en el reloj del receptor es una variable más a determinar, que designaremos en esta síntesis como "Cr". De modo que la distancia real satélite (S1) - receptor (P), podrá calcularse en términos de pseudodistancia y corrección de reloj como:

$$d_1 = Pd_1 - Cr \quad (III)$$

Sustituyendo la ecuación (III) en la ecuación (I) podemos plantear la siguiente igualdad:

$$(X_1 - X_P)^2 + (Y_1 - Y_P)^2 + (Z_1 - Z_P)^2 = (Pd_1 - Cr)^2 \quad (IV)$$

En esta expresión las incógnitas son las tres coordenadas espaciales del sitio, más la corrección del reloj en el receptor: X_P, Y_P, Z_P, Cr .

Para determinar estas cuatro variables, habrá que resolver algebraicamente un sistema de igual número de ecuaciones; para plantear dicho sistema es necesario contar con la señal de por lo menos cuatro satélites en el receptor:

$$\begin{aligned} (X_1 - X_P)^2 + (Y_1 - Y_P)^2 + (Z_1 - Z_P)^2 &= (Pd_1 - Cr)^2 \\ (X_2 - X_P)^2 + (Y_2 - Y_P)^2 + (Z_2 - Z_P)^2 &= (Pd_2 - Cr)^2 \\ (X_3 - X_P)^2 + (Y_3 - Y_P)^2 + (Z_3 - Z_P)^2 &= (Pd_3 - Cr)^2 \\ (X_4 - X_P)^2 + (Y_4 - Y_P)^2 + (Z_4 - Z_P)^2 &= (Pd_4 - Cr)^2 \end{aligned}$$

Una vez que el receptor "engancha" la señal de al menos cuatro satélites, calculará sus correspondientes coordenadas X_P, Y_P, Z_P en el sistema geocéntrico cartesiano y mediante un algoritmo matemático, las transformará en coordenadas geodésicas (Φ, λ, h), como se muestra en la siguiente figura:

$P(X_P, Y_P, Z_P)$ (flecha) $P(\Phi, \lambda, h)$; el receptor transforma las coordenadas cartesianas en geodésicas, latitud (Φ), longitud (λ) y altura sobre el elipsoide de referencia (h).

Hasta ahora se ha tratado de explicar cómo es que un receptor GPS calcula su posición con base en las coordenadas que recibe de los satélites de la constelación NAVSTAR; cuando el caso es que sólo un receptor está trabajando independientemente, el método se denomina posicionamiento absoluto.

La precisión de este levantamiento es aleatoria, esta condición se expresa en los receptores mediante un valor adimensional llamado PDOP, que es inversamente proporcional a la calidad del posicionamiento. El posicionamiento autónomo como tal sirve para navegación terrestre, marítima o aérea, para trabajos de reconocimiento ya que actualmente su exactitud se encuentra en el rango de los 3 a 10 m.

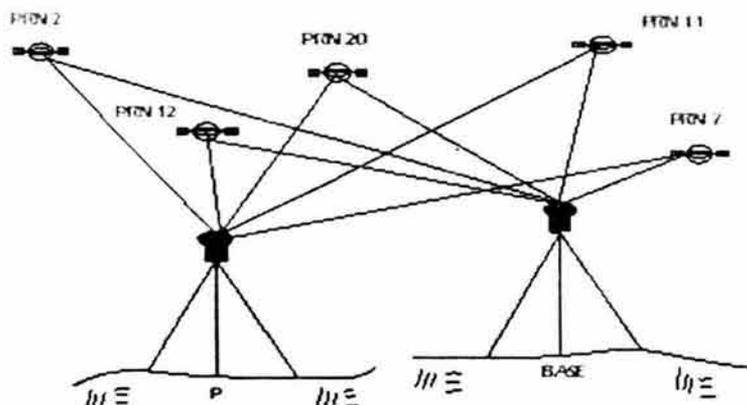
Sin embargo este rango de precisión no es suficiente para otro tipo de aplicaciones. Cuando se requiere más precisión en el cálculo de las coordenadas del receptor, el procedimiento que se aplica se llama posicionamiento relativo o diferencial, y consiste básicamente en colocar un receptor en un punto de control, es decir un sitio de coordenadas previamente determinadas con la precisión que se espera obtener en el levantamiento de los demás puntos, y el otro receptor en el sitio cuyas coordenadas se desea calcular.

Los archivos de ambos receptores se almacenan en la memoria interna de los mismos, posteriormente en un programa de "post-proceso" en PC, se introducen las coordenadas de la base y con las observaciones hechas en este sitio, el programa calcula una serie de parámetros llamados "corrección diferencial" que aplica a las observaciones realizadas con el otro receptor, mejorando así la precisión de las coordenadas.

El receptor que se ubica en el punto de control se denomina comúnmente "base" mientras que el o los otros receptores que se ubicaran en los puntos de coordenadas por determinar se denominan "remotos"; tanto la base como los receptores remotos deben observar los mismos satélites NAVSTAR durante un lapso común que está en función directa de la distancia que existe entre ellos.

Los receptores de una sola banda L1, no deben separarse más de 40 km., y la precisión que se puede esperar en el post-proceso es de 1m a 5m. Este tipo de posicionamiento es útil para rastreo de vehículos, captura de información para GIS, localización de elementos en cartografía escala 1:5,000 etc. Si los receptores son geodésicos (de doble banda L1 y L2 con 12 canales), pueden separarse hasta 350 km, y resolver el vector que los separa con precisión de 5 mm + 1 ppm, es decir de 5mm, más 1mm por cada km.

Hay que aclarar aquí que estos receptores por su tecnología son costosos, ya que los programas de post-proceso son más sofisticados y que las sesiones de medición son relativamente largas, sin embargo, la precisión que alcanzan no se puede obtener por métodos topográficos, especialmente por las distancias tan grandes que pueden medir. Comúnmente se utiliza este posicionamiento para Geodesia, Topografía, Control Terrestre, Fotogrametría y otras aplicaciones que requieren Alta Precisión.



ANEXO B, Sistemas de Información Geográfica

1. Reseña histórica

El primer Sistema de Información Geográfica, SIG, fue el Canadian Geographical System; su creación inició en 1964; 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:

- 1967. Land Use and Natural Resources Information Systems, desarrollado en Nueva York
- 1969. Minnesota Land Management Information System
- 1971. Polygon Information Overlay System
- 1972. The Oak Ridge Modeling Information System
- 1975. Storage and Retrieval of Data for Water Quality Control System

En la década de los setentas construcción de un SIG estaba ligada a necesidades muy concretas de Instituciones Públicas. Dichos sistemas eran instalados en grandes computadoras y su finalidad principal era el inventario de recursos en especial de uso de suelo, aunque con pocas capacidades analíticas.

En México, el primer Sistema de Información Geográfica, "Sistema Geomunicipal de Información" fue un sistema de punta tecnológica; lo realizó el Centro de Procesamiento Arturo Rosenblueth (CPAR) perteneciente a la Secretaría de Educación Pública a principios de la década de los setentas. Este sistema se depuró hasta llegar al Sistema de Información para la Planeación Educativa; este sistema cuenta con la cartografía de todo el país a nivel municipal, las variables de educación y censal con que cuenta la SEP.

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

Este nuevo centro también ha elaborado un plan de investigación con varias líneas como 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 Centro Nacional Holandés para SIG, con finalidades semejantes a las citadas anteriormente.

Pronto los SIG se comienzan a utilizar en cualquier disciplina que necesite la combinación de planos cartográficos y bases de datos como, en Ingeniería Civil: diseño de carreteras, presas y embalses, estudios medioambientales, estudios socioeconómicos y demográficos, planificación de líneas de comunicación, ordenación del territorio, estudios geológicos y geofísicos, prospección y explotación de minas, entre otros.

Los años noventa se caracterizan por la madurez en el uso de estas tecnologías en los ámbitos tradicionales mencionados y por su expansión.

Con el transcurso del tiempo se ha logrado desarrollar un trabajo multidisciplinario y es por esta razón que ha sido posible pensar en utilizar los Sistemas de Información Geográfica.

2. Importancia y definición de los Sistemas de Información Geográfica, SIG

Vivimos en un mundo básicamente espacial y temporal por naturaleza y estamos acostumbrados en nuestra rutina diaria a interactuar con complejos conceptos espaciales. Vivimos en un domicilio, trabajamos en otros y nos desenvolvemos en muchas zonas como comercios, instituciones y las casas de las amistades, a estos tenemos asociados direcciones, distancias, posiciones relativas (atrás del metro "x", a dos calles de la Plaza "y", etc.) y muchos otros conceptos espaciales que manejamos en forma intuitiva.

Es por eso que muchos procesos de importancia involucrados en la toma de decisiones, deben estar referidos espacialmente. Investigadores en Geografía y otras disciplinas, por muchos años tuvieron problemas para relacionar el análisis y manipulación de entidades en un marco de trabajo en el espacio-tiempo. El medio más común para almacenar y presentar esta información fue tradicionalmente el mapa.

Pero la incorporación de los sistemas de cómputo y el avance conceptual de otras áreas facilitaron el problema del almacenamiento, manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos espaciales.

Un Sistema de Información Geográfica trata de representar un fenómeno real para producir información necesaria para los tomadores de decisiones que pueden tener influencia en el mundo real. La información es básica en muchos procesos de la toma de decisiones: Política, Administración, e Ingeniería y otras.

La cantidad de información que puede ser observada y analizada en un mapa, es equiparable a muchos libros de textos de explicación y a muchos listados extensos de datos, de ahí la relevancia de los SIG como tecnología de la información geográfica y, el por qué hoy en día son usados en tan diversas áreas: cartografía, negocios, planeación, manejo ambiental, transporte, telecomunicaciones, turismo, seguridad, salud, entre otras.

Con frecuencia, los SIG son entendidos únicamente como unas herramientas tecnológicas que permiten realizar más rápidamente algunos procesos. Sin embargo, los SIG son parte de una red contemporánea de conocimiento, ideología y práctica, que define patrones sociales y medioambientales dentro de un amplio significado. Esto implica nuevas formas de pensar, actuar y escribir. De allí la importancia de que sus elementos principales sean conocidos por los profesionales que se relacionan con el manejo de los recursos naturales. Los SIG quedan definidos de acuerdo con:

- El tipo de información que manejan; se define como una base de datos que contiene información espacial (información distribuida en un área o superficie de un espacio geográfico).
- Sus funciones y capacidades; se define como un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, manejo, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente georeferenciados para resolver problemas.
- Su finalidad se concibe como un modelo del mundo real, organizado a partir de capas o estratos de datos clasificados por temas (Fig 1), cuyos valores se pueden estimar para cualquier espacio geográfico. En cada capa o estrato los datos tienen las mismas componentes conceptuales.

Las características geográficas de un SIG se describen comúnmente por objetos vistos tanto en el medio natural (roca, suelo, clima, atmósfera, flora, fauna, etc.) como en el que ha sido modificado por el hombre (redes de agua potable y alcantarillado, catastro, líneas de transmisión etc.). Dichas características están asociadas a un marco de referencia geográfico y son representadas en formato digital en mapas mediante objetos geográficos abstractos (puntos, líneas o áreas diferenciados por colores, símbolos o anotaciones, explicadas por leyendas o textos descriptivos).

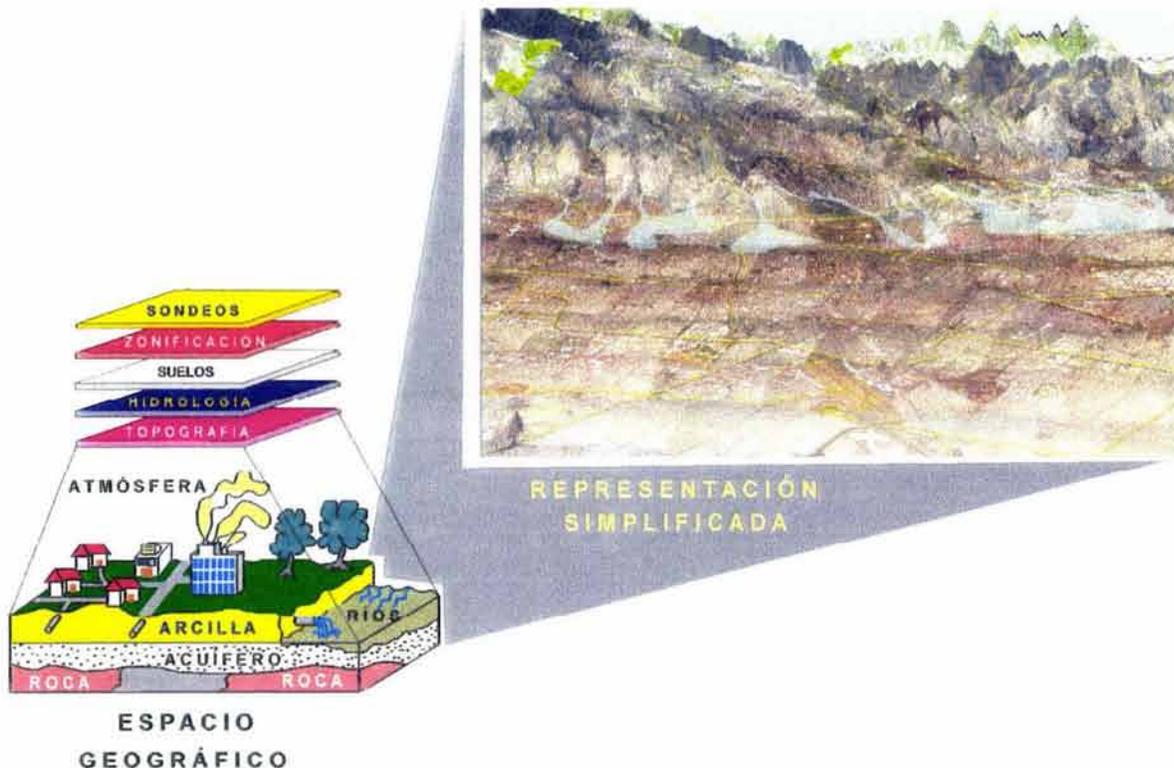


Fig 1 Modelo del mundo real, organizado a partir de capas o estratos de información

Un SIG relaciona datos espaciales y de atributo para el soporte de visualización de mapas con el propósito de permitir la actualización, la consulta y el análisis. Existen dos tipos de datos geográficos y se definen como:

Los datos espaciales, son aquellos que se encuentran distribuidos en un área o superficie y que proporcionan la localización de los elementos geográficos bajo un sistema de referencia geográfico de coordenadas x, y. Se traducen en objetos simples como puntos, líneas, áreas, mallas, etc. Por ejemplo, un sondeo está representado por un punto, una línea de transmisión por una línea, un predio por una área, etc.

Los datos de atributo, son registros que sirven para describir a los elementos geográficos; por ejemplo, el nombre del ejecutor de un sondeo, la longitud de un tramo de cableado, el nombre del propietario de un predio, etc.

Otra definición importante y que deja ver en claro lo que 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 así como un manejo ágil, eficiente y rápido de grandes volúmenes de datos que son necesarios para el manejo cuantitativo del problema descrito 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. La utilización de un SIG facilita la obtención, almacenamiento, manipulación, análisis y representación de la información requerida. 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 (ver Fig 2) tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas incluidos en el sistema de información.

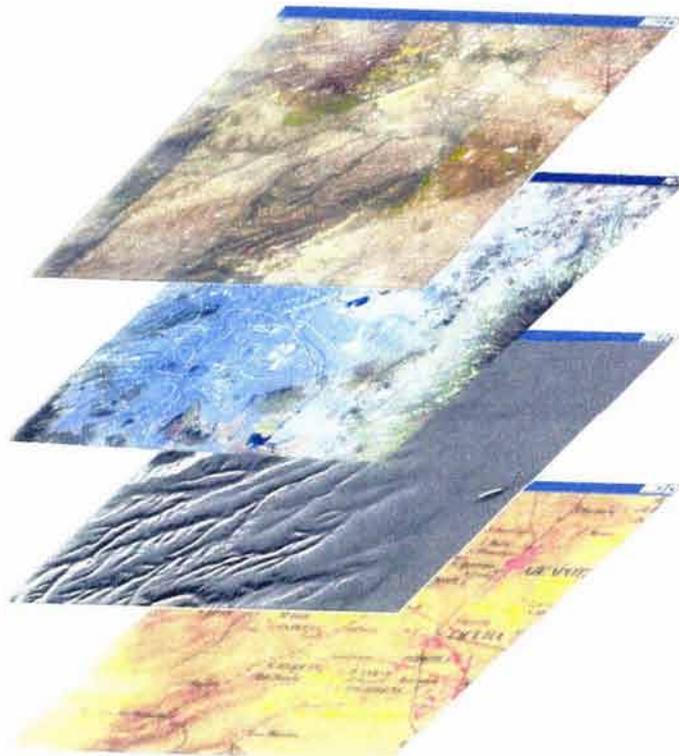


Fig 2 Conjunto de mapas de la misma porción de un territorio

3 Elementos del SIG

Un SIG está formado por cuatro elementos y cada uno de esos componentes cumple con una función para que exista entre ellos una interacción. Es decir, éstos conforman la información para que sea procesada. A continuación se describen dichos componentes:

a) **Hardware:** Es el equipo de cómputo con el que opera un SIG. Actualmente el software de estos sistemas se ha adaptado a diversos tipos de hardware. Para las consultas espaciales el hardware es útil para efectuar el procesamiento de las operaciones que con base a algoritmos solucionan las relaciones entre geometrías (Fig 3).



Fig 3 Hardware

b) **Software:** Proporciona las herramientas y funciones necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica; para ello se necesitan de elementos principales de software los cuales son:

Herramientas para la entrada y manipulación de información geográfica.

Un sistema de administración de base de datos (DBMS Data Base Management System).

Herramientas que soportan consultas, análisis y visualización de elementos geográficos.

Una interfaz gráfica de usuario (GUI Graphical User Interface) de manera que facilite el acceso a las herramientas anteriormente mencionadas.

En éste se implementan aplicaciones como las consultas espaciales, los lenguajes visuales para consultas espacio-temporales como lo refiere y, en el caso de las consultas espaciales, poder utilizar la tercera dimensión de los objetos (Fig 4)



Fig 4 Software para el diseño de un SIG

c) Datos: Se refiere al elemento principal para lograr una correcta información. Es decir, una vez conocido el objeto del modelo del mundo real, se identifican las propiedades que lo forman, por ejemplo, sus atributos que se refieren a los elementos descriptivos y el tipo de geometría como el elemento espacial. En las consultas espaciales es necesario conocer el tipo de geometría entre los objetos del mundo real que se relacionan topológicamente.

Recursos humanos: Son las personas que se encargan de administrar el sistema así como de desarrollar un proyecto basado en el mundo real, entre los que se involucran analistas, desarrolladores, administradores, programadores y usuarios. Por ejemplo, para las consultas espaciales, esas personas se refieren a quienes proporcionan la información fuente, realizan la edición de la información, implementan los algoritmos útiles para resolver las consultas espaciales y los usuarios finales que se favorecen de la aplicación o proyecto elaborado. Los componentes mencionados tienen la finalidad para establecer la estructura de un SIG y, en concordancia con ello, implementar aplicaciones que apoyen la toma de decisiones.

4 Modelos vectoriales y Raster

Un sistema de información geográfica trabaja con dos tipos fundamentales de modelos geográficos el "vector" y el "raster", (Fig 5). 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. Y 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. En la actualidad, los SIG que mejor funcionan son aquellos que presentan ambos modelos para sus análisis.

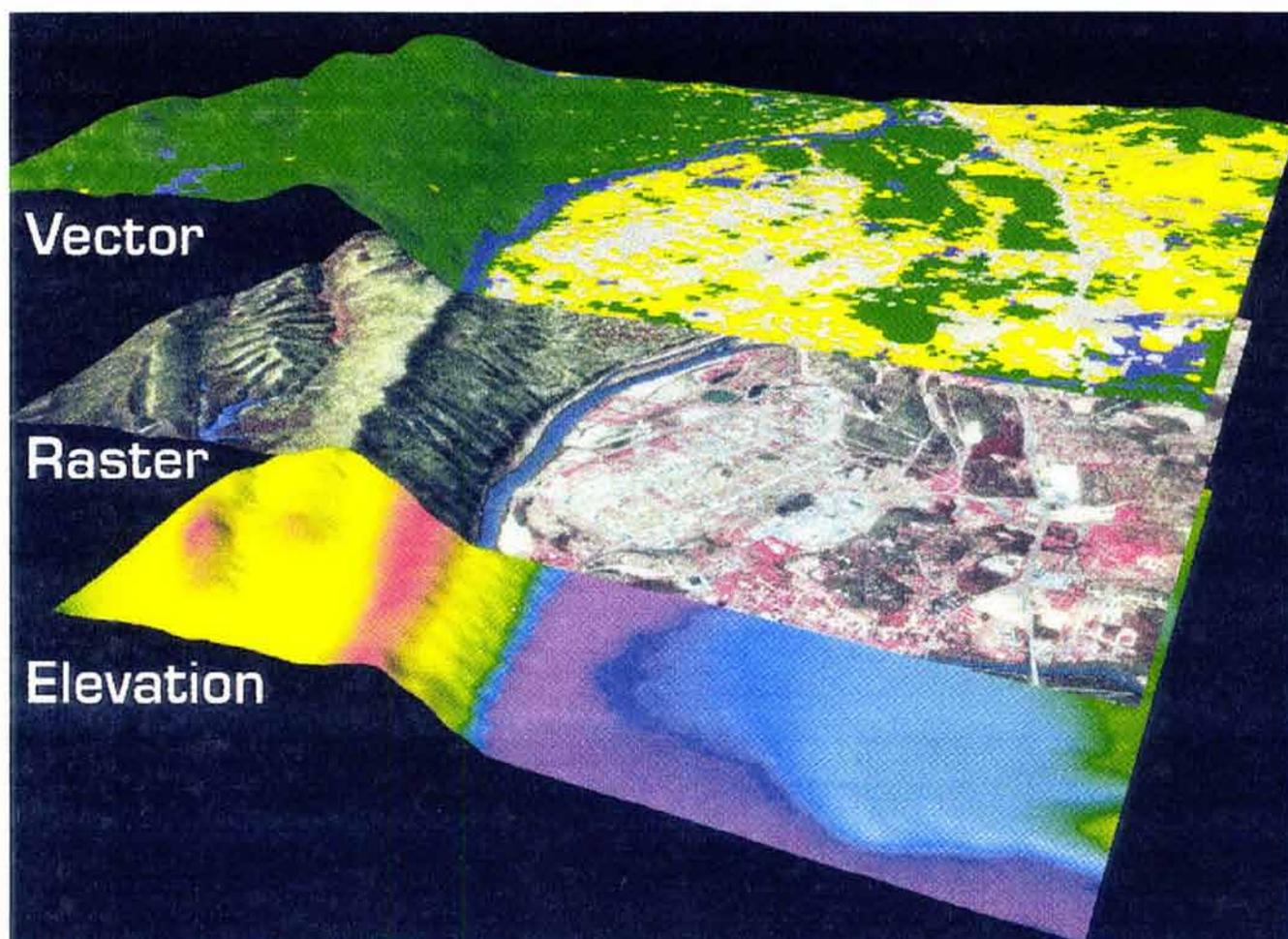


Fig 5 Modelos raster y vector en un SIG.

5 Funciones principales de un SIG

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 (especialmente en forma de mapas) al formato digital que puede manejar la computadora. Esta conversión se debe realizar manteniendo todas las características iniciales de datos.

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. Se representan 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.

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 los elementos más característicos 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.

ANEXO C, Percepción Remota o Teledetección

1. PERCEPCIÓN REMOTA

1.1 Antecedentes

Con el inicio del programa de exploración espacial a principios de los sesenta, en los Estados Unidos se incrementa el desarrollo tecnológico para la obtención de información sobre el medio terrestre y sus recursos, con el uso de fotografías y otras imágenes tomadas desde satélites. La instalación de sensores remotos en el espacio por parte de la NASA, para hacer observaciones terrestres y gracias a los resultados del programa espacial, se amplía el propósito de obtener información que sirva de base a estudios sobre geografía, geología, recursos minerales, hidráulicos e hidrológicos. Se reafirma así el valor de la percepción remota como medio de obtención de datos para el estudio de la superficie terrestre.

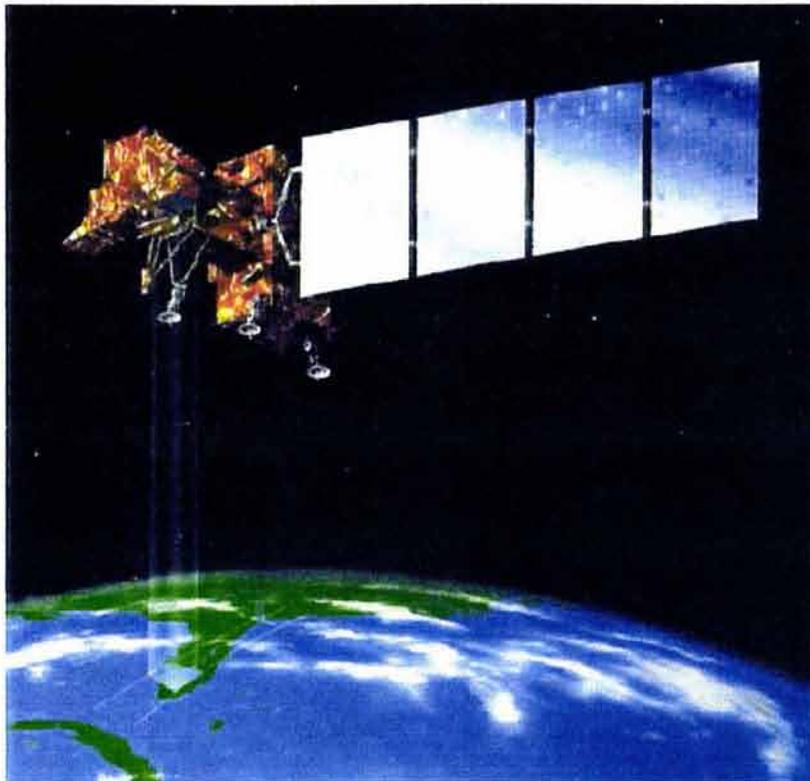


Fig 1

El avance tecnológico satelital se desarrolla inicialmente en dos áreas: satélites meteorológicos y satélites de multimisión, que obtienen datos para la observación y análisis de la actividad terrestre, como la evolución geológica, la actividad sísmica, forestal, vegetal y en general de recursos naturales. Actualmente se desarrollan y ponen en órbita satélites geodésicos que envían información a las estaciones receptoras en la Tierra y los que incluyen sistemas de radar. Con el lanzamiento de cada nuevo satélite, las capacidades sensoriales para recolección de datos se perfeccionan cada vez más.

Por otra parte, el Geological Survey de los Estados Unidos establece el Programa Satelital de Observación de los Recursos Terrestres EROS; el cual, contribuye al desarrollo y operación del satélite conocido ahora como LANDSAT 1, el cual es el primero que se diseña específicamente para recolectar información de la superficie y los recursos terrestres.

El LANDSAT 1 lleva un escáner de cuatro canales (MSS), un sistema de recolección de datos y dos grabadoras de video. El equipo se modifica conforme se lanzan otros dos satélites. En la década de los ochenta se superan algunas limitaciones de los primeros LANDSAT, y se diseñan satélites que utilizan un escáner multiespectral más avanzado, además del mapeador temático (TM), el cual proporciona señales únicas para diferentes rasgos de los recursos naturales conforme a su respuesta espectral, facilitando la producción de cartas temáticas. Las imágenes se obtienen desde una altura de 705 kilómetros sobre la superficie terrestre.

En 1986, Francia en cooperación con Bélgica y Suecia, lanzan el primer satélite SPOT. Este es un satélite de multimisión que obtiene imágenes de alta resolución espacial a una altura de 832 kilómetros. Actualmente se dispone de tres de estos satélites en órbita.

En cambio, en la República Popular de China anuncia que está trabajando en la construcción de un escáner multiespectral de once bandas; la Agencia Espacial Europea (ESA) desarrolla en 1982 el vehículo de lanzamiento ARIANE y diseña uno para observaciones oceánicas; la Agencia de los Países Bajos para los Programas Aeroespaciales (NIRV), en cooperación con Indonesia, planea un satélite para estudiar los recursos tropicales terrestres; la Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO) desarrolla el satélite de observación terrestre BHASKARA, puesto en órbita por un vehículo de la URSS. En 1995, Canadá lanza el RADARSAT, sistema diseñado para cubrir aplicaciones en geología, hidrología y agricultura con tecnología de radar.

En nuestro país, el uso de imágenes de satélite para diversas aplicaciones se inicia en la segunda mitad de los años 70. Por la amplia gama de posibilidades de explotación de la información que proporciona, su utilización en la actividad geográfica y cartográfica se acrecienta con el tiempo.

1.2 Definición de Percepción Remota.

La Percepción Remota (Remote Sensing) o Teledetección puede definirse como la ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto.

La Percepción Remota comenzó hace unos 600 millones de años, cuando alguna forma inferior de vida animal diferenció algunas de sus células, volviéndolas fotosensibles. También durante millones de años dicho rudimento fotosensible evolucionó convirtiéndose en un poderoso y sofisticado sensor, el ojo humano. Este tuvo un imitador mecánico, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace algo más de un siglo y que fue muy mejorada durante la década de 1930 para ser aplicada a la fotografía aérea. La Segunda Guerra Mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo, el "salto cuántico" en esta disciplina se produjo en la década de 1960 cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas y los sensores electrónicos multiespectrales, acoplados a computadoras, reemplazaron las cámaras fotográficas.

El esquema operativo de un satélite de observación se representa en forma muy simplificada, en la figura 2. Los objetos terrestres, iluminados por la radiación solar, reflejan ésta luego de introducir en ella modificaciones inducidas por la misma estructura y composición de dichos objetos.

La radiación reflejada es capturada por los sensores del satélite, siendo parcialmente procesada a bordo de éste y retransmitida a estaciones receptoras terrestres para su posterior procesamiento y análisis (fuente emisora, sensor, cerebro).



Fig 2

1.3 El Procesamiento de Imágenes de Satélite.

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 elemento de escena, pixel) cuyas dimensiones en el terreno definen la resolución espacial de la imagen, 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.

El procesamiento de imágenes consiste en manipular los valores de reflectancia en tres etapas relacionadas entre sí, el pre-procesamiento que implica las correcciones radiométricas y geométricas, el realce o mejoramiento y la clasificación.

Una parte importante del pre-procesamiento es la georreferenciación o asignación de coordenadas a la imagen. Las coordenadas asignadas a la imagen son el medio de comunicación con el resto de la información espacial que integra el sistema.

El realce consiste en aplicar una serie de técnicas para mejorar la apariencia visual y facilitar tanto la interpretación visual cuanto la toma de muestras para la clasificación espectral. Dos de los procesos más comunes son el estiramiento del histograma y el filtrado de imágenes.

La clasificación multispectral consiste en el agrupamiento de objetos con similares respuestas espectrales. Una clasificación espectral 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.

Una clasificación espectral puede realizarse tanto en forma manual como automática- asistida por computadora. En el ámbito digital, y de acuerdo con la forma en que se construyan las clases espectrales, pueden realizarse clasificaciones supervisadas, no supervisadas o una combinación de ambas, denominada híbrida

En el primer caso, se toman muestras representativas de objetos conocidos, presentes en la imagen, tratando de cubrir toda la variabilidad espectral de la escena. En el segundo caso, las muestras se generan en forma automática, mediante técnicas de agrupamiento

Las clasificaciones espectrales arrojan diferentes resultados en cuanto a la exactitud con que consiguen reproducir la realidad que modelan. El cuadro siguiente muestra las Principales características de algunos sensores remotos

Sensor	Banda	Longitud de onda μ	Resolución (m)
Lansat MSS	4	0.5-0.6 (verde)	79
	5	0.6-0.7 (rojo)	79
	6	0.7-0.8(infrarrojo cercano)	79
	7	0.8-1.1 (infrarrojo cercano)	79
Lansat Mapeador Temático	1	0.45-0.52 (azul)	30
	2	0.52-0.60 (verde)	30
	3	0.63-0.69 (rojo)	30
	4	0.76-0.90 (infrarrojo cercano)	30
	5	1.55-1.75 (infrarrojo medio)	30
	6	10.4-12.5(infrarrojo termal)	120
	7	2.08-2.35(infrarrojo medio)	30
SPOT MSS	1	0.50-0.59 (verde)	20
	2	0.61-0.68 (rojo)	20
	3	0.79-0.89 (infrarrojo cercano)	20
SPOT Pancromático	1	0.51-0.73 (visible)	10

1.4 Aplicaciones de la Percepción Remota

Las técnicas automatizadas de percepción remota, en especial la clasificación espectral han contribuido sustancialmente en la realización de inventarios, cartografía y monitoreo de recursos y riesgos naturales. La clasificación espectral se ha utilizado en la detección y cuantificación de terrenos erosionados, con el supuesto de que estos constituyen una clase espectral identificable

En México se han utilizado imágenes de satélite para confeccionar mapas de uso de suelo y de vegetación en los estados de la Republica. Asimismo, se han realizado en forma sistemática inventarios de terrenos erosionados. Estos trabajos fueron elaborados a partir de imágenes del barredor multiespectral Lansat

ANEXO E, Modelos Digitales de Terreno, MDT.

1. ANTECEDENTES DE LOS MDT

Las Ciencias de la Tierra se han visto sometidas a una serie de cambios que han permitido nuevas formas de trabajo diferentes a las tradicionales.

El tratamiento de los datos geográficos es un caso en el que la evolución ha sido especialmente llamativa. A la función histórica de los mapas, como una referencia para los desplazamientos terrestres y marítimos, se ha agregado recientemente la de servir de documento básico en la planificación territorial y, de forma más general, en los estudios. En este sentido, las concepciones tradicionales de lo que es la cartografía y de las formas de trabajo que se apoyan en ella se han visto profundamente transformadas:

El tratamiento manual de la información cartográfica se ha complementado con la integración de la misma en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), definidos como sistemas informáticos diseñados para el almacenamiento, manejo y análisis de información espacial (Berry, 1987; 1405).

Los modelos digitales del terreno deben acotarse apropiadamente, para ello pasaremos a exponer las características que los definen y separan del resto de la información territorial.

El término Digital Terrain Model tiene aparentemente su origen en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachussets en la década de los años 50. En el trabajo pionero de Miller y Laflamme (1958) se establecen ya los primeros principios del uso de los Modelos Digitales para el tratamiento de problemas científicos y militares.

La definición del MDT que se menciona en sus trabajos es una representación estadística de la superficie continua del terreno, para grandes volúmenes de puntos con coordenadas X, Y y Z conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario.

La creación o invención del MDT fue acelerar el diseño de carreteras mediante el tratamiento digital de datos del terreno adquiridos por fotogrametría; planteándose un conjunto de algoritmos para la obtención de pendientes, áreas, etc.

Un obstáculo crítico fue el manejo de grandes volúmenes de puntos, debido a la escasa capacidad de almacenamiento de las computadoras de esa generación y para eliminar dicho obstáculo se propuso el uso de ecuaciones polinómicas para almacenar segmentos de los perfiles topográficos. Esta técnica no ha sido abandonada en la actualidad, aunque se han propuesto versiones algo más sofisticadas (Walton, 1989).

Los programas de uso más general para el tratamiento de los MDT tuvieron que esperar varios años más y, habitualmente, surgieron en un contexto SIG que incorporaba la información topográfica para el manejo de cartografía digital en términos más generales.

Probablemente el trabajo de mayor importancia fue desarrollado por el Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis que, en 1967, presentó el SYMAP; este conjunto de programas de manejo de cartografía digital incorporaba, entre otros, algoritmos de interpolación que permitían la generación de mapas de isolíneas a partir de puntos de altitud distribuidos irregularmente.

SYMAP constituyó una de las primeras demostraciones de la posibilidad de manejo de la información espacial por medios informáticos.

Posteriormente surgieron programas como el SYMVU, destinado a generar simulaciones 3D de los datos procedentes del SYMAP, o el GRID, que manejaba información en formato matricial y, en general, un número considerable de aplicaciones con bases muy diferentes.

Sólo una cobertura topográfica global y utilizada de forma general podía garantizar cierta convergencia en los métodos de trabajo con los MDT. Esto no se consigue hasta la década de los años 80 en los EE.UU., con los trabajos del U.S. Geological Survey, que estandariza la información de un modelo digital de elevaciones para los Estados Unidos

El USGS-DEM, en formato matricial. Puede observarse el uso del término "digital elevation model, DEM", eliminando la ambigüedad del "digital terrain model, DTM" de los trabajos previos.

Los programas de manejo de modelos digitales están en la actualidad en pleno desarrollo, aunque aún intentando resolver satisfactoriamente problemas básicos. Entre ellos pueden citarse la estructuración idónea de los datos (buscando un compromiso entre el tamaño y la facilidad de operación), la compatibilidad de diferentes estructuras entre sí, la búsqueda de algoritmos eficientes para generar nueva información y el intercambio de ésta entre sistemas diferentes.

En Menéndez Díaz (1992; 22-34) puede encontrarse una revisión histórica más completa que, aunque referida al ámbito más amplio de los SIG, presenta datos de interés sobre el desarrollo histórico de los MDT.

1.2 Concepto de modelo

La palabra modelo, empleada en los ámbitos geográficos, lo define como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988; 111). La definición se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original y se ve representado por otro objeto de menor complejidad.

Los modelos se construyen estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes.

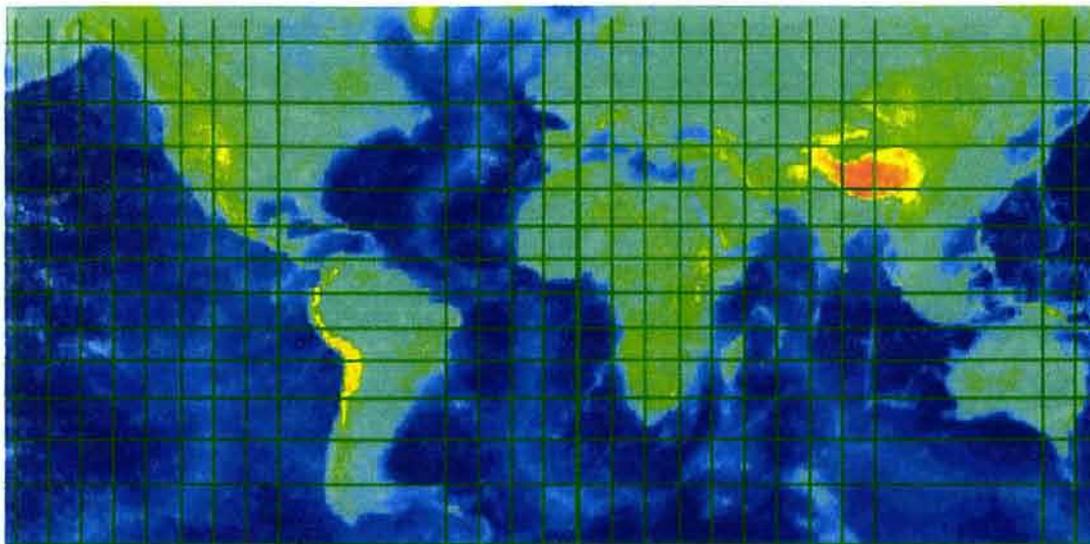
Turner (1970; 364) distingue tres tipos básicos: Los modelos icónicos, analógicos y los simbólicos.

En los modelos icónicos, la relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas. Una maqueta es un modelo del objeto representado donde la relación establecida es fundamentalmente una reducción de escala.



En un modelo icónico se conservan las proporciones del objeto real mediante una reducción de escala y una selección de las propiedades representadas

Los modelos análogos poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser una réplica morfológica de los mismos. Un mapa es un modelo de la realidad establecido mediante un conjunto de convenciones relativamente complejo que conduce a un resultado final claramente distinto del objeto representado.



En la figura se muestra la representación de la Tierra en una proyección cilíndrica conforme de Mercator.

Finalmente, en los modelos simbólicos se llega a un nivel superior de abstracción ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.).

Un ejemplo de modelo simbólico es la representación de un edificio mediante la identificación y transformación en una estructura geométrica de sus elementos básicos. El modelo así construido permite la aplicación de algoritmos para, por ejemplo, la estimación de esfuerzos a los que está sometido.



Reconstrucción de un edificio prerrománico, un ejemplo de modelo simbólico. Parte del edificio ha sido representado a partir de un levantamiento simulado basado en restos de cimientos y muros.

Los modelos digitales del terreno se incluyen en esta última categoría y, consecuentemente, las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos. En este caso, los MDT presentan algunas ventajas sobre el resto de los diferentes tipos de modelos, derivadas de su naturaleza numérica: no ambigüedad, posibilidad de modelar los procesos con una deducción estricta, verificabilidad y repetibilidad de los resultados.

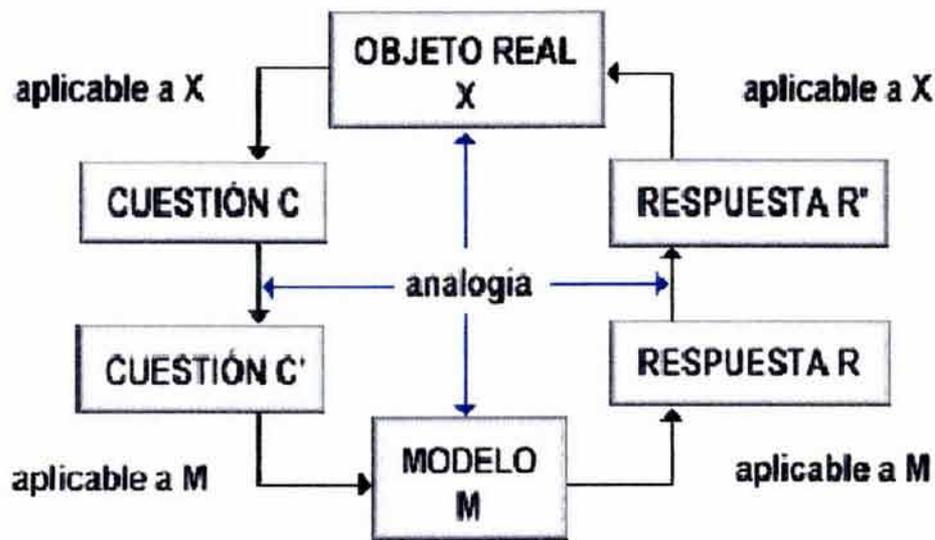
El segundo aspecto de los modelos que nos interesa no se deriva directamente de la definición anterior ya que aquella no aporta nada sobre sus objetivos. En el caso presente, la construcción de modelos se realiza para conocer o predecir propiedades que se desconocen del objeto real.

Algunos autores llegan a incluir esta expresión de finalidad en la propia definición de modelo: un objeto M es un modelo de X para un observador O , si O puede utilizar M para responder a cuestiones que le interesan acerca de X (Aracil, 1986; 123); o bien, según Ríos (1995:23): "un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica".

Este es el sentido en el que vamos a desarrollar los modelos en este trabajo, partiendo de una información conocida (curvas de nivel) a partir de la medición del objeto real (superficie del terreno de una zona en estudio), se elaborará información derivada que refleja otras propiedades diferentes (pendiente, altimetría, relieve sombreado, etc.).

La elaboración de modelos debe realizarse de manera que la relación de correspondencia entre el objeto real y el modelo sea al menos parcialmente reversible y exista, por tanto, una relación simétrica que permita la traducción de algunas propiedades del modelo a la realidad.

La existencia de la relación simétrica permite que un resultado C' relativo al modelo pueda traducirse en otro C relativo al objeto real y, de esta forma, que las respuestas derivadas del modelo sean aplicables sobre a la realidad sin perder sentido.

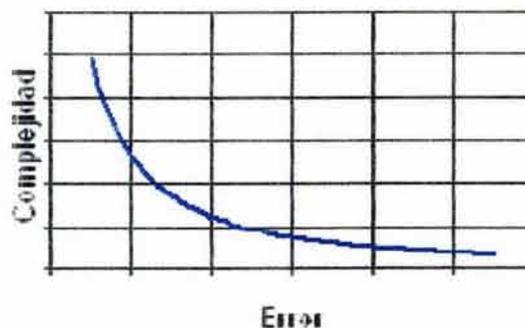


Los modelos sirven para responder a cuestiones sobre la realidad que no serían accesibles mediante la experimentación directa.

La utilidad de los modelos para conocer o predecir, esta condicionada principalmente por una buena selección de factores relevantes para el problema y una adecuada descripción de sus relaciones funcionales que pueden valorarse sometiendo los resultados a verificación experimental.

En efecto, si del uso del modelo M se deduce una propiedad determinada, ésta será previsiblemente aplicable al objeto real X . El contraste experimental puede servir de mecanismo de realimentación para realizar ajustes, tanto en los elementos que componen el modelo como en las relaciones que se establecen entre ellos.

Cabe destacar que en esta etapa de la exposición, la naturaleza digital y simbólica de los MDT permite una elevada precisión en la descripción de los procesos pero no garantiza la exactitud de los resultados.



Relación genérica entre error y complejidad. La modelización pretende reducir el error manteniendo una complejidad reducida.

En efecto, un modelo es necesariamente una descripción aproximada que, en último término, se construye mediante la aplicación de unos supuestos más o menos adaptados a la realidad pero que nunca pueden ser exactos. Estos supuestos son los encargados de señalar, por ejemplo, qué factores son relevantes para el modelo y cuáles pueden ser obvios (ver Popper, 1984; 64-70 para una discusión más amplia).

1.3 Modelos Digitales del Terreno, MDT

Los MDT son una categoría de modelos simbólicos que se desarrollaron a favor de las nuevas tecnologías. Los modelos digitales del terreno se han definido (Doyle, 1978; 1481) como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio.

La definición anterior aporta algunos aspectos nuevos al concepto más general de modelo presentada en el inciso anterior. Además, se diversifica de que los modelos que van a ser tratados son digitales, motivo por el cual, se diferencian de los modelos analógicos. Finalmente, se resalta la importancia de la distribución espacial de la variable representada.

La diferencia básica entre los modelos digitales y los modelos analógicos reside en que los primeros están transformados en una matriz de números; es decir, a cada número se le asigna un elemento celda o píxel, lo que permite su tratamiento por medios informáticos.

Para la construcción o elaboración de los modelos digitales es necesario realizar un proceso de transformar la información para permitir su representación virtual en forma de celda o píxel. Las relaciones espaciales o las características que se desean representar se traducen a diferentes tipos de estructuras numéricas (vectores, matrices, conjuntos, etc.) o a expresiones matemáticas que expresan relaciones topológicas y funcionales.

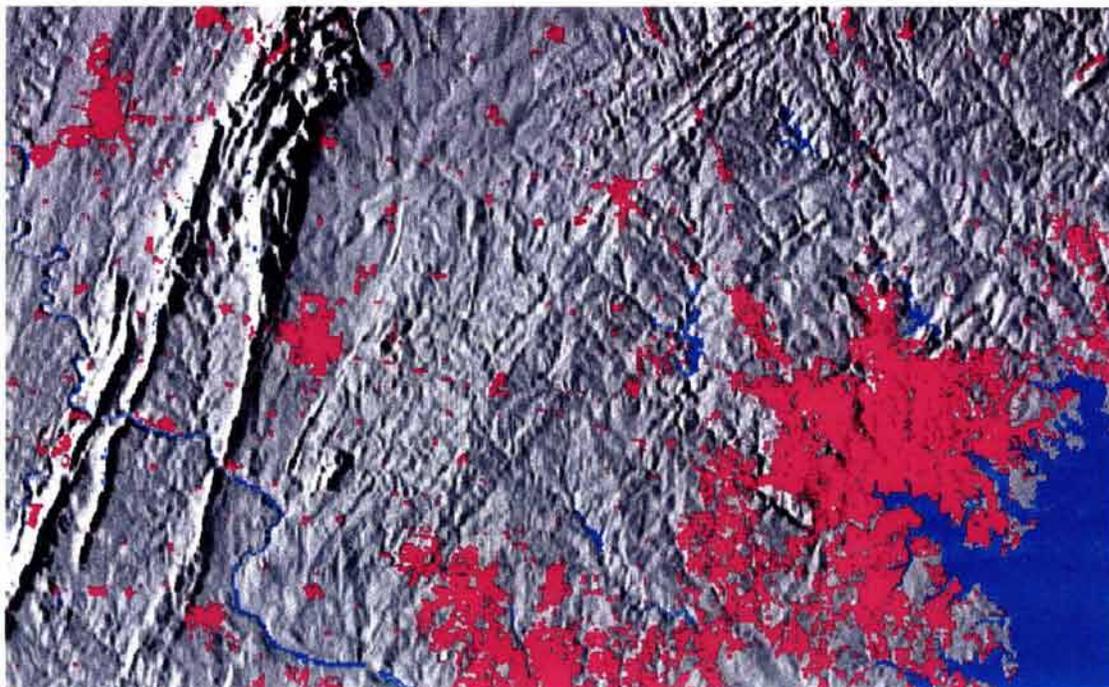
Una maqueta, como modelo icónico, también constituye un modelo analógico de la realidad, dándole especial importancia a la conservación de las proporciones o relaciones espaciales relativas.

Un mapa convencional es otro modelo analógico más sofisticado en el que se establecen unas relaciones especiales de simbolización que permiten la reducción de la realidad tridimensional a un modelo de dos dimensiones (no deben confundirse los conceptos de modelo análogo, mencionado unos párrafos atrás, y modelo analógico, que se opone al de modelo digital).

Los MDT pueden ser contruidos directamente a partir de la realidad a representar, pero es muy habitual que exista un modelo analógico intermedio (curvas de nivel de una carta topográfica) a partir del cual se realiza la transformación (digitalización, restitución fotogramétrica, etc.). Éste puede adoptar diversas formas, desde los mapas anteriormente citados hasta pares fotográficos estereoscópicos. Los MDT son una versión digital (transformados de formato analógico a digital) de los mapas convencionales por lo que, en ocasiones, han sido denominados mapas virtuales (Moellering, 1983).

Otro aspecto interesante es que la definición anterior permite que la característica a representar sea diferente de la altitud. Este aspecto, aunque en principio pueda parecer evidente, debe ser destacado ya que es habitual identificar los MDT con los modelos digitales de elevaciones cuando, en realidad, pueden ser representadas muchas otras propiedades del terreno (pendiente, altitud, etc.).

Es necesario diferenciar claramente qué variable se está representando en el modelo y a partir de este momento, denominaremos a los modelos digitales de forma explícita, de acuerdo con la propiedad representada (modelo digital de pendientes o elevación, por ejemplo) y reservaremos el término MDT para la denominación genérica.



En la figura se muestra un modelo de reflectancia al cual se le ha superpuesto información sobre la edificación —en rojo—, y las superficies de agua —en azul—. Estas dos últimas categorías no pueden considerarse parte del modelo de reflectancia.

La definición de Doyle, sin embargo, es todavía algo ambigua ya que permite, por ejemplo, que un simple listado secuencial de cotas pueda ser considerado un modelo digital de elevaciones. Asimismo, es necesario realizar alguna limitación en cuanto al tipo de variable representada ya que es discutible que las versiones digitales de los mapas de vegetación, de vías de comunicación o de puntos singulares puedan ser considerados modelos digitales del terreno.

Por este motivo, una definición de MDT más completa y precisa que las anteriores: es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.

En la cartografía convencional la descripción altimétrica constituye la infraestructura básica del resto de los mapas. El equivalente en los MDT lo desempeña el modelo digital de elevaciones (MDE), que describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados. Siguiendo la analogía cartográfica, es posible construir un conjunto de modelos derivados, elaborados a partir de la información contenida explícita o implícitamente en el MDE.

Los modelos derivados más sencillos pueden construirse exclusivamente con la información del MDE y reflejan características morfológicas simples (pendiente, orientación, etc.), incorporando información auxiliar es posible elaborar otros modelos más complejos, utilizando conjuntamente la descripción morfológica del terreno y simulaciones numéricas de procesos físicos. Algunos ejemplos de ello son la predicción de zonas de saturación (O'Loughlin, 1986), la evaluación del riesgo de incendio (Chuvieco y Congalton, 1989) o la elaboración de modelos de reflectancia (Felicísimo y García-Manteca, 1990).

Los MDT descritos de esta forma son esencialmente modelos estáticos (en los que las propiedades representadas permanecen con valores inmutables), pero su naturaleza digital permite utilizarlos para realizar procesos de simulación dinámica con cierta facilidad.

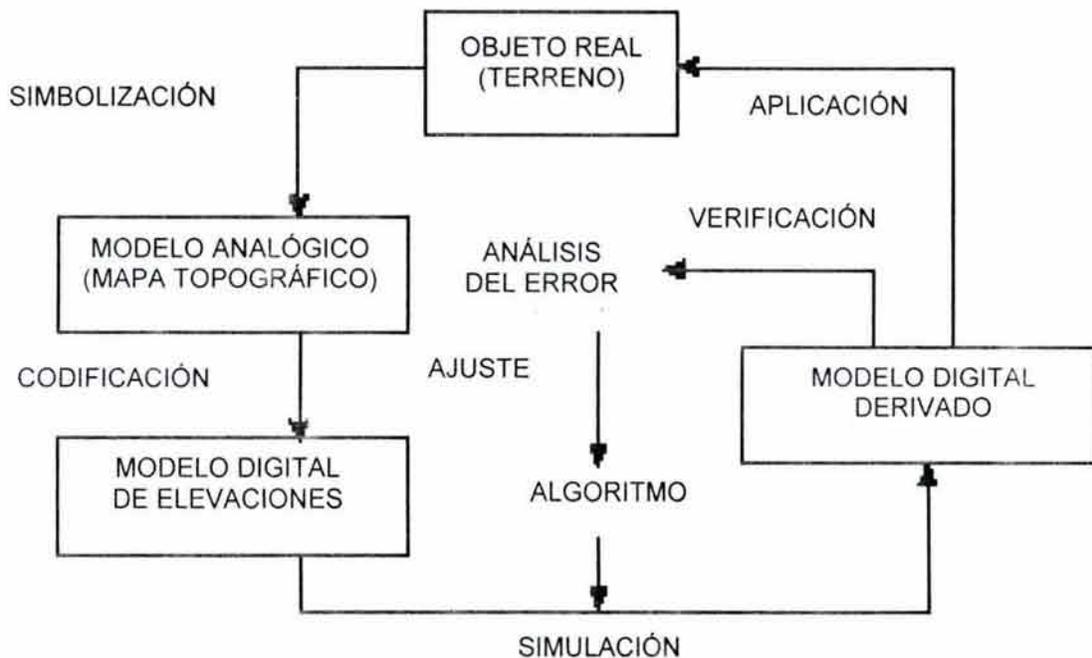
Así, por ejemplo, el uso de un MDE complementado con una simulación de la trayectoria solar permite conocer la cantidad acumulada de horas de radiación directa que puede recibir un lugar determinado.

Tanto la construcción de los modelos derivados como los procesos de simulación dinámica son posibles mediante el diseño de algoritmos numéricos, es decir, construyendo secuencias explícitas de operaciones matemáticas que conducen a la solución de problemas concretos.

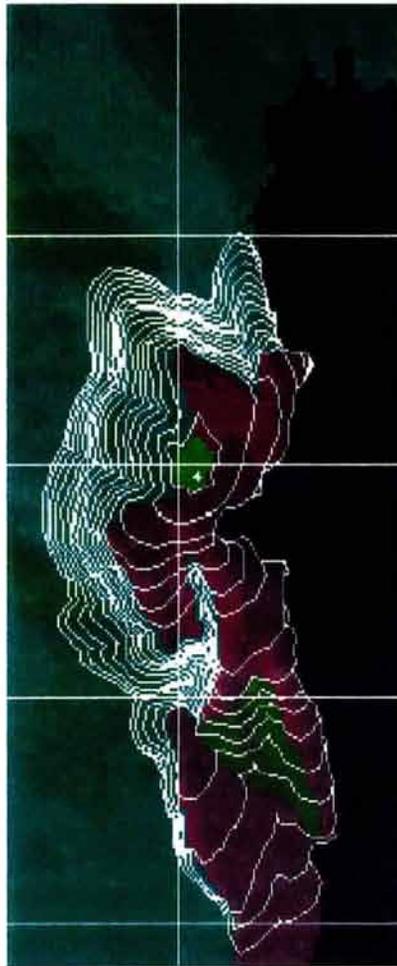
El correcto funcionamiento de los algoritmos es susceptible de revisión mediante contraste o verificación del modelo derivado con el objeto real. Este contraste se realiza mediante métodos de análisis del error que, habitualmente, se basan en la comparación de una muestra extraída del modelo derivado con medidas empíricas realizadas sobre el terreno. Los resultados del análisis del error permiten efectuar ajustes en el algoritmo, aumentando su confiabilidad y, por tanto, su capacidad predictiva. Esto significa que un algoritmo sólidamente construido, aplicado sobre un MDT confiable, permite estimar propiedades que pueden ser aplicadas al objeto real con tolerancia de error moderado, aportando información difícil de obtener por otros medios.

Partiendo de la superficie real del terreno, la construcción del mapa topográfico incluye básicamente un proceso de simbolización, mediante el cual las propiedades del terreno se representan sobre un plano usando relaciones de analogía previamente establecidas. La transformación numérica del modelo analógico conduce al modelo digital, susceptible de tratamientos matemáticos y estadísticos imposibles de aplicar al anterior.

Ello permite construir modelos digitales derivados y realizar procesos de modelación mediante simulaciones numéricas. Los resultados obtenidos son contrastables con la realidad, induciendo correcciones o ajustes del algoritmo de modelación que permitan una mejor correspondencia con el fenómeno real.



Esta figura ilustra los procesos básicos implicados en la construcción y manejo de los MDE.



Simulación de un incendio, este tipo de aplicaciones permite simular la evolución del incendio en función de variables como la pendiente, combustibilidad, vegetación, etc.

1.4 Justificación de los Modelos Digitales del Terreno, MDT

El trabajo se ha estructurado partiendo de algunas consideraciones básicas, que pueden resumirse de la forma siguiente:

- a) La integración de los MDT como soporte básico en la investigación en las áreas de las Ciencias de la Tierra supone un incremento notable de las posibilidades de trabajo e introduce frecuentemente un cambio cualitativo en el enfoque del mismo.
- b) El uso de los MDT como el desarrollo de sus aplicaciones aún no ha sido adoptado de forma general por los grupos de trabajo, por lo que su utilidad real se ve muy limitada.
- c) Por este motivo, se hace necesario un esfuerzo para generar métodos, algoritmos y aplicaciones que permitan, con un fundamento claro y sólido, resolver problemas difíciles de abordar por métodos convencionales.
- d) una parte de los problemas en los campos mencionados puede abordarse mediante la modelización de procesos o el análisis de la información contenida, explícita o implícitamente, en el MDE.

2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES, MDE

2.1 Definición del MDE.

Un modelo digital de elevaciones, MDE se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $z = \zeta(x, y)$ donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x, y) y ζ es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo digital de elevaciones se aplica la función anterior sobre un dominio espacial concreto, D . En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como $MDE = (D, \zeta)$.

Un MDE puede describirse de forma genérica del modo siguiente:

$$z = \zeta(x, y)$$

donde: z es la altitud del punto situado en las coordenadas X, Y y Z es la función que relaciona la variable con su localización geográfica

Los valores de X y Y corresponden a las abscisas y ordenadas de un sistema plano de coordenadas, que representa un sistema de proyección cartográfica. La ecuación anterior representa una superficie o campo escalar en la que la altitud es una variable continua. Dado que esta superficie está formada por un número infinito de puntos y no es posible su modelización sin cierta pérdida de información, proceso equivalente al de generalización cartográfica en los mapas convencionales.

En la versión digital sería posible presentar de forma explícita al menos teóricamente, la ecuación anterior relaciona la altitud con la localización geográfica.

Sin embargo, la complejidad del relieve hace que su representación matemática mediante funciones no tenga más que un significado simbólico. En la práctica, las cotas correspondientes a una zona sólo pueden representarse mediante una ecuación cuando la parcela descrita es pequeña y el relieve implicado muy simple. Este método puede ser utilizado para aplicaciones concretas, operando sobre zonas muy limitadas, pero en cuanto el relieve se complica o la superficie aumenta, el ajuste de una ecuación para su descripción se hace imposible.

Como alternativa, se han buscado soluciones para representar la altitud mediante conjuntos limitados de cotas, diseñando las estructuras de datos que buscan un equilibrio entre la facilidad de manejo y la descripción realista del relieve.

2.2 Estructuras de datos en el MDE.

De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud, Z , al que acompañan los valores correspondientes de X y Y , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial. Las variantes aparecen cuando se definen las interrelaciones entre estas unidades elementales de información.

El diseño de estas interrelaciones es lo que configura las diferentes opciones en la estructura de datos, cuya elección es trascendental pues condiciona completamente el futuro manejo de la información.

Mientras que los mapas convencionales usan casi exclusivamente una única convención (las curvas de nivel) para la representación de la superficie del terreno, los MDE disponen de alternativas más variadas, desde una transposición casi directa de la altimetría hasta otras menos habituales, en la cartografía impresa pero más adaptadas al proceso digital.

En todas ellas la altitud se describe básicamente mediante un conjunto finito y explícito de cotas. El valor propio de un punto de localización arbitraria será, en su caso, estimado por interpolación a partir de los datos de su entorno. La Tabla 2.1 muestra un resumen de las estructuras de datos de mayor interés para la realización de los MDE.

VECTORIALES	CONTORNOS	<i>SECUENCIAL</i> : las líneas se almacenan como cadenas de cotas. <i>ANALÍTICA</i> : las líneas se almacenan como segmentos de Bézier, polinómicos, etc.
	PERFILES	Cadenas paralelas de cotas en línea con altitud variable.
	TRIÁNGULOS	Red de triángulos irregulares (TIN).
RASTER	MATRICES	<i>REGULARES</i> : cotas sobre una malla cuadrada de filas y columnas equidistantes. <i>ESCALABLES</i> : cotas sobre sub-mallas jerárquicas y de resolución variable.
	POLÍGONOS	Cotas asignadas a teselas poligonales regulares (triángulos o hexágonos).

Tabla 2.1 Resumen de las estructuras más usuales utilizadas para el almacenamiento de los modelos digitales de elevaciones

Históricamente, los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y raster. Los modelos vectoriales están basados en entidades, isolíneas o curvas de nivel (básicamente puntos y líneas) definidas por sus coordenadas.

En los modelos raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales (a cada unidad se le adjudica una celda o píxel) de superficie y la unión de éstas conforman una estructura matricial con una distribución regular, sin bordes y con recubrimiento total del área representada; es decir, un mosaico de terreno.

Esta división clásica, analizada en sus fundamentos, tiene bastante más interés en el caso de los SIG, donde interviene información por temas, que en los modelos digitales del terreno. En efecto, las matrices, caso característico de estructura raster, pueden ser consideradas fácilmente como un conjunto de puntos acotados, sin asumir necesariamente que el atributo se asigna a una celda cuadrada de altitud uniforme.

En cualquier caso, el tratamiento posterior de la estructura matricial es idéntico con ambas concepciones. En los modelos vectoriales los atributos del terreno se representan mediante líneas (vectores) y mediante puntos acotados (caso límite de reducción de un vector a un único elemento).

Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas y las líneas, por tanto, mediante un vector de pares de coordenadas. La altitud puede ser única para la línea o diferente para cada punto integrante de la misma.

La simplicidad inicial puede perderse, evolucionando hacia otras estructuras donde, por ejemplo, los vectores son segmentos rectilíneos y se encuentran organizados topológicamente de forma más o menos compleja.

La Tabla 2.1, aún puede ampliarse con estructuras menos usuales, la práctica o experiencia ha reducido la capacidad de los métodos estructurales a unos cuantos. Los más representativos son básicamente cuatro.

Dos de ellos son vectoriales: contornos (contours) y red irregular de triángulos (TIN, triangulated irregular network); los otros dos son raster: matrices regulares (URG, uniform regular grids) y matrices jerárquicas escalables (en estructuras de tipo quadtree).

2.2.1 Modelo vectorial: contornos.

La estructura básica es el vector, compuesto por un conjunto de pares de coordenadas (x, y) que describe la trayectoria de líneas isométricas (coincidiendo con las curvas de nivel del mapa topográfico convencional).

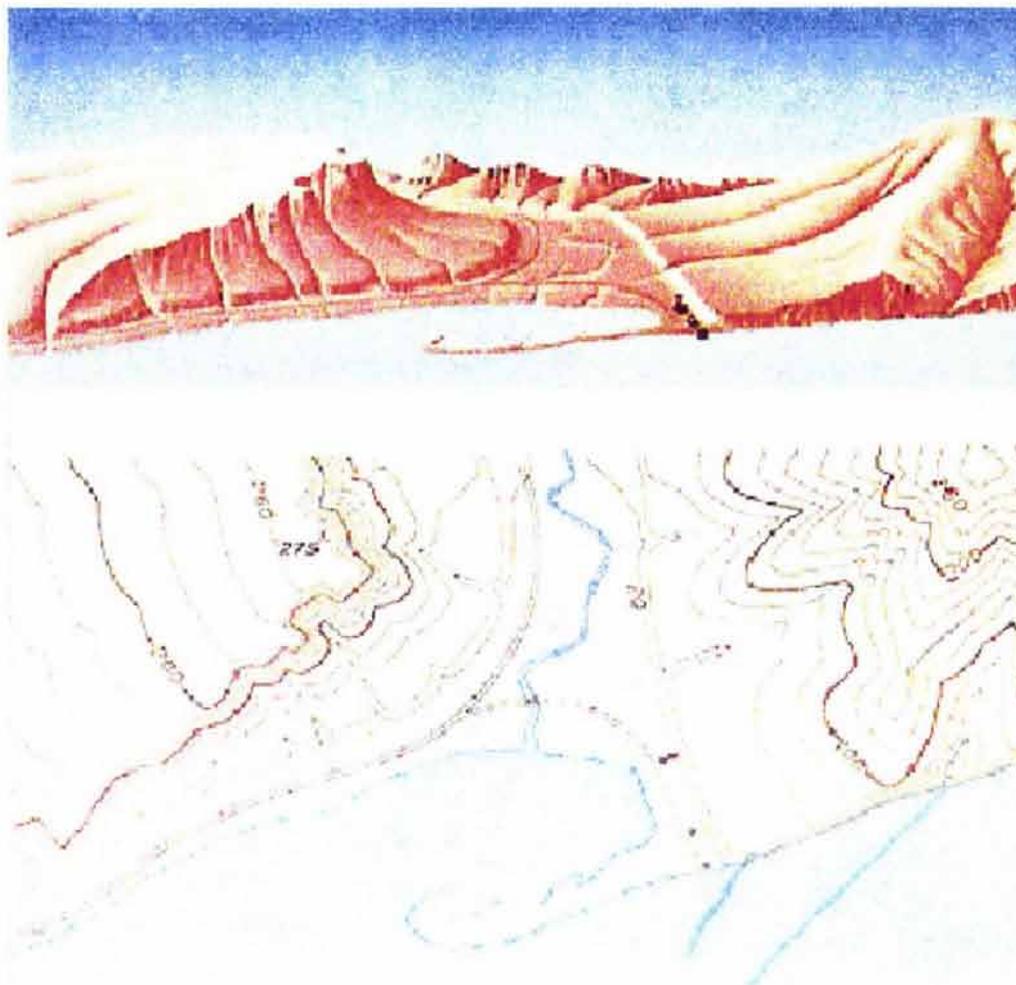
El número de elementos de cada vector es variable y la reducción de éste a un único elemento permite incorporar cotas puntuales sin introducir incoherencias estructurales.

Una curva de nivel concreta queda definida, por tanto, mediante un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella a intervalos adecuados (no necesariamente iguales) para garantizar la exactitud necesaria del modelo.

La localización espacial de cada elemento es explícita, conservando los valores individuales de coordenadas.

En el caso más sencillo, el MDE está constituido por el conjunto de las curvas de nivel que pasan por la zona representada, separadas generalmente por intervalos constantes de altitud.

Algunas opciones más avanzadas introducen nociones nuevas en el tratamiento de los datos, especialmente las líneas de rotura (breaklines), que permiten una mejor adaptación a algunos elementos del relieve (fallas, taludes), y que facilitan los tratamientos que necesitan asegurar la conectividad hidrológica.



El modelo de contornos es el utilizado habitualmente en los mapas impresos. Es una estructura de datos poco útil para el manejo por medios informáticos pero la escasez de otras fuentes de datos obliga a que todos los SIG tengan herramientas para incorporarlos y usarlos, normalmente mediante transformaciones a otras estructuras (TIN o matrices)

2.2.2 Modelo vectorial: redes de triángulos irregulares (TIN).

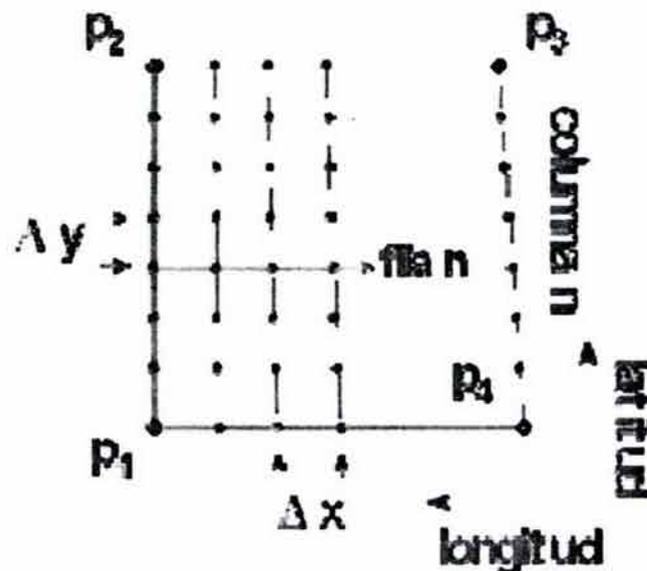
Una estructura de datos cada vez más utilizada es la que se compone de un conjunto de triángulos irregulares unidos y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa: triangulated irregular network, TIN (Peucker et al., 1978). Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se unen sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de puntos.

Los TIN pueden considerarse como una estructura derivada de otra anterior de puntos o líneas. Aunque la distribución original puede ser cualquiera (incluso puntos distribuidos aleatoriamente), es frecuente partir de una base de curvas de nivel (modelo vectorial) para generar la red de triángulos. Estos están internamente organizados en función de su vecindad mediante un conjunto de información bastante complejo que hace posible un manejo relativamente ágil y eficaz frente a alternativas menos estructuradas.

2.2.3 Modelo raster: matrices regulares.

La estructura matricial tiene antecedentes relativamente remotos: Chapman (1952) propone ya métodos de análisis topográficos basados en matrices regulares. Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda (aunque habitualmente se utiliza un valor puntual, asociado a cada nodo de la retícula o punto medio de la celda, con lo que esencialmente se construye un modelo vectorial de puntos).

La retícula puede adoptar formas variadas pero la más utilizada es una red regular de malla cuadrada con filas y columnas equiespaciadas. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está implícitamente determinada por su situación en la matriz, una vez definidos su origen y el intervalo entre filas y columnas. Las matrices de altitudes suelen ser generadas por interpolación a partir de un modelo previo de contornos o por métodos fotogramétricos.



La matriz regular es la estructura más utilizada para construir los MDE. La razón es que se trata de una estructura de fácil manejo informático y simple de representar mediante estructuras lógicas como matrices de dos dimensiones.

2.2.4 Modelo raster: matrices de resolución variable.

El interés de las matrices de resolución variable reside en la posibilidad de solucionar el principal problema de las matrices regulares (su resolución espacial prefijada), manteniendo, en principio, sus principales ventajas: la sencillez conceptual y operacional. En este tipo de matrices los elementos pueden ser, datos elementales (como en las matrices regulares), o submatrices con un nivel de resolución diferente. La estructura final es un árbol jerárquico y dinámico de submatrices con una profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel. Se trata de una estructura análoga a los quadrees, utilizados ocasionalmente en el tratamiento de diversos temas (ver, por ejemplo, Samet *et al.*, 1984).

Este tipo de estructura se encuentra en desarrollo y poco utilizada, según puede deducirse de la bibliografía, aunque tiene una relación directa con el método fotogramétrico de muestreo progresivo (Makarovic, 1973). En el tratamiento de los MDE, los trabajos pioneros parecen corresponder a Ebner y Reinhardt (1984, 1988), que utilizan un modelo mixto de matrices jerárquicas y estructuras TIN.

2.2.5 Otras estructuras

Se han descrito muchas variantes y alternativas para el archivo y tratamiento de los MDE. La representación mediante perfiles suele citarse como una posibilidad y algunos autores la evalúan positivamente debido a algunas ventajas teóricas (Yoeli, 1983:21); en la bibliografía actual, sin embargo, no se encuentran ejemplos que la utilicen.

La transformación de contornos mediante ecuaciones polinómicas fue propuesta en los primeros trabajos sobre modelos digitales (Miller y Laflamme, 1958:437); más recientemente, Walton (1989) propone un método similar basado en una secuencia de segmentos de Bézier con el fin de reducir el tamaño de los archivos vectoriales. Otros, como los polígonos irregulares unidos (Moore *et al.*, 1988) o redes regulares hexagonales (Roessel, 1988), aportan en cada caso ventajas para aplicaciones concretas; pero su uso, no se ha generalizado hasta el momento.

Las matrices representan una alternativa estructural muy simple y de fácil manejo, cuya mayor desventaja reside en la resolución espacial fija, que no permite tratar unas zonas más detalladamente que otras. Este problema queda razonablemente resuelto con las matrices escalables, una estructura jerárquica puede mantener un equilibrio entre la facilidad de manejo y la representación realista del relieve. Finalmente, los TIN permiten variar la resolución espacial de la representación, pero implican un incremento notable de la complejidad de la estructura de datos.

2.3 Criterios de selección de la estructura del MDE.

La elección del tipo de estructura tiene importantes implicaciones debido a que las formas de tratamiento numérico pueden ser muy diferentes. Algunos autores han hecho notar que las diferencias teóricas son reducidas si la resolución es similar (Berry, 1988) ya que se trata en todos los casos de una distribución de puntos acotados. Sin embargo, esto es fijar la atención sólo en los elementos primarios del modelo cuando la diferencia fundamental estriba, lógicamente, en la forma de estructurar los datos, en la complejidad de la referenciación interna o topología de los objetos representados y en los procesos de tratamiento que estas circunstancias permiten o exigen.

Las alternativas prácticas en este momento (por su uso masivo) se reducen básicamente a dos: matrices regulares y TIN. Como ya se ha indicado, el modelo de contornos presenta serias dificultades de tratamiento directo; la consecuencia ha sido que, en el caso de los MDE, puede considerarse en la práctica como una estructura aceptable para la captación de información, pero no funcional para el tratamiento de los datos topográficos (Mark, 1979:34).

Las ventajas relativas de unas estructuras frente a otras han sido tratadas repetidamente en la literatura. Las conclusiones son claras en algunos aspectos puntuales y dependen estrechamente de aspectos prácticos más que teóricos. Dolton y Dueker (1986) analizan el uso de estos modelos en micro computadoras y sus conclusiones, aunque más bien aplicadas a los procesos propios de los SIG, son bastante orientadoras: los modelos matriciales tienen a su favor facilitar las labores de análisis (cálculo) pero son poco flexibles debido a lo rígido de su estructura; recíprocamente, los modelos vectoriales facilitan las tareas de inventario pero presentan dificultades para realizar procesos de análisis debido a la complejidad de su manejo.

Carter (1988) concluye que la alternativa matricial ofrece una representación adecuada de la forma general de la superficie en áreas de fuerte relieve pero da peores resultados en la definición de detalles en áreas de relieve suave.

La representación vectorial de contornos y la de redes irregulares de triángulos tienen a su favor la posibilidad de aumentar el grado de detalle en zonas concretas donde las pequeñas variaciones del relieve pueden no ser detectables con una estructura matricial (obviamente, esta dificultad podría eliminarse mediante el uso, aún reducido en la práctica, de estructuras matriciales escalables).

En general, la descripción vectorial es más adecuada para variables discretas, que por su naturaleza están limitadas por fronteras lineales claras, mientras que las descripciones raster se adaptan mejor para la representación espacial de variables continuas, para las que no se pueden definir bordes de una forma neta, así como para otras con una naturaleza estadística o probabilística (Berry, 1988).

Desde un punto de vista histórico, todo el manejo de mapas antes de que comenzara la automatización con medios informáticos se hacía en formato analógico y vectorial. El formato raster comienza a implantarse en los años 60 en los primeros programas destinados al manejo de información territorial debido a su particular adaptación al cálculo mediante computadoras. En efecto, una ventaja especialmente importante de este tipo de organización es la facilidad que ofrece para el tratamiento numérico.

En una estructura matricial, la combinación de mapas necesita solamente operaciones matriciales sencillas entre datos homólogos: sumas, productos, operaciones lógicas, etc. En los modelos vectoriales, al carecer los datos de regularidad en su distribución espacial, se precisan operaciones geométricas (especialmente cálculos de intersección de líneas y de relaciones de interioridad) que hacen de su manejo más complejo y costoso.

La facilidad de manejo hizo que los modelos matriciales fueran rápidamente adoptados en los primeros pasos de los SIG, en los años 60. En los 70 ya existían ambos tipos de productos (raster y vectoriales) pero seguían dominando los que utilizaban estructuras matriciales (Wallace, 1988).

Sólo en los 80 se han desarrollado con gran fuerza los SIG basados en estructuras vectoriales, pero debemos tener en cuenta que la información que estos programas manejan son, en gran medida, de variables discretas o fácilmente transformables a formatos vectoriales: tipos de usos del suelo, delimitación de propiedades, trazado de calles, líneas eléctricas, etc.

La necesidad de archivar grandes volúmenes de datos fue una seria dificultad hasta hace pocos años debido a la escasa capacidad de almacenamiento de las computadoras y al elevado tiempo de acceso de las memorias masivas. Esta dificultad motivó la creación de modelos matriciales relativamente burdos (Berry, 1988). En principio, el modelo vectorial es menos exigente que el matricial en este sentido, lo que supone una ventaja. Sin embargo, en la actualidad, la polémica ha perdido buena parte de su fuerza debido al enorme desarrollo de la tecnología de almacenamiento masivo de datos y de acceso a los mismos.

Aunque la tendencia general en los SIG es la adopción de estructuras vectoriales para el tratamiento de la información, ésta se refiere esencialmente a propiedades cualitativas del terreno, de distribución discreta y con límites netos entre las diferentes clases.

En el tratamiento de los datos topográficos y otras variables continuas sigue teniendo una fuerte implantación el uso de formatos matriciales. La tendencia actual es la incorporación de ambos tipos de modelos debido a sus ventajas específicas en función del tipo de variable representada. Es significativo que uno de los sistemas de información geográfica más utilizados incluye un módulo de tratamiento topográfico que utiliza la estructura TIN para algunas operaciones pero necesita la matricial para otras, lo cual da a entender la existencia de dificultades que justifican el costo de mantenerlas simultáneamente activas.

En este sentido, la aparición de las imágenes de satélite ha impulsado a la integración de ambos formatos ya que esta información sólo puede utilizarse en forma matricial y representa una fuente de datos que no puede ser ignorada.

En este trabajo, las aplicaciones se realizan básicamente con variables continuas y que, en algunos casos, tienen incluso una fuerte componente estadística. Por este motivo, se ha considerado adecuado realizar la mayoría de los tratamientos mediante modelos matriciales; con esta estructura, la programación se hace de forma menos compleja, la ejecución es generalmente más rápida y los algoritmos más fácilmente comprensibles.

Sólo en algunas excepciones las estructuras vectorial y matricial se complementan de tal forma que se hace aconsejable manejar ambas simultánea o secuencialmente. Es el caso, por ejemplo, de la obtención del modelo digital de elevaciones a partir de la digitalización del mapa topográfico (formato vectorial) y su transformación para obtener una estructura matricial.

3. CONSTRUCCIÓN DEL MDE

La captura de la información altimétrica constituye, lógicamente, el paso inicial en el proceso de construcción del MDE, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos manipulable por medios informáticos. Numerosos autores han coincidido en que esta fase inicial es la más costosa (en términos de tiempo y trabajo) de todo el proceso de manejo de los MDE.

Lógicamente, se trata de la fase de mayor trascendencia ya que la calidad de su resultado es el principal factor limitante para todos los tratamientos que se realicen posteriormente. Tras la captura de los datos, éstos deben ser estructurados de forma adecuada para el manejo por parte de las aplicaciones informáticas, lo cual puede realizarse de diversas formas, aún dentro del mismo esquema general (matricial, vectorial, etc.).

A continuación analizaremos las principales alternativas que existen en la actualidad para realizar estas operaciones, hasta llegar al resultado de esta fase: un MDE preparado para ser sometido a las pruebas de control necesarias para la evaluación de su calidad y para la detección y corrección de errores.

3.1 Captura de los datos.

El origen de un MDE puede estar, en un principio de manera directa sobre la superficie real del terreno mediante, por ejemplo, altímetros aerotransportados.

Sin embargo, es más frecuente el uso de métodos indirectos, que utilizan como base un conjunto de documentos (analógicos o digitales) elaborados previamente. La Tabla 3.1, muestra algunos ejemplos de métodos que pueden ser utilizados con mayores o menores dificultades y limitaciones.

DIRECTOS	ALTIMETRÍA	Altimetros transportados por plataformas aéreas
	<i>GPS</i>	<i>Global positioning system</i> , sistema de localización mediante satélites
	TOPOGRAFÍA	Mediante estaciones topográficas con salida digital
INDIRECTOS	RESTITUCIÓN	Origen digital: imágenes digitales captadas por satélites (p. ej. SPOT) con diferentes ángulos de visión
		Origen analógico: pares fotográficos convencionales (pancromático, color, infrarrojo)
	DIGITALIZACIÓN	Manual: mediante tableros digitalizadores Automática: mediante scanners

Tabla 3.1 Ejemplos de métodos de captura de datos para la Construcción del modelo digital de elevaciones.

a) Altimetros

Algunos satélites han incorporado altímetros entre sus instrumentos, con lo que se hace posible, al menos teóricamente, el registro directo de los datos altimétricos en formato digital. Las características de estos altímetros hacen de ellos aparatos extremadamente precisos: el transportado por el satélite ERS-1 (iniciales de European Remote-Sensing Satellite) es un radar de 13.8 GHz con un error nominal de apenas unos cm (Bruzzi y Wooding, 1990;13).

Los altímetros radar se basan esencialmente en diferentes principios físicos de la teledetección convencional. Los sensores ópticos reciben la fracción de luz reflejada por el suelo ante la radiación electromagnética del Sol; son sensores pasivos (no emiten energía) y la energía que reciben depende del albedo del suelo para el rango de longitudes de onda con el que se trabaje.

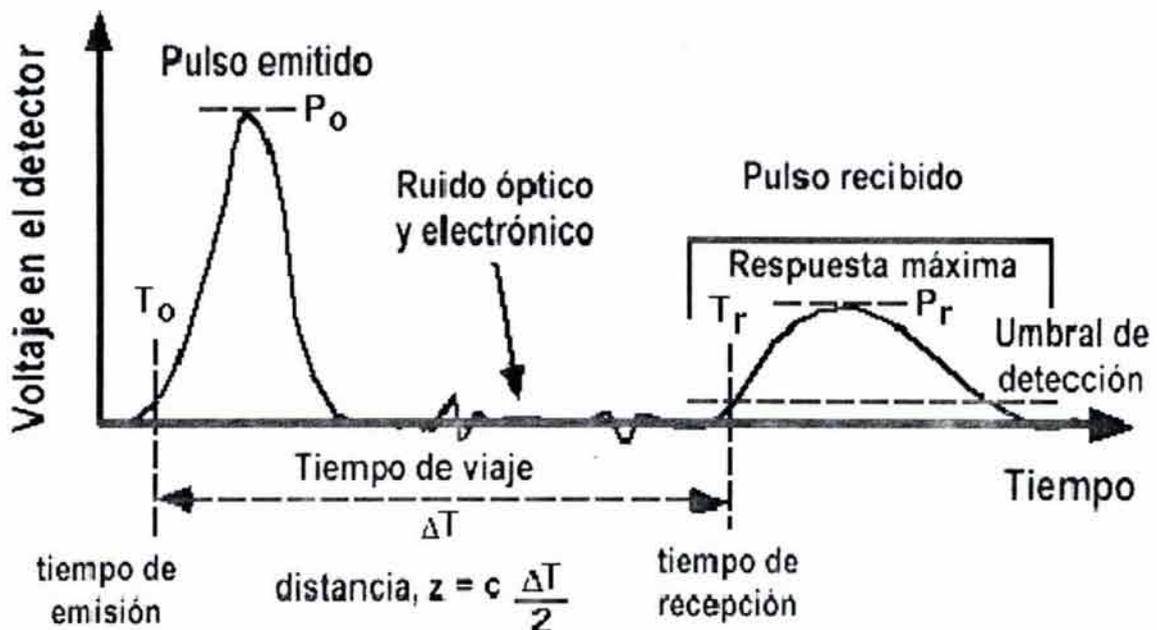
El radar es activo: emite una radiación desde una antena emisora y, además, esta radiación es coherente, es decir, se trata de una luz de longitud de onda pura en la que crestas y valles de la onda electromagnética son absolutamente regulares.

Debido a esta característica, el sensor puede distinguir el punto exacto en el que se encuentra la oscilación de la onda reflejada: la fase. La medida de la fase es útil debido a la elevada frecuencia de trabajo: si un radar transportado por un satélite funciona a 6 GHz, la señal recorrerá sólo 5 cm en el tiempo de una oscilación completa.

Si el suelo está exactamente a 800 Km. de distancia, los 1600 Km. de ida y vuelta corresponden a un número entero de ciclos y la onda recibida llegará en fase con la onda de salida. Si la distancia es de 800 Km. y 1 cm, la onda llegará con un desfase del 40%: un 20% corresponde al cm del viaje de ida y el otro 20% al del viaje de vuelta. Este desfase se detecta en equipo receptor. La medida de la fase permite, por tanto, estimar las distancias con precisiones centimétricas.

Sin embargo, problemas relacionados con la fuerte dispersión de la señal en zonas rugosas y con una resolución espacial reducida han limitado prácticamente su uso al análisis de la topografía de la superficie marina y seguimiento de los hielos polares (Francis *et al.*, 1991;42-43). Su mayor ventaja reside en que se trata de un método de captación remota de información por lo que la toma de los datos no está limitada por la accesibilidad de la zona.

Los altímetros láser utilizados para el levantamiento topográfico están basados en el mismo principio: desde el satélite o avión se lanza un breve pulso hacia la superficie; una fracción de la energía es reflejada por la superficie y devuelta hacia una antena receptora. El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del eco depende de la distancia entre la antena y el suelo.

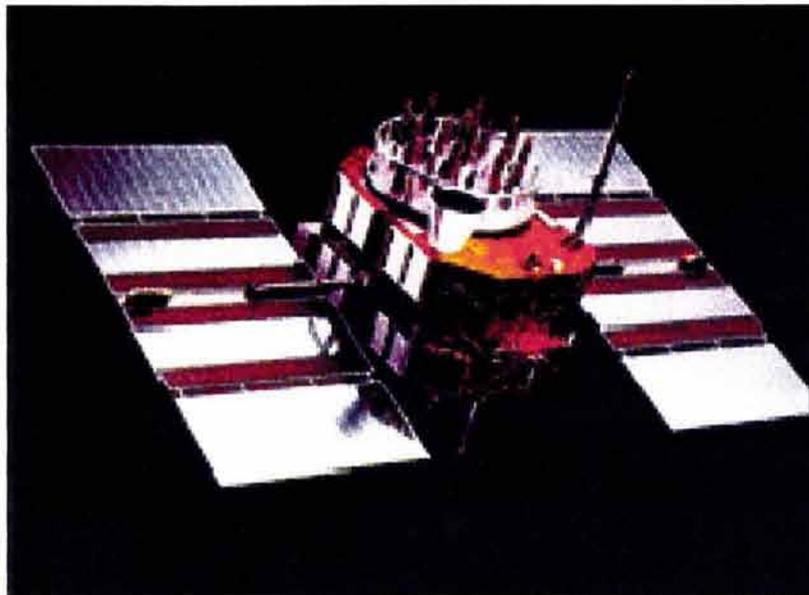


b) Sistema de Posicionamiento Global, GPS (siglas de su denominación en inglés: Global Positioning System).

En los últimos años se han desarrollado sistemas de localización geográfica conocidos como GPS. Estos métodos utilizan un conjunto de satélites de referencia y, mediante métodos de triangulación, permiten obtener valores de las tres coordenadas espaciales para un lugar localizado sobre la superficie terrestre.

La constelación GPS está formada actualmente por un total de 21 satélites primarios y 3 de reserva orbitando a 20.000 Km. de altitud con un periodo de 12 horas.

La precisión potencial es muy elevada, del orden de centímetros, ya que los satélites contienen relojes atómicos y se han depurado notablemente los sistemas de sincronización con las estaciones receptoras. Sin embargo, ya en el origen, las Fuerzas Armadas de EE.UU. introdujeron ruido en las señales de los satélites de forma que la población civil no pudieran ubicarse con demasiada precisión sobre el terreno y aprovechar el sistema para fines militares propios. El método, denominado disponibilidad selectiva. (selective availability) consiste en alterar los relojes de los satélites de acuerdo con un código específico pseudoaleatorio. El objetivo es que un usuario del SPS (Standard Positioning Service) pueda ubicarse con unos errores de 100 m (horizontal) y 156 m (vertical) el 95% de las veces.



Satélite de la constelación GPS

A pesar de su precisión, este método presenta algunas limitaciones para la construcción del MDE, entre las cuales destacan la necesidad de acceder físicamente al lugar de medida y el tiempo relativamente elevado que se requiere para realizar una toma de datos confiables. A estas dos circunstancias, que impiden en la práctica la adquisición del enorme número de datos deben agregarse algunos problemas secundarios relativos a la necesidad de condiciones favorables para las medidas (acceso directo y simultáneo a un mínimo de cuatro satélites, poca cubierta vegetal sobre la antena receptora, necesidad de una segunda estación de apoyo en funcionamiento simultáneo, etc). Estas limitaciones convierten al método *GPS* más en un recurso de apoyo que en el sistema básico de captación de datos.

c) Estaciones topográficas.

Las estaciones topográficas más avanzadas pueden generar y almacenar los resultados de sus medidas en formato digital. Algunos SIG incorporan herramientas que permiten el tratamiento e incorporación de los datos en este tipo de formatos (ver, por ejemplo, ESRI, 1991). A pesar de su utilidad, el método tiene problemas similares al anterior ya que la recopilación de la información exige la presencia física sobre el terreno. Asimismo, el tiempo necesario para realizar una toma de datos confiables y completa invalida el método como única vía de incorporación de datos en la construcción del MDE.

3.1.2 Métodos indirectos

Como se ha indicado anteriormente, es más frecuente utilizar métodos indirectos para la construcción de los MDE. Las causas son principalmente que estos métodos no necesitan acceder físicamente a la totalidad de la zona de estudio, pues utilizan documentos preexistentes, y que la formación de los datos se hace de forma relativamente rápida, aspecto básico cuando el volumen de información es muy elevado.

En las operaciones de restitución se utiliza como documento básico un conjunto de pares estereoscópicos de imágenes de la zona a estudiar. El trabajo se basa en métodos fotogramétricos que, examinando puntos homólogos en los pares estereoscópicos, deducen de su paralaje las cotas de referencia necesarias para reconstruir la topografía.

a) Restitución fotogramétrica

Actualmente existen sistemas (restituidores fotogramétricos) completamente automatizados que realizan esta labor grabando directamente los resultados en un formato digital compatible con Sistemas de Información Geográfica, SIG.

En este caso, los pares estereoscópicos son analizados mediante sistemas ópticos de exploración. La información resultante es procesada para, mediante un proceso iterativo de cálculo de correlaciones, identificando los puntos homólogos (Claus, 1984), medir paralajes y estimar altitudes (Allam, 1978).

El acceso al terreno es necesario para establecer un conjunto de puntos de apoyo que permitan fijar valores de altitud en una escala absoluta.

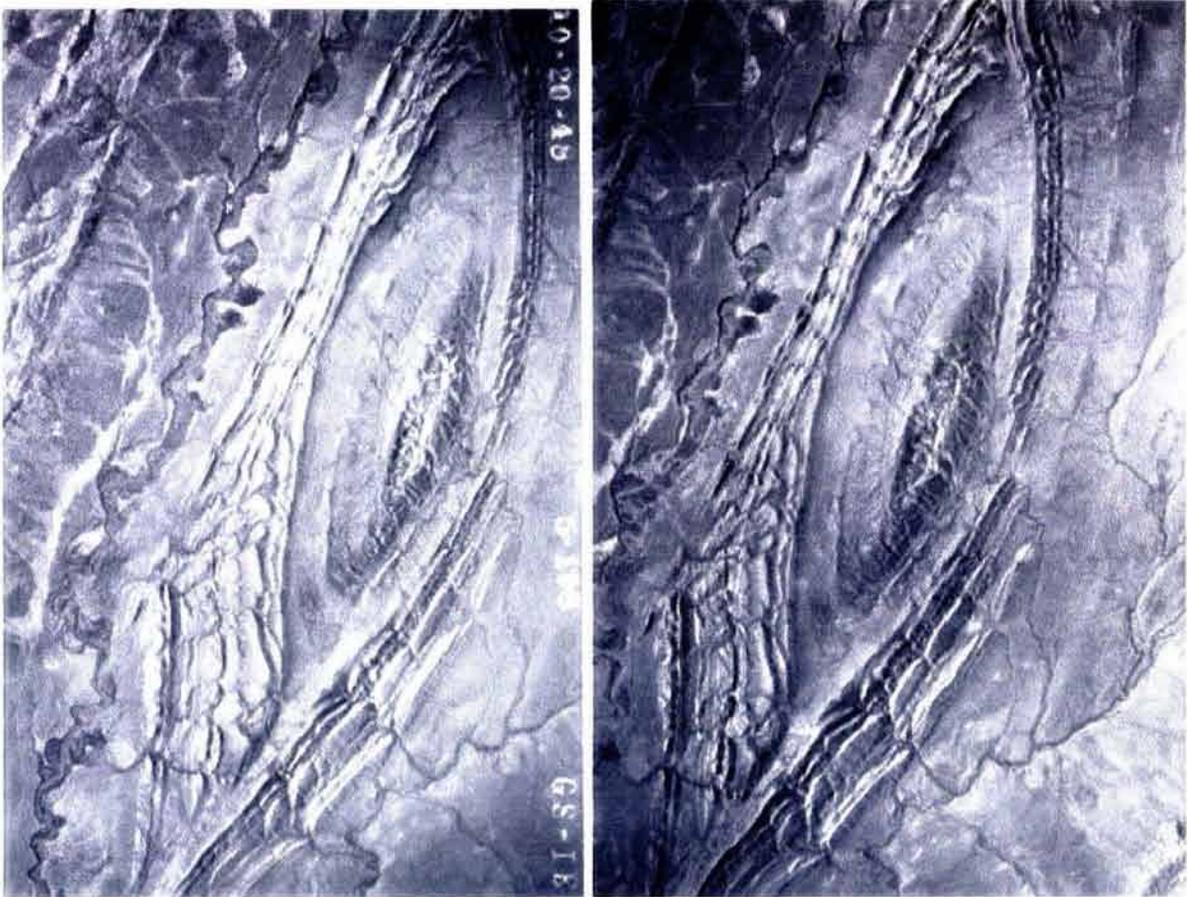
El método se utiliza también en la elaboración de cartografía analógica y sólo se diferencia en el formato de la salida de los datos.

En la cartografía convencional, la salida se realiza sobre un soporte físico estable (minuta), mientras que en el otro caso se graba directamente en un soporte informático. Ambos tipos de productos, sin embargo, no son incompatibles y pueden ser generados paralelamente.

Los pares estereoscópicos han sido hasta hace pocos años exclusivamente fotogramas aéreos, tomados por cámaras de gran formato desde aviones en vuelo a diferentes altitudes. Actualmente, a estas fotografías se han sumado las imágenes digitales tomadas por sensores pancromáticos transportados por aeronaves y satélites.

Una novedad reciente en este campo ha sido el lanzamiento del satélite SPOT en 1986, que incorpora la posibilidad de obtener imágenes estereoscópicas mediante variaciones en el ángulo de vista, programables desde tierra.

Los sensores pancromáticos del SPOT permiten una resolución de 10 m, con un espectro de captación similar al visible. Aunque la investigación en este campo es lógicamente muy reciente (Day y Muller, 1989), según algunos autores, los MDE resultantes tienen una calidad comparable a los obtenidos mediante los métodos fotogramétricos convencionales (Kaufmann y Haja, 1988).



Ejemplo de par estereoscópico formado por dos imágenes tomadas desde distintos puntos de vista. La observación mediante un estereoscopio permite observar el relieve de la zona donde ambas imágenes se solapan.

Finalmente, la construcción de MDE a partir de datos tomados por los radares de apertura sintética (SAR) que, aunque basados también en el análisis de pares de imágenes, difieren notablemente de los métodos convencionales

Las técnicas implicadas suelen agruparse bajo el término de radargrametría y la precisión de los resultados depende básicamente de la resolución espacial y de la precisión y estabilidad de la trayectoria de la plataforma.

Aunque se trata de una técnica con futuro, en la actualidad las dificultades de operación son significativas y la magnitud del error del MDE resultante es elevada como para establecer una competencia real con los métodos más convencionales. En Polidori (1992) puede encontrarse una exposición más amplia de los métodos disponibles y una discusión sobre sus características.

b) Digitalización de mapas topográficos

Los métodos fotogramétricos son utilizados generalmente por organismos estatales o por empresas especializadas. El elevado costo de los aparatos necesarios para la restitución hace difícil que pequeños equipos puedan abordar la construcción de los MDE por esta vía. La opción alternativa es la digitalización de los mapas topográficos preexistentes, lo cual puede realizarse bien de forma manual (mediante un tablero digitalizador), bien automáticamente (mediante sensores ópticos de exploración).

La digitalización automática ha sido una línea de investigación en constante desarrollo en los últimos años debido a que los métodos de digitalización manual son lentos y proporcionalmente muy costosos dentro de los procesos. El método usado más común en la actualidad se basa en el uso de microdensitómetros de exploración (scanners) que detectan un cierto número de niveles de gris (o componentes de color) en un mapa original mediante sensores ópticos.

Existen dos variantes básicas en función del formato del resultado, vectorial o raster. En la primera, el cabezal se sitúa al inicio de una línea y realiza el seguimiento de la misma de forma automática, generando directamente una salida vectorial. Este proceso presenta problemas en los casos en que las líneas se interrumpen o se cruzan: cotas en medio de las curvas de nivel, caminos o carreteras que las cortan, etc., por lo que precisa de un operador que intervenga para solucionar todas las situaciones conflictivas. En el caso de mapas sencillos y limpios de información imprecisa, el método supera en eficacia a la digitalización manual, pero si la información es compleja puede ser considerablemente más lento.

La digitalización mediante scanners puede generar también salidas en formato raster cuando el barrido se hace de acuerdo con un esquema matricial. La salida digital es una matriz de valores de gris, de componentes primarios (amarillo, cian y magenta) en los dispositivos sensibles al color o, simplemente, de blanco y negro. La generación de esta matriz es un proceso simple pero constituye una información que no es aprovechable directamente para la construcción del modelo digital. Para transformar el conjunto de datos en algo más útil se sigue a continuación un proceso de vectorización de este archivo raster que, para un mapa topográfico, implica las siguientes fases:

1. Filtrado. En esta fase, la imagen raster, se le asigna un valor umbral de gris, todos los píxeles¹ se asignen a blanco o negro. Se trata esencialmente de un realce de contraste que persigue la eliminación de las sombras, manchas en el papel, etc. y la mejor delimitación de lo que son realmente elementos significativos en el mapa.

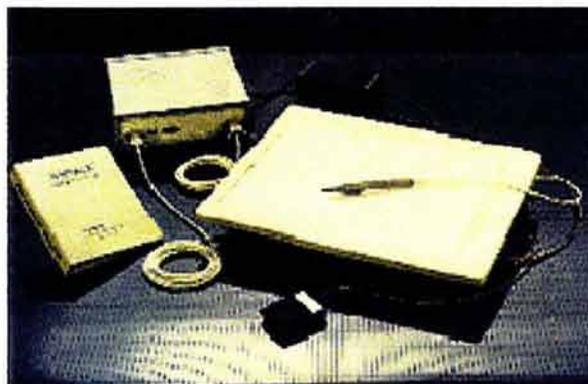
2. Vectorización. En ésta, la imagen contrastada, de forma que los píxeles adyacentes se estructuran en líneas, generándose una imagen vectorial. Su semejanza con el mapa original es función de la calidad gráfica y complejidad de éste; pero, suele ser un producto poco depurado debido a las dificultades de separar las líneas de nivel de cualquier otra entidad del mapa: retículas, toponimia, cotas, carreteras, red hidrográfica, tramas, etc. Esta fase puede realizarse de forma automática o interactiva, donde la toma de decisiones ante situaciones conflictivas la realiza un operador ante la pantalla gráfica.

3. Edición y revisión. En ésta, interviene un operador, ya que los procesos descritos suelen ofrecer resultados plagados de errores, especialmente en el caso de mapas complejos o de mala calidad. Comúnmente, el resultado no puede cumplir con las exigencias de coherencia topológica de un modelo de elevaciones y necesita de una completa revisión con la referencia del mapa original.

El resultado de este conjunto de procesos da como producto la versión digital del mapa topográfico original, cuya calidad debe ser ya suficiente para ser utilizada como MDE, una vez asignada a cada línea la altitud correspondiente. El costo total de la operación es un factor muy variable en el que la elección de un mapa original de buena calidad es decisiva. Cualquiera de los métodos anteriormente expuestos es una elección razonable si los medios disponibles lo permiten.

Dos factores han hecho, sin embargo, que la digitalización manual sea el método más empleado en la actualidad.

El primero por el equipo es de costo elevado; ya que, aunque los scanners de pequeño formato o tamaño son bastante accesibles, su utilidad es reducida para estos trabajos. El segundo es que los mapas disponibles suelen contener mucha más información que la exclusivamente topográfica, por lo que la última fase mencionada (edición interactiva para la corrección de errores), adquiere unas dimensiones tales que su rendimiento puede ser inferior al de la digitalización manual.



Los tableros digitalizadores se componen de una densa rejilla que es capaz de localizar el cursor con una precisión elevada (variable según el modelo pero no inferior a los 0.25 mm). Esta precisión es superior a la que un operador es capaz de mantener durante una sesión de trabajo.

Por los motivos anteriormente expuestos, la digitalización manual a partir de los mapas topográficos es el método más usado en la actualidad, al menos por los grupos de investigadores de medianas o pequeñas instituciones. El proceso se realiza sobre un tableta digitalizadora; sobre la cual, se monta el mapa. Las curvas de nivel se siguen manualmente con un cursor de forma que la computadora recibe a ciertos intervalos fijados por el operador las coordenadas que definen la trayectoria de la línea.

El proceso es lento y los errores inevitables, pero la experiencia muestra que si el personal está suficientemente capacitado pueden ser escasos. Por otra parte, como ya ha sido mencionado anteriormente, el método puede ser el más eficaz para la digitalización de cartografía compleja ya que se utiliza la capacidad de análisis del operador y la toma de decisiones es flexible y adaptable a las circunstancias en cada caso.

Finalmente, el método más simple de digitalización consiste en superponer físicamente al mapa topográfico una malla uniforme y extraer manualmente las altitudes correspondientes a cada nodo de la red. Esta es la versión estrictamente manual de una serie de procesos de muestreo e interpolación inherentes a la transformación vector-raster. Aunque muy rudimentario, este método permite disponer de pequeños modelos usando medios muy limitados y prescindiendo de la tableta digitalizadora y, por tanto, de los programas utilizados para manejarlo. Obviamente, el volumen de trabajo sólo es adecuado para pequeñas zonas o modelos poco detallados. Los errores son mucho más frecuentes que en la digitalización sobre la tableta; ya que la concentración necesaria y la fatiga del operador son mayores.

¹ El neologismo píxel (pl.: píxeles) proviene de la contracción de la expresión picture element y define los elementos discretos en que se divide una imagen matricial. Se ha optado por la transcripción directa del inglés ya que no existe una equivalencia en español y la palabra es de uso común en la terminología técnica.