

3
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“ESTUDIO GEOFISICO DEL CONO VOLCANICO EL
XICO, MPIO. DE CHALCO, EDO. DE MEXICO”.**

T E S I S

Que para obtener el Título de:

INGENIERO GEOFISICO

P r e s e n t a :

Artemio Araujo Mendieta

México, D. F.

1987.



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 está 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.

**ESTUDIO GEOFISICO DEL CONO VOLCANICO
"EL XICO" MUNICIPIO DE CHALCO, ESTADO DE MEXICO**

R E S U M E N

- I. GENERALIDADES**
- II. GEOLOGIA**
- III. DATOS DE PERFORACION**
- IV. GEOFISICA**
- V. INTERPRETACION DE RESULTADOS**
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

ESTUDIO GEOFISICO DEL CONO VOLCANICO
"EL XICO", MUNICIPIO DE CHALCO, ESTADO DE MEXICO

PAGINA

RESUMEN

1. Introducción.	8
2. Antecedentes.	10
3. Objetivos.	13

I. GENERALIDADES

I.1. Localización Geográfica.	14
I.2. Vías de Comunicación.	14
I.3. Clima y Vegetación.	15
I.4. Método de Trabajo.	17

II. GEOLOGIA

II.1. Geología Regional.	18
II.2. Geología Local.	24
II.2.1. Levantamiento Geológico superficial y localización de fracturas en la plantilla de cimentación de los tanques.	27

II.3. Sismicidad.	30
III. DATOS DE PERFORACION	
III.1. Pozos a cielo abierto.	31
III.2. Perforaciones con Máquina - Rotaria.	33
III.3. Pozos Perforados para agua y piezometría.	36
IV. GEOFISICA	
IV.1. GRAVIMETRIA	43
IV.1.1. Datos disponibles.	43
IV.1.2. Anomalia regional.	43
IV.1.3. Anomalia residual.	45
IV.1.4. Resultado gravimétrico.	45
IV.2. METODOS SISMICOS	46
IV.2.1. Principios fundamentales.	46
IV.2.2. Método sísmico de - - - refracción.	51
IV.2.2.1. Gráficas - - - tiempo-distancia.	53

IV.2.2.2. Determinación de la profundidad para 1, 2, 3, ..., n, con tectos horizontales.	55
IV.2.3. Método sísmico reflexión.	64
IV.2.4. Trabajo de campo.	68
IV.2.5. Determinación de velocidades.	71
IV.2.6. Trabajo de gabinete.	78
IV.2.7. Resultado sísmico.	84
 IV.3. PROSPECCION ELECTRICA	 89
 IV.3.1. Fundamentos teóricos.	 89
IV.3.1.1. Ley de Ohm en medios de tres dimensiones.	89
A) Distribución de potencial eléctrico en un terreno homogéneo e isotrópico.	94
B) Fórmula general de un <u>cu</u> adripolo.	96

C)Deducción de las fórmulas para los arreglos eléctricos mas comunes.	100
C.1 Arreglos simétricos.	100
C.1.1 - - Wenner.	100
C.1.2. - - Lee.	101
C.1.3. - - Schlumberger.	103
IV.3.2. Equipo utilizado.	105
IV.3.3. Técnicas de campo.	107
IV.3.4. Trabajo de gabinete	108
IV.3.5. Resultado geoséctrico.	110
V. INTEGRACION DE RESULTADOS	115
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
IV.1. Conclusiones.	124
IV.2. Recomendaciones.	129
ANEXOS	132
BIBLIOGRAFIA	145

RESUMEN

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión de Aguas del Valle de México, al plantear la necesidad de incrementar el volumen de agua potable para la Ciudad de México, buscó lugares cercanos que tuvieran características adecuadas para poder explotar los acuíferos; encontrando que uno de ellos, es el que se localiza en el Valle de Chalco, - Estado de México.

Para llevar a cabo dicho proyecto, fue necesario hacer una serie de estudios, los cuales resultaron positivos, sin embargo, debido a que en la región, el agua disponible tiene actualmente uso agrícola, fue necesario pensar en otra alternativa, la de intercambiar el agua potable por aguas negras tratadas, que serán enviadas de la Ciudad de México.

Para realizar dicho proyecto, se buscó un sitio elevado donde se pudiera construir un tanque regulador y de almacenamiento, que proporcionara al agua la energía potencial necesaria, para ser usada en la zona de riego por aspersión, ya que el suelo cultivable es de ti-

po arenoso. El sitio seleccionado quedó ubicado sobre el cono volcánico "El Xico", del Municipio de Chalco, Estado de México; procediendo a efectuarse un corte - sobre el lado SW de la estructura en donde se proyectó la construcción de dos tanques de almacenamiento y un camino de acceso hacia la parte alta del mismo.

Al concluirse el corte del tajo, pudo observarse una familia de fracturas con orientación SW-NE, que podrían poner en peligro la estabilidad de la futura es tructura.

Al realizar visitas al sitio del proyecto distintos es pecialistas de la SARH, se concluyó que era necesario hacer estudios de laboratorio al material, dando como resultado que la toba basáltica podía soportar cargas hasta de 25 kg/cm^2 , según pruebas de compresión simple; siendo que la carga por agregar por concepto de los -- tanques y el agua almacenada, sería alrededor de - - - 1.5 kg/cm^2 . Además también se efectuaron estudios de ti po Geológico y Geofísico, para determinar el modelo Geo lógico del cono y condiciones de estabilidad actuales.

Los datos Geológicos mostraron que en la Cuenca del - -

Valle de México, las rocas más antiguas que existen son calizas del Cretácico Superior representadas por la formación Cuautla y Mezcala, según datos inferidos de la perforación del pozo profundo Texcoco 1 y por datos obtenidos recientemente por geofísica y por las perforaciones profundas en la Cuenca.

Hacia el terciario inferior, sucedieron eventos de tipo Orogénico, ocasionando que las rocas calcáreas sufrieran grandes plegamientos con una subsecuente etapa distensiva y grandes esfuerzos tensionales, -- que dieron lugar a fallamientos de tipo normal, llamadas "Fosas Tectónicas" que al parecer son contemporáneas al sistema de fracturamiento Chapala - Acambay. Al irse erosionando las rocas de las partes altas, -- las fallas se fueron rellenando y dieron lugar a la formación Balsas.

En el Terciario Medio y Superior, la actividad volcánica de la Cuenca, tuvo un período muy intenso de -- erupciones, depositándose cuantiosas cantidades de -- lavas y tobas de diferentes composiciones y otros materiales, que al erosionarse se fueron depositando en las partes bajas.

4

En el Terciario Superior, la actividad volcánica -- cerró la salida que la Cuenca tenía hacia el N, quedando la Cuenca cerrada.

El período Cuaternario se caracterizó por tener -- etras etapas de actividad volcánica y el depósito de enormes cantidades de material aluvial y lacustre en el interior de la Cuenca, sobre el cual se formaron rios y barrancas profundas hacia el S, arrastrando -- gran cantidad de material volcánico hacia el Amacu-- zac. La actividad continuó y se fueron formando rocas nuevas de tipo basáltico y andesítico principal-- mente, así como material piroclástico y brechoide, -- que interrumpieron el drenaje hacia el S (entre -- -- Sierra Nevada y Ajusco), formando una enorme Cuenca -- cerrada que rápidamente se fue rellenando con todo ti-- po de materiales, desde cantos rodados hasta arcillas, con espesores hasta de 800 m. En algunas partes de la Cuenca, los rellenos se encuentran intercalados con -- lavas y basaltos.

De acuerdo con estudios geológicos recientes se ha -- observado que todo este conjunto litológico, está afec-- tado por fallas transcurrentes con orientación NE 50°

SW, que coinciden con sistemas de drenaje y con fracturas tanto en rellenos del Valle como en la roca.

El cono volcánico "El Xico", con altura aproximada de 110 m, es una estructura joven casi perfecta, el cual aún conserva sus rasgos, existiendo un drenaje radial incipiente en sus laderas. El cuerpo del cono presenta pseudoestratos con echados de 20 a 40°; existiendo tres sistemas de fracturamiento: radial, concéntrico y tectónico. El tectónico es el considerado de mayor riesgo, pero se cree que este sistema tuvo su origen al formarse el cono adyacente al Xico, el cual está formado por brecha volcánica basáltica y material piroclástico; sin embargo, para mayor seguridad y con el objeto de tener más datos de apoyo, se procedió a ejecutar una serie de trabajos consistentes en exploraciones directas, pozos a cielo abierto, levantamiento Geológico a detalle y el método Geofísico de resistividad eléctrica conocido como calicatas y secciones isorresistivas. Adicionalmente se consultaron los trabajos efectuados con anterioridad en la zona de estudio y se complementó la información recabada, con tres líneas sísmicas y un plano gravimétrico, los que fueron muy valiosos para la solución del problema. El método Gravimétrico se aplicó en forma regional para

observar el comportamiento general del área, el --- sísmico se acercó un poco más al objetivo y proporcionó información valiosa sobre todo, del material - ígneo existente en la zona y el método geoséptico arrojó datos del cuerpo del cono y la zona de contacto entre éste y los sedimentos lacustres que lo rodean.

De acuerdo con toda la información disponible, puede concluirse que el cono volcánico reúne características aceptables para la construcción de los tanques, siempre y cuando se tomen en cuenta los factores de seguridad sísmicos adecuados.

Geométricamente el Xico, tiene la forma de un cono - con la parte más ancha hacia la base, aún por debajo de los sedimentos lacustres y se cree que su origen - lo tiene a partir de la Sierra de Chichincutzin, por medio de una fractura, de acuerdo a los datos de Gravimetría y Sismología. Sin embargo, también se le - encontraron prolongaciones a profundidad, hacia la roca Terciaria; por lo cual se considera que si extrag mos el agua del acuífero que lo rodea, los efectos -- que éste sufriría serían mínimos y afectarían poco - al fracturamiento que tiene.

Por lo que respecta a la carga de los tanques y a la cantidad de agua almacenada, es menor que el peso del material que se le quitó al cono, por concepto del -- corte del tajo en ladera SW.

Resumiendo, se puede decir que los métodos que se -- emplearon para la solución de este problema son inter disciplinarios y que si los aplicamos correctamente -- de acuerdo con los contrastes de propiedades que presentan los materiales y las rocas a estudiar, darán -- una solución adecuada al problema.

1.- Introducción

El agua es un recurso natural renovable indispensable para todo tipo de vida, no obstante, es objeto de -- derroche y de uso irracional por parte del hombre, -- así como por la constante y progresiva contaminación, que ha traído como consecuencia la destrucción de bagtas zonas de vegetación y paisajes, que al paso del -- tiempo se han transformado en zonas semidesérticas, -- donde la vida difícilmente prospera.

Es paradójico observar que frente al gran desarrollo -- tecnológico, existente todavía personas que transpor--tan con gran sacrificio el agua desde lugares lejanos hasta donde habitan, siendo para ellos de un valor -- incalculable el vital elemento, que otros sectores de la población malgastan por ignorancia o por inconciencia.

La demanda de agua potable en la Ciudad de México, -- aumenta día a día con la incontrolable explosión demográfica, donde los sistemas de abastecimiento se vuelven insuficientes y obligan al Gobierno a realizar inversiones cada vez más costosas, para traer el agua --

desde regiones lejanas hasta esta gran urbe.

Para solucionar este problema, la Secretaría de Recursos Hidráulicos, creó la Comisión de Aguas del Valle de México. organismo encargado de planear, -- proyectar y analizar las múltiples alternativas para captar la mayor cantidad posible de agua y conducirla a la Ciudad de México por medio de acueductos y plantas de bombeo.

A la fecha se están explotando las Cuencas del Valle de México, Cutzamala la. Etapa, Amacuzac y el Valle de Lerma, siendo las fuentes de abastecimiento más comunes presas, ríos y baterías de pozos profundos, que en ocasiones se explotan irracionalmente deteriorando la ecología.

Con la finalidad de disminuir la sobreexplotación de las fuentes anteriores y además aumentar el caudal de agua que alimenta a la población del Distrito Federal, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión de Aguas del Valle de -- México, planteó la posibilidad de explotar los mantos acuíferos del Valle de Chalco, estado de México:

para lo cual se hicieron estudios tendientes a determinar la cantidad y calidad de agua que puede extraerse de este Valle, sin sobreexplotarlo.

El resultado de dichos estudios concluyó; que puede extraerse un volumen considerable de agua mediante la perforación de baterías de pozos profundos, sin embargo, debido a que en esta zona existen pozos perforados para fines agrícolas, la consecuencia inmediata sería el cambio de cultivos de riego a temporal y la baja en la producción en granjas y establos, repercutiendo en los ingresos de los habitantes de la región, que se verían obligados a emigrar a otros lugares en busca de fuentes de trabajo para subsistir, -- este fenómeno se observa en los Valles de Lerma y -- México, principalmente.

2.- Antecedentes

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión de Aguas del Valle de México, al querer incrementar el volumen de agua potable captado para la Ciudad de México, consideró la posibilidad de explotar los mantos acuíferos del Valle de --

Chalco.

Si, en embargo, debido a que el agua es usada con fines agrícolas se planteó la necesidad de crear una zona de riego que proporcionara fuentes de trabajo e ingresos a la población; dicha zona de riego sería alimentada con excedentes de aguas tratadas, - procedentes de la Ciudad de México.

Para llevar a cabo dicho proyecto, fue necesario - localizar un sitio elevado que por medio de un tanque regulador y de almacenamiento proporcionara a el agua la energía potencial necesaria. para distribuirla en la zona de riego por aspersión, ya - que el suelo cultivable es de tipo arenoso.

Una vez localizado el lugar apropiado. el cual que - dó ubicado en el Cono Volcánico "El Xico", se procedió a efectuar los siguientes trabajos:

- Corte de tajó en la parte superior de la ladera SW del cono y nivelación de la -- plantilla en que se alojarán los tanques de almacenamiento.

- Camino de acceso al sitio del proyecto.

Concluidos los trabajos anteriores fue posible observar en el corte y en la plantilla la presencia de -- fracturas, lo que puso en duda la capacidad de carga de la roca. la cual fue sometida a pruebas de laboratorio triaxiales y de compresión simple. cuyos resultados fueron satisfactorios.

A raíz de diversas visitas efectuadas al proyecto por técnicos de la Secretaría de Agricultura y Recursos - Hidráulicos, se recomendó hacer un estudio de prospección geofísica y localización de las fracturas, en el área destinada para cimentar los tanques reguladores y de almacenamiento.

Para realizar dicho trabajo se analizó el problema -- planteado y se eligió el método más adecuado para su solución, de acuerdo a las propiedades físicas de los materiales y del equipo disponible; siendo en este caso el método eléctrico con la modalidad de perfiles - geoelectricos. los cuales fueron distribuidos estratégicamente en la superficie a estudiar.

3.- Objetivos

- a) Localizar los sistemas de fracturas y sus dimensiones horizontales y verticales explicando el origen de las mismas, indicando si son activas.
- b) Establecer la relación que existe entre el Cono "El Xico", El Cono adyacente y los sedimentos lacustres, que lo rodean.
- c) Efectuar un levantamiento geológico detallado de las diferentes unidades litológicas y estructuras existentes localmente, correlacionándolas con la información proporcionada por la investigación geofísica.
- d) Hacer un modelo geológico del subsuelo con los datos obtenidos por medio de los diferentes métodos aplicados.
- e) Determinar en la plantilla de cimentación de los tanques, la profundidad de las fracturas y la posible existencia de cavernas u oquedades, en el cuerpo del cono.

I. GENERALIDADES

I.1 Localización Geográfica.

El proyecto "El Xico" se localiza en la porción - -
oriental del estado de México, hacia el E del Dis--
trito Federal.

Sus coordenadas geográficas tomadas de la Carta To-
pográfica Chalco (E14 B31), escala 1:50.000, edita-
da por DETENAL en el año de 1979 son:

19° 15' y 19° 17' de latitud Norte

98° 55' y 98° 57' de longitud W.

(fig. I.1)

I.2 Vías de Comunicación.

El acceso al lugar del proyecto se efectúa partiendo
de la Ciudad de México por la autopista México-Puebla.
recorriéndose 33 kms aproximadamente hasta llegar al -
cruce con la carretera federal No. 115. México-Cuau- -
tla, por la que se transitan 4 kms. hasta llegar al po
blado de Chalco; a partir del cual se continúa hacia -
el W por la carretera que conduce a Tláhuac - - --

4.5 kms., para llegar al cerro "El Xico", sobre el que se encuentra ubicada el área del proyecto, los accesos son transitables en cualquier época del año (fig. I.1).

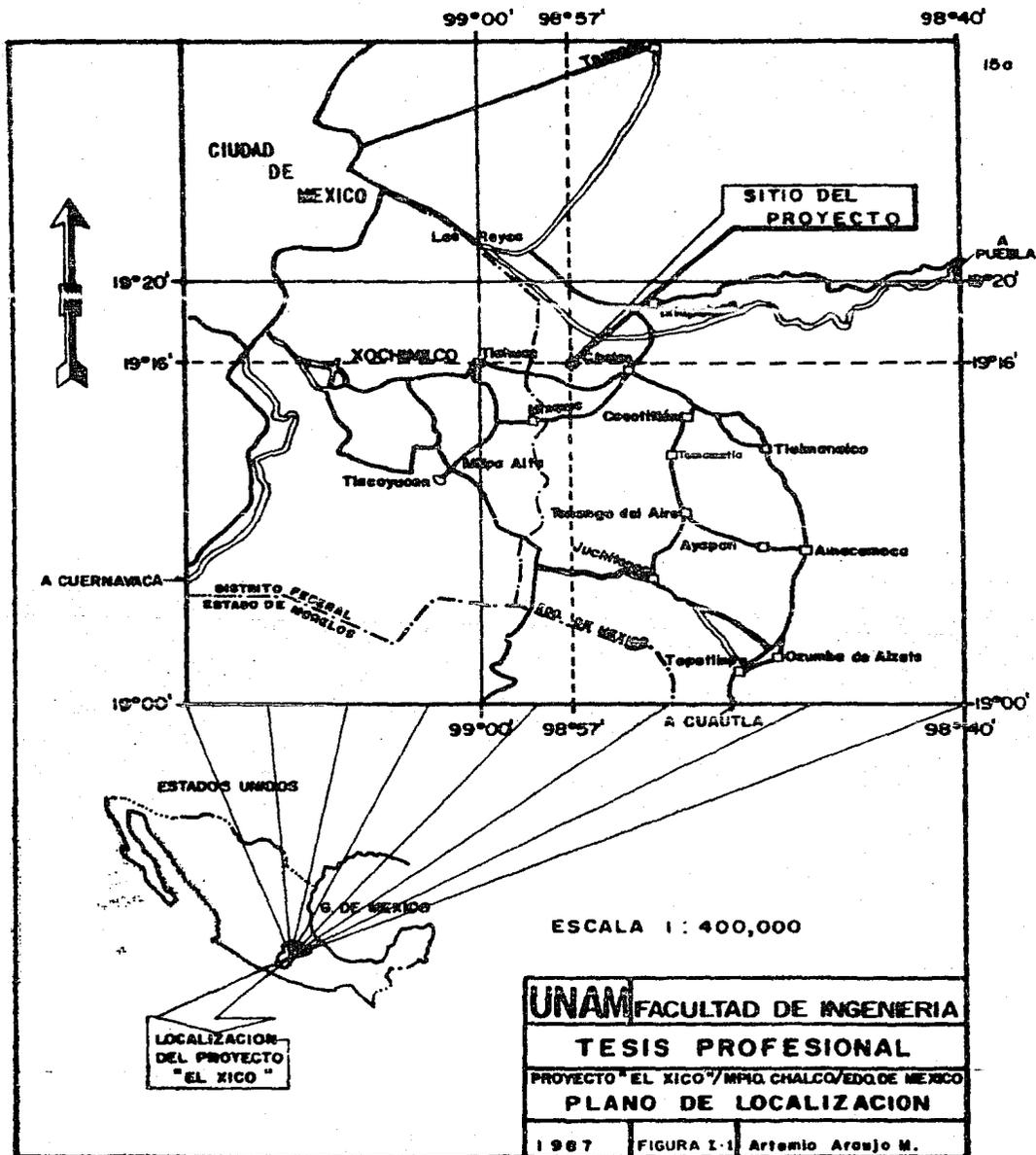
1.3' Clima y Vegetación

Clima.- Según la Carta de Climas de W. Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana; el lugar del proyecto tiene un clima que corresponde a los índices siguientes:

C (W) (W)' b (i) que significa subhúmedo templado, de acuerdo a su grado de humedad y temperatura.

C (W). El más seco de los templados con lluvias en verano.

(W)'. Régimen de lluvias en verano, por lo menos - 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad - caliente del año, que el más seco.



con un porcentaje de lluvia -
invernal entre 5 y 16.2 de la
total anual.

b.- Verano fresco largo, temperatura del mes más
caliente entre 6.5° y 22°C.

(1).- Temperatura con poca oscilación entre 5° y
7°C.

La temperatura y precipitación medias anuales son de
16°C y 614 mm, respectivamente, de acuerdo a la esta-
ción climatológica más cercana al lugar del proyecto
y con un periodo de observación de más de 10 años.

Vegetación.- La vegetación predominante en esta re-
gión, es la característica a las regiones subhúmedas
templadas, siendo las especies vegetales más comu-
nes las siguientes:

NOMBRE COMUN

NOMBRE CIENTIFICO

Encino

Quercus Graciliformes

Maguey

Agave Sp

Nopal

Junqlans Mollis

Bisnaga

Echinocactus Sp

Los cultivos que hay en la zona son principalmente: **maíz, frijol, cebada, avena, calabaza y alfalfa.**

I.4 Método de Trabajo

Para efectuar el presente trabajo, se procedió de la siguiente forma:

- 1. Recopilación de la información geológica, topográfica y geofísica existente de la zona.**
- 2. Chequeo de campo de la información existente.**
- 3. Levantamiento litológico y estructural a detalle con apoyo de la información existente, vaciando los datos en plano topográfico escala 1:10.000 y localización de fracturas en la plantilla de cimentación de los tanques.**
- 4. Localización de los ejes más favorables para - - efectuar las secciones y sondeos eléctricos, así como para la excavación de los pozos a cielo - - abierto y perforaciones con máquina rotaria.**
- 5. Adaptación de la información de trabajos gravimé**

tricos y sismológicos existentes, al objetivo del presente estudio.

6. Realización de los trabajos de geofísica eléctrica en el campo.
7. Integración de toda la información obtenida.
8. Elaboración del informe.

II. GEOLOGIA

II.1 Geología Regional

El proyecto "El Xico", se encuentra localizado en la parte Sur-Oriental de la Provincia Fisiográfica denominada "Eje Neovolcánico" o "Zona de Fosas Tectónicas" (Alvarez Jr, 1957) y en la parte Sur-Oriental - también, de la Cuenca del Valle de México.

Por su posición estratigráfica las formaciones geológicas de la Cuenca del Valle de México y sus alrededores pueden agruparse en los siguientes periodos: -- Cretácico Superior (K_s), Terciario Inferior (T_i), -- Terciario Medio (T_m), Terciario Superior (T_s) y -- Cuaternario (Q). (fig. II.1).

ESTRATIGRAFIA DEL AREA DE ESTUDIO

ERA	SISTEMA	SERIE	EDAD M.A.	(C.J. SCHLAEPFER) CUENCA DEL VALLE DE MEXICO	(A. ARAUJO MENDIETA) AREA DE ESTUDIO
CENOZOICA	TERTIARIO	RECIENTE Y PLEISTOCENO	1		CAPAS LACUSTRES FORMACION ROCAS VOLCANICAS FORMACION TARANGO
		PLIOCENO	13		FORMACION TARANGO FORMACION IZTACCIHUATL
		MIOCENO	25		FORMACION TEPOZTLAN
		OLIGOCENO	36		ROCAS VOLCANICAS
		EOCENO	58		FORMACION BALSAS
		PALEOCENO	63		?
MEZOZOICA	CRETACICO	SUPERIOR	99		FORMACION MEZCALA FORMACION CUAUTLA

FIGURA II-1 TABLA DE CORRELACION ESTRATIGRAFICA.

CRETACICO SUPERIOR (Ks)

Este periodo se encuentra representado por rocas carbonatadas y terrígenas, de las formaciones Cuautla y Mezcala, que les suprayace el material ígneo del terciario.

FORMACION CUAUTLA.

Está constituida por capas de caliza de espesores delgados y gruesos con fósiles y nódulos de pedernal. variando en coloración de gris claro a oscuro y en ocasiones se observan capas arcillosas.

FORMACION MEZCALA.

Está constituida por capas delgadas de caliza interstratificadas con lutitas y limolitas.

TERCIARIO INFERIOR. (Ti) (Paleoceno y Eoceno)

Se cree (Fries 1960), que a fines del Cretácico o principios del Terciario, las rocas de la Cuenca del Valle de México fueron afectadas por la Orogénia Larumide, como consecuencia de la subducción de la placa oceánica de cocos, bajo la placa Continental

Americana, lo cual ocasionó que las rocas sufrieran grandes plegamientos y levantamientos, quedando - - expuestas a ciantos de metros de altura. Al término de la etapa de plegamiento y levantamiento, tuvo lugar una etapa distensiva causada por esfuerzos tensionales, originando con ello Grandes Sistemas de Fallamientos Normales y formando las llamadas "Fosas Tectónicas, que al parecer son contemporáneas al origen del fracturamiento Chapala - Acambay.

Al actuar la erosión sobre las rocas pre-existentes - se fueron depositando grandes cantidades de sedimentos continentales, fragmentos de calizas con pedernal y productos piroclásticos derivados de la actividad volcánica, consistentes en brechas y lavas de composición basáltica a lo que se le llama Formación Balsas.

TERCIARIO MEDIO (Tm) (Oligoceno y Mioceno)

Las rocas volcánicas mas antiguas en la cuenca, se les ha llamado "Rocas Volcánicas del Terciario Medio" y -- comprenden: tobas, brechas, andesitas, riolitas, dacitas, basaltos y productos volcánicos erosionados que - se encuentran a los pies de las Sierras de las Cruces, de Río Frío, Nevada, Guadalupe, Cerro de Chapultepec, Peñón de los Baños y Bases de Iztaccíhuatl y Ajusco.

FORMACION TEPOTZTLAN

Aflora bajo los derrames de la Formación Chichinautzin y está compuesta por rocas volcánicas piroclásticas, asociadas con derrames de lavas andesíticas, depositadas por corrientes de agua o lodos en capas de 0.5 a 10 m de espesor.

TERCIARIO SUPERIOR (Ts) (Plioceno)

Este período del (Ts) se caracteriza por un nuevo ciclo de vulcanismo y fallamiento, el cual está representado por: lava basáltica y dacitas (Sierra de Pachuca y Guadalupe), lavas andesitas, dacitas y piroclásticos (Sierra Nevada y de las Cruces).

Los primeros movimientos en la zona de fracturamiento Clarión originaron complejos volcánicos andesíticos (Prominencias del Ajusco).

Durante el Plioceno Superior, los productos volcánicos consistieron en andesitas y basaltos formando extensas cordilleras, interrumpiendo desde entonces la conexión directa que pudo existir hacia el Norte de la Cuenca, acumulándose rápidamente potentes espesores de aluviones y sedimentos lacustres, inter-

estratificados con horizontes piroclásticos derivados de la constante actividad volcánica; a los que se les llama Formación Tarango.

CUATERNARIO (Q) (Pleistoceno)

Durante el Cuaternario, las condiciones climatológicas cambiaron dominando el frío y la humedad, formándose glaciares. Las lluvias y los deshielos formaron grandes arroyos y barrancas profundas en la Formación Tarango, originando extensos valles que se extendían hacia el sur, desaguando hacia el Amacuzac. En la porción sur estos sistemas fluviales erosionaron casi toda la Formación Tarango.

Contemporáneamente al desarrollo de esta red fluvial se intensificaron las erupciones volcánicas, rellenando los drenes con avalanchas ardientes y material brechoide, a partir de entonces hubo continua actividad volcánica, tanto en el norte como en el sur de la Cuenca.

Debido al fracturamiento profundo del sistema Clarión se desarrolló el vulcanismo básico del Cuaternario, consistente en lavas basálticas de la Formación Chichinautzin, tobas, basaltos y andesitas en otras --

localidades.

El material volcánico con espesor de cerca de - - -
3 000 m (Mooser, 1961), interrumpió definitivamente
el drenaje de la Cuenca al Sur, obturando el gran -
espacio situado entre las bases del Ajusco y la - -
Sierra Nevada, creando así una enorme Cuenca cerrada,
la Cuenca de México.

La Sierra Nevada tuvo actividad en este período - --
expulsando productos lávicos basálticos y andesíti--
cos intercalados con piroclásticos.

Al actuar los agentes erosivos y seguir la constante
actividad volcánica, la Cuenca se rellenó rápidamen-
te con cantos rodados, gravas, arenas, cenizas y ar-
cillas con espesores hasta de 800 m. el paisaje de
la Cuenca se transformó en una enorme planicie, en -
la que se formaron lagos someros sobre capas impermea-
bles de arcillas.

Toda esta secuencia ha sido afectada finalmente, por
efectos de tectonismo que originó fallas transcurren-
tes NE - SW, notándose en las unidades litológicas -
mas recientes plegamientos incipientes y fracturas -
en los materiales de relleno asociados con ellas.

Esto se puede observar en varias localidades de la Cuenca de México, por ejemplo: Tepotzotlán y Tlalmanalco.

II.2 Geología local

Las Sierras de Santa Catarina y Chichinautzin están constituidas por varios conos cineríticos y basálticos. que representan las máximas elevaciones dentro de una extensa planicie de sedimentos lacustres, -- uno de estos conos es el Cerro "El Xico", que posiblemente representa una salida lateral de la Sierra de Chichinautzin. marcando con ello las últimas manifestaciones de la actividad volcánica en el SE de la Cuenca de México.

El cono "El Xico", con altura aproximada sobre el --- valle de 110 m.

Se caracteriza por la conservación original del cráter, sin presentar un patrón bien definido de drenaje; está constituido por pseudoestratos de toba arenosa lítica, horizontes de aglomerado y escoria. todos de -- composición basáltica y de color gris claro a gris -- obscuro y con material superficial de color crema. los pseudoechados son hacia afuera y hacia adentro del cono, con inclinaciones que varían de 20° a 40°.

En el cuerpo de la estructura es posible identificar tres sistemas de fracturas:

- 1o. Sistema radial con rumbos en todas las direcciones y desarrollo vertical.
- 2o. Sistema concéntrico, es normal al anterior y en forma circular al centro del cráter.
- 3o. Sistema tectónico, el más importante de los tres, localizado sobre todo en las laderas NE y SW del cono. sus rumbos varían de 40° a 75° NE-SW y su desarrollo es vertical.

En los dos primeros sistemas, la mayoría de los planos de fractura, están cerrados o rellenos con caliche y/o material de emisión. Estas fracturas genéticamente están relacionadas con el enfriamiento que sufrió el material volcánico durante la formación del cono.

El tercer sistema de fracturas, presenta planos con aberturas que van de 0.01 m, hasta 0.70 m y por procesos erosivos se han formado cavidades con dimensio

nes hasta de 2.00 m de alto x 4.00 m de ancho y - -
7.00 m de longitud; no existe comunicación entre es-
tas cavidades (ver fig II.3).

Adyacente al cerro "El Xico", en su parte NE, existe otro cono constituido por bloques de basalto, piroclásticos, arenas y cenizas volcánicas. clasificado en las cartas de DETENAL como basalto y brecha volcánica basáltica (E-Bvb), cuya formación se supone fue posterior a la formación de "El Xico". y originó fracturas al cuerpo del Xico.

En la parte baja y rodeando a ambos conos hay sedimentos aluviales y lacustres, depositados tanto antes -- del nacimiento de las estructuras volcánicas, como -- después de haberse formado.

En la base del cono cinerítico, a 35.00 m de la ladera Sur, se manifestaron grietas de forma y rumbo irregulares con anchos máximos de 1.40 m. longitudes de -- 60.00 m y profundidades observadas de 250 m. estas -- grietas que están dispuestas casi paralelas a la ladera del cerro. son superficiales y afectan solamente al material limoso (ver fig. II.2).

Recientemente en el lado Oriente, se formaron otras - -

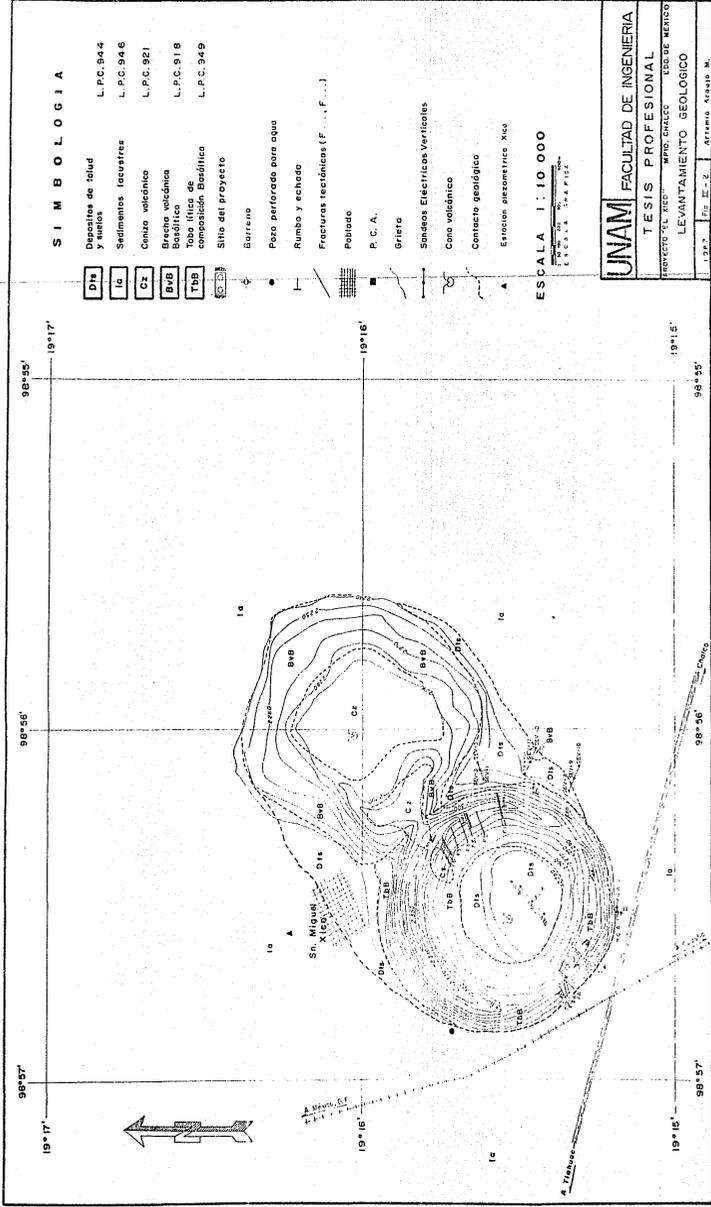
grietas en el material de relleno que al parecer se relacionan con fracturas más profundas que afectaron también a la roca.

II.2.1. Levantamiento geológico superficial y localización de fracturas en la plan-tilla de cimentación.

Para el mejor conocimiento geológico de la zona y del sitio del proyecto, se programó un reconocimiento su perfi-cial, donde se marcaron los aspectos geológicos y estructurales más sobresalientes de los conos volcá-nicos, como son: topografía, grietas, fracturas, - - rumbos y echados de los pseudoestratos, contactos, - - extensión y delimitación de las diferentes unidades - litológicas, así como su clasificación cronológica en base a su posible edad (ver fig. II.2 y II.3).

En forma complementaria se marcaron: El sitio del pro-yecto, P.C.A., barrenos con máquina rotaria y las - - secciones que se elaboraron por medio de sondeos eléc-tricos verticales.

La Geología del sitio queda resumida en la fig. II.2.- donde se tienen las siguientes unidades; clasificadas de más antiguas a más jóvenes.



S I M B O L O G I A

- D1a Depósitos de Talud y Arena L.P.C. 944
- 1c Sedimentos lacustres L.P.C. 946
- C2 Conazo volcánico L.P.C. 921
- B1B Brechas volcánicas Basáltico L.P.C. 918
- TB1 Toba lítica de composición Basáltica L.P.C. 949

- Barreno
- Pozo perforado para agua
- Rumbo y echado
- Fracturas reológicas (F... F...)
- Poblado
- P. C. A.
- Grieta
- Sonreos Eléctricos Verticales
- Cano volcánico
- Contacto geológico
- Estacion pesimétrica Xco

ESCALA 1 : 10 000
1:10,000
1:10,000

UNAM FACULTAD DE INGENIERIA
 TESIS PROFESIONAL
 PROYECTO DEL AREA: MPIO. CHANCSÍ - SED. DE MEXICO
 LEVANTAMIENTO GEOLOGICO
 1987. No. E-2. Arceles Aguilar M.

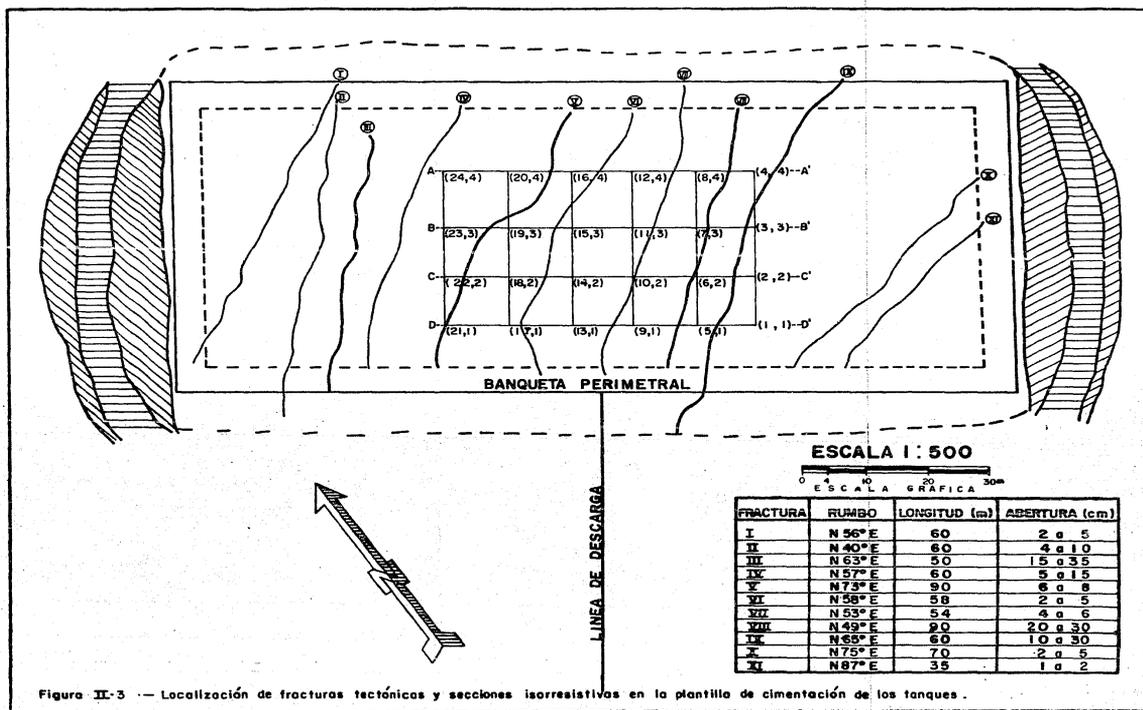


Figura II-3 -- Localización de fracturas tectónicas y secciones isoresistivas en la plantilla de cimentación de los tanques .

1. Toba Lítica de Composición Basáltica (TbB), está formada por una toba arenosa compacta en forma de pseudoestratos con echados radiales hacia el centro y el exterior del cono, presentando algunos horizontes con granulometría fina y otros de grano mayor, lo que nos indica las diferentes emisiones del cono y los subsecuentes períodos de calma, -- el material presenta una coloración que va de gris claro a gris oscuro y se encuentra formando casi la totalidad del cono cinerítico con edad (según Bryan, 1948) Cuaternaria (fines del pleistoceno).

2. Basalto y Brecha Volcánica Basáltica (B-BV), esta unidad forma casi el total del cono -- adyacente al cinerítico y está formada por -- un basalto en forma de bloques de color gris azulado a negro con algo de olivino, asociado con brecha de la misma composición, la -- cual está constituida por bombas, lacilli y ceniza volcánica; el origen de este material se considera posterior al del cono cinerítico.

3. Ceniza Volcánica (Cz), está localizada en la

parte superior del cono basáltico y en el contacto de ambos, está formada por material muy fino del tamaño de las partículas de las arcillas y su color varía de crema a beige, se cree que este material puede ser producto de la última emisión del cono basáltico ya que se localiza la mayor parte sobre él sin erosionar, lo cual indica que el período de exposición a los agentes erosivos ha sido corto y por ende su origen puede corresponder a la última emisión del cono brechoide.

4. Sedimentos Lacustres (La). se consideran a los depósitos posteriores a la formación de los conos que fueron depositados en el extinto Lago de Chalco y están compuestos por horizontes de arcilla, arenas y capas de limos alternados con capas de material orgánico -- (turba). su coloración varía de café oscuro a negro.
5. Depósitos de Talud y Suelos (Dts). se le llama con este nombre al material arcillo-limo-arenoso con fragmentos pequeños de basalto

y algo de gravas. depositado en el talud de las estructuras y en el interior del cono cinerítico, debido a la erosión y a la fuerte pendiente, su coloración y espesor son variables.

II.3. Sismicidad

De acuerdo con la carta sísmica de la República Mexicana, editada por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (1959) y modificada en 1970 por él mismo, el sitio del proyecto se encuentra limitado por dos grandes zonas de fracturamiento, al norte la Chapala Acambay y al sur la Clarión (Mooser, 1961), que son los sistemas principales que limitan a la Cuenca del Valle de México, cuando comprendido el proyecto dentro de la zona sísmica o de sismos muy frecuentes.

Además se ubica a 2 km al NW de una de las fallas transcurrentes que afectan al eje neovolcánico (Marín y Aguayo, 1986).

En los últimos tiempos la frecuencia sísmica en la Cuenca del Valle de México ha aumentado, revelando sus

efectos principalmente en la zona edificada constituida por terrenos blandos de constitución geológica pobre y con elevado porcentaje de líquidos.

De 1909 a 1959, se encuentran registrados 14 epifocos en la cuenca, siendo el más cercano al sitio de estudio el ocurrido el 23 de diciembre de 1950 en el área de Iztapalapa.

El total de movimientos telúricos registrados en Tacubaya con grado mayor de III en la escala de Mercalli y sentidos en la Ciudad de México, en el período considerado (1909 - 1959) es de 7,366 sismos.

El sismo más reciente que afectó a gran parte de la Ciudad de México, ocurrió el 19 de septiembre de 1965, con intensidad de 8.1⁰ en la escala de Richter.

III. DATOS DE PERFORACION

III.1. Pozos a cielo abierto (P.C.A.)

Se efectuaron dos P.C.A., localizados en el plano de la fig. II.2 y fueron excavados en la parte de depósitos lacustres, el primero aproximadamente a 30.00 m del --

pie del cono cinerítico en su porción sur y el segundo a 20.00 m al este del anterior. Los P.C.A., están labrados sobre una de las grietas que se abrieron en esta zona, con el objeto de determinar su continuidad y sus características físicas.

El P.C.A. No. 1, tuvo una profundidad total de 4 m y de lados 1.90 m x 1.20 m, la litología se muestra en la fig. III.1 siendo la siguiente:

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCION LITOLOGICA
0.00 a 0.20	- Suelo
0.20 a 0.50	- Material pumítico
0.50 a 0.75	- Limo café obscuro
0.75 a 1.00	- Material pumítico
1.00 a 3.15	- Limo negrusco
3.15 a 3.25	- Limo café claro
3.25 a 4.00	- Limo café obscuro

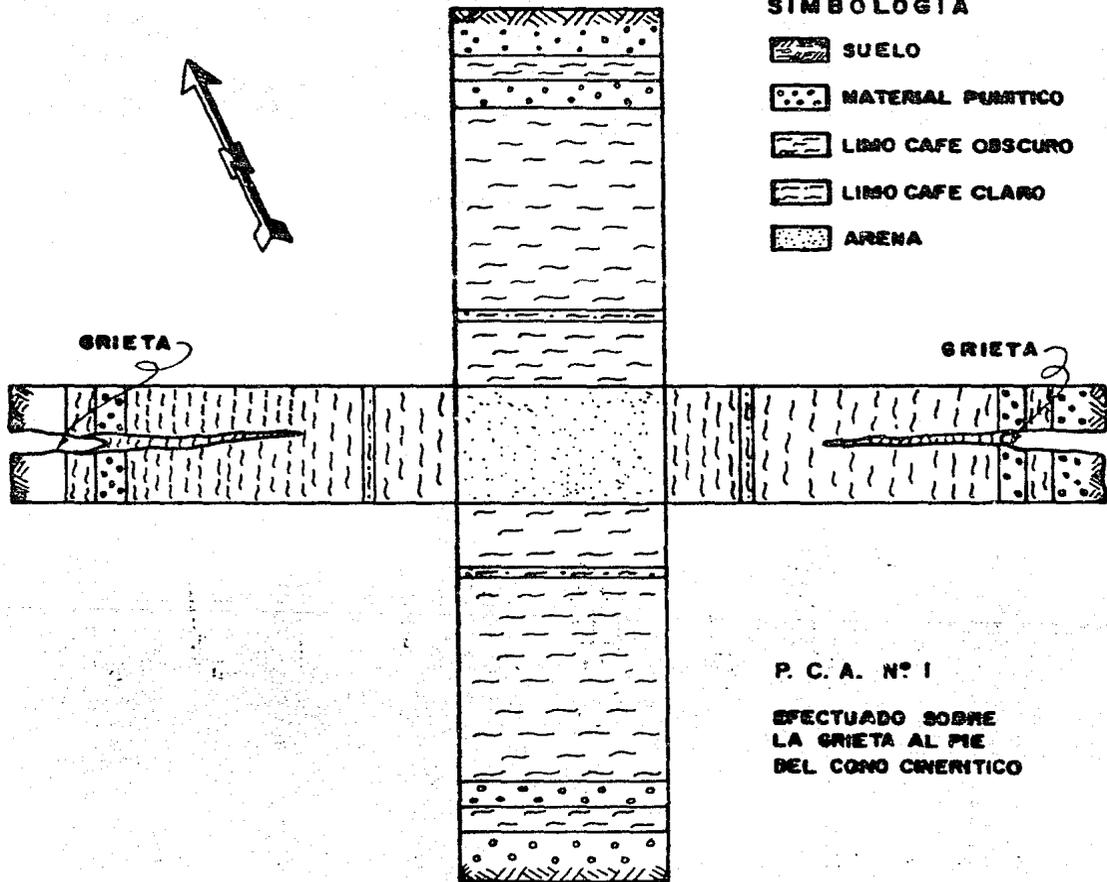
El fondo del P.C.A., está constituido por material argoso de color café claro a café lechoso.

El P.C.A. No. 2, con una profundidad total de 1.80 m y de lados 2.20 m x 2.25 m, se muestra en la fig. III.2 y sus horizontes son los siguientes:

PLANTA

SIMBOLOGIA

-  SUELO
-  MATERIAL PURTICO
-  LIMO CAFE OSCURO
-  LIMO CAFE CLARO
-  ARENA



P. C. A. N° 1

EFECTUADO SOBRE
LA GRIETA AL PIE
DEL CONO CUERTEICO

ESCALA 1 : 50


0 25 50 1 2m.
ESCALA GRAFICA

FIGURA III-1 PLANTA DEL P.C.A. N° 1

SIMBOLOGIA

-  Suelo
-  Material pumítico
-  Limo café oscuro
-  Ceniza volcánica

PLANTA

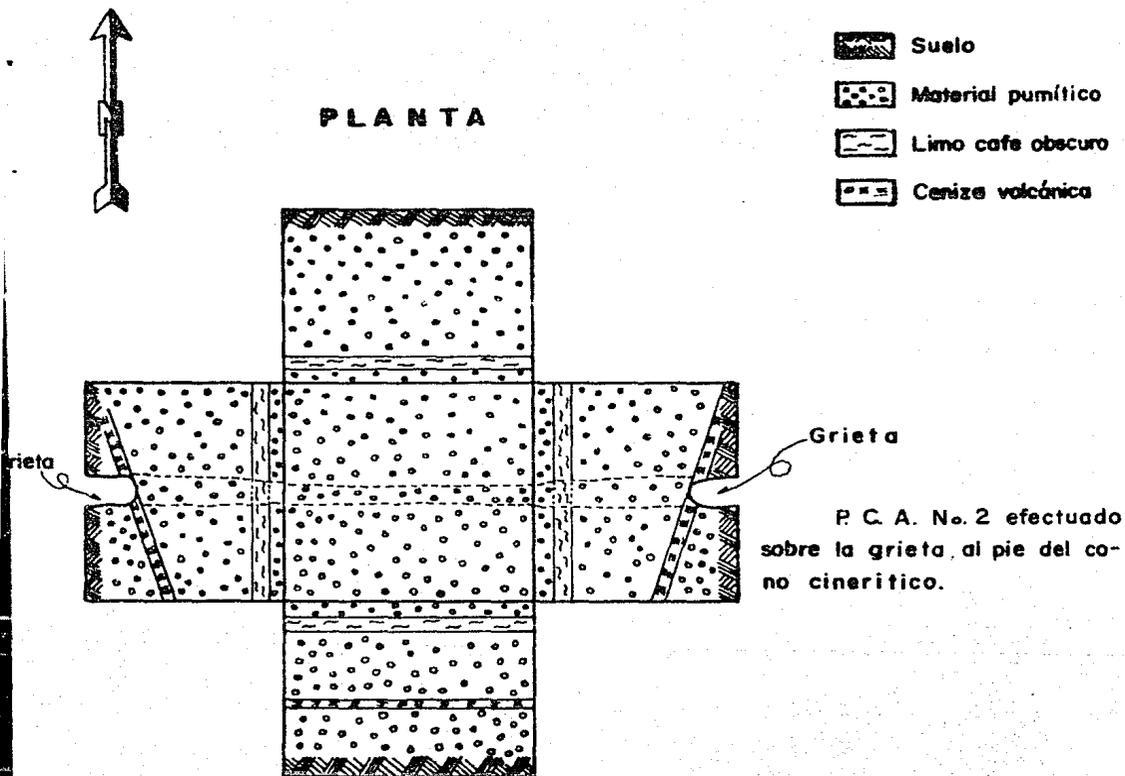


FIGURA III · 2 PLANTA DEL P.C.A. N° 2

PROFUNDIDAD (M)	DESCRIPCION LITOLOGICA
0.00 a 0.20	- Suelo
0.20 a 1.50	- Material pumítico in tercalado con una pe queña capa inclinada de ceniza volcánica - en el lado E y W. y - horizontal en el lado Sur.
1.50 a 1.65	- Limo café oscuro
1.65 a 1.80	- Material pumítico.

En los dos Pozos a Cielo Abierto, se pudo observar que las grietas son superficiales acuñándose la más profunda a 2.60 m, siendo su ancho mayor sobre el terreno y disminuyendo a medida que se profundiza.

Por lo anteriormente expuesto, estas grietas son superficiales y solo afectan un pequeño paquete de los sedimentos que se encuentran depositados al pie del cono - o ser manifestaciones de problemas tectónicos mas profundos.

III.2 Perforación con máquina rotaria

Con la finalidad de establecer de manera directa la -- relación que existe entre el cono cinerítico "El Xico"

y los sedimentos lacustres que lo rodean, se efectuaron con exploraciones directas con máquina rotaria - marca Long-Year No.38 con diámetro NQ (7.6 cm.) con recuperación continua de núcleos, ambas perforaciones están localizadas en la zona cercana a la ladera Sur del cono y se encuentran separadas 280 m, una de otra, en dirección casi E-W (ver localización en el plano de la fig. II.2).

Las columnas se muestran en los cortes litológicos 1 y 2 (figs. III.3 y III.4). Describiéndose megascópicamente a continuación como sigue:

EXPLORACION I (V)

Elevación 2237.08 m.s.n.m.

PROFUNDIDAD (M)

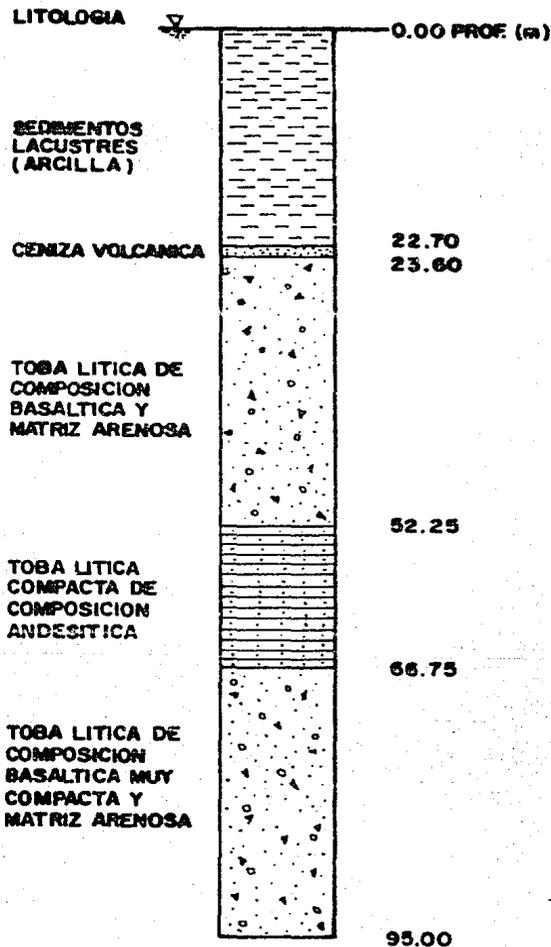
0.00 a 22.70

DESCRIPCION LITOLOGICA

- Sedimentos de origen lacustre, principalmente arcillas, limos y algunos horizontes de material orgánico de coloración café oscuro a negro.

22.70 a 23.60

- Horizonte de cenizas volcánicas.



ESCALA VER. 1 : 500

CORTE LITOLOGICO

FIGURA III-3 CORTE LITOLOGICO DE LA EXPLORACION I (v)

23.60 a 52.25

- Toba lítica de composición basáltica con matriz arenosa, presentando coloración de gris claro a gris obscuro.

52.25 a 66.75

- Toba lítica muy compacta con matriz y composición andesítica, se encuentra sana y su coloración varía de gris obscuro a crema.

66.75 a 95.00

- Toba lítica de composición basáltica con matriz arenosa, presentando coloración de -- gris claro a gris obscuro.

EXPLORACION II (V)

Elevación 2236.46 m.s.n.m.

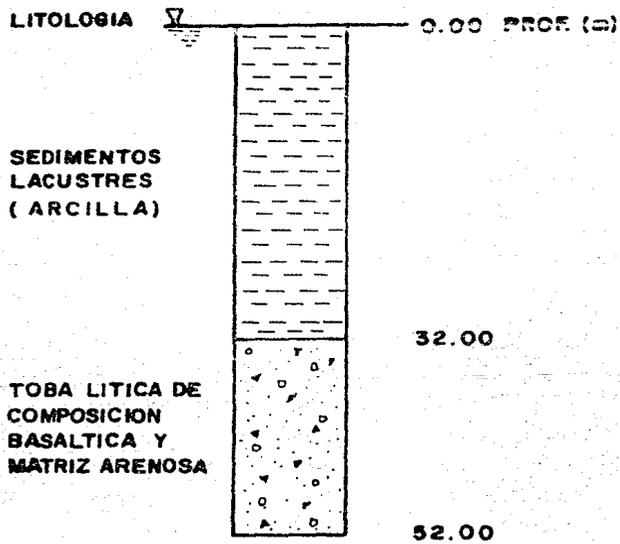
PROFUNDIDAD (M)

0.00 a 32.00

DESCRIPCION LITOLOGICA

- Sedimentación de origen lacustre, principalmente arcillas, limos y --

EXPLORACION N° II (V), PROYECTO "XICO" MPIO. CHALCO, EDO. DE MEXICO



CORTE LITOLOGICO

ESCALA VER. 1 : 500

FIGURA III.4 CORTE LITOLOGICO DE LA EXPLORACION II (v)

algunos horizontes de material orgánico de coloración café oscuro a negro.

32.00 a 52.00

- Toba lítica de composición basáltica con matriz arenosa, presentando coloración de gris claro a gris oscuro.

La perforación se suspendió por haberse quedado atascada la tubería y la barrena a 52.00 m de profundidad. Como se pudo comprobar con las perforaciones directas, el cono cinerítico se extiende lateralmente siguiendo sensiblemente la misma inclinación, que tienen sus laderas, al hacer contacto con el material lacustre y además no solo existe material de composición basáltica, sino que el cono tuvo emisiones de composición andesítica.

III.3 Pozos perforados para agua y piezométricos.

Con el objeto de contar con la mayor cantidad de información, se incluyeron cortes litológicos de pozos cer-

canos al sitio del proyecto, por considerarse los datos útiles para cumplir los objetivos de este trabajo.

Pozo piezométrico "Xico"

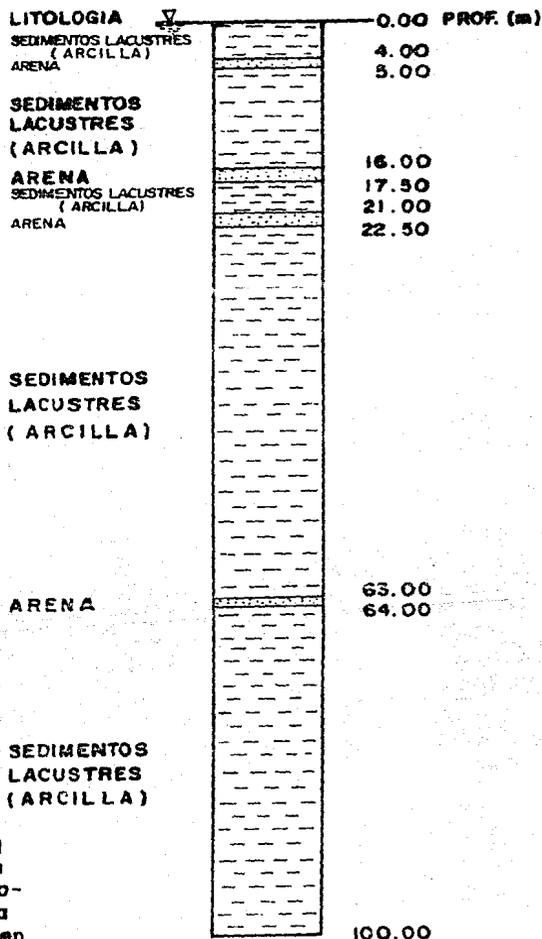
Este pozo es de observación y sirve para medir la variación de los niveles freáticos en distintas épocas - del año (fig. III.5).

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCION LITOLÓGICA
0.00 a 4.00	- Sedimentos de origen lacustre, principalmente arcillas, limos y algunos horizontes de material orgánico de color café obscuro a negro.
4.00 a 5.00	- Horizonte de arena.
5.00 a 16.00	- Sedimentos de origen lacustre principalmente arcillas, limos y algunos horizontes de material orgánico de coloración café obscuro a negro.

- 16.00 a 17.50 - Horizonte de arena.
- 17.50 a 21.00 - Sedimentos de origen lacustre principalmente arcillas, limos y algunos horizontes de material orgánico de coloración café obscuro a negro.
- 21.00 a 22.50 - Horizonte de arena.
- 22.50 a 63.00 - Sedimentos de origen lacustre principalmente arcillas limos y algunos horizontes de material orgánico de coloración café obscuro a negro.
- 63.00 a 64.00 - Horizonte de arena.
- 64.00 a 100.00 - Sedimentos de origen lacustre principalmente -

ESTACION PIEZOMETRICA "XICO", MPIO. CHALCO, EDO. DE MEXICO

380



NOTA.— Este corte fue obtenido del informe titulado investigación geofísica en la zona Xochimilco-Chalco-Amecameca presentada por la Cia. Marval para S.R.H. en 1962

ESCALA VER. 1 : 500

CORTE LITOLOGICO

FIGURA III-5 CORTE LITOLOGICO POZO PIEZOMETRICO "EL XICO "

arcillas. y algunos horizontes de material orgánico de coloración café obscuro a negro.

POZO PARA AGUA POTABLE

" San Miguel Xico "

Esta perforación, se hizo en la parte SW del cono cónico "El Xico", aproximadamente a 60 m. del contacto de la ladera con los sedimentos lacustres (ver localización en el plano de la fig. II.2). obteniéndose la siguiente columna (ver corte litológico de la fig. III.6).

PROFUNDIDAD (M)

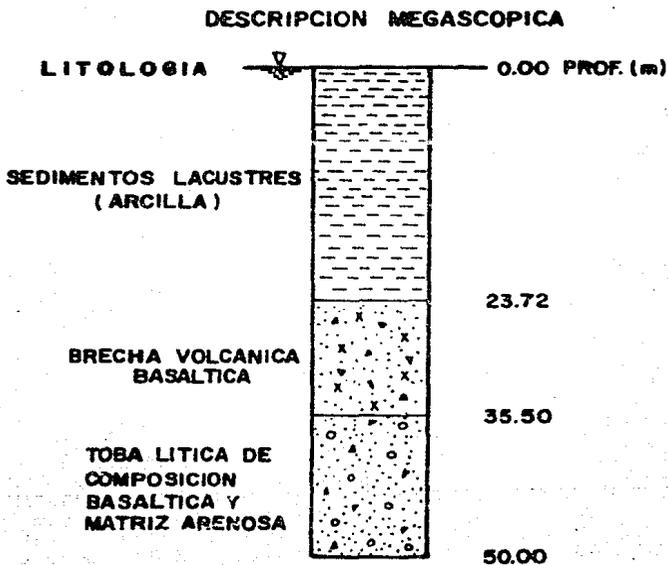
0.00 a 23.72

DESCRIPCION LITOLOGICA

- Sedimentos de origen lacustre principalmente arcilla, limos y algunos horizontes de material orgánico de coloración café obscuro a negro.

**CORTE DEL POZO PARA AGUA POTABLE
"SAN MIGUEL XICO"**

MPIO. CHALCO, EDO. MEXICO



CORTE LITOLOGICO

ESC. VER. 1:500

FIGURA III.6 CORTE LITOLOGICO DEL POZO "SAN MIGUEL XICO"

- 23.72 a 35.50 - Brecha volcánica basáltica de coloración gris oscuro.
- 35.50 a 50.00 - Toba lítica de composición basáltica y matriz arenosa de coloración gris claro a gris oscuro.

Por información verbal de la Residencia de Perforación de Pozos de la C.A.V.M., dependiente de la S.A.R.H., los pozos perforados actualmente entre "San Miguel Xico" y "Tlahuac", tienen generalmente la siguiente columna estratigráfica (ver fig. III.7).

POZO ENTRE "XICO" Y "TLAHUAC"

PROFUNDIDAD (M)	DESCRIPCION LITOLOGICA
0.00 a 124.00	- Sedimentos de origen lacustre principalmente arcillas, limos y algunos horizontes de mate-

rial orgánico de coloración café oscuro- - verdoso a negro.

124.00 a 131.00

- Horizonte de arena.

131.00 a 252.00

- Sedimentos de origen - lacustre principalmente arcillas, limos y algunos horizontes de material orgánico de coloración café oscuro-verdoso a negro.

252.00 a 387.00

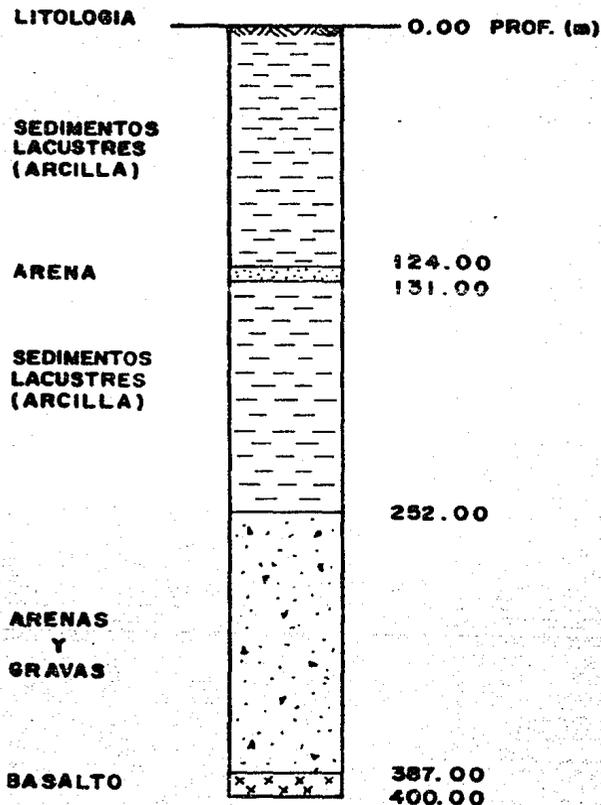
- Gravas y arenas intercaladas con fragmentos de rocas ígneas y horizontes de basaltos, cenizas y lodos, se cree que este material es de la Formación Tarango.

367.00 a 400.00

- Basalto en forma masiva compacto. de color gris

**POZO PERFORADO POR LA C. A. V. M.
PARA AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE MEXICO
ENTRE "SN. MIGUEL XICO" Y TLAHUAC.**

410



CORTE LITOLOGICO

ESCALA VER. 1 : 2 500

FIGURA III-7 CORTE LITOLOGICO DEL POZO PERFORADO ENTRE "SAN MIGUEL XICO" Y "TLAHUAC"

oscuro, se cree que pertenece a las rocas ígneas del Plio-Cuaternario.

oscuro, se cree que pertenece a las rocas ígneas del Plio-Cuaternario.

IV. GEOFISICA

IV.1. Gravimetría

IV.1.1. Datos disponibles

El material disponible, consiste en un plano de - -
Anomalías Gravimétricas del Valle de México, elabo-
rado por Servicios Geofísicos, S.A., en el año 1948,
por parte del Instituto Nacional para la Investiga-
ción Científica, cuyo informe es inédito (fig.IV.1.1).

IV.1.2. Anomalía regional

Para obtener mayor información del plano de Anoma-
lías Gravimétricas, se consideró conveniente obtener
la Anomalía Regional y Residual; la cual se obtuvo -
por medio del método de rejilla o de operadores puré-
ricos. Dicho método consiste fundamentalmente en for-
mar una rejilla de 8 puntos que se promedian aritmé-
ticamente y el valor que se obtiene se atribuye al --
punto central.

Para poder aplicar dicho método, fue necesario cons-
truir en el plano gravimétrico una cuadrícula con lí-
neas norte - sur y este - oeste, con espaciamientos -
de 1 km. de tal forma que al cruce de las mismas se le
atribuyó el valor de la gravedad que se obtuvo de las

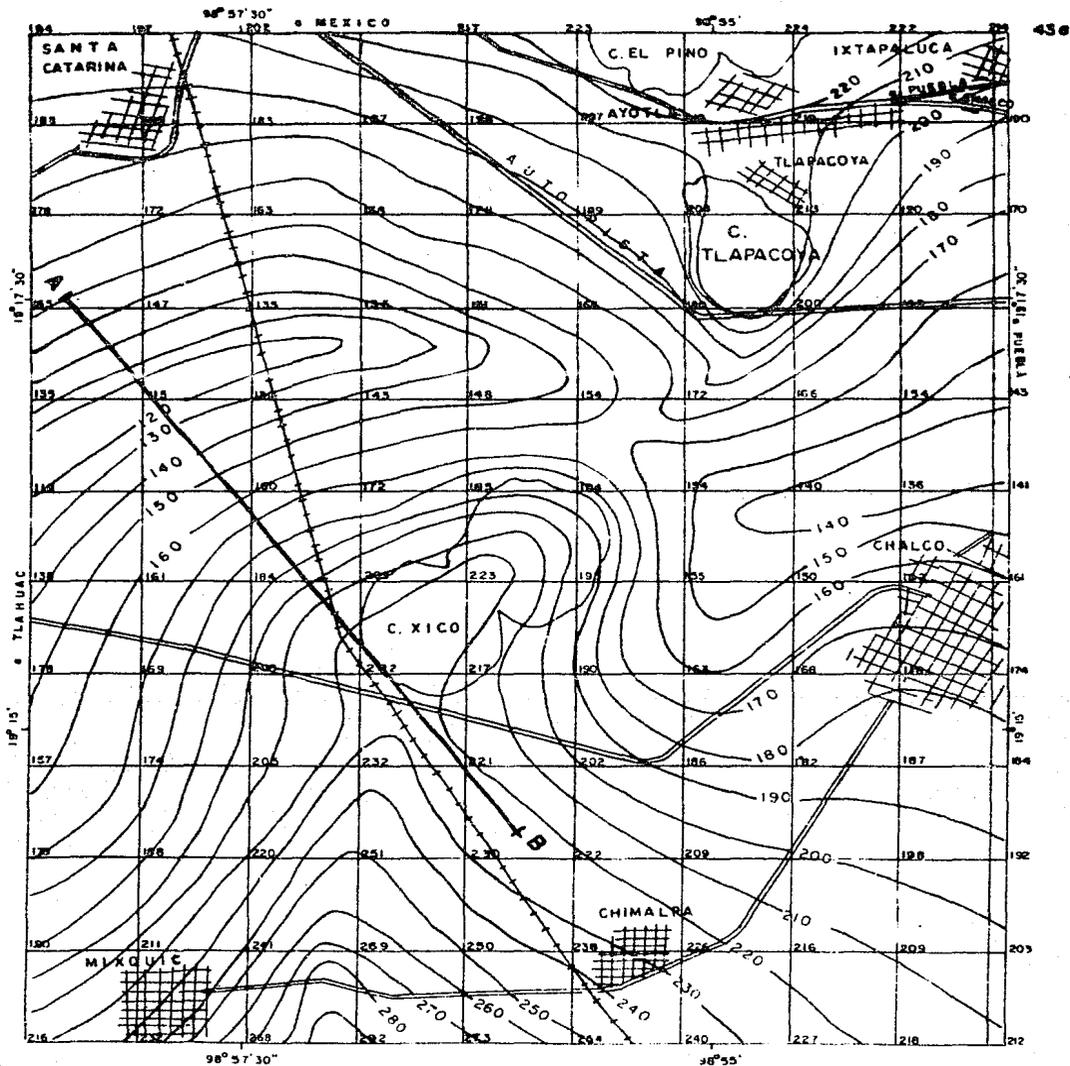


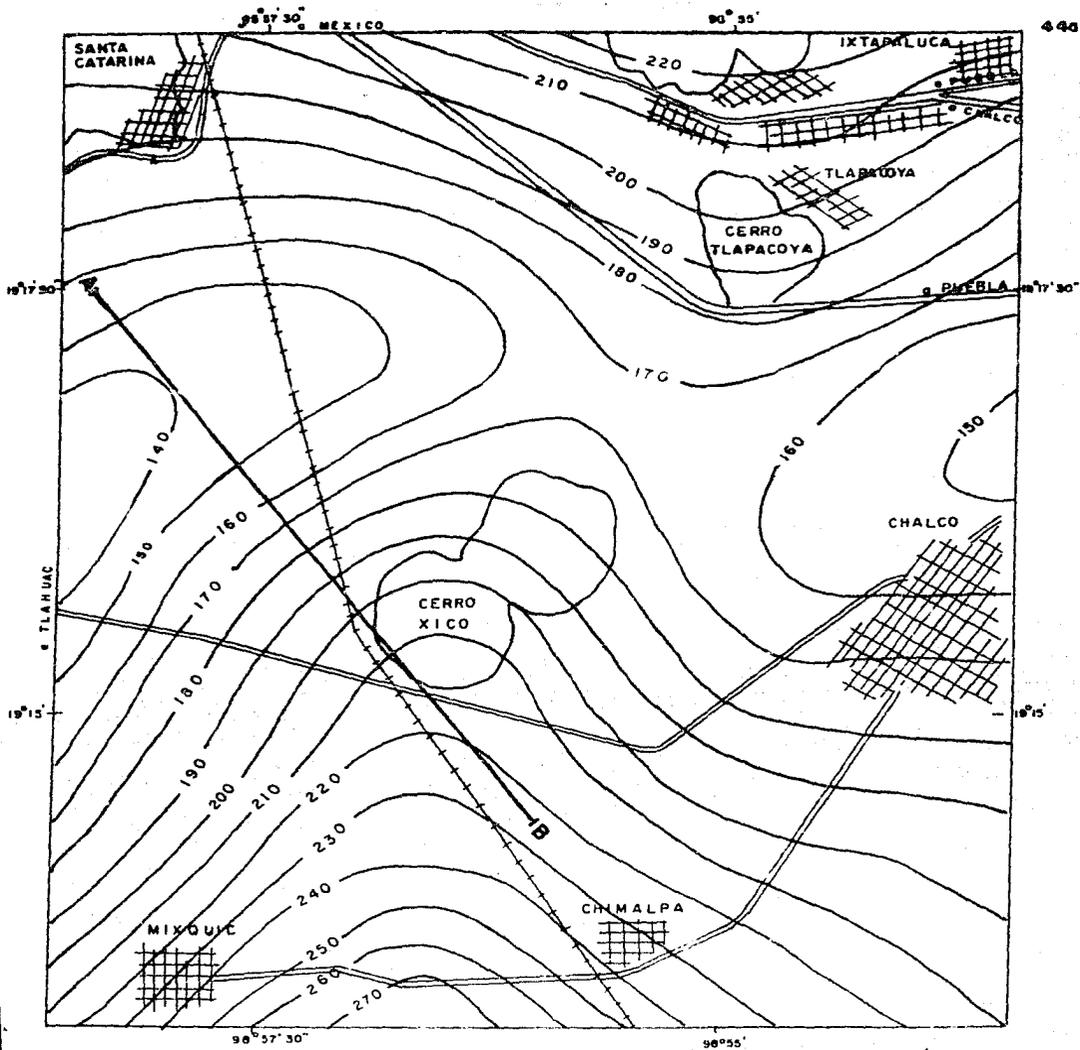
Figura - IV - 1 - 1

curvas.

Posteriormente se pasaron los valores gravimétricos por el operador numérico y el resultado se anotó en otra hoja, sobre la cual previamente se había hecho la misma cuadrícula. Uniendo los puntos con igual -- gravedad, se trazaron las curvas que dieron como resultado la Anomalia Regional (fig. IV.1.2). En dicha figura se puede observar que los gradientes mínimos gravimétricos son de 140 y 120 miligals. y se localizan entre Santa Catarina y Chalco, respectivamente e indican que en estos lugares existen depresiones con profundidades aproximadas entre 800-1000 m. en dirección NE-SW.

Los valores gravimétricos máximos se encuentran al -- Norte, con 220 miligals y al Sur con 270 miligals. -- correspondiendo a las partes altas donde afloran las rocas y/o se localizan próximas a la superficie.

La anomalía regional es muy parecida a la de Bouguer, indicando con ello que la mayor parte del efecto gravimétrico, proviene de las rocas que existen a profundidad. existiendo solo una pequeña anomalía debida a las estructuras rocosas superficiales.



ANOMALIA REGIONAL
ESC. 1: 50 000

IV.1.3. Anomalia residual

Los valores de gravedad, oscilan de 20 a -20 miligals, correspondiendo los valores positivos a los cerros el Xico y Tlapacoya (ver fig. IV.1.3) y los negativos a las partes donde la roca se localiza a mayor profundidad, puede decirse que el efecto residual es de poca importancia desde el punto de vista geofísico, ya que no aporta muchos datos.

IV.1.4. Resultado gravimétrico

Como un resumen del método gravimétrico, se construyó la sección A-B, la cual se hizo del cerro "El Xico" - a la parte que tiene valores gravimétricos mínimos, observándose que tanto la anomalía de Bouguer como el regional, tienen la misma tendencia, no siendo así el residual.

La forma de la curva que se obtuvo en la sección, sugiere que el modelo a emplear en este caso, es el de una falla debido a que existe un contacto inclinado - entre el material lacustre y el material ígneo de los conos (fig. IV.1.4), obteniéndose mediante fórmulas algunos de los parámetros que se pretendían conocer. Ilustrándose en la figura antes citada, la forma de obtener

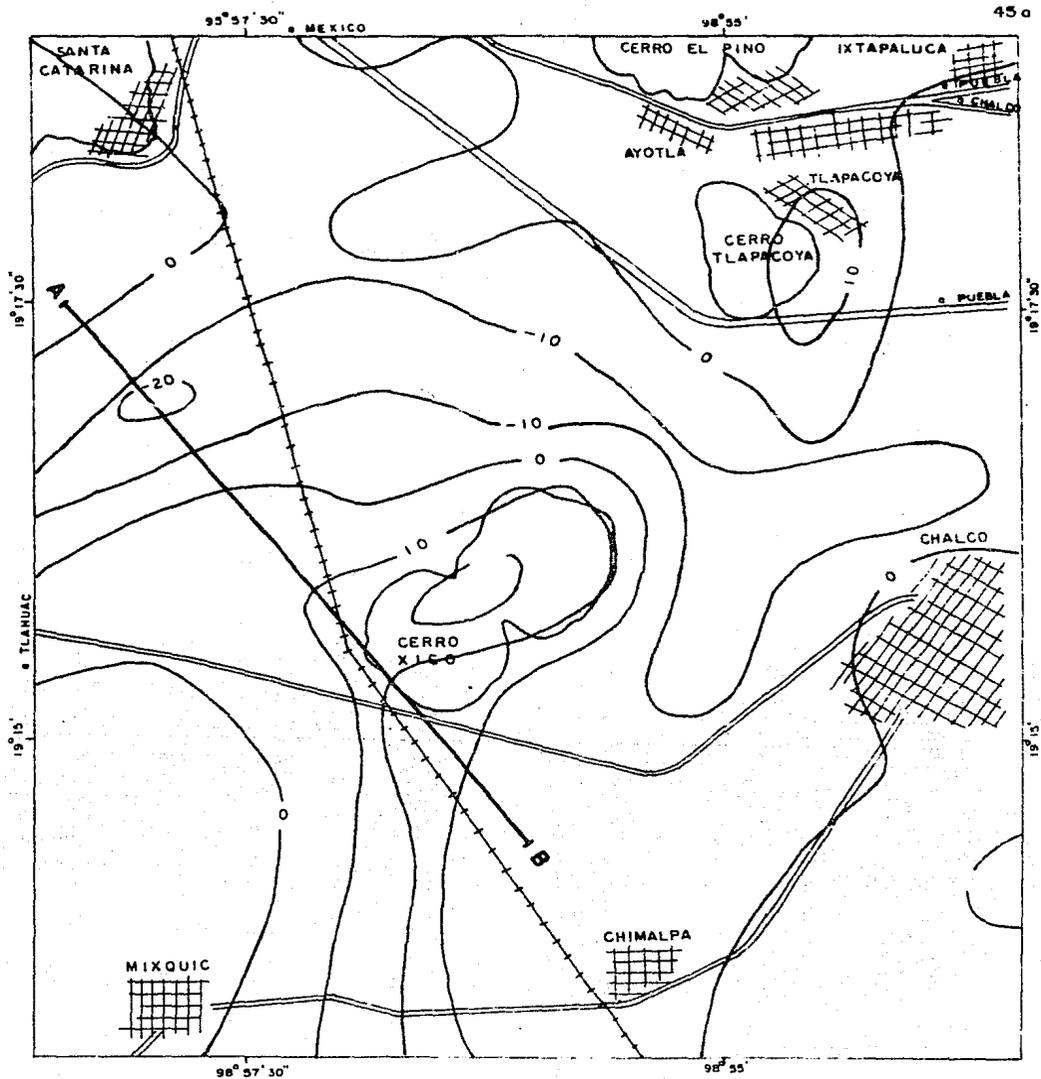
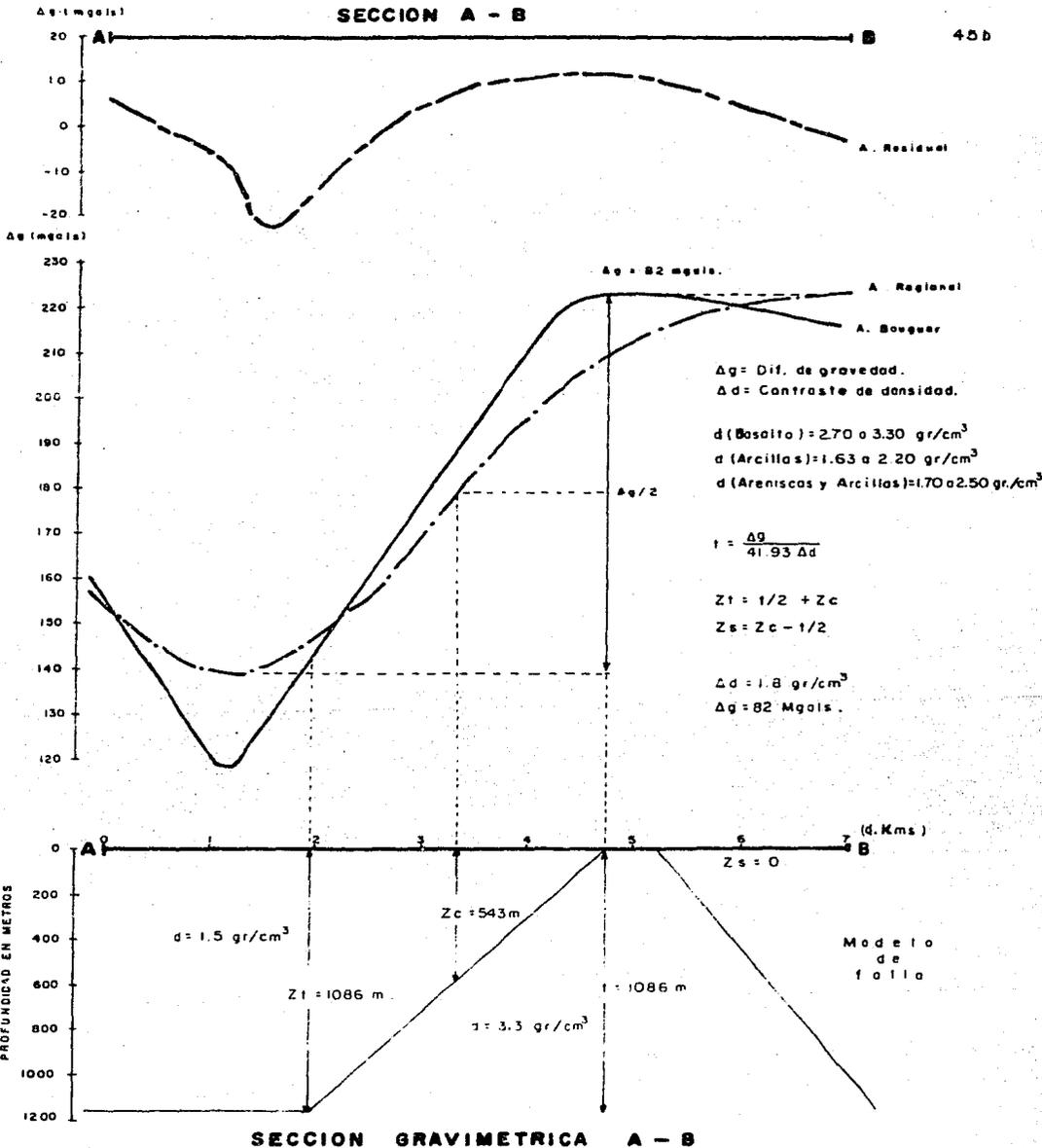


Figure - IV - 1-3

SECCION A - B

45b



SECCION GRAVIMETRICA A - B

Figura.- IX-1-4

datos, así como el modelo al cual se llegó después de integrar toda la información.

IV.2. Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos de exploración, permiten inferir las condiciones estratigráficas y estructurales del subsuelo a partir de la velocidad de propagación de las ondas elásticas, generadas artificialmente en el terreno y registradas mediante un aparato en la superficie, determinando así el tiempo de recorrido y la profundidad a la que se refractó o reflejó la onda, de acuerdo con su velocidad de propagación. Cuando la onda elástica llega a la superficie de contacto entre dos capas que presentan diferentes velocidades de propagación, es reflejada parcialmente a la superficie, refractándose otra parte hacia la parte profunda y así sucesivamente, hasta la disipación total de la energía, a estos métodos de reconocimiento se les conoce como de reflexión y refracción, respectivamente.

IV.2.1. Principios fundamentales

En sismología las leyes que rigen la propagación de las ondas elásticas, son prácticamente las mismas que en - -

Óptica, siguen los rayos luminosos al reflejarse o refractarse en cualquier superficie, siendo las principales las siguientes:

- a) Principio de Huyghens.- Todo punto de un frente de onda se comporta como un nuevo centro generador de ondas. Entendiéndose por frente de onda, al lugar geométrico de todos los puntos que se encuentran en el mismo estado de vibración o tienen el mismo tiempo de desplazamiento (ver fig. IV.2.1).

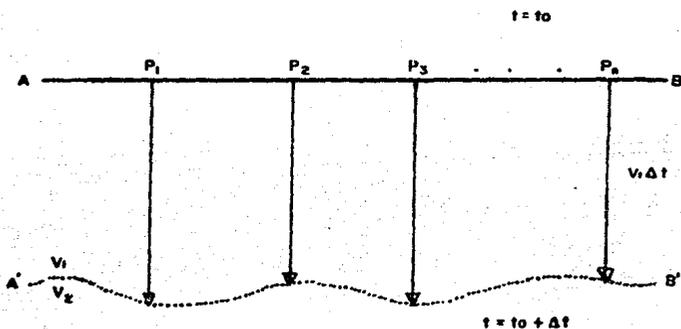


fig. IV.2.1

b) Principio de Fermat.- Todo movimiento ondulatorio que va de un punto a otro, sigue la trayectoria de tiempo mínimo, es decir generalmente una línea recta (ver fig. IV.2.2)

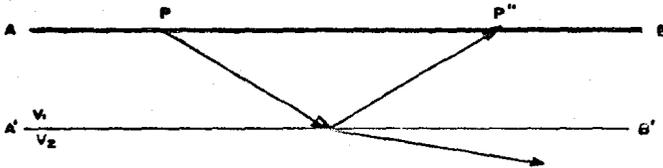


fig. IV.2.2

El frente de onda normalmente es de forma esférica, -- solo que en sismología, para simplificar los cálculos matemáticos se considera plano (ver la relación entre el frente de onda plano y esférico en la fig. IV.2.3).

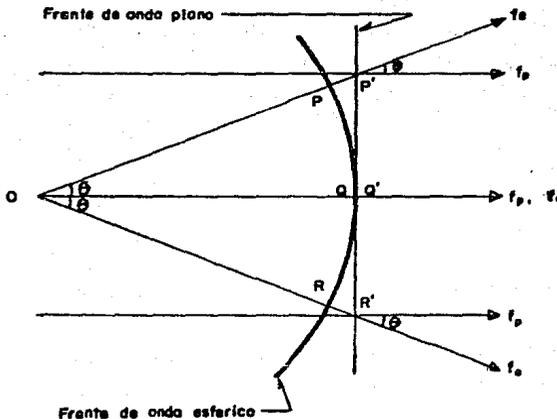


fig. IV.2.3

c) Tipos de ondas sísmicas

Cuando se produce una perturbación sísmica en el subsuelo, ya sea natural o artificialmente, se originan varios tipos de ondas elásticas, de las cuales se consideran las siguientes:

- Ondas primarias o longitudinales, también se les llama de compresión y dilatación, son -- las de mayor velocidad y el movimiento de las partículas es en dirección de propagación del movimiento. Este tipo de ondas es el que se - estudia en sismología con mas frecuencia.
- Ondas secundarias o transversales. también --- llamadas de cizalla, su velocidad es menor que la de las primarias y el movimiento que producen es ortogonal a la dirección de propagación.
- Ondas Love, se propagan en la superficie y son de componente horizontal solamente.
- Ondas Raleigh o superficiales, el movimiento - de propagación se efectúa en la superficie del terreno en un plano vertical elíptico y su ve-

locidad es relativamente baja.

La velocidad de propagación de las ondas depende de las propiedades elásticas de los materiales, en el caso que estos sean homogéneos isótropos. las velocidades transversales y longitudinal se definen como sigue:

$$V_t = \sqrt{\frac{G}{d}} \quad \text{y} \quad V_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{d}}$$

V_t	Velocidad de las ondas transversales
V_l	Velocidad de las ondas longitudinales
λ	Constante de Lamé
G	Módulo de rigidez transversal
d	Densidad

Los materiales que constituyen la corteza terrestre normalmente son heterogéneos y la velocidad dista mucho de ser constante en cada capa; en general puede observarse un incremento de la velocidad con la profundidad y la edad geológica.

Por otra parte, si tomamos en cuenta que al propagarse radialmente en todas direcciones, el frente de ondas produce en el medio geológico una gran variedad de señales nocivas llamadas "ruido", siendo las más comunes las que forman las ondas superficiales, ondas directas, difracciones y reflejos múltiples. Los rui

dos afectan los datos sismológicos, por lo que es importante discriminarlos de las señales útiles y el geofísico, debe conocer su origen y existencia, a fin de poder atenuarlos por el método más adecuado.

IV.2.2 Método sísmico de refracción

Ley de refracción o de Snell

Si tenemos un plano de contacto AB entre 2 materiales, que tienen diferentes velocidades de propagación de las ondas sísmicas V_1 y V_2 , para que exista refracción, se debe cumplir que V_1 menor que V_2 .

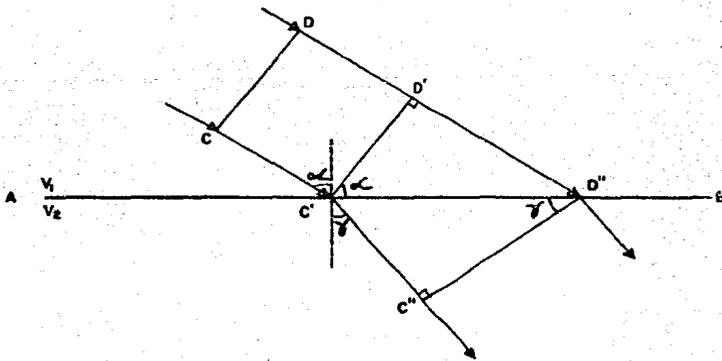


fig. IV.2.4

Cuando el frente de onda C D, llega al plano AB en la posición C' D', a partir de C', se propaga una onda hacia el medio inferior, con una velocidad V_2 , siguiendo la posición del segmento. Finalmente C' llega a C'' y D' a D'' entonces el nuevo frente de onda es C'' D'' (fig. IV.2.4).

Si obtenemos el seno del ángulo correspondiente a los medios V_1 y V_2 tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Sen } \alpha &= \frac{D' D''}{C' D''} & \text{Y} & \quad \text{Sen } \beta &= \frac{C'' C'}{C' D''} \\ \therefore \frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \beta} &= \frac{\frac{D' D''}{C' D''}}{\frac{C'' C'}{C' D''}} & ; & \quad \frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \beta} &= \frac{D' D''}{C'' C'} = \frac{V_1}{V_2} \end{aligned}$$

finalmente:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Ley de Snell}$$

Cuando el ángulo de refracción (ver fig. IV.2.5) es igual a 90° , la relación anterior se convierte en:

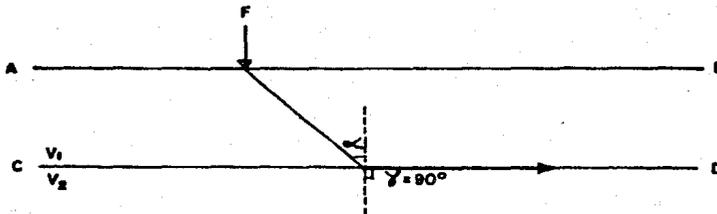


fig. IV.2.5

$$\text{Sen } \alpha = \frac{V_1}{V_2}$$

Al cual se le llama ángulo de refracción total o crítica. En la práctica de la sismología, la onda que llega primero a los detectores es la directa, simultáneamente con la de refracción total e distancia crítica.

IV.2.2.1 Gráfica tiempo - distancia

Normalmente al efectuar un trabajo de sismología de refracción, se conocen los datos de tiempo y el tendido de los detectores, con lo cual se hace una gráfica tiempo - distancia a los que se les llama cronograma y a partir de ella es factible obtener los datos siguientes:

- A. Velocidad de transmisión de las ondas sísmicas.
- B. Profundidad de los contactos.

Para obtener las velocidades de las ondas sísmicas en los diferentes estratos, se parte de la gráfica tiempo - distancia (fig. IV.2.6).

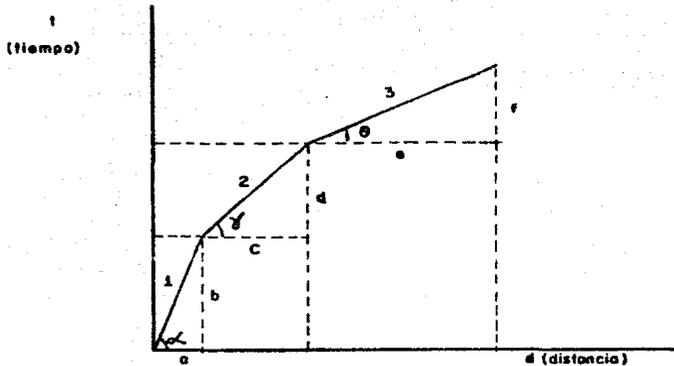


fig. IV.2.6

La dromocrónica, está hecha a escala y con facilidad se puede obtener la pendiente de cada tramo de recta - con la fórmula:

$$m = \frac{Y - Y_1}{X - X_1}$$

ó

$$\text{Tan } \alpha = \frac{b}{a}$$

donde:

m = Pendiente de la recta.

X, Y = Abcisa y ordenada del punto P

X_1, Y_1 = Abcisa y ordenada del punto P_1

Con lo cual se puede obtener la ecuación de cada una de las rectas 1, 2 y 3, con la fórmula general para la ecuación de una recta:

$$y = m x + b$$

y la velocidad de cada capa estará dada por la relación:

$$V_1 = \frac{1}{m_1}$$

V_1 = Velocidad de las ondas sísmicas
en la capa 1.

m_1 = Pendiente de la recta 1.

Siguiendo el mismo procedimiento para los tramos de rectas restantes, de tal forma que obtengamos cada una de las velocidades de los diferentes horizontes refractores.

IV.2.2.2 Determinación de la profundidad para 1, 2, 3... n, contactos horizontales.

Para encontrar las fórmulas necesarias para determinar

la profundidad de 1, 2, 3... n contactos horizontales en el subsuelo, se parte de la fig. IV.2.7.

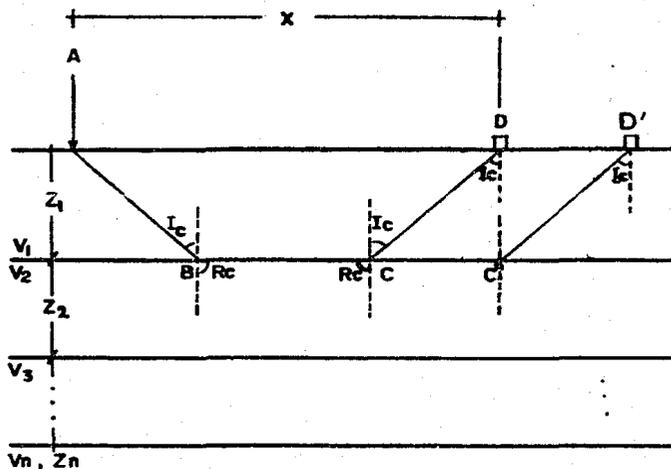


fig. IV.2.7.

- V_1 Velocidad de las ondas sísmicas en la capa 1
- V_2 Velocidad de las ondas sísmicas en la capa 2
- V_3 Velocidad de las ondas sísmicas en la capa 3
- V_n Velocidad de las ondas sísmicas en la capa n
- I_c Angulo de incidencia crítica
- R_c Angulo de refracción crítica
- Z_1 Profundidad de la capa 1

Z_2 Profundidad de la capa 2.

Z_n Profundidad de la capa n.

Sea A una fuente emisora de energía en la superficie del terreno y D un detector colocado a tal distancia que llegan simultáneamente el rayo directo (AD) y la onda de refracción total, por lo tanto los tiempos t_{AD} y t_{ABCD} son iguales.

$$t_{AD} = t_{ABCD} \quad \text{--- -- -- --} \quad 1$$

$$v = \frac{x}{t} \quad \text{--- -- -- --} \quad 2$$

Despejando de 2 a t, tenemos:

$$t = \frac{x}{v} \quad \text{--- -- -- --} \quad 3$$

Aplicando la expresión 3 para obtener los tiempos de la ecuación 1, queda:

$$t_{AD} = \frac{x}{v_1} \quad \text{--- -- -- --} \quad 4$$

$$t_{ABCD} = \frac{AC}{v_1} + \frac{BC}{v_2} + \frac{CD}{v_1}$$

como $AB = CD$

$$t \text{ ABCD} = \frac{2AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} \text{ ----- 5}$$

igualando 4 y 5

$$\frac{X}{V_1} = 2 \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} \text{ ----- 6}$$

$$\text{Pero } \cos Ic = \frac{Z_1}{AB} ; AB = \frac{Z_1}{\cos Ic} \text{ ----- 7}$$

y

$$\text{Tan Ic} = \frac{CC'}{Z_1} ; CC' = Z_1 \text{ Tan Ic} \text{ ----- 8}$$

$$BC = X - 2CC' \text{ ----- 9}$$

Sustituyendo 8 en 9:

$$BC = X - 2Z_1 \text{ Tan Ic} \text{ ----- 10}$$

Sustituyendo 7 y 10 en 6 tenemos:

$$\frac{X}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1 \cos Ic} + \frac{X - 2Z_1 \text{ Tan Ic}}{V_2}$$

$$\frac{X}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1 \cos Ic} + \frac{X - 2Z_1 \text{ Tan Ic}}{V_2}$$

$$\frac{X}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1} \left(\frac{1}{\cos Ic} - \frac{V_1 \text{ Tan Ic}}{V_2} \right) + \frac{X}{V_2} \text{ ----- 11}$$

Por la Ley de Snell:

$$\text{Sen Ic} = \frac{V_1}{V_2} \text{ ----- 12}$$

$$y \text{ Tan Ic} = \frac{\text{Sen Ic}}{\cos Ic} \text{ ----- 13}$$

Sustituyendo 12 y 13 en 11:

$$\frac{X}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1} \left(\frac{1}{\cos \theta_c} - \frac{\sin \theta_c \sin \theta_c}{\cos \theta_c} \right) + \frac{X}{V_2}$$

$$\frac{X}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1} \left(\frac{1 - \sin^2 \theta_c}{\cos \theta_c} \right) + \frac{X}{V_2} \quad \text{----- 14}$$

Pero $\sin^2 \theta_c + \cos^2 \theta_c = 1$

$$1 - \sin^2 \theta_c = \cos^2 \theta_c \quad \text{----- 15}$$

Sustituyendo 15 en 14:

$$\frac{X}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1} \left(\frac{\cos^2 \theta_c}{\cos \theta_c} \right) + \frac{X}{V_2}$$

$$\frac{X}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1} \cos \theta_c + \frac{X}{V_2}$$

Agrupando términos:

$$\frac{X}{V_1} - \frac{X}{V_2} = \frac{2Z_1 \cos \theta_c}{V_1}$$

$$Z_1 = \frac{V_1 \times \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right)}{2 \cos \theta_c}$$

$$Z_1 = \frac{X \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \right)}{2 \cos \theta_c} \quad \text{----- 16}$$

Pero $\cos \theta_c = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c}$ ----- 17

y $\sin \theta_c = \frac{V_1}{V_2}$ ----- 18

Sustituyendo 18 en 17:

$$\cos Ic = \sqrt{1^2 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2} \text{-----} 19$$

y 19 se puede descomponer en:

$$\cos Ic = \sqrt{\left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right)} \text{-----} 20$$

Sustituyendo 20 en 16:

$$Z_1 = \frac{x \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)^{1/2}}{2 \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right)^{1/2}}$$

$$Z_1 = \frac{x \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)^{1/2}}{2 \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right)^{1/2}}$$

$$Z_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{\frac{V_2 - V_1}{V_2}}{\frac{V_2 + V_1}{V_2}}}$$

$$Z_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \text{-----} 21$$

La fórmula 21, sirve para obtener la profundidad de un contacto horizontal a partir de la distancia crítica X ó de simultaneidad.

La fórmula 22, también sirve para obtener la profundidad de un contacto horizontal en función del tiempo de intersección T_i .

$$z_1 = \frac{T_i V_1 V_2}{2\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad \text{-----} 22$$

Para poder generalizar las fórmulas para cacos de N capas, es necesario recurrir a las siguientes figuras (IV.2.8 a y b):

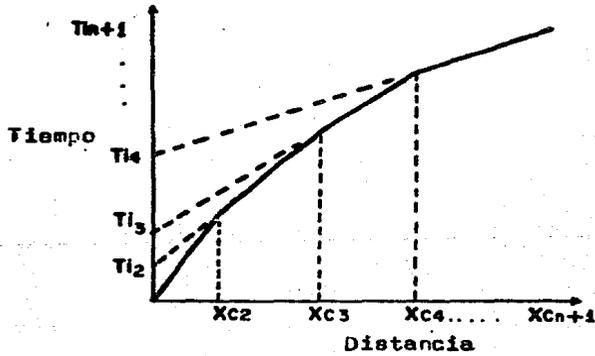
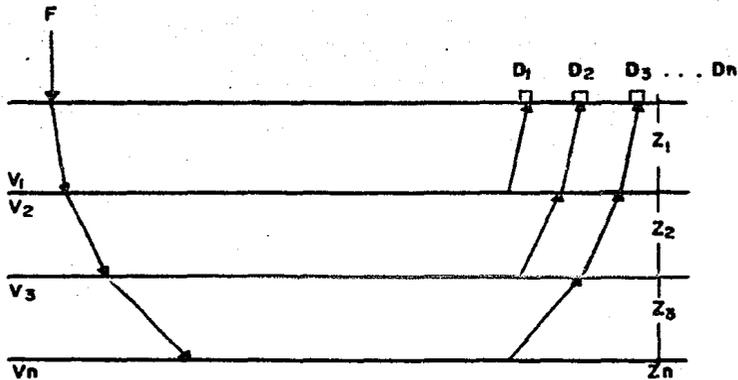


Fig. IV. 2. 8a



$$v_1 < v_2 < v_3 \dots < v_n$$

Fig. IV.2 . 6b

Para obtener la profundidad de 2 capas horizontales, por medio de las distancias de simultaneidad, queda:

$$z_2 = \frac{Xc_3}{2} \sqrt{\frac{v_3 - v_2}{v_3 + v_2}} + \frac{z_1}{v_1} \left(\frac{v_3 \sqrt{v_2^2 - v_1^2} - v_2 \sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \right) \quad 23$$

o en función de los tiempos de intersección:

$$z_2 = \frac{T_{i3} v_2 v_3}{2 \sqrt{v_3^2 - v_2^2}} - z_1 \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \sqrt{\frac{v_3^2 - v_1^2}{v_3^2 - v_2^2}} \quad \dots \quad 24$$

En general, para el caso de N contactos horizontales, la profundidad de la capa N , se puede obtener por medio de las distancias críticas, de la fórmula siguiente:

$$Z_n = \frac{X_{cn+1}}{2} \sqrt{\frac{v_{n+1} - v_n}{v_{n+1} + v_n}} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{Z_j}{v_j} \left(\frac{v_{n+1} \sqrt{v_n^2 - v_j^2} - v_n \sqrt{v_{n+1}^2 - v_j^2}}{\sqrt{v_{n+1}^2 - v_n^2}} \right) \quad 25$$

y en función de los tiempos de interacción:

$$Z_n = \frac{I_{n+1} v_n v_{n+1}}{2 \sqrt{v_{n+1}^2 - v_n^2}} - \sum_{j=1}^{n-1} Z_j \left(\frac{v_n}{v_j} \right)$$

$$\sqrt{\frac{v_{n+1}^2 - v_j^2}{v_{n+1}^2 - v_n^2}} \quad \text{-----} \quad 26$$

IV.2.3. Método sísmico de reflexión.

Este método, es el mas usado en la exploración Petrolera; aunque puede usarse para profundidades medias, siendo sus principios los siguientes:

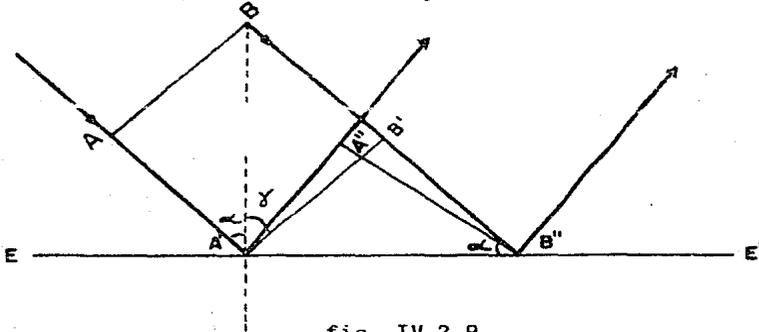


fig. IV.2.9

Ley de la reflexión.

Sea un haz de rayos paralelos AB (fig.IV.2.9) que --incide sobre el plano EE' ; formando un ángulo de incidencia alfa con relación a la normal del plano.

En el punto A' ; de la onda plana $A'B'$ se origina una onda elemental y así sucesivamente en todos los puntos del segmento $A'B''$. Finalmente cuando B' llega al punto B'' , tenemos como onda principal $A''B''$. Puesto que $A'A''$ es perpendicular a $A'B''$ y $A'B'$ es perpendicular a $B'B''$, resulta que $A'A'' = B'B''$ y por

lo tanto $\alpha = \gamma$ o dicho en otra forma:

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } \gamma$$

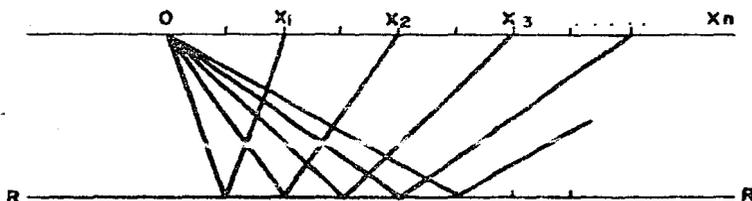


fig. IV.2.10

En el punto O se genera una onda elástica (fig. IV. 2.10) por medio de una fuente de energía a base de dinamita, el impulso se mueve hasta alcanzar el re flector R y regresa de nuevo a la superficie, donde se registra por medio de detectores ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$). El tiempo que emplea la onda en recorrer la distancia desde el punto de tiro O hasta el reflector y de éste a los detectores, es el tiempo de reflexión. La sucesión de impulsos captados por cada detector, constituyen un reflejo y se registra en el papel fotográfico formando un sismograma.

La velocidad en la que se mueven las ondas sísmicas, normalmente se puede conocer por algún método y la distancia de los detectores al punto O también es conocida, por lo cual la profundidad de reflector podrá calcularse fácilmente con la fórmula de velocidad ($v = d/t$), usando 0.5 del tiempo de reflexión.

El procedimiento del perfil continuo se hace por medio de observaciones realizadas en puntos de tiro -- distribuidos a lo largo de una línea, tales como -- 1, 2, 3, etc., como se muestra en la figura IV.2.11.

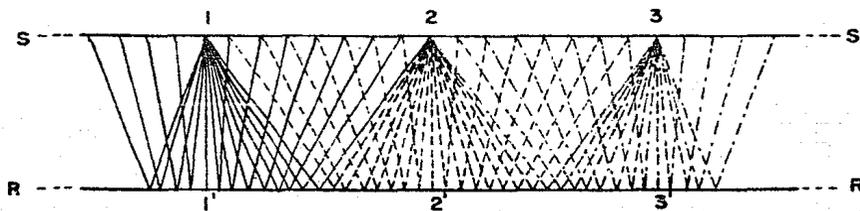


fig. IV.2.11.

En cada observación, se registran los impulsos sísmicos generados en el punto de tiro por medio de detectores colocados en ambos lados del punto considerado; de tal manera que en cada estación sucesiva, se obtie

nen reflejos procedentes de las porciones contiguas del reflector, los que superpuestos forman el perfil continuo.

En el caso que el reflector sea inclinado, los -- tiempos registrados por los detectores extremos de la estación, serán diferentes; como se muestra en -- la figura IV.2.12 y el tiempo registrado por el detector D, sera mayor que el registrado por el E. La diferencia de tiempos permite el cálculo del echado del reflector, siempre y cuando no sea muy grande.

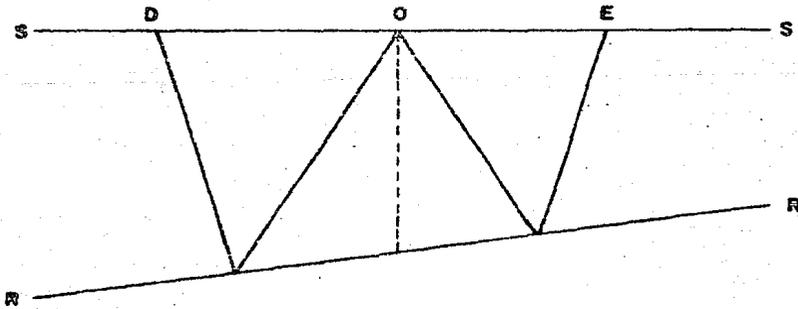


Fig. IV. 2. 12.

Lo mencionado anteriormente da una idea de los fundamentos del método de reflexión, pero la aplicación práctica es compleja, ya que de éste se derivan muchos factores, por ejemplo: La superficie del terreno no siempre es un plano horizontal, las velocidades de las ondas sísmicas no siempre son constantes ni planas, los medios geológicos generalmente son heterogéneos, etc.

De los tiempos de reflexión registrados y sus variaciones correspondientes a distintos reflectores y del conocimiento de la velocidad de las ondas sísmicas, se deducen las condiciones estructurales del subsuelo, mediante el cálculo de profundidades de las capas y el echado de las mismas.

Una de las ventajas inherentes al método de reflexión sobre otros métodos Geofísicos es la precisión con que pueden obtenerse los resultados, siendo independientes de la profundidad de investigación (ya que en cualquier otro método, la precisión disminuye con la profundidad).

IV.2.4. Trabajo de campo.

El trabajo de campo se efectuó con un sismógrafo portá-

til de 12 canales y con detectores 36 d.c. obteniéndose el sismograma en papel fotográfico, la fuente de energía fue dinamita, variando las cargas y profundidades de acuerdo a las características del terreno.

Los sismogramas obtenidos en general son de calidad mediana a buena, obteniéndose información pobre en una parte de la línea L-1, aparentemente esto se debió a una capa superficial gruesa de material suelto, con velocidad baja (esta capa tiene espesores de 20 a 100 m.) y a la existencia de derrames basálticos sepultados en distintos sitios.

Se hicieron todos los esfuerzos posibles para mejorar la calidad de la información; repitiendo las observaciones, usando pozos múltiples con profundidades y cargas óptimas que el equipo y las condiciones del terreno requerían, variando el tendido y arreglo de detectores, distancias de tiro, etc., en fin. se procuró lograr las condiciones óptimas de observación posibles.

Los mejores datos se obtuvieron en la zona de Chalco, en la línea L-1, la transmisión de la energía fue excepcionalmente buena aún a distancias grandes. Las

distancias máximas de tiro usadas fueron de 2000 m. ver fig. IV.2.13, donde se explica la forma en la que se distribuyeron en el campo los detectores los instrumentos de observación, tanto para el caso de refracción como para el de reflexión.

Al ir efectuando los trabajos de refracción se hicieron simultáneamente por el método de reflexión, en las líneas L-1 y L-2, en aquellas partes donde se encontraron formaciones con alta velocidad - - - (3000 m/seg. o más) y en los lugares donde las formaciones de interés alcanzaron profundidades hasta varios cientos de metros.

En la fase preliminar de los trabajos, se ensayó el método de reflexión y en algunos puntos posteriormente se determinó la presencia de derrames de roca - - ígnea. Los resultados obtenidos, no fueron del todo satisfactorios, a pesar que se probaron diversas variantes; uso de detectores múltiples con arreglos en serie y paralelo, variación de la profundidad de los pozos de tiro hasta 60 m., uso de diferentes cargas de dinamita de 0.5 a 20 kg, buscando la posibilidad de encontrar una carga adecuada y finalmente pozos -- múltiples. Además se hicieron observaciones para determinar las características de la onda superficial.

ARREGLO DE DETECTORES EN REFRACCION Y REFLEXION

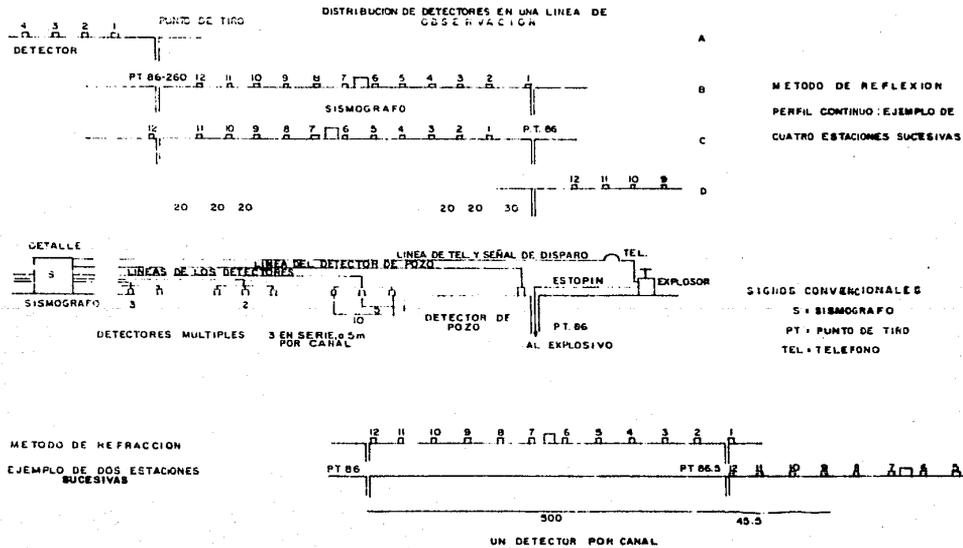


Figura IV. 2. 13.

a fin de cancelarla; aún cuando en el transcurso de dichas pruebas se comprobó que la interferencia causada por la misma, no era de consideración.

Las zonas con respuesta positiva al método de reflexión, parece ser indicativo de la ausencia de rocas ígneas a poca profundidad. Esto se confirmó con observaciones practicadas en la zona.

Con el fin de evaluar debidamente los resultados obtenidos por el método de reflexión, se hizo un perfil de velocidades, el cual nos permitió conocerlas hasta la profundidad de 1340 m. (fig. IV.2.14).

IV.2.5. Determinación de velocidades.

A fin de poder hacer la debida interpretación de los datos obtenidos por los métodos sísmicos, fue necesario determinar la distribución de las velocidades verticales de las ondas sísmicas en el área estudiada.

TABLA DE CONVERSION TIEMPO - PROFUNDIDAD
APLICABLE EN EL AREA DE CHALCO - XICO.

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.30	223	224	224	225	226	227	228	229	229	230
0.31	231	232	233	234	234	235	236	237	238	239
0.32	239	240	241	242	243	244	245	245	246	247
0.33	248	249	250	250	251	252	253	254	255	256
0.34	256	257	258	259	260	261	261	262	263	264
0.35	265	266	266	267	268	269	270	271	272	272
0.36	273	274	275	276	276	277	278	279	280	281
0.37	282	282	283	284	285	286	287	288	288	289
0.38	290	291	292	293	294	294	295	296	297	298
0.39	298	299	300	301	302	303	303	304	305	306
0.40	307	308	309	309	310	311	312	313	314	314
0.41	315	316	317	318	319	319	320	321	322	323
0.42	324	325	325	326	327	327	329	330	330	331
0.43	332	333	334	335	335	336	337	338	339	340
0.44	341	341	342	343	344	345	346	346	347	348
0.45	349	350	350	351	352	353	354	355	356	357
0.46	357	358	359	360	361	362	362	363	364	365
0.47	366	367	367	368	369	370	371	372	372	373
0.48	374	375	376	377	378	378	379	380	381	382
0.49	383	383	384	385	386	387	388	388	389	390
0.50	391	392	393	394	394	395	396	397	398	399
0.51	399	400	401	402	403	404	404	405	406	407
0.52	408	409	410	410	411	412	413	414	415	415
0.53	416	417	418	419	420	420	421	422	423	424
0.54	425	426	426	427	428	429	430	431	431	432
0.55	433	434	435	435	436	437	438	439	439	440
0.56	441	442	443	444	445	446	447	447	448	449
0.57	450	451	452	452	453	454	455	456	457	457
0.58	458	459	460	461	462	463	463	464	465	466
0.59	467	468	468	469	470	471	472	473	473	474
0.60	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484
0.61	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494
0.62	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504
0.63	505	506	507	508	509	511	512	513	514	515
0.64	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525
0.65	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535
0.66	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545
0.67	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555
0.68	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565
0.69	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575
0.70	576	577	578	580	581	582	583	584	585	586
0.71	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596
0.72	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606
0.73	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616
0.74	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	73
0.75	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	
0.76	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	
0.77	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	
0.78	657	658	659	660	662	663	664	665	666	667	
0.79	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	
0.80	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	
0.81	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	
0.82	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	
0.83	708	709	710	711	712	713	714	715	715	717	
0.84	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	
0.85	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	
0.86	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	
0.87	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	
0.88	758	759	761	762	763	764	765	766	767	768	
0.89	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	
0.90	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	
0.91	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	
0.92	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	
0.93	809	810	811	812	814	815	817	818	820	821	
0.94	823	824	826	827	828	830	831	833	834	836	
0.95	837	839	840	842	843	845	846	847	849	850	
0.96	852	853	855	856	858	859	861	862	863	865	
0.97	866	868	869	871	872	874	875	877	878	880	
0.98	881	882	884	885	887	888	890	891	893	894	
0.99	896	897	898	900	901	903	904	906	907	909	
1.00	910	912	913	915	916	917	919	920	922	923	
1.01	925	926	928	929	931	932	934	935	936	938	
1.02	939	941	942	944	945	947	948	950	951	952	
1.03	953	955	956	957	958	959	961	962	963	964	
1.04	966	967	968	969	970	972	973	974	975	976	
1.05	978	979	980	981	983	985	986	987	989	990	
1.06	991	992	993	994	995	996	987	998	1000	1001	
1.07	1002	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1012	1013	
1.08	1014	1015	1017	1018	1019	1020	1021	1023	1024	1025	
1.09	1026	1027	1029	1030	1031	1032	1034	1035	1036	1037	
1.10	1038	1040	1041	1042	1043	1044	1046	1047	1047	1049	
1.11	1051	1052	1054	1055	1057	1058	1059	1060	1061	1062	
1.12	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1074	
1.13	1075	1076	1077	1078	1080	1081	1082	1083	1085	1086	
1.14	1087	1088	1089	1091	1092	1093	1094	1095	1097	1098	
1.15	1099	1100	1102	1103	1104	1105	1106	1108	1109	1110	
1.16	1111	1112	1114	1115	1116	1117	1119	1120	1121	1122	
1.17	1123	1125	1126	1127	1128	1129	1131	1132	1133	1134	
1.18	1136	1137	1138	1139	1140	1142	1143	1144	1145	1146	
1.19	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	

Profundidad en m. t = tiempo de reflexión en seg.

fig. IV.2.14.- Tabla de conversión tiempo - profundidad en el área de estudio.

El mejor método para determinar las velocidades, se basa en observaciones directas hechas en pozos profundos; pero dado que no fue posible aplicarlo, se optó por el indirecto llamado Perfil de Velocidades, en el cual la velocidad se obtiene por medio de observaciones de reflexión.

El fundamento de este método es extremadamente simple y consiste en determinar los tiempos de reflexión, hasta un horizonte señalado, que se registra en detectores colocados a distancia previamente establecida, partiendo del punto de tiro (fig. IV.2.15).

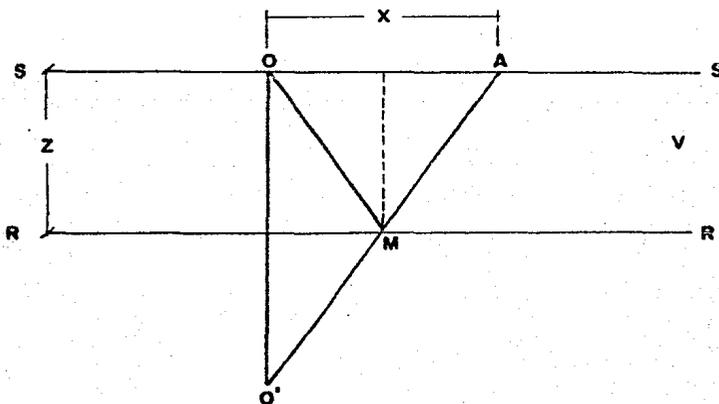


fig. IV.2.15

O es el punto de tiro en la superficie.

A es un detector colocado a la distancia x de O.

R es un reflector.

OMA es una onda reflejada.

La imagen de O que se produce sobre R es O', de tal modo que OO' y O'MA tienen respectivamente las longitudes de las trayectorias de reflexión normal y oblicua.

Si llamamos V a la velocidad constante de la onda sísmica, Z a la profundidad del reflector y t al tiempo de reflexión en la trayectoria OMA=O'MA, resulta el triángulo O'OA y por el teorema de Pitágoras tenemos:

$$x^2 + 4Z^2 = (tV)^2$$

Esta expresión establece una relación entre el tiempo de reflexión t y la distancia x del detector al punto de tiro, que depende de la velocidad V de la onda sísmica y de la profundidad Z del reflector. En principio el problema de la determinación de V (simultáneamente con Z) queda resuelto con solo observar los tiempos -

t_1 y t_2 correspondientes a dos detectores situados a las distancias X_1 y X_2 ; pues ello permite plantear un sistema de ecuaciones (1) con dos incógnitas.

Sin embargo, para eliminar errores de observación e identificar fácil los reflejos provenientes de cada reflector, así como para estar en condiciones de juzgar si la hipótesis que sirve de base al método se cumple; en la práctica se procede observando los tiempos de reflexión en varios detectores distribuidos en una línea, correspondientes a reflexiones de la energía sobre una misma porción de reflector y desde diferentes puntos de tiro.

Con este procedimiento se obtienen una serie de valores de t correspondientes a diversas distancias de X ; quedando la ecuación 1, en la forma siguiente:

$$t^2 = \frac{X^2}{V^2} + \frac{4Z^2}{V^2} \dots\dots\dots^2$$

Si las condiciones reales se aproximan a las teóricas supuestas (reflector horizontal y trayectorias rectas). entonces los valores de t^2 estarán ligados

a los de X^2 por una relación lineal, cuyos parámetros dependen de las constantes a determinar: V y Z

La velocidad de las ondas elásticas en el subsuelo, dista mucho de ser constante y por consiguiente las trayectorias sufren refracciones y reflexiones al pasar de un medio a otro, encontrándose en cada punto considerado varios reflectores y refractores y a cada uno de ellos puede aplicarse el método descrito. - dando como resultado una gráfica t^2 contra X^2 para cada horizonte, la cual es una recta (fig. IV.2.16) - de la que puede obtenerse la ecuación siguiente:

$$t^2 = ax^2 + b \quad \text{-----} 3$$

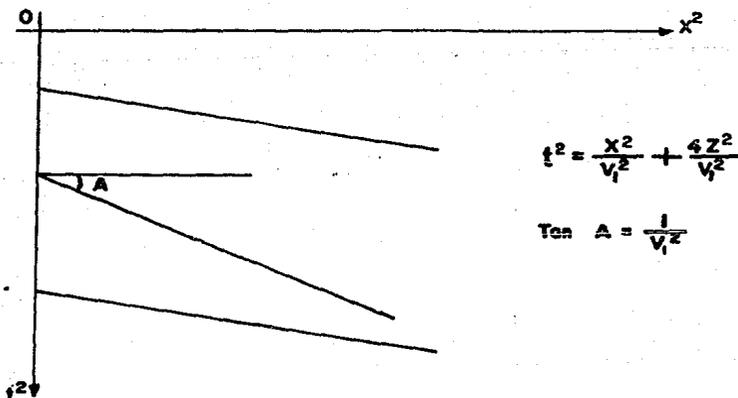


fig. IV.2.16

La pendiente de cada recta y su ordenada al origen. dan los elementos para calcular la velocidad (V_1) de apilamiento hasta cada reflector y su profundidad Z . La determinación de los parámetros, para cada recta se hace gráficamente o por el método de mínimos cuadrados. En este caso se usó el método de mínimos cuadrados.

Una vez conocidos los valores del tiempo de reflexión y las profundidades correspondientes de cada reflector, es posible determinar las velocidades de intervalo; ésto es la velocidad de la onda sísmica. entre dos reflectores consecutivos, ya que este dato es muy importante para la interpretación de un trabajo sísmico.

IV.2.6. Trabajo de gabinete

Esta consistió en la obtención de los tiempos de refracción y reflexión a partir de los sismogramas, elaboración de gráficas tiempo - distancia, obtención de velocidades, profundidad de los contactos, correlación de velocidades con tipos de material, cortes geológicos, etc.

Siendo el terreno sensiblemente plano en la zona de estudio, se usó en las dos líneas tiradas un nivel de referencia, el correspondiente al nivel natural del terreno y así las gráficas tiempo - distancia - fueron elaboradas. Estas gráficas se hicieron con todos los impulsos leídos en los sismogramas, siendo todos confiables, ya que los dudosos fueron deshechados y cuando la precisión de las lecturas fue pobre, se prefirió no usar los datos.

El método de interpretación es el de Hales modificado. (Geophysics prospecting. 6. 1958, pag. 285-314).

Esta modificación permite interpretar aún cuando los polígonos de Hales estén incompletos (siempre y cuando se conozca el tiempo inverso y haya control de la profundidad). Se basa en el hecho de que el recíproco de la pendiente de la línea media del polígono, - es aproximadamente igual a la velocidad del refractor (ver fig.IV.2.17).

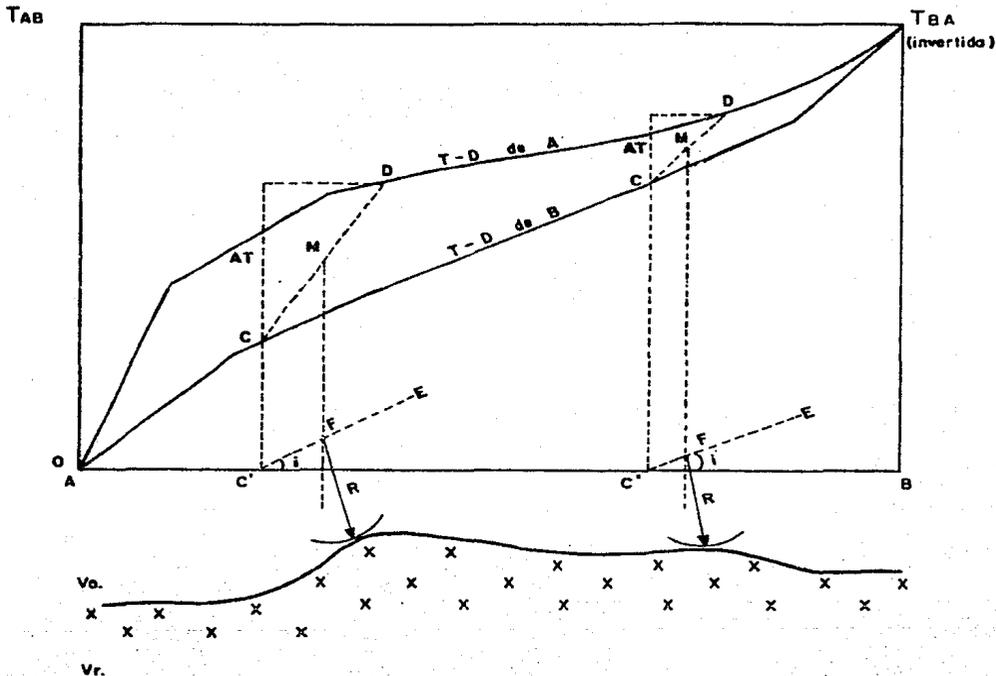


fig. IV.2.17

MÉTODO DE HALES.

Es un método gráfico de interpretación en sismología de refracción, muy útil cuando el refractor tiene -- cambios de profundidad muy fuertes, hay variaciones de relieve considerables o fallas.

El método de Hales supone velocidad constante sobre el refractor.

Las curvas inversas tiempo-distancia, están dibujadas en una sola dirección con respecto al tiempo recíproco (fig. IV.2.17). Las líneas CD se dibujan con una pendiente igual a $V_0^2/V_r \cos W$, donde W es el echado del refractor; $\cos W$ se aproxima tanto a la unidad, - por lo que la expresión anterior queda:

$$V_0^2/V_r$$

C' es la proyección de C sobre la horizontal, a partir de la cual se dibuja la línea C'E con el ángulo crítico i con respecto a la horizontal ($i = \text{arc sen } V_0/V_r$).

La proyección vertical del punto medio de CD sobre la línea corresponde al centro del círculo del perfil F.

El radio del círculo está dado por $R = V_0 AT / 2 \cos i$, - donde AT es el tiempo entre C y D.

El arco de radio R es tangente al refractor .

La configuración del refractor se encuentra dibujando tantos arcos como sea posible.

Al hacer las consideraciones anteriores el error que se comete, será menor que el que ocasionó al considerar la velocidad del refractor a partir de los tiempos de los sismogramas.

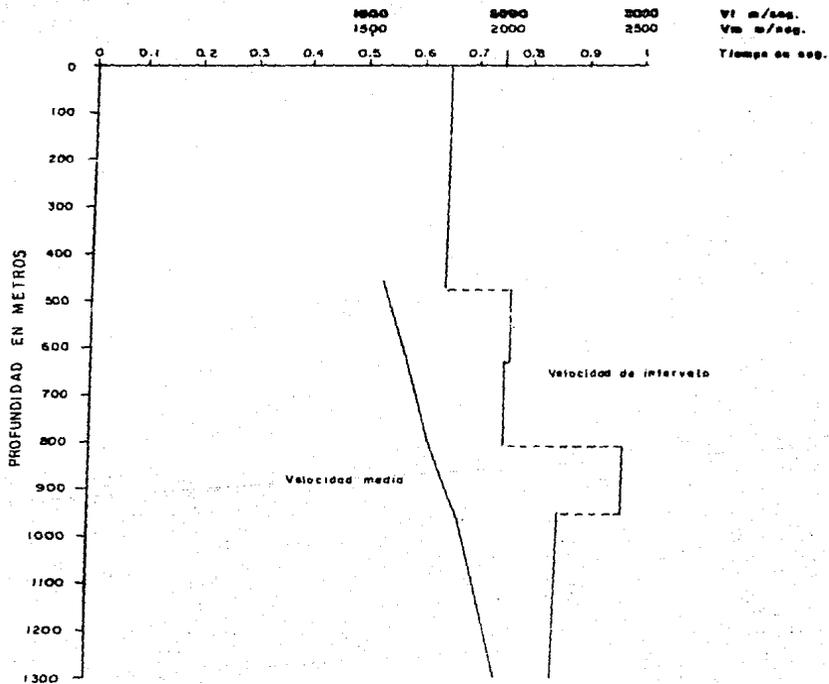
Este método es válido, como se mencionó en un principio, aún en el caso que el refractor no sea plano. La línea media del polígono (M), puede trazarse si se conoce un punto y la velocidad del refractor. Esta línea es recta si W es pequeño independientemente de la irregularidades del refractor.

El método anteriormente descrito, se aplicó siempre que fue posible, usando como nivel de referencia la superficie del terreno; con un valor promedio de la velocidad de la onda sísmica hasta el reflector considerado. Esta velocidad se conservó constante a lo largo de las líneas sísmicas, donde se consideró que no existía variación, en las secciones de interpretación escala 1:50,000 se muestran los resultados.

De manera sistemática se comprobó la interpretación mediante el trazo de trayectorias rectas o por medio del trazo de frentes de onda. La interpretación se consideró satisfactoria cuando la aproximación fue del 1%.

La precisión con que se obtuvieron las profundidades se considera inferior, ya que no se hicieron determinaciones sistemáticas de velocidad vertical en toda el área. Dependió básicamente de la velocidad vertical lograda en un pozo a 60 m de profundidad cercano al área de estudio, así como de las observaciones del perfil de velocidades.

El perfil de velocidades verticales (fig. IV.2.18) indica una velocidad de intervalo en el área de estudio



PERFIL DE VELOCIDADES VERTICALES

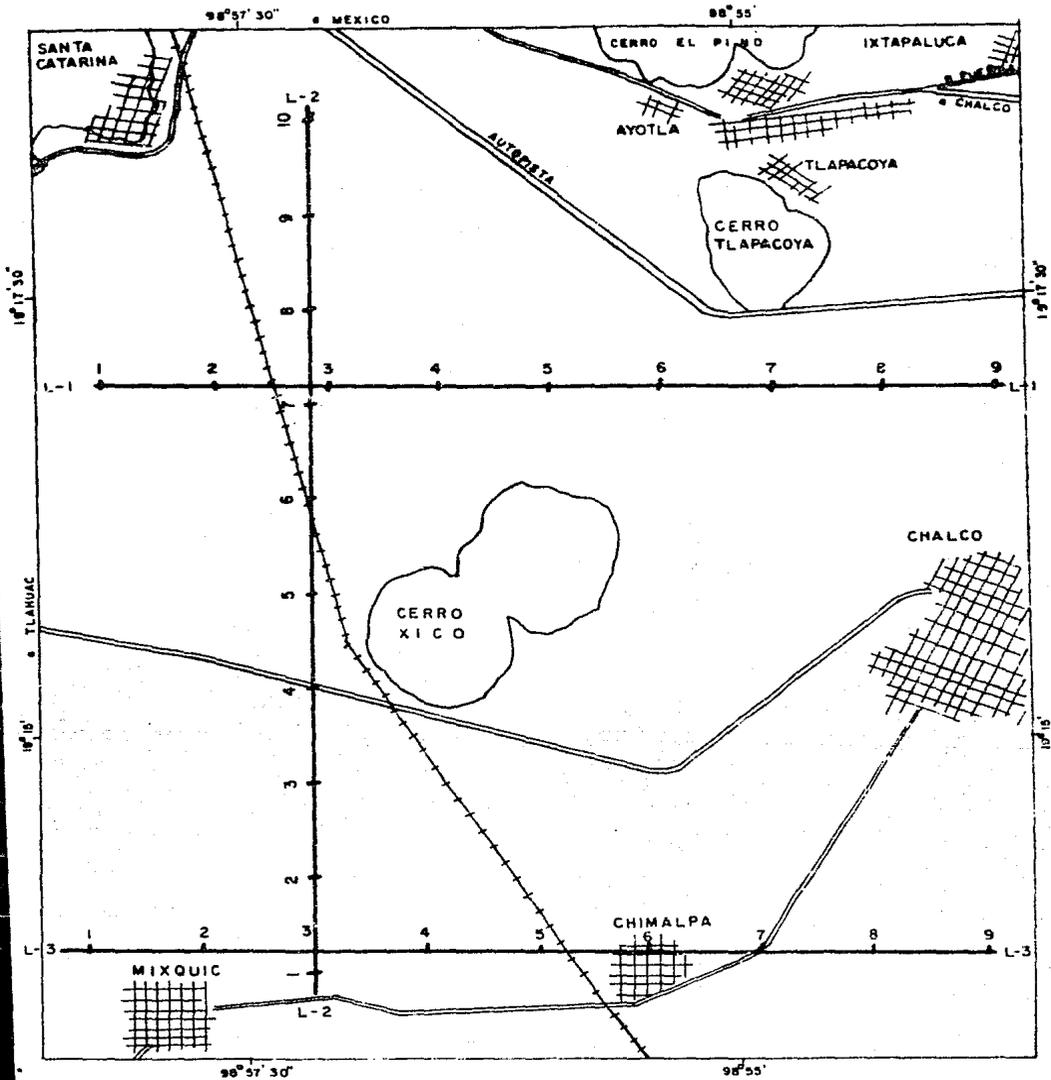
de 1583 m/seg. entre 0 y 475 m de profundidad, considerando la zona de baja velocidad cercana a la superficie; para fines prácticos y haciendo los ajustes necesarios, se consideró la velocidad de intervalo vertical de 1600 a 1700 m/seg. como máximo, aumentando la velocidad a mayor profundidad.

IV.2.7. Resultado sísmico

La distribución de las líneas sísmicas se encuentra en el plano IV.2.19 y los resultados están resumidos en los perfiles geológicos de las líneas L-1, L-2 y L-3, fig. IV.2.20, IV.2.21 y IV.2.22 respectivamente, en dichas figuras puede apreciarse lo siguiente:

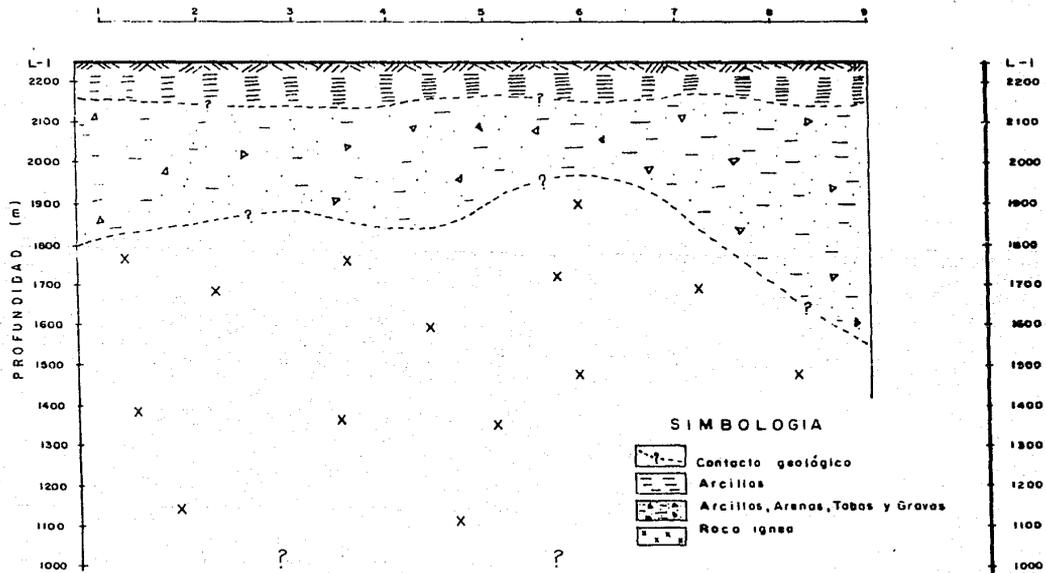
Línea L-1

La capa superficial de este corte tiene un espesor que varía de 75 a 110 m de profundidad, a lo largo de los puntos de tiro. La velocidad máxima de este horizonte es de 1583 m/seg. y corresponde a los depósitos lacustres arcillosos que existen en la Cuenca del Valle de México: la segunda capa acusa espesores de 160 m. en el



**DISTRIBUCION DE LINEAS SISMICAS
ESC. 1:50 000**

L I N E A L-1
P U N T O S D E T I R O



SECCION GEOLOGICA DE LA LINEA SISMICA L-1
ESCALA , HOR. 1: 50 000

punto de tiro 6, hasta 600 m. en el punto de tiro 9. dicho material está constituido por arcillas, arenas, tobas y gravas de diferentes tamaños y su velocidad sísmica promedio es de 2000 m/seg. La tercera capa registrada. la constituye la roca ígnea variando en profundidad de 230 a 750 m y con velocidad cercana a los 3000 m/seg.

Por debajo del punto de tiro 6, se observa un ascenso de la roca hacia la superficie que posiblemente tiene relación con el material ígneo que formó al cono volcánico "El Xico".

Línea L-2

En esta línea se observa que el material lacustre arcilloso, tiene espesores que varían de 50 a 100 m -- localizándose la mayor potencia bajo el punto de tiro 8 y la menor en el punto de tiro 6. con velocidad sísmica máxima de 1600 m/seg. La segunda capa tiene espesor variable de 100 a 290 m; siendo mayor bajo el punto de tiro 8 y menor entre los puntos 5 y 6 .

El material constituyente de estos depósitos es: arcillas, tobas y arenas con algunas gravas. el mate--

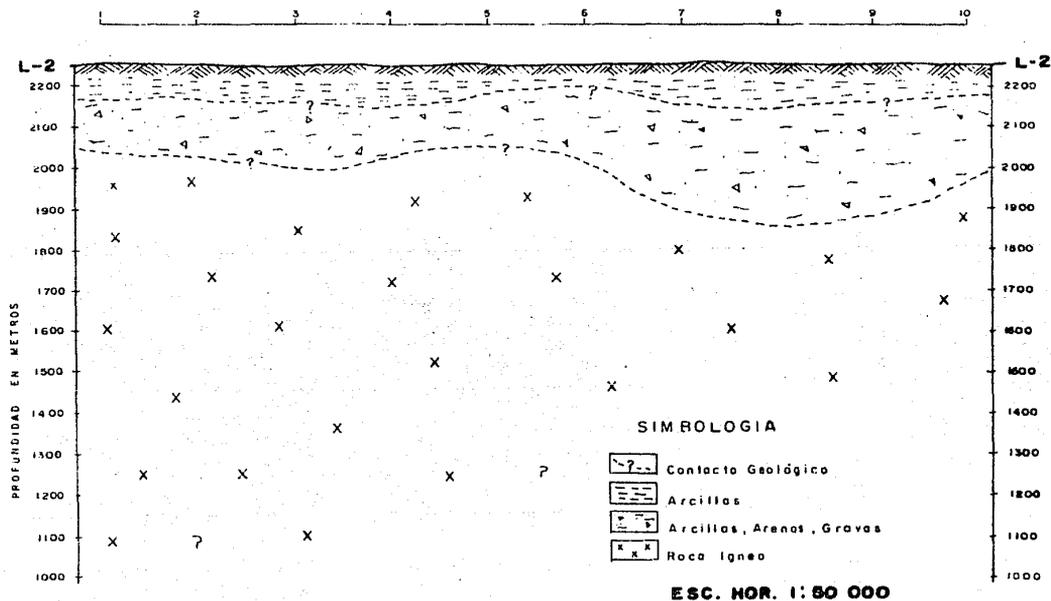
rial es de origen ígneo. La velocidad promedio es de 2100 m/seg. La tercera capa que se detectó es la roca ígnea con profundidad del lecho rocoso entre 200 y 400 m y cuya velocidad sísmica pasa de los 3000 m/seg. Los materiales de este horizonte son rocas ígneas y constituyen la roca basal de la cuenca.

En los puntos de tiro 5 y 6, se observa que la roca se encuentra más cercana a la superficie, debiéndose probablemente a las cercanías de la línea sísmica con el cerro "Xico" (fig.IV.2.21).

Línea L-3

La línea sísmica L-3, muestra características similares a los datos anteriores; existiendo superficialmente relleno lacustre, con espesores de 40 a 80 m y velocidad máxima de las ondas sísmicas de 1550 m/seg. - Por debajo de este horizonte se encuentra el material piroclástico: tobas, gravas y brechas de tipo volcánico, el espesor varía de 20 a 350 m, localizándose la zona más potente bajo el punto de tiro 1 y el mínimo en el punto del tiro 4; la velocidad sísmica de este material es cercana a los 2000 m/seg. La última capa

**LINEA L-2
PUNTOS DE TIRO**



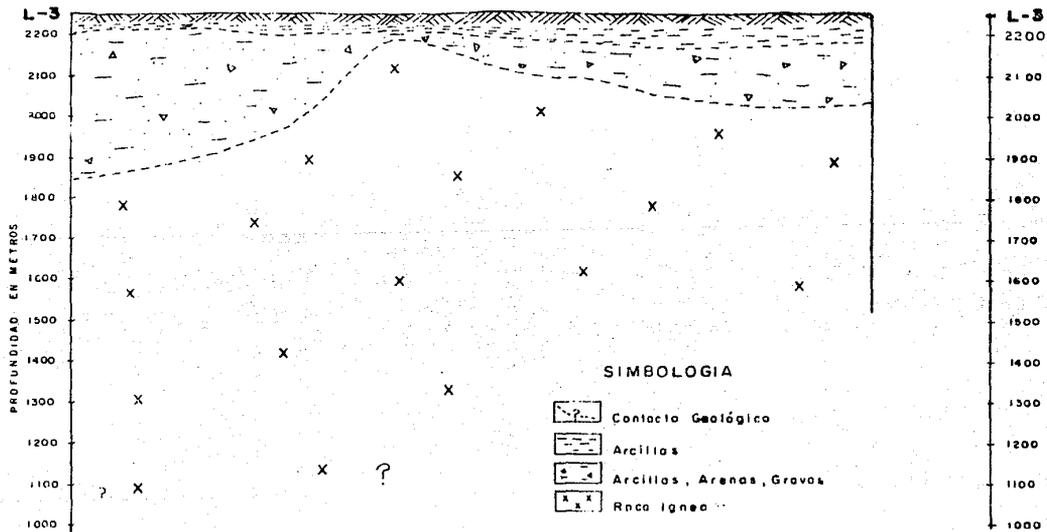
**SECCION GEOLOGICA DE LA LINEA
SISMICA L-2**

detectada, la forma la roca basal, siendo principal-
 mente basaltos; la velocidad de las ondas sísmicas
 es de 3200 m/seg. Por debajo del punto de tiro 4
 se encuentra la roca ígnea muy cercana a la superfi-
 cie del terreno, debiéndose esto probablemente a --
 una fractura que arrojó el basalto y que posterior-
 mente fue cubierta por el relleno lacustre; si rela-
 cionamos al cono "Xico" con el resultado de esta --
 sección geológica, podemos decir que pertenece a la
 Sierra de Chichinautzin, ya que de acuerdo a los da-
 tos, el material que formó la estructura proviene -
 del sur. (fig. IV.2.22).

De las tres secciones geológicas hechas por medio de
 sismología, puede afirmarse que las dos primeras ca-
 pas pertenecen a depósitos del cuaternario y la uni-
 dad más profunda (roca ígnea), pertenece al terciario
 medio y superior, ya que la velocidad sísmica así lo
 manifiesta. La cima de las formaciones de alta velo-
 cidad, la constituye la roca ígnea que sirve de base
 a los rellenos cuaternarios en la cuenca.

No se observaron velocidades altas a mayor profundi-
 dad, por lo que se infiere que los sedimentos marinos
 del cretácico no fueron alcanzados y que por consi-

LINEA L-3
PUNTOS DE TIRO



ESC. HOR. 1:50 000

SECCION GEOLOGICA DE LA LINEA
SISMICA L-3

guiente deben encontrarse a profundidades mayores de 1300 m. en el área de estudio.

IV.3. Prospección eléctrica (SEV)

Con la finalidad de determinar la profundidad de las fracturas en la plantilla de cimentación del tanque y los contactos litológicos en el cuerpo del cono, - así como en la base del mismo, se programaron 36 SEV los cuales se distribuyeron en 8 secciones geoelectricas de la siguiente manera: 4 en la plantilla del tanque con un AB máximo de 120 m. una en la parte interior del cono con un AB máximo de 360 m y 3 en la zona cercana al contacto entre los dos conos con un AB también de 360 m.

Con las ocho secciones, se obtuvo la distribución de las resistividades del subsuelo y con ello pudo establecerse la correspondencia entre ésta y los diferentes horizontales litológicos, así como fracturamiento, dando como resultado final un modelo del medio geológico.

IV.3.1 Fundamentos teóricos

IV.3.1.1 Ley de Ohm en medios de 3 dimensiones

La Ley de Ohm regula la circulación de corriente en -

un circuito eléctrico. Esta Ley establece que la relación entre la caída de potencial (V) en un circuito y la corriente (I) que circula a través de él, son -- constantes en un campo estacionario (fig.IV.3.1) y se definen por medio de la resistencia eléctrica (R) y se expresa con la fórmula:

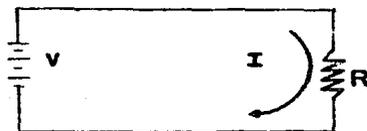


fig.IV.3.1

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{-----}(1)$$

Unidades:

V - Volts

I - Amperes

R - Ohms

Esta fórmula es válida para medios lineales; si que remos extender el concepto a medios de tres dimensiones, podemos considerar la fig. IV.3.2 .

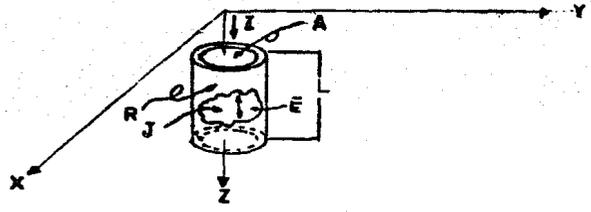


fig.IV.3.2

La resistencia en el cilindro será directamente proporcional a la longitud (L) e inversamente proporcional al área del mismo (A).

Lo anterior puede establecerse en la siguiente forma:

$$R \approx \frac{L}{A}$$

Para que la relación anterior se pueda convertir en una igualdad, introducimos la constante de proporcionalidad (R₀), la cual será igual a un cubo unitario de L=1, A=1 y ρ=R₀ del material que se desea estudiar; a esta constante se le llama Resistividad o Resistencia Específica, si la introducimos en la relación anterior nos queda:

$$R = R_0 \frac{L}{A} \quad \text{-----} (2)$$

Las unidades de la resistividad en el Sistema M.K.S. es el $\text{Ohm}\cdot\text{m}$ ó $\text{Ohm}\cdot\text{m}^2$. Para extender este concepto a volúmenes diminutos, consideremos la densidad de corriente (\vec{J}) en vez de la corriente total y el gradiente de potencial eléctrico (\vec{E}) en lugar de la caída de potencial a través del cuerpo (ver fig. IV.3.3).

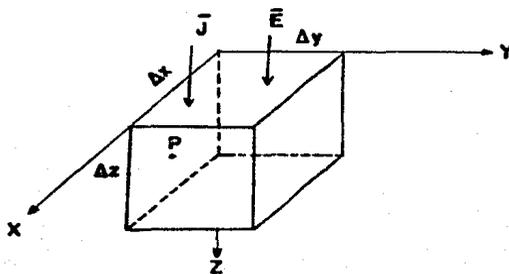


fig. IV.3.3

Si consideramos el paralelepípedo de la fig. IV.3.3 de lados Δx , Δy y Δz y refiriéndonos a un punto P situado en tal forma que se localiza en la dirección de la corriente y suponiendo que no hay discontinuidades del campo eléctrico, tendremos que la resistencia a través de la figura está dada en la forma siguiente:

De la fig. IV.3.3

$$L = \Delta Z$$

$$A = \Delta X \times \Delta Y$$

De 2:

$$R = \frac{\bar{E}}{J} \frac{L}{A}$$

Sustituyendo L y A:

$$R = \frac{\bar{E}}{J} \frac{\Delta Z}{\Delta X \Delta Y} \quad \text{-----} (3)$$

Sustituyendo L y A en 2

$$R = R_0 \frac{\Delta Z}{\Delta X \Delta Y} \quad \text{-----} (3a)$$

Iguando 3 con 3a

$$\frac{\bar{E}}{J} \frac{\Delta Z}{\Delta X \Delta Y} = R_0 \frac{\Delta Z}{\Delta X \Delta Y}$$

$$R_0 = \frac{\bar{E}}{J} \quad \text{-----} (4)$$

Como $R_0 = \frac{1}{C}$ ----- de 4

$$\frac{1}{C} = \frac{\bar{E}}{J}$$

$$C = \frac{J}{\bar{E}} \quad \text{-----} (5)$$

Unidades:

J : Amperes/m²

\bar{E} : Volts/m

R_o : Ohm - m.

C : (Ohm-m)⁻¹ ó Mho-m.

A) Distribución de potencial eléctrico en un terreno homogéneo e isotropo. (Ver fig. IV.3.4)

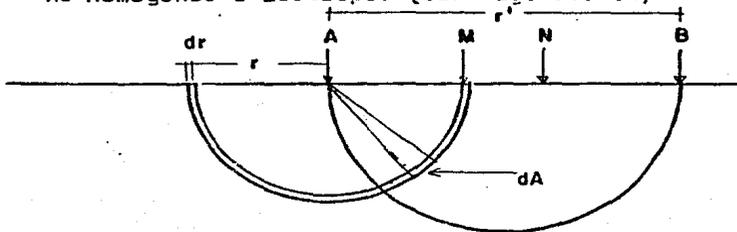


fig. IV.3.4

De acuerdo a la figura y a la fórmula No. 4 tenemos:

$$R_o = \frac{\bar{E}}{J}$$

$$\bar{E} = R_o \bar{J} \text{ pero } \bar{J} = \frac{I}{dA}$$

$$\bar{E} = R_o \frac{I}{dA} \text{ ----- (6)}$$

La diferencia de potencial (dv) producida por el paso de la corriente se expresa por la fórmula:

$$dv = - R_0 \frac{I}{dA} dr, \quad - dv = R_0 I \frac{dr}{dA} \quad (7)$$

Siendo dA el área de la figura a una distancia $r + dr$ y R_0 la resistividad.

Para la semiesfera de radio r tenemos:

$$-dv = R_0 I \frac{dr}{4\pi r^2} \quad \text{-----} (8)$$

El potencial a una distancia r del punto de emisión de corriente A viene dado por la integral de la expresión anterior:

$$-V = \frac{R_0 I}{4\pi} \int_0^r \frac{dr}{r^2} \quad \begin{array}{l} U = r^2 \\ du = 2rdr \rightarrow \frac{1}{u} \end{array}$$

$$V(r) = \frac{R_0 I}{4\pi} \int \frac{du}{u}$$

$$V(r) = \frac{R_0 I}{2\pi} \frac{1}{r} \quad \text{-----} (9)$$

Si tenemos otro electrodo P en el cual r' es la distancia del punto al electrodo; el potencial total

vendrá dado por:

$$V = V(r) - V(r^*) = \frac{I \rho_0}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r^*} \right) \quad (10)$$

La ecuación (10) nos permite el cálculo de la distribución de potencial en el subsuelo y en la superficie del terreno, para diferentes disposiciones de A y B, M y N.

B) Fórmula general de un cuadrípolo.

En caso de tener un terreno o cuerpo lineal, no es posible determinar directamente la resistividad, si diendo en un punto la corriente y el voltaje debido a la deformación del campo eléctrico, ya que no representaría el valor real de la resistividad del medio recorrido por la corriente.

Es necesario para ello, usar varios electrodos para introducir la corriente (I) a la superficie del terreno y medir la diferencia de potencial (AV) que existe entre los electrodos, de acuerdo a la distribución del campo eléctrico producido por las condiciones eléctricas del subsuelo; generalmente se usan 4 electrodos o cuadrípolos.

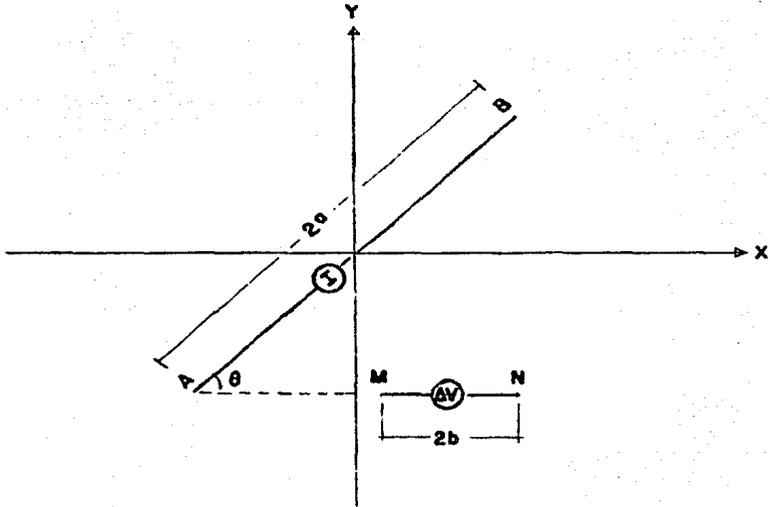


fig. IV.3.5

Consideremos un dispositivo general (fig. IV.3.5) -- donde A y B son los electrodos de corriente introducidos en el terreno, por los que circula una corriente I; si ponemos como condición que el subsuelo sea homogéneo e isótropo, los potenciales en los puntos M y N se pueden determinar por medio de la fórmula -- (10) y serán:

$$V_M = \frac{R\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$

$$V_N = \frac{R\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

decir que la resistividad aparente es función de:

$$R_{oa} = F (X_0, Y_0, a, b, \theta)$$

La resistividad aparente se define como la resistividad que tiene un medio heterogéneo, al introducir a través de un dispositivo o cuadripolo, una corriente I y registrar una diferencia de potencias ΔV . Es por lo tanto, un valor promedio de resistividad de las capas del subsuelo y depende principalmente de las características eléctricas del subsuelo y de la constante K .

De la fórmula 13, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. El valor de R_{oa} no cambiara mientras la corriente recorra el mismo tipo de material en el subsuelo y cuando las capas cambien, también la resistividad cambiará.
2. El dispositivo electródico a usar, deberá elegirse de acuerdo al objetivo de la exploración, si se efectúa un sondeo eléctrico vertical (sev) a profundidad de investigación teórica grande y

si la distancia entre los electrodos M y N es pequeña en relación a la distancia A B, el factor K será muy alto y las variaciones de la Roa serán mínimas, sin depender de -- las propiedades eléctricas de las capas pro fundas en forma muy marcada.

3. Para un terreno y disposición de electrodos determinado, ΔV es proporcional a I introducida en el terreno, por tanto para obtener lecturas legibles y precisas de " ΔV ", se de be disponer de una corriente apreciable en el terreno y una separación adecuada de los electrodos M y N.

C) Dedución de fórmulas para los arreglos electródicos mas comunes.

Las disposiciones electródicas comúnmente usadas en el campo, son las siguientes:

C.1 Arreglos simétricos.

C.1.1. Wenner.

En esta modalidad, la separación entre los cuatro eleg trodos es la misma (fig. IV.3.6)

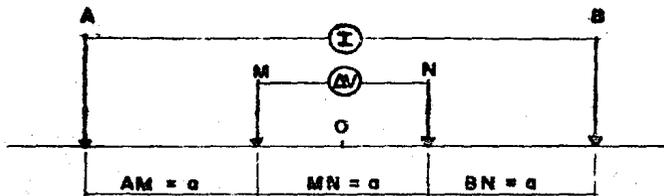


fig. IV.3.6

Usa la fórmula (12).

$$R_{oa} = \frac{2 \pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM}} \frac{\Delta V}{I}$$

Sustituy. en función de a $R_{oa} = \frac{2 \pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} - \frac{1}{2a}} \frac{\Delta V}{I}$

$$R_{oa} = 2 \pi a \frac{\Delta V}{I} \quad \text{--- (14)}$$

C.1.2. Lee.

Esta disposición es una variante de la anterior, colocando un quinto electrodo (G) en el centro de los electrodos M y N (fig. IV.3.7).

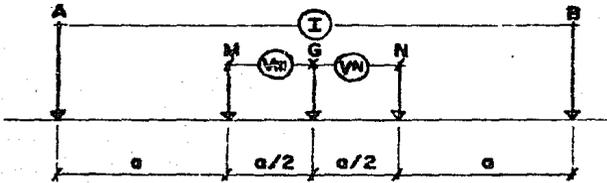


fig. IV.3.7

De la fórmula (12)

$$Roa = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{Am} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{Bn}\right)} \frac{\Delta V}{I}$$

La cual puede descomponerse en 2 términos:

$$Roa1 = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{Am} - \frac{1}{Bn}\right)} \frac{\Delta Vm}{I}$$

$$Roa2 = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{Bn} - \frac{1}{AN}\right)} \frac{\Delta Vn}{I}$$

Sustituyendo en función de a:

$$Roa1 = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a}\right)} \frac{\Delta Vm}{I}, \quad Roa2 = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a}\right)} \frac{\Delta Vn}{I}$$

Haciendo operaciones, obtenemos la fórmula por medio de la cual puede calcularse la resistividad aparente:

$$\begin{aligned} R_{oa1} &= 4\bar{\Pi} a \frac{\Delta V}{I} M \\ R_{oa2} &= 4\bar{\Pi} a \frac{\Delta V}{I} N \end{aligned} \quad \text{-----(15)}$$

Los valores obtenidos en cada uno de los términos - deben ser muy parecidos, las discrepancias que se - obtengan se deben a errores operacionales o a que - las capas no son horizontales, en este caso puede - apreciarse el buzamiento del contacto entre las - formaciones.

C.1.3 Schlumberger.

En esta modalidad la separación entre los electrodos de potencial M y N es mínima respecto a la distancia $2a$ de los electrodos de corriente A y B, tratando de que $M N / AB \approx 0$.

De esta manera el dispositivo electródico está de acuerdo con las consideraciones teóricas del campo eléctrico que tienen que suponerse al deducir las

fórmulas. Para fines prácticos es suficiente con -
que se conserve la relación $MN \leq AB/5$. (Ver fig. -
IV.3.8).

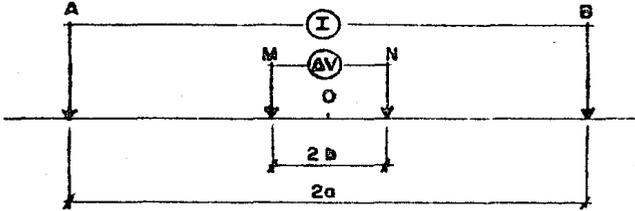


fig. IV.3.8

De acuerdo a la fig. IV.3.8, tenemos $AM=BN= a-b$; - -
 $AN = BM = a+b$; y de la fórmula 12:

$$R_{oa} = \frac{2\bar{I}}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM}\right)} \frac{AV}{I}$$

Sustituyendo en la fórmula anterior en función de -
a y b, tenemos:

$$R_{oa} = \frac{2\bar{I}}{\left(\frac{1}{a-b} - \frac{1}{a+b} + \frac{1}{a-b} - \frac{1}{a+b}\right)^2} \frac{AV}{I}$$

$$R_{oa} = \frac{2 \pi}{\frac{a+b - (a-b) + a+b - (a-b)}{(a-b)(a+b)}} \frac{\Delta V}{I}$$

$$R_{oa} = \frac{2 \pi}{\frac{a+b - a+b+a+b - a+b}{(a-b)(a+b)}} \frac{\Delta V}{I}$$

$$R_{oa} = \frac{2 \pi}{4b} \frac{\Delta V}{I} \\ (a-b)(a+b)$$

$$R_{oa} = \frac{2 \pi}{4b} \frac{\Delta V}{I} \\ (a^2 - b^2)$$

$$R_{oa} = \frac{2 \pi}{4b} \frac{(a^2 - b^2)}{I} \frac{\Delta V}{I}$$

$$R_{oa} = \frac{\pi (a^2 - b^2)}{2b} \frac{\Delta V}{I} \quad (16)$$

Fórmula para el cálculo de la resistividad aparente en un arreglo eléctrico Schlumberger.

IV.3.2 Equipo utilizado.

Para la ejecución de los SEV, se empleó un resistivímetro marca Gish-Rooney modelo 10, de patente nortea-

mericana; este equipo consta de 2 unidades, una que tiene montados los instrumentos de medición de -- corriente (I) y voltaje (V) y la otra es la fuente de poder de corriente directa (c.d.), a base de 6 pilas secas de 45 volts cada una, conectadas en serie de tal forma que pueden emplearse voltajes múltiples de 45, con un máximo de 270 volts. Adicionalmente el equipo cuenta con un dispositivo de conmutación, que funciona a base de un acumulador para -- carro de 12 volts., transformando la corriente directa en corriente conmutada o de onda cuadrada.

La profundidad de penetración del equipo es de 600 m en condiciones geológicas normales, siendo menor -- cuando las condiciones son adversas.

Como complemento al equipo, se contó con cuatro carretes con cable eléctrico del número 14, 2 electrodos -- metálicos para inyección de corriente (I) al terreno y dos electrodos impolarizables de porcelana porosa -- para la medición de los voltajes (V).

La brigada de campo estuvo formada por los siguientes elementos:

- 1 Jefe de brigada (observador)
- 1 Ayudante
- 4 Peones
- 1 Chofer
- 1 Vehículo

IV.3.3. Técnicas de campo.

Para obtener los datos de campo de los SEV, se empleó el arreglo electródico Wenner, por considerarse el -- mas adecuado para este tipo de trabajo, con espacia-- mientos máximos de $AB = 360$ m.

El arreglo electródico Wenner fundamentalmente consis-- te en señalar un punto de origen en el terreno, a par-- tir del cual se marcan cadenamientos simétricos y pro-- gresivos hasta alcanzar la abertura de los electrodos AB deseada.

Para ejecutar el SEV, se inyecta corriente eléctrica al terreno por medio de los electrodos A y B, con-- tinuando al circuito el terreno y registrándose en el mili-- amperímetro la cantidad de corriente que circula, si-- multáneamente funciona un voltímetro que mide la dife-- rencia de potencial que existe entre los electrodos -

M y N; esta misma secuencia se sigue para cada estación hasta terminar con el cadenamiento que previamente se ha señalado.

Los datos de campo se van calculando en el lugar del sondeo y graficando en papel bilogarítmico, poniéndose en el eje de las abscisas la tercera parte de la distancia entre los electrodos A B y en el eje de las ordenadas la resistividad aparente. Si algún dato resulta erróneo o dudoso, se repite la lectura con la finalidad de obtener una curva de buena calidad.

IV.3.4. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete consiste fundamentalmente en procesar e interpretar la información recabada en el campo. Los datos y curvas se analizan y de ser necesario se recalculan y grafican de nuevo, dándoles el suavizado y ajustes necesarios, obteniéndose de esta forma una gráfica continua del SEV, denominada curva de campo de resistividad aparente.

El siguiente paso consiste en la interpretación individual de las gráficas de campo, la cual se logra por superposición con las curvas patrón para el arreglo Wenner, para los casos de 2, 3 y 4 capas de Wenner --

and Wetzel University of Minnesota Press. USA 1956.

Si las curvas maestras no coinciden con las de campo o existen algún caso con mas de cuatro capas, se utilizan combinaciones entre ellas ayudados por el método del punto auxiliar, con las gráficas del mismo nombre.

Como resultado de este procedimiento, se obtienen los valores reales de resistividad y profundidad de cada capa.

Posteriormente se elaboran perfiles topográficos de las secciones estudiadas, en donde se anotan los centros de los SEV, bajo los cuales se ponen los valores de resistividad aparente y $AB/3$, obtenidos de las curvas de campo, correlacionando los valores de igual resistividad en cada sondeo por medio de una línea o curva a lo que se le llama sección isorresistiva.

Para hacer una interpretación correcta, se deben tomar en cuenta los datos geológicos y de perforación que existan, así como la distribución horizontal y ver

tical de la resistividad aparente en el subsuelo. -
Con todos estos datos, se determinan los contactos
y las diferentes unidades litológicas que existan
en el sitio del proyecto.

IV.3.5 Resultado geoelectrico.

Como resultado de los puntos anteriores, partiendo de
las secciones isoresistivas y datos litológicos, se
elaboraron las correspondientes secciones geológicas,
donde se hace un modelo gráfico del subsuelo.

Secciones isoresistivas A-A', B-B',
C-C' y D-D'.

En la fig. II.3, se encuentran localizadas las cuatro
secciones que se elaboraron en el corte o base para la
cimentación del tanque, siendo A-A', B-B', C-C' y D-D'
interpretándose de la siguiente manera:

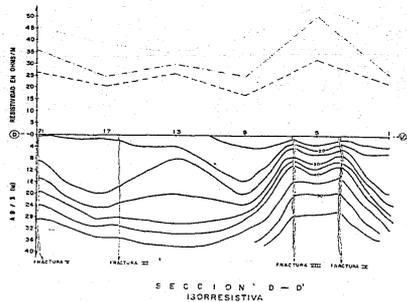
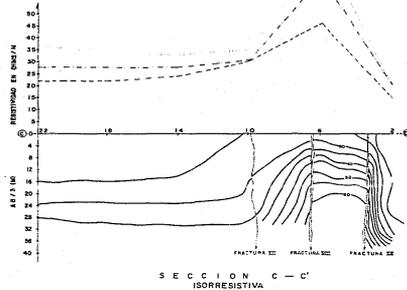
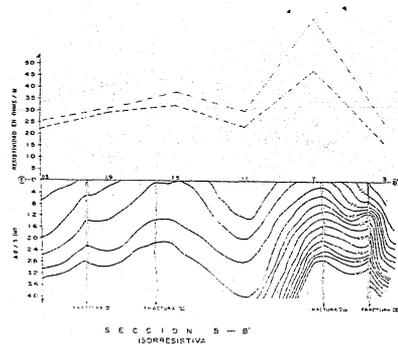
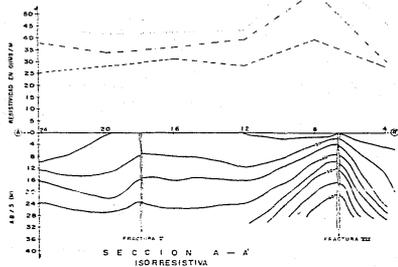
En general las cuatro secciones se comportan eléctrica-
mente de una forma heterogénea, observándose pequeñas -
anomalías que normalmente se deben al paso superficial
de los electrodos de corriente y potencial sobre las -
fracturas. Aplicando un suavizado o filtro numérico a
las curvas, se eliminó la información indeseable y al

interpretarse pudo verse que no existan anomalías - provocadas por cuerpos o estructuras extrañas, solo son dignas de consideración las que están a lo largo de las fracturas III y IV, VIII y IX (ver fig. IV.3. 9) las que señalan valores resistivos altos, debidos a la influencia de las fracturas.

No se determinó la profundidad total de las fracturas, ya que algunas de ellas están rellenas y además la exploración indirecta no se pudo efectuar a mayor AB, por las condiciones del terreno y el espacio plano disponible.

Por otra parte en las cuatro secciones isorresistivas, se pudo observar que no existen anomalías que pudieran acusar la presencia de onquedades o cavernas en el cuerpo del cono, ya que en los datos eléctricos no se manifiestan; además por otro lado, de acuerdo a la génesis del cono, no es posible que existan.

Para estos cuatro perfiles no se consideró pertinente elaborar secciones geológicas, ya que la toba basáltica se encuentra desde la superficie hasta la abertura máxima de AB.



SIMBOLOGIA

- 50 m de profundidad
- 20 m de profundidad
- - - - - 10 m de profundidad
- ~~~~~ Valor de resistividad aparente de la sección inclinada en Ohm/m.

ESCALA H. 1:200



UNAM FACULTAD DE INGENIERIA
 TESIS PROFESIONAL

PROFESOR VIC. PEEC. M. PEDRO CANOLES. I. DEPT. DE INGENIERIA
 RESISTIVIDAD A DIFERENTES
 AB.S. EN SECCIONES ISORESISTIVAS
 1977 PA. DE 2-3. AUTORES: GUSTAVO M.

Las otras cuatro secciones se encuentran localizadas en la fig. II.2, una de ellas se efectuó en el interior del cono cinerítico y las otras tres cerca del contacto entre los dos conos.

Secciones isorresistivas 1 y geológica 1.

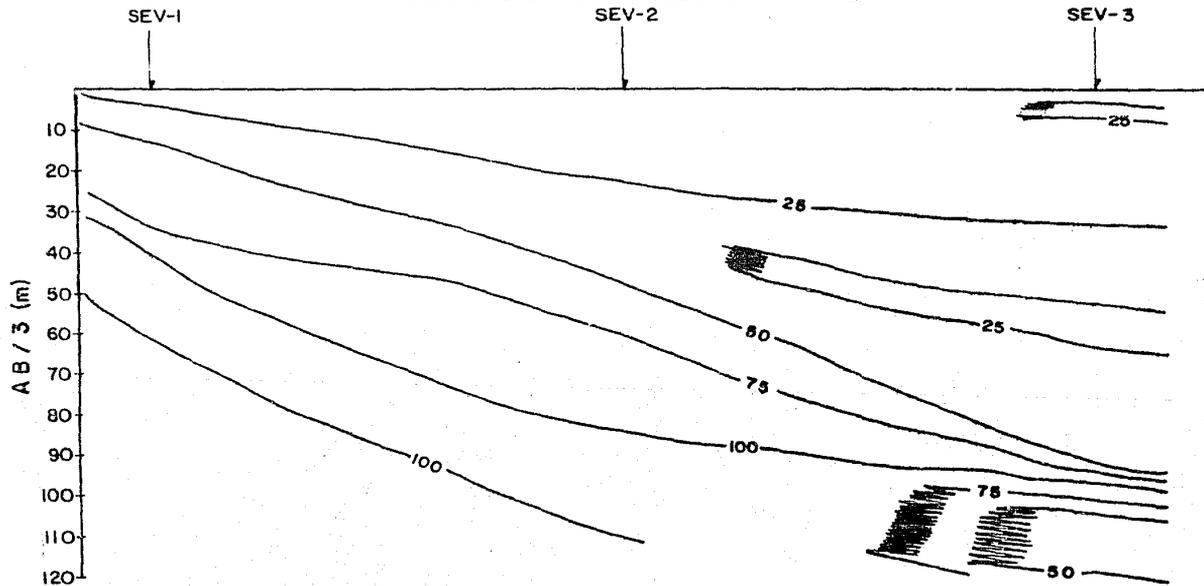
Las curvas isorresistivas de esta sección (fig. IV.3.10), muestran valores ascendentes, a medida que AB/3 aumenta, indicando con esto que los materiales profundos son más compactos y su calidad es mejor, comparada con los superficiales.

En el SEV-3 se observan tres cuerpos que causan anomalías, las que podemos atribuir a posibles lentes de material basáltico o brechoide. La interpretación se muestra en la sección geológica 1 (fig. IV.3.11), en la que se asocia a un cierto rango de resistividad un tipo de material, de acuerdo con la estratigrafía - - observada en el sitio de estudio.

Secciones isorresistivas 2 y geológica 2.

Prácticamente en todas las secciones, se observan rangos resistivos de bajos a altos con pequeñas variacio-

SECCION ISORRESISTIVA 1



SIMBOLOGIA

— 25 — Curva Isorresistiva en Ohm-m

ESC. H. 1 : 500

0 5 10 20m
ESCALA GRAFICA

1124

Figura IV. 3. 10. : Sección isorresistiva 1

SECCION GEOLOGICA I

SEV-1

SEV-2

SEV-3

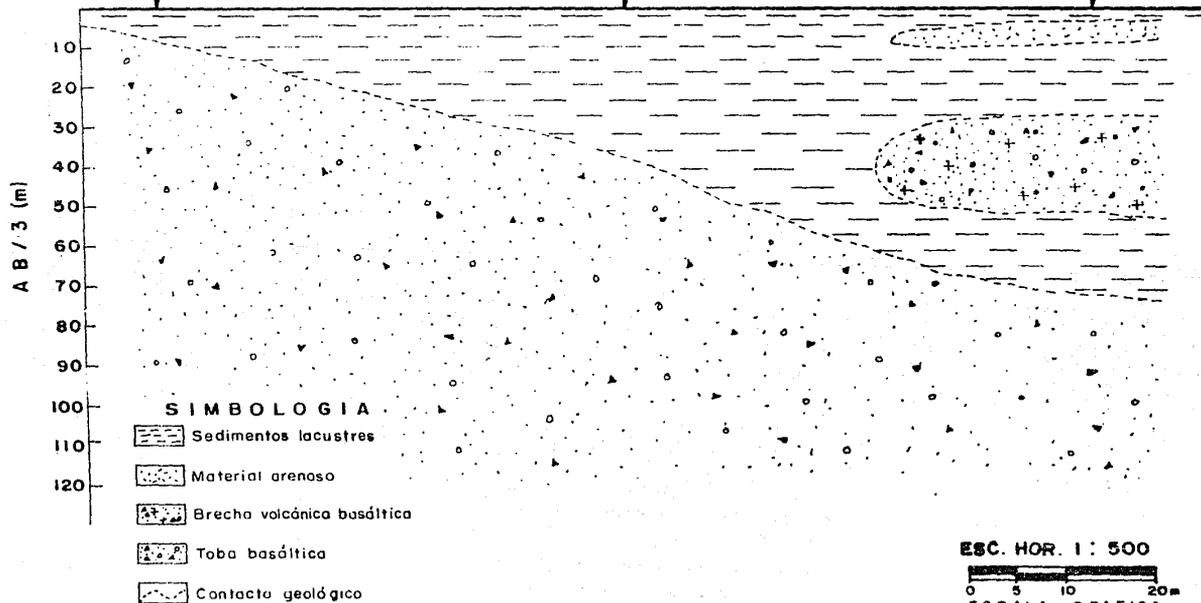


Figura IV. 3. II.-Sección Geológica 1

nes (fig. IV.3.12), lo cual sugiere la existencia del mismo tipo de roca (toba basáltica). ya que el corte se encuentra en el interior del cono cinerítico; donde el cuerpo de la estructura tiene un espesor considerable. el modelo se muestra en la sección geológica 2 (fig. IV.3.13).

Secciones isorresistivas 3 y geológica 3.

Está formada con los SEV 8, 9 y 10, los cuales muestran en sus líneas isorresistivas (fig. IV.3.14). -- una distribución creciente de resistividad aparente, a medida que la profundidad de investigación aumenta: en el sondeo 8; se puede afirmar que el espesor del material de relleno es mínimo y máximo en el sondeo 10, infrayaciendo a este la toba basáltica, la cual alcanza mayor profundidad a medida que nos alejamos del cono. La interpretación se muestra en la sección geológica 3 (fig. IV.3.15), donde podemos ver que el material lacustre se depositó sobre la toba basáltica de "El Xico", adaptándose a la forma y pendiente de las laderas.

Secciones isorresistivas 4 y geológica 4.

La sección se formó con los sondeos 11, 12 y 13 - - -

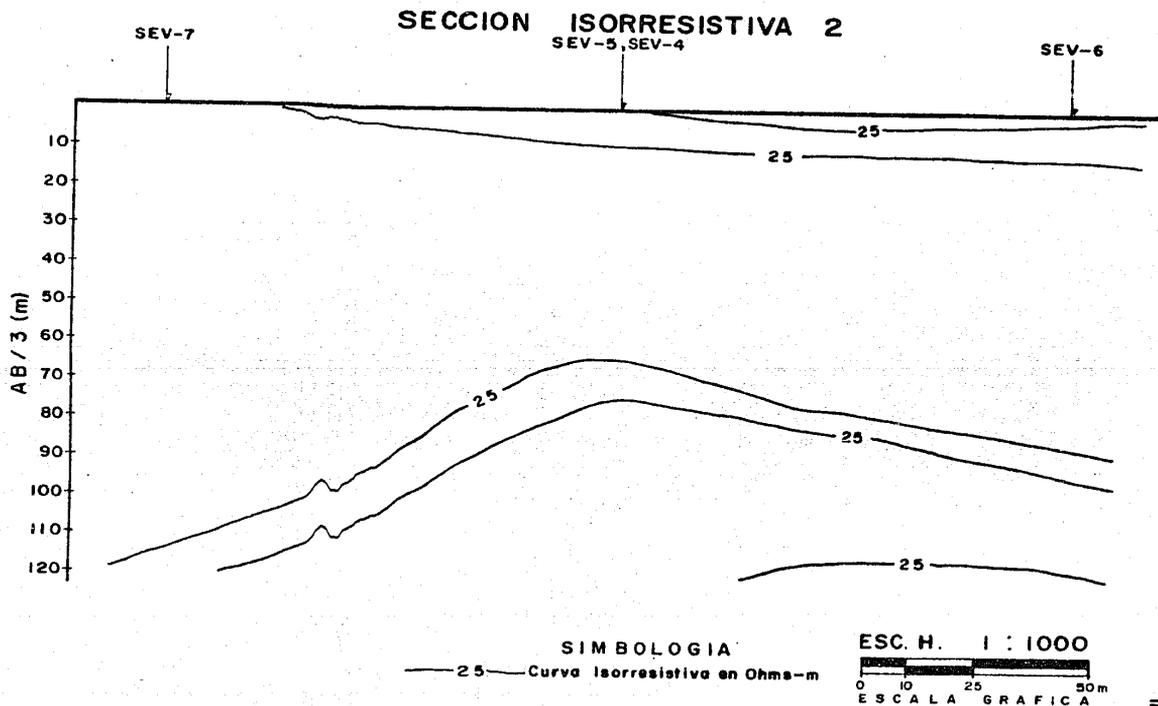
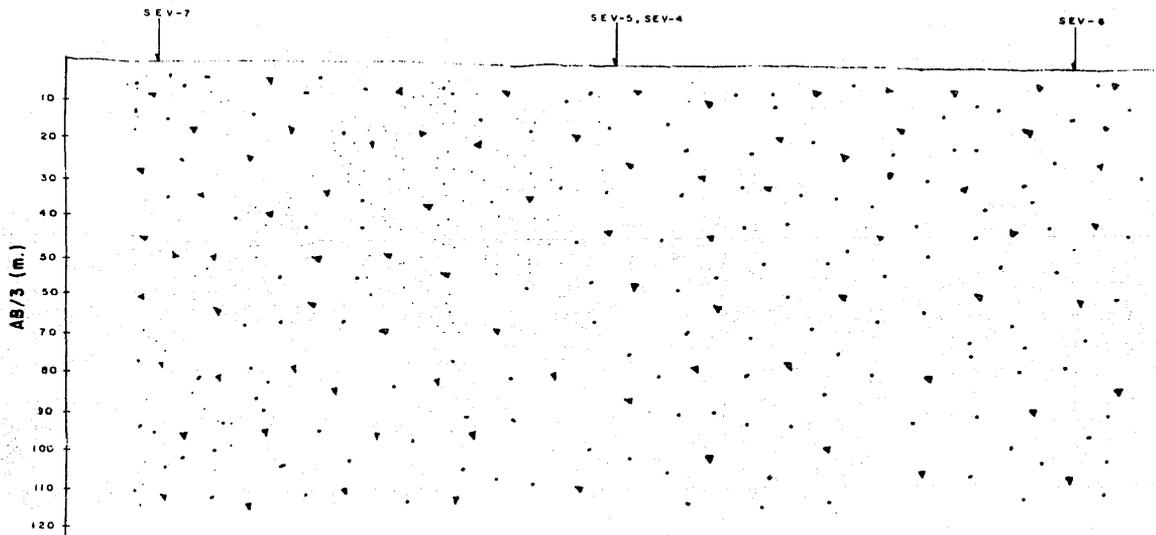


Figura IV. 3. 12. Sección isorresistiva 2

SECCION GEOLOGICA 2



ESCALA N - 1:1000



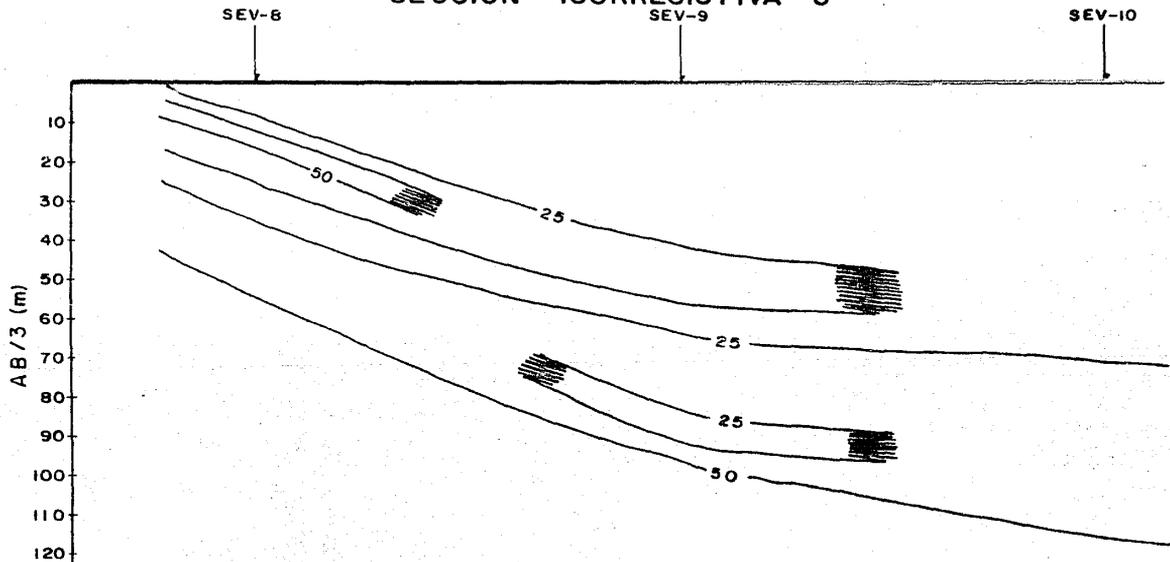
SIMBOLOGIA



13b

Figura IV. 3. 13. Sección Geológica 2

SECCION ISORRESISTIVA 3



SIMBOLOGIA

— 25 — Curva Isorresistiva en Ohms-m

ESC. H. 1 : 750



1136

Figura IV. 3. 14. Sección Isorresistiva 3

(fig. IV.3.16), en ella se observa un máximo resistivo en el SEV-12; el cual puede ser provocado por un cuerpo compacto (brecha volcánica basáltica) localizado cerca de la superficie; en el SEV-11 el espesor de relleno lacustre es mayor y en el SEV-13 alcanza su máximo espesor. Como base de los rellenos se encuentra la toba basáltica, la interpretación se muestra en la sección geológica 4 (fig. IV.3.17).

SECCION GEOLOGICA 4

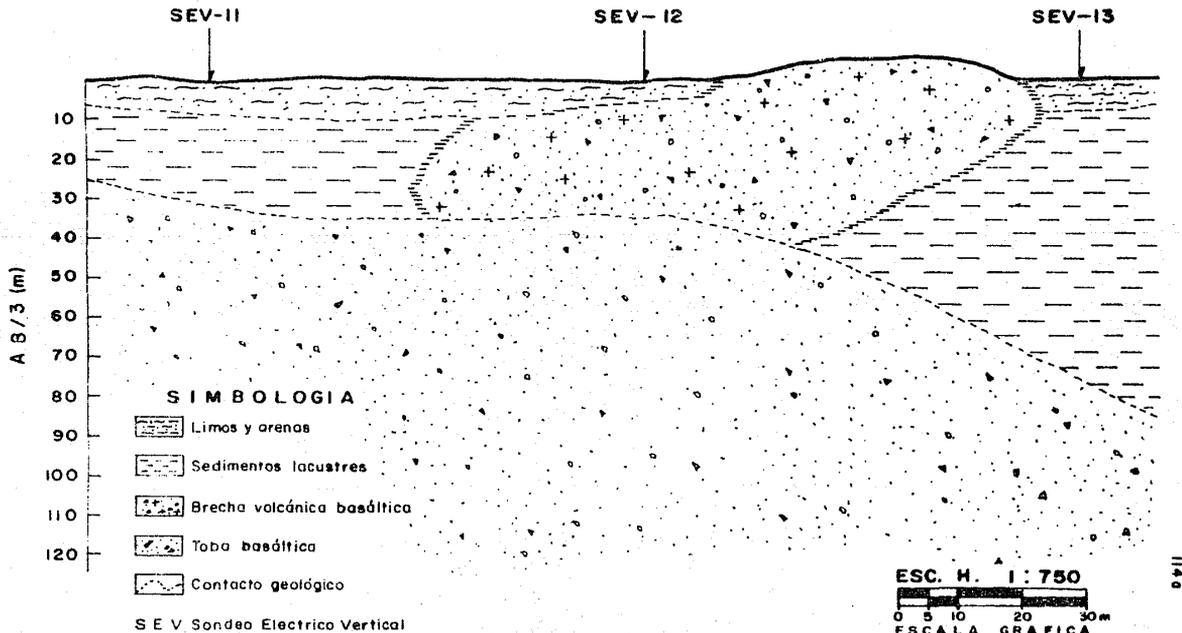


Figura IV. 3. 17. Sección Geológica 4

SECCION ISORRESISTIVA 4

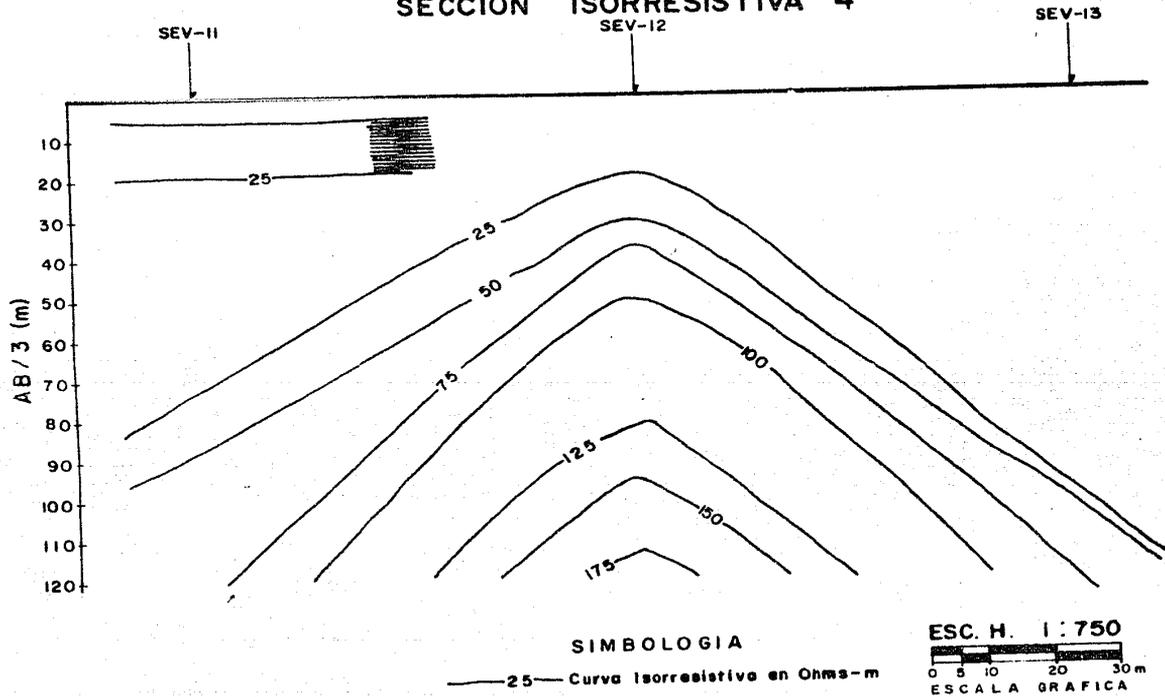


Figura IV. 3. 16. Sección isorresistiva 4

V. INTEGRACION DE RESULTADOS

Para integrar los resultados obtenidos fue necesario considerar los resultados parciales a que se -- llegó tanto por Geología como por Geofísica (gravi-- metría, sismología y prospección eléctrica).

De acuerdo a los datos geológicos, se sabe que el -- cono volcánico "El Xico", es de tipo cinerítico y for-- ma la figura geométrica de un cono truncado, con la -- base mas ancha hacia abajo, el cual tiene su caldera o chimenea en su centro y el material que lo compone es toba lítica de composición basáltica, existiendo -- al lado NE otro cono mixto formado por basalto y emi-- siones de productos piroclásticos; material que se -- clasifica como brecha volcánica basáltica, al parecer esta estructura fue posterior al cono tobaceo, por lo que es posible que haya dado origen a las fracturas -- de tipo tectónico(mayores)del cono cinerítico.

Por los datos que se obtuvieron de las perforaciones efectuadas en la zona, se sabe que la roca basáltica se encuentra a profundidades cercanas a los 400 m de profundidad en la subcuenca de Chalco y que puede va-- riar si nos acercamos a los afloramientos de roca. El

material piroclástico y basáltico que dió origen al Xico y al cono adyacente, según datos geológicos y geofísicos de apoyo, provienen de la Sierra de - - Chichinautzin por medio de alguna fractura oblicua transversal al sistema principal Clarion.

La parte superficial de la región. está formada por rollanos de tipo lacustre con materia orgánica. la parte poco mas profunda se compone de productos piroclásticos de todos tipos, desde ceniza hasta - -- bombas volcánicas y brechas de composición variada.

La roca basal de la Cuenca. la constituyen emisiones volcánicas de tipo basáltico y andesítico principalmente, aunque existen rocas de otra composición. La profundidad de la roca varía según el lugar de la -- subcuenca. localizándose la parte mas profunda hacia el NW y NE del cono volcánico "El Xico".

En el cuerpo del cono se identificaron 3 tipos de - - fracturas:

1. Sistema radial, con rumbos en direcciones radiales al centro del cono y con desarrollo casi vertical.

2. Sistema concéntrico: es normal al anterior y de forma circular con respecto al centro del cráter.
3. Sistema tectónico: localizado sobre las laderas NE y SW del cono, sus rumbos varían de 40° a 75° NE-SW y su desarrollo es vertical.

Al analizar las tres familias de fracturas, se llegó a la conclusión que los dos primeros sistemas, no -- representan peligro alguno para la realización del -- proyecto, ya que tuvieron su origen al enfriarse el cono cinerítico.

Al ejecutar las diferentes perforaciones cerca del -- cono y el levantamiento de datos geológicos correspondientes, se pudo saber que las fracturas tectónicas -- se originaron al formarse el cono adyacente al Xico y por lo tanto no se encuentran activas ni comunicadas entre sí. Se debe poner especial cuidado en lo referente a sismicidad, ya que deben considerarse los coeficientes de seguridad adecuados, así como las especificaciones necesarias para el proyecto de construcción de los tanques.

Por los datos que arrojaron las exploraciones directas e información existente, se pudo comprobar que parte de los sedimentos lacustres fueron depositados antes de la formación de los conos y posteriormente hubo depósitos que cubrieron parte de las estructuras volcánicas.

Debido a la geometría del cono cinerítico, los sedimentos lacustres que lo rodean tienden a ser más potentes a medida que nos alejamos de él, siguiendo sensiblemente a la pendiente que tiene la estructura en sus laderas.

Los datos geofísicos que pudieron obtenerse en la zona de estudio, son: gravimétricos, sísmicos y geoelectrónicos.

La gravimetría sirvió de apoyo regional, ya que los datos existentes son de casi toda la cuenca; sin embargo, se les dió un enfoque útil, dando como resultado una anomalía regional muy parecida a la de Bouguer, indicando con ello que las estructuras que la originan se encuentran profundas, siguiendo un máximo gravimétrico en la dirección S del Xico. Lo que se atribuye a una fractura que arrojó material -

ígneo, posiblemente proveniente de la sierra de Chichinautzin y que posteriormente fue cubierta por material de relleno lacustre; ésto se confirma con la sección geológica de la línea sísmica L-3 (fig. IV.2. 22), en la que a la altura del punto de tiro 4. se observa un ascenso de la roca ígnea hacia la superficie a unos 60 m de profundidad. En la parte superior derecha de la fig. IV.1.2, existe otro máximo correspondiendo a las cercanías del cerro de Tlapacoya, es atribuido a la densidad del mencionado cerro. Los mínimos gravimétricos se localizan en dirección SE-NW siguiendo una línea curva, estos valores se atribuyen a que la roca ígnea en esa dirección se encuentra mas profunda.

Por lo que respecta a la anomalía residual (fig. IV.1. 3), no tiene mucho interés, ya que los datos que se observan en el plano se ven superficialmente; sin embargo, se recalca la anomalía positiva, que existe de "El Xico" hacia el S, que como ya se mencionó es posible que sea a consecuencia de una fractura que arrojó material ígneo y que posteriormente fue cubierto por relleno lacustre.

La sección gravimétrica AB (fig.IV.1.4). muestra los resultados del método, donde el modelo propuesto fue el de una falla, los parámetros obtenidos. se encuentran en la hoja de dicha figura.

Para comprender mejor el método sismológico aplicado en el presente trabajo, se trataron inicialmente los aspectos teóricos fundamentales de los métodos de refracción y reflexión. así como la forma de interpretación de los datos obtenidos en los sismogramas. Para manejar con mayor facilidad la información obtenida en el área se elaboró una tabla Tiempo-Profundidad por medio de datos obtenidos en pozos y por el llamado perfil de velocidades. con observaciones por el método de reflexión.

El método usado en la interpretación en el sitio estudiado es el de Hales modificado, para datos de refracción, con el cual se lograron resultados aceptables y confiables.

La sismología que se realizó en el área fue con carácter regional, aplicando los métodos de refracción y reflexión.

Para utilizar la información en el presente trabajo.

se tomaron las tres líneas sísmicas mas cercanos al sitio de interés y se reinterpreataron, buscando las anomalías que acusaran alguna evidencia de la existencia de la base sepultada o raices del "Xico" en la línea sísmica L-1, bajo el punto de tiro 6 se nota en el perfil sísmico correspondiente, un ascenso de la roca ígnea a unos 300 m de profundidad; en la línea sísmica L-2, también se manifiestan las raices del "Xico", en el punto de tiro 5, donde se observa que la roca ígnea se acerca hacia la superficie del terreno. La línea sísmica L-3, pasó lejos del sitio de interés, por lo que no aportó datos del cono volcánico, sin embargo corroboró la existencia de una estructura sepultada (posiblemente una fractura que arrojó material ígneo), del "Xico" hacia el sur y que ya la gravimetría había detectado, por lo que los datos sísmicos vinieron a reforzar los resultados obtenidos.

Con respecto al método geoelectrico aplicado en el área de estudio, primeramente se mencionan los aspectos teóricos fundamentales y luego se pasa a la aplicación práctica del mismo.

En el sitio de estudio se ejecutaron 4 secciones -- geoelectricas, siendo una de ellas en el centro del cráter y las tres restantes en la parte SE de la estructura, cerca del contacto al cono adyacente -- (fig.II.2); también se efectuaron 4 secciones de calicatas eléctricas a 10, 20 y 30 m de profundidad -- teórica y secciones isorresistivas a 40 m (fig.IV.3. 11), todos los datos fueron obtenidos con arreglo -- electródico Wenner.

Los datos que arrojó este método, reforzaron los que se habían obtenido por el método gravimétrico y sísmico.

Básicamente la prospección eléctrica efectuada en la zona de contacto de los conos con el material lacustre, dice que las laderas de los mismos, siguen bajo el material de relleno sensiblemente con la misma inclinación que en la superficie.

Con respecto a la plantilla de cimentación de los -- tanques las fracturas que existen en ella son muy profundas, siendo peligrosas las señaladas como tectónicas, solo que por ser muy necesario el proyecto, puede considerarse suficiente tomando en cuenta un factor de

seguridad adecuado para la ejecución de la obra.

Debido a que los métodos geológicos y geofísicos -- son complementarios, en este caso se vio que si los sabemos aplicar correctamente, se pueden resolver - problemas que aunque en un principio parezcan difíciles, con la ayuda de datos obtenidos por diferentes métodos, se les puede dar la solución adecuada.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1. Conclusiones

Correlacionando los datos geológicos de campo, con la información que se obtuvo indirectamente por los métodos geofísicos, así como los datos que arrojaron las perforaciones efectuadas en la zona y con ayuda de los datos que existen en la región por medio de trabajos publicados anteriormente, se pueden hacer las siguientes consideraciones:

1. En el área comprendida entre Chalco y Tlahuac, existen potentes sedimentos terciarios y cuaternarios con espesores que varían de 800 a 1300 m de profundidad, disminuyendo de espesor a medida que nos acercamos a los afloramientos de la roca.

Los potentes sedimentos aluviales y lacustres del cuaternario, tienen intercalaciones de material piroclástico y rocas volcánicas extrusivas, encontrándose el nivel freático muy cercano a la superficie en toda la zona.

Las formaciones aluviales lacustres están constitu

das por diferentes materiales, como son: gravas, arenas, limos, arcillas, turbas y material piroclástico de todos tipos. Por debajo de los 300 m de profundidad el material de la cuenca debe contener abundantes tobas, aglomerados y material semiconsolidado.

En las zonas superficiales, la consolidación no tiene importancia, excepto en lentes aislados de arcillas. En las partes que se encuentran muy próximas a los aparatos volcánicos abundan los materiales piroclásticos, como es el caso de el cerro el "Xico".

2. Debido a la ausencia de discordancias geológicas y por el valor de las velocidades sísmicas, se infiere que las formaciones Cretácicas marinas no fueron alcanzadas y que se encuentran a mas de 1300 m. de profundidad en la zona de estudio. Esto concuerda con la información que se obtuvo con sismología de reflexión y pozos profundos perforados por PEMEX en la cuenca, a raíz del sismo de 1985, donde el pozo mas cercano a la zona de estudio, el Tulyehualco 1. tocó la roca cretácica a 2500 m de profundidad.

3. En las formaciones cuaternarias, existe suficiente porosidad y permeabilidad por lo que existen buenos acuíferos en esa parte de la cuenca. Las resistividades eléctricas obtenidas abajo de la capa superficial, son un poco altas, por lo que puede suponerse que las aguas del acuífero son bajas en cloruros y tienen contaminación con restos de material orgánico. Esto puede notarse en los cruces de las líneas sísmicas L-1 y L-2 y al sur del poblado de Chalco.

4. Bordeando el área de la cuenca, se localizan las rocas basálticas expulsadas por los aparatos volcánicos de la sierra de Santa Catarina, cerro el Pino y los derrames procedentes de la sierra de Río Frío y Chichinautzin; estos materiales actualmente se encuentran cubiertos por un espesor muy potente de material lacustre.

Los derrames procedentes del cerro de Xaltepec (sierra de Santa Catarina) y el Tehutli, estrangulan el área en las inmediaciones de Tlabuac, dividiéndola en dos porciones la E y la W.

La parte E, es la que nos ocupa en este caso y tiene en la planicie lacustre dos estructuras principales; el cerro de Cocotitlán y el Xico, los cuales están formados por lavas, brechas, tobas y material piroclástico.

Al NE de Mixquic, se localiza una estructura a poca profundidad de la superficie, la que se supone está asociada con el origen del Xico, de acuerdo a los datos que aporta la línea sísmica A-3 y a los datos aportados por la gravimetría.

5. Al N y NE de la zona de Xico y a profundidades del orden de 350 m. se observan anomalías sísmicas que acusan la existencia de rocas ígneas que se supone son terciarias, por la cercanía que guardan con respecto al cerro de Tlapacoyá y por encontrarse dispuestas en horizontes semejantes a éste.

Estas rocas forman cuerpos grandes, en una línea que parte de entre los cerros de Tlapacoyá y Xico, continuando hacia el sur del segundo.

6. Los datos geológicos disponibles del Xico, las exploraciones mecánicas y los datos geofísicos -

que se obtuvieron en el cuerpo y cercanías de la estructura, muestran que los sedimentos lacustres que lo rodean, son de depósito posterior al mismo y - - aumentan de espesor a medida que nos alejamos de él; siendo de edad mas reciente que "El Xico" y existiendo una total independencia entre ambos, de tal forma que si extraemos el agua que contienen los sedimentos cercanos al cuerpo, no hay problemas de asentamientos para ese aparato volcánico ni con las fracturas que éste tiene, ya que la roca que lo forma, de acuerdo con el origen del cono, proviene de fracturas transversales y oblicuas que ocasionaron los sistemas principales del cinturón orogénico.

7. Los sistemas de fracturas que existen en el cuerpo del cono, es posible que sean activos de acuerdo con la información geofísica y geológica obtenida recientemente.

8. Las cavidades alojadas en algunas fracturas tectónicas son muy locales y no tienen comunicación entre sí.

9. Las exploraciones efectuadas mediante pozos a cielo abierto, permitieron observar que las grietas que existen cerca de la base del cono son poco profundas.

das, ya que desaparecen a 2.60 m de profundidad, presentando su mayor desarrollo cerca de la superficie del terreno.

10. Los datos que se obtuvieron por medio de geofísica y perforaciones mecánicas, permitieron conocer la geometría del cono volcánico, con semejanza a un cono con la base hacia abajo.

VI.2. Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos por geología, geofísica, exploraciones directas y pruebas de laboratorio, se considera que los proyectos constructivos de los tanques reguladores y de almacenamiento (en proyecto) y las baterías de los pozos profundos (actualmente perforados), pueden llevarse a cabo, teniendo en cuenta las siguientes precauciones:

A. Para el proyecto de los tanques, dada la imponderable necesidad de la obra, debe considerarse un alto factor de seguridad sísmico, ya que el sitio elegido se encuentra dentro del cinturón orogénico y además las fracturas que tiene la estructura cónica, representan zonas de debilidad que a pesar de tener tratamiento de

inyectado, pueden provocar algunos asentamientos.

B. Construir los tanque sobre una loza de cimentación fragmentada en partes y reforzada; de tal suerte que si hay movimientos diferenciales en el terreno, puedan ser absorbidos por la estructura.

C. De preferencia los tanques deberán construirse con lozas prefabricadas, con capacidad para absorber pequeños movimientos; los cuales provocarán en ellas deformaciones geométricas únicamente o fugas de agua, pero en ningún caso la falla de la estructura.

D. En el caso que sobre las laderas del cono, existan volúmenes de roca inestable y que amenacen con fallar o deslizar es conveniente efectuar cortes que las estabilicen y con ello evitar peligros posteriores.

E. La perforación de las baterías de pozos profundos se llevó a cabo, considerando la distancia entre pozos (de 1 a 2 km), cada uno; teniendo presente que las aguas superficiales generalmente se encuentran contaminadas con materia orgánica y por lo tanto no son potables.

F. El diseño y terminación de los pozos, se hizo

en base a los resultados obtenidos del muestreo litológico, muestras de canal y registre eléctrico.

G. Para no romper el equilibrio de la cuenca entre la recarga y la extracción, es necesario tener pozos de observación y piezométricos que permitan conocer el comportamiento del acuífero.

A N E X O S

A). Indice de figuras.

(capítulo I - IV)

B). Indice de fotografías ilustrativas.

A). Indice de figuras

(capítulo I-IV).

Capítulo I

I.1. Plano de localización. 15a

Capítulo II

II.1. Tabla de correlación estratigráfica, 18a

II.2. Levantamiento geológico. 27a

II.3. Localización de fracturas tectónicas y secciones isorresistivas en la plantilla de cimentación de los tanques. 27b

Capítulo III

III.1. Planta del P.C.A. 1 32a

III.2. Planta del P.C.A. 2 32b

III.3. Corte litológico de la exploración I (V). 34a

	PAGINA
III.4. Corte litológico de la exploración II (V).	350
III.5. Corte litológico del - pozo piezométrico - - "El Xico".	38a
III.6. Corte litológico del - pozo "San Miguel Xico".	39a
III.7. Corte litológico del - pozo perforado per la C.A.V.M. entre "San - Miguel Xico" y "Tlahuac".	41a

Capítulo IV

Subcapítulo IV.1

IV.1.1. Anomalia gravimétrica - (Bouguer).	43a
IV.1.2. Anomalia regional.	44a
IV.1.3. Anomalia residual.	45a
IV.1.4. Sección gravimétrica A-B.	45b

Subcapítulo IV.2

IV.2.1. Ilustración del principio - de Huyghens.	47
IV.2.2. Ilustración del principio - de Fermat.	48
IV.2.3. Diferencia y relación entre frentes de onda plano y esférico.	48
IV.2.4. Ilustración de la Ley de -- refracción.	51

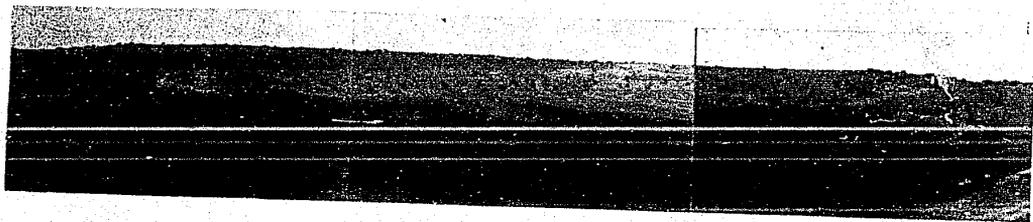
	PAGINA
IV.2.5. Caso de refracción total.	52
IV.2.6. Gráficas tiempo distancia.	54
IV.2.7. Esquema general de un modelo de N capas.	56
IV.2.8. (a y b). Esquema general de un modelo de N capas, - señalando distancias críticas y tiempos de intersección.	61 y 62
IV.2.9. Ilustración sobre la Ley de reflexión.	64
IV.2.10. Ilustración sobre reflexión de ondas sísmicas.	65
IV.2.11. Ilustración de un perfil -- continuo.	66
IV.2.12. Refractor inclinado.	67
IV.2.13. Arreglo de detectores en -- refracción y reflexión.	70a
IV.2.14. Tabla de conversión tiempo - profundidad en el área de - estudio.	72 y 73
IV.2.15. Ilustración del método indirecto de perfil de velocidades.	74
IV.2.16. Gráfica t^2 contra x^2 .	77
IV.2.17. Método de Hales.	80
IV.2.18. Perfil de velocidades verticales.	83a
IV.2.19. Distribución de líneas sísmicas.	84a
IV.2.20. Sección geológica de la línea sísmica L-1.	84b

	PAGINA
IV.2.21. Sección geológica de la - línea sísmica I-2.	86a
IV.2.22. Sección geológica de la - línea sísmica I-3.	87a
Subcapítulo IV.3	
IV.3.1. Circuito ilustrativo de la Ley de Ohm.	90
IV.3.2. Cilindro en tres dimensio- nes.	91
IV.3.3. Cubo unitario en tres di- mensiones.	92
IV.3.4. Distribución de potencial eléctrico en un terreno - homogeneo e isótropo.	94
IV.3.5. Arreglo electródico general de un cuadripolo.	97
IV.3.6. Arreglo electródico Wenner.	101
IV.3.7. Arreglo electródico Lee.	102
IV.3.8. Arreglo electródico - - - Schlumberger.	104
IV.3.9. Resistividad a diferentes profundidades y secciones isorresistivas (A-A', B-B', C-C' y D-D').	111a
IV.3.10. Sección isorresistiva 1.	112a
IV.3.11. Sección geológica 1.	112b
IV.3.12. Sección isorresistiva 2.	113a
IV.3.13. Sección geológica 2.	113b
IV.3.14. Sección isorresistiva 3.	113c
IV.3.15. Sección geológica 3.	113d

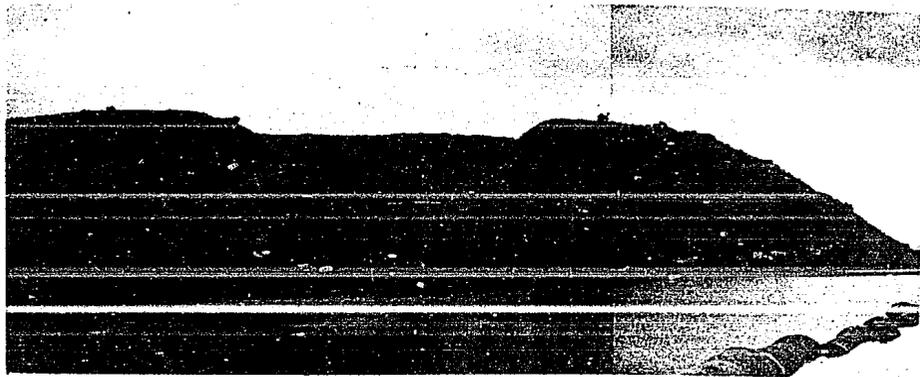
	PAGINA
IV.3.16. Sección isocronística 4.	114a
IV.3.17. Sección geológica 4.	114b
B). Indice de fotografías ilustrativas	
1. Vista panorámica de las partes W, N y E del cono volcánico -- "El Xico".	138
2. Vista del lado S del cono y del corte.	139
3. Vista de las plantillas de cimentación de los tanques desde la parte alta W, del corte.	139
4. Acercamiento del lado E del corte, donde se observa la medición de los testigos, entre dos pseudoestratos.	140
5. Fracturas en la plantilla de cimentación, sobre la excavación que se hizo, para la entrada y salida de tubería.	140
6. Fracturas en la parte SW del cono.	141
7. Zona de debilidad entre dos pseudoestratos, sobre el camino de acceso.	141
8. Fractura aumentada por efectos de erosión muy cercana a la parte NE, casi al pie del cono.	142

PAGINA

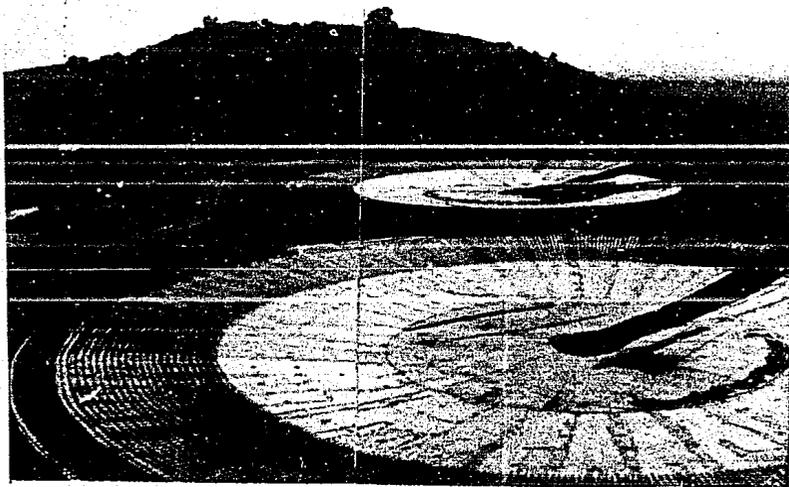
- | | |
|---|-----|
| 9. Grieta sobre el terreno, cerca de la base del cono en la parte S. | 142 |
| 10. Vista del P.C.A. 1 | 143 |
| 11. Vista del P.C.A. 2 | 143 |
| 12. Máquina Long-Year 38, con que se efectuaron las exploraciones directas. | 144 |



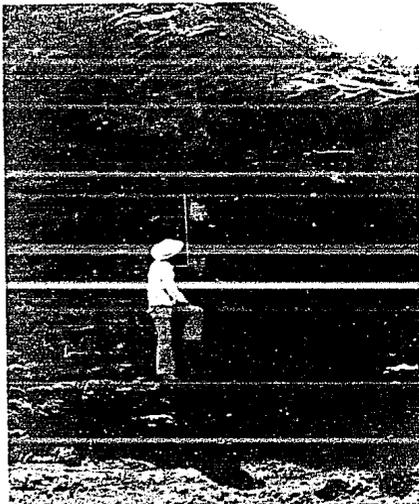
1. VISTA PANORAMICA DE LAS PARTES W , N Y E DEL CONO VOLCANICO XICO.



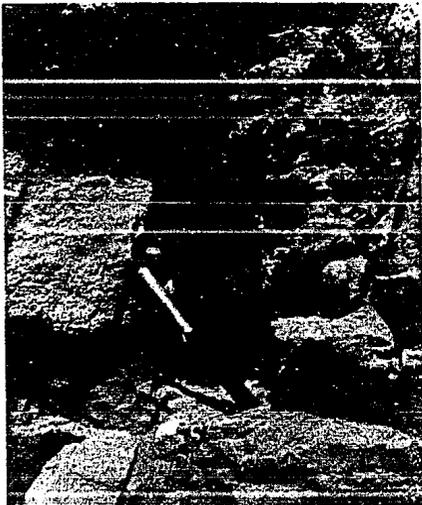
2. VISTA DEL LADO S DEL CONO Y DEL CORTE.



3. VISTA DE LAS PLANTILLAS DE CIMENTACION DE LOS TANQUES, DESDE LA PARTE ALTA W DEL CORTE.



4. ACERCAMIENTO DEL LADO E DEL CORTE, DONDE SE -- OBSERVA LA MEDICION DE -- LOS TESTIGOS, ENTRE DOS SEUDOESTRATOS.



5. FRACTURAS EN LA PLANTILLA DE CIMENTACION, SOBRE LA EXCAVACION QUE SE HIZO, - PARA LA ENTRADA Y SALIDA DE TUBERIAS.



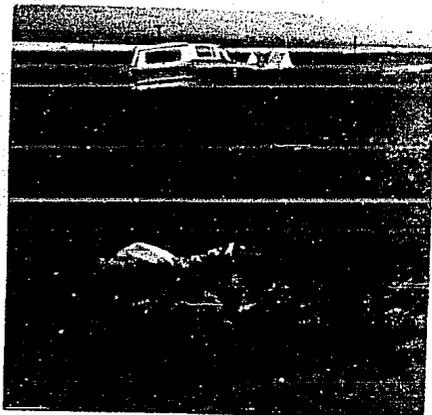
6. FRACTURAS EN LA PARTE SW DEL CONO.



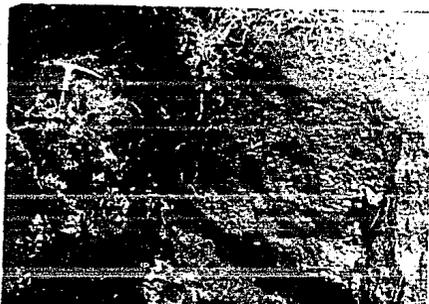
7. ZONA DE DEBILIDAD ENTRE DOS SEUDOESTRATOS, SOBRE EL CAMINO DE ACCESO.



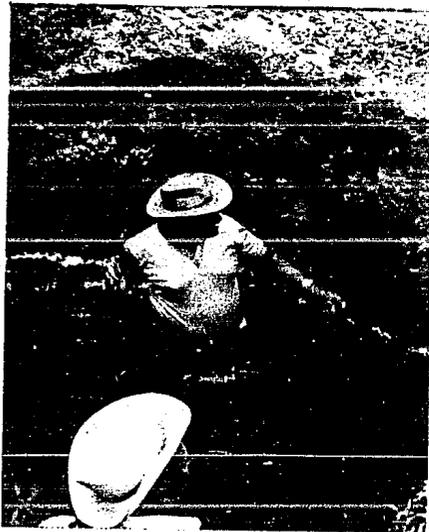
8. FRACTURA AUMENTADA POR EFECTOS DE EROSION MUY CERCANA A LA PARTE NE, CASI AL PIE DEL CONO.



9. GRIETA SOBRE EL TERRENO CERCA DE LA BASE DEL - CONO, POR LA PARTE S.



10. VISTA DEL P.C.A. 1.



11. VISTA DEL P.C.A. 2.



12. MAQUINA LONG-YEAR 38, CON QUE SE EFECTUARON LAS EXPLORACIONES -- DIRECTAS.

B I B L I O G R A F I A

1. ARAUJO MENDIETA A. y FERNANDO LOZADA, ESTUDIO GEOLOGICO SUPERFICIAL A DETALLE Y DE GEOFISICA ELECTRICA DEL PROYECTO "CHALCO-TLAHUAC", MUNICIPIO DE CHALCO, ESTADO DE MEXICO. SARH 1982 - INEDITO.
2. ASTIER. GEOFISICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGIA. EDITORIAL PARANINFO. MADRID ESPAÑA. 1976.
3. CARTA SISMICA DE LA REPUBLICA MEXICANA. UNAM. INSTITUTO DE GEOFISICA. EDICION 1959. ACTUALIZADA.
4. M. GISBERT. CURSO DE PROSPECCION GRAVIMETRICA EDITORIAL REVERTE S.A. BARCELONA ESPAÑA. 1977.
5. HALES F.W. AN ACURATE GRAPHICAL METHOD FOR - - INTERPRETING SEISMIC REFRACTION LINES; GEOPHYSICAL PROSPECTING. VOL. 6. PAG.285-294. 1958.
6. HOJA GEOLOGICA CHALCO. E14331. SECRETARIA DE - PROGRAMACION Y PRESUPUESTO. DGETENAL. 1979.

7. HOJA MEXICO 14 Q-H (5). UNAM. INSTITUTO DE -
GEOLOGIA. 1968.
8. MARIN C. y AGUAYO C. SIMPOSIO CUENCA DE - -
MEXICO. CONVENCION GEOLOGICA. 1986.
9. MARVAL S.A. EXPLORACION GEOFISICA DE LA ZONA
DE XOCHIMILCO-CHALCO-AMECAMECA. ESTUDIO 222
DE LA C.H.C.V.M. INEDITO.
10. MOLINA BERBEYER R. CALCULO DE LOS VALORES DE
T y S PARA ENCONTRAR EL COMPORTAMIENTO HIDRAU
LICO DEL ACUIFERO DE CHALCO. MEXICO. ANALES -
INSTITUTO DE GEOFISICA. VOL. 9 1963.
11. MOLINA BERBEYER R. USO DEL TRITIO NATURAL EN
LA DETERMINACION DEL VOLUMEN MEDIO INFILTRADO
DE LAS AGUAS METEORICAS EN LOS ACUIFEROS DE LA
SUBCUENCA DE CHALCO. MEXICO. ANALES INSTITUTO
DE GEOFISICA. VOL. 9. 1963.
12. MOLINA BERBEYER R. ESTUDIO GEOHIDROLOGICO PARA
DETERMINAR EL CAUDAL DE AGUA SUBTERRANEA DISPO
NIBLE EN LA CULCA DE MEXICO. ANALES INSTITUTO
DE GEOFISICA. VOL. 4. 1958.

13. MOLINA BERBEYER R. GEOQUIMICA DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DE MEXICO. MEMORIA DEL CONGRESO - - CIENTIFICO MEXICANO IV. UNAM. 1963.
14. MOLINA BERBEYER R. ESTUDIO GEOHIDROLOGICO Y - GEOQUIMICO DE LA SECCION CHALCO. SRH (C.H.C.V.M.). 1959.
15. MOONEY WETZEL. THE POTENTIAL ABOUT A POINT - ELECTRODE AND APARENT RESISTIVITY CURVES FOR A TWO, THREE AND FOUR LAYER EART. THE UNIVERSITY OF MINNESOTA PRESS. MINNEAPOLIS. 1956.
16. MOONEY AND WETZEL. CURVAS PATRON PARA INTERPRE TACION DE SEV WENNER THE UNIVERSITY OF - - - MINNESOTA PRESS. USA. 1956.
17. MOOSER F. THE MEXICAN VOLCANIC BELT, STRUCTURE AND TECTONICS, GEOFISICA INTERNACIONAL. 1972.
18. MOOSER F. INFORME SOBRE LA GEOLOGIA DE LA CUEN CA DEL VALLE DE MEXICO SRH (C.H.C.V.M.). 1961.
19. NECEADANK, J. F. G. VOLCANICS OF THE VALLEY OF MEXICO. MINER ABH. 1972.

20. E. ORELLANA. CURVAS PATRON PARA INTERPRETACION DE SEV SCHLUMBERGER. ESPAÑA. 1966.
21. E. ORELLANA. PROSPECCION GEDELECTRICA EN -- CORRIENTE CONTINUA. ESPAÑA. 1966.
22. QUIEDO DE LEON, AMADOR. ESTUDIO GEOLOGICO DEL - SUBSUELO, BASADO EN LOS DATOS OBTENIDOS DE LA - PERFORACION DEL POZO PROFUNDO TEXCCO 1. INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO. 1967.
23. D.S. PARANIS. GEOFISICA MINERA. EDITORIAL PARA-- NINFO. MADRID. 1971.
24. SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS (C.H.C.V.M.). INVESTIGACION GEOFISICA DE LA ZONA DE XOCHIMILCO- CHALCO-AMECAMECA. 1964.
25. SCHLUMBERGER. INTERPRETACION DE PERFILES. VOL. I - FUNDAMENTOS NEW YORK. 1972.
26. SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE ROCAS. SIMPOSIO 1978.
27. STANLEY N. DAVIS. HIDROGEOLOGIA. EDITORIAL ARIEL.

MEXICO 1971.

28. W.M. TELFORD. APPLIED GEOPHYSICS. CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS. USA. 1980.