

27  
7



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“ESTUDIO GEOFISICO EN EL PROYECTO  
HIDROELECTRICO SAN JUAN  
TETELCINGO, GRO.”**

FALLA DE ORIGEN

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO GEOFISICO  
P R E S E N T A N ;  
PABLO BARRIGA LLANOS Y  
GUILLERMO OCTAVIO OROZCO FARARONI



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Dirección  
60-1-132

SRS. PABLO BARRIGA LLANOS Y  
GUILLERMO OCTAVIO OROZCO FARARONI  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Roboam León Sánchez, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de ingeniero geofísico:

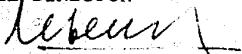
"ESTUDIO GEOFISICO EN EL PROYECTO HIDROELECTRICO  
SAN JUAN TETELCINGO, GRO."

- PROLOGO
- I GENERALIDADES
- II METODO SISMICO
- III METODO GEOELECTRICO
- IV ESTUDIO GEOFISICO
- V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Coordinación de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 15 de agosto de 1988  
EL DIRECTOR

  
DANIEL RESENDIZ NUNEZ

  
DRN:R.P.YS:gtg

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Físico Salvador García Durán Jefe de la Oficina de Geofísica de la Unidad de Estudios de Ingeniería Civil y al Ing. Andrés Hindú Robles Superintendente de Estudios de la Zona Pacífico Sur por las facilidades que nos otorgaron para la utilización de la información geológica y geofísica del Proyecto Hidroeléctrico "SAN JUAN TETELCINGO"; asimismo a los Ings. Marco Antonio García Calvario y Rogelio Pérez Angón por sus útiles aportaciones y sugerencias a la presente tesis. Todos ellos de la Comisión Federal de Electricidad.

También hacemos extensiva nuestra gratitud al Ing. Roboam León Sánchez profesor de la Facultad de Ingeniería, quien amablemente dirigió esta tesis y al M. en I. Beizay Martínez Romero Asesor Técnico de la empresa Exploraciones Coordinadas, S.A. de C.V., quien revisó el manuscrito.

Finalmente a la Srta. Juana Ramírez Mendoza por su paciencia para mecanografiar el escrito.

## CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE PLANOS.....	VII
PROLOGO.....	VIII
I.- GENERALIDADES .....	1
I.1.- Objetivo (General).....	1
I.2.- Ubicación del Area.....	1
I.3.- Acceso.....	1
I.4.- Fisiografía.....	4
I.5.- Hidrografía.....	4
I.6.- Clima.....	7
I.7.- Bosquejo Geológico.....	8
I.8.- Objetivos (Específicos).....	9
II.- METODO SISMICO .....	12
II.1.- Tendidos Sísmicos de Refracción Superficiales.....	12
II.2.- Módulos Elásticos Dinámicos.....	20
II.3.- Tomografía Sísmica .....	23
III.- METODO GEOELECTRICO.....	26
III.1.- Sondeos Eléctricos Verticales.....	29
IV.- ESTUDIO GEOFISICO .....	31
IV.1.- Aplicación del Método Sísmico.....	31
IV.1.1.- Tendidos Sísmicos de Refracción.....	31
IV.1.1.1.- Arabilidad de la Zona.....	37
IV.1.2.- Tomografía Sísmica.....	38
IV.1.3.- Módulos Elásticos Dinámicos.....	41

## CONTENIDO

IV.1.3.1.- Módulos Elásticos Dinámicos en Capavones.....	41
IV.1.3.2.- Módulos Elásticos Dinámicos de Tendidos Super- ficiales.....	49
IV.2.- Aplicación del Método Geoelectrico.....	57
IV.2.1.- Resultados.....	61
IV.2.1.1.- Planos de Isorresistividad Aparente.....	66
V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFIA.....	72

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1.- Clasificación de la roca de acuerdo a las velocidades sísmicas.....	33
2.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el socavón 18.....	43
3.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el socavón 10.....	44
4.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el socavón 17.....	45
5.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el socavón 19.....	46
6.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el socavón 20.....	47
7.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el socavón 21.....	48
8.- Módulos Elásticos Dinámicos sobre el eje de la cortina de la Alternativa 4 del P.H. San Juan Tetelcingo (plano 2).....	53
9.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el eje de la ataguía aguas arriba de la Alternativa 4 del P.H. San Juan Tetelcingo (plano 3).....	54

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
10.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el eje de la ataguía aguas abajo de la Alternativa 4 del P.H. San Juan Tetelcingo (plano 4) .....	54
11.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el eje de la obra de control de excedencias M.I. de la Alternativa 4 del P.H. San Juan Tetelcingo (plano 6).....	55
12.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el eje del canal de desvío M.I. de la Alternativa 4 del P.H. San Juan Tetelcingo (plano 7).....	56
13.- Módulos Elásticos Dinámicos determinados en el eje de la obra de control de excedencias M.D. de la Alternativa 4 del P.H. San Juan Tetelcingo (plano 8).....	56



## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1.- Ubicación del área.....	2
2.- Vías de acceso.....	3
3.- Localización de provincias fisiográficas.....	5
4.- Cuenca del Río Balsas .....	6
5.- Localización de las alternativas en el P.H. San Juan Tetelcingo.....	10
6.- Arreglo de un tendido sísmico de refracción.....	13
7.- Sismograma de un tendido sísmico de refracción obtenido en el P.H. San Juan Tetelcingo.....	14
8.- Dromócronica de 3 capas planas horizontales.....	16
9.- Dromócronica para el caso de un contacto plano inclinado.....	19
10.- Tomografía sísmica .....	24
11.- Dispositivo Schulumberger ( $\overline{AB} \cong 5 \overline{MN}$ ).....	28
12.- Detalle de obras civiles "Alternativa 4".....	32
13.- Arreglo de los tendidos de sísmica de refracción utilizados.....	34

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
14.- Sismogramas de ondas transversales de la sección de ataguía aguas abajo .....	51
15.- Sismogramas sobrepuestos de la sección de ataguía de aguas abajo.....	52
16.- Curva de campo sondeo Schlumberger.....	58
17.- Curva interpretada de sondeo Schlumberger.....	59
18.- Verificación de un S.E.V. por computadora.....	60

## LISTA DE PLANOS

Pla.

- 1.- Geología de la zona del proyecto hidroeléctrico "San Juan Tetelcingo".
- 2.- Sección 1-1' eje cortina Alternativa 4
- 3.- Sección 2-2' ataguía aguas arriba Alternativa 4
- 4.- Sección 4-4' ataguía aguas abajo Alternativa 4
- 5.- Sección 3-3' casa de máquinas Alternativa 4
- 6.- Sección 6-6' obra de control de excedencias M.I. Alternativa 4
- 7.- Sección 5-5' canal de desvío Alternativa 4
- 8.- Sección 7-7' obra de control de excedencias M.D. Alternativa 4
- 9.- Arabilidad de la zona de la Alternativa 4
- 10.- Tomografía sísmica entre socavones Margen Izquierda
- 11.- Tomografía sísmica entre socavones Margen Derecha
- 12.- Isorresistividades aparentes con aberturas electródicas  $\overline{AB}/2: 50\text{ m}$
- 13.- Isorresistividades aparentes con aberturas electródicas  $\overline{AB}/2: 100\text{ m}$
- 14.- Isorresistividades aparentes con aberturas electródicas  $\overline{AB}/2: 200\text{ m}$
- 15.- Isorresistividades aparentes con aberturas electródicas  $\overline{AB}/2: 300\text{ m}$

## PROLOGO

Nuestro país requiere cada vez de mayor número de fuentes de energía para su desarrollo, sobre todo por el rápido incremento que ha experimentado en su población, la cual demanda todo tipo de satisfactores. Ello obliga a la búsqueda y evaluación de los sitios susceptibles de ser aprovechados para la generación de energía eléctrica, en especial la de origen hidráulico, dado que nuestra orografía y clima favorecen la existencia de una gran variedad de corrientes fluviales, ya sea pequeñas de fuerte gradiente o de enorme caudal. Actualmente, estas últimas se consideran prioritarias por su mayor potencial hidroeléctrico individual, como el caso del Río Balsas, al Sur de la República Mexicana, que cuenta con tres plantas generadoras en operación y dos más en proyecto, una de las cuales, denominada San Juan Tetelcingo y que se encuentra aguas arriba de aquéllas, tiene además el propósito de prolongar la vida útil de dichas plantas regulando los volúmenes de agua del río y reduciendo la acumulación de azolve en las otras presas.

Los primeros estudios geológicos del sitio San Juan Tetelcingo, en el Estado de Guerrero, datan de 1959, cuando se evaluó la primera alternativa. Posteriormente, en diversos periodos de actividad se estudiaron con Geología y Geofísica un total de cuatro sitios, dentro de la etapa a nivel de prefactibilidad, seleccionándose la opción técnica y económicamente más viable. Finalmente, se realizó la evaluación de la factibilidad de esta alternativa mediante estudios de tipo geológico, geofísico y geotécnico con un mayor detalle.

En la presente tesis se describen diversos aspectos del estudio geofísico llevado a cabo en el área del Proyecto Hidroeléctrico San Juan Tetelcingo, hasta el año de 1983, donde el empleo de las técnicas de refracción sísmica y sondeo eléctrico permitió detectar y caracterizar información geológica importante del subsuelo (litología, estratigrafía y estructura), así como estimar las

condiciones físicas de rocas y otros materiales (compacidad, alteración y fracturamiento) a costos y tiempos inferiores a los de otros métodos de exploración.

## I.- GENERALIDADES

### I.1.- Objetivo (General)

Al utilizar los métodos geofísicos en la exploración del sitio donde se ubica el proyecto hidroeléctrico "San Juan Tetelcingo", se propone obtener información geológico-estructural del subsuelo y de la calidad de las rocas en una área aproximada de 12 km<sup>2</sup>, donde quedan comprendidos 4 posibles ejes para la construcción de la cortina. Para ésto se utilizaron los métodos de sismica de refracción y eléctrico de resistividad.

### I.2.- Ubicación del Area.

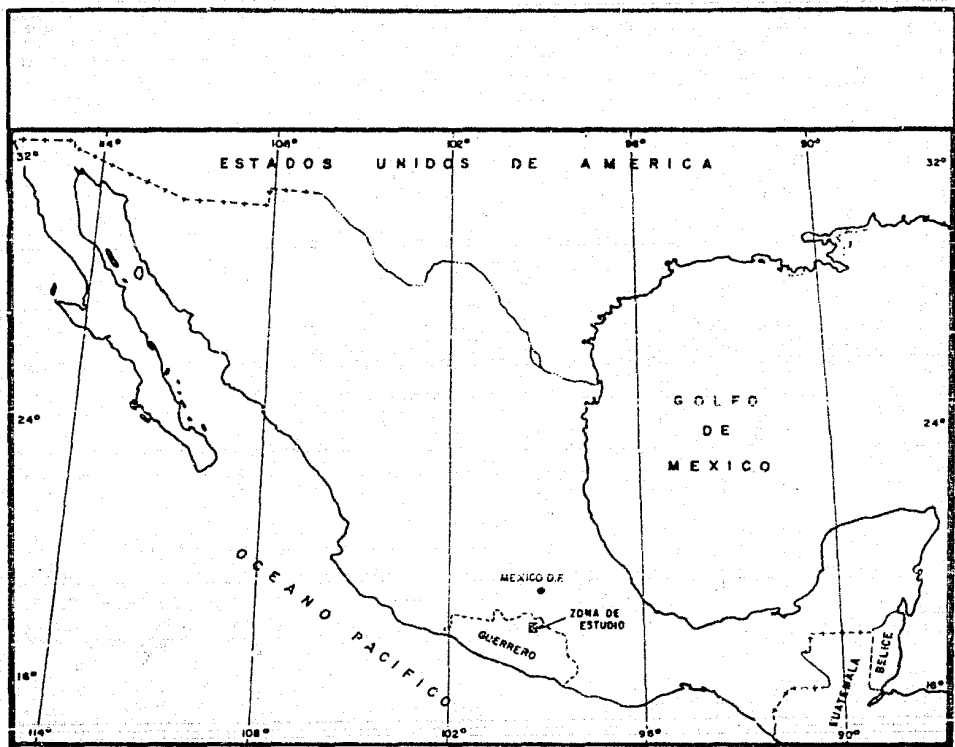
El proyecto Hidroeléctrico "San Juan Tetelcingo" se localiza sobre el Río Balsas, en la porción Norte-central del estado de Guerrero (Fig. 1), a 218 y 48 km al Sur de las ciudades de México e Iguala, respectivamente, y a 4.5 km al oriente del poblado de Mexcala.

Geográficamente se encuentra situado entre los meridianos 99° 32' y 99° 36' de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich y los paralelos 17° 54' y 17° 56' de latitud Norte.

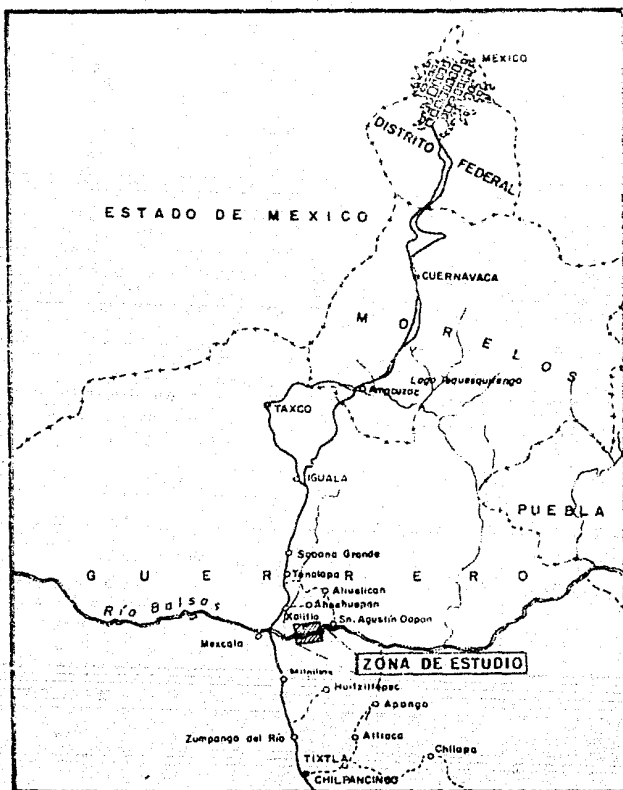
El área de interés tiene aproximadamente 12 km<sup>2</sup> y su altitud está comprendida entre los 515 y 900 m.s.n.m.

### I.3.- Acceso

De la ciudad de México se puede seguir por la Carretera Federal México-Acapulco o la Autopista México-Iguala (Fig. 2), que después se une con la Carretera Federal México-Acapulco. Por esta ruta se llega hasta el kilómetro 218, sitio en el cual se encuentran el



<b>U N A M</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
<b>UBICACION DEL AREA</b>	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
<b>PABLO BARRIGA LLANOS</b> <b>GUILLEMO O. OROZCO PARARONI.</b>	<b>FIG. 1</b>



ESCALA GRAFICA



1:125,000

U N A M  
FACULTAD DE INGENIERIA

VIAS DE ACCESO

TESIS PROFESIONAL

PABLO BARRIGA LLANOS  
GUILLERMO O GROZCO FARARONI

FIG. 2



Puente Mezcala y el Río Balsas. Al Oriente existen 2 brechas, una en cada margen del río y con una longitud aproximada de 6 km, las cuales conducen a las obras exploratorias.

I.4.- Fisiografía

Esta área se ubica en la porción central de la subprovincia denominada Cuenca del Balsas Mezcala (Raisz, 1959), que forma parte de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (Fig. 3).

La Cuenca del Balsas Mezcala es de forma oblonga con su eje mayor de 700 Km de longitud orientado este-oeste; su porción más ancha, que abarca aproximadamente 200 Km, corresponde a la parte donde se localiza el área de estudio.

La subprovincia Cuenca del Balsas Mezcala está limitada al Norte por la Altiplanicie Neovolcánica y al Sur, por la Sierra Madre del Sur. Al centro de estas dos unidades fisiográficas se encuentra el Valle del Río Balsas Mezcala, donde escurre el agua de toda la cuenca. Al Oriente colinda con la Altiplanicie Oaxaqueña y al Occidente, con la Sierra Madre del Sur.

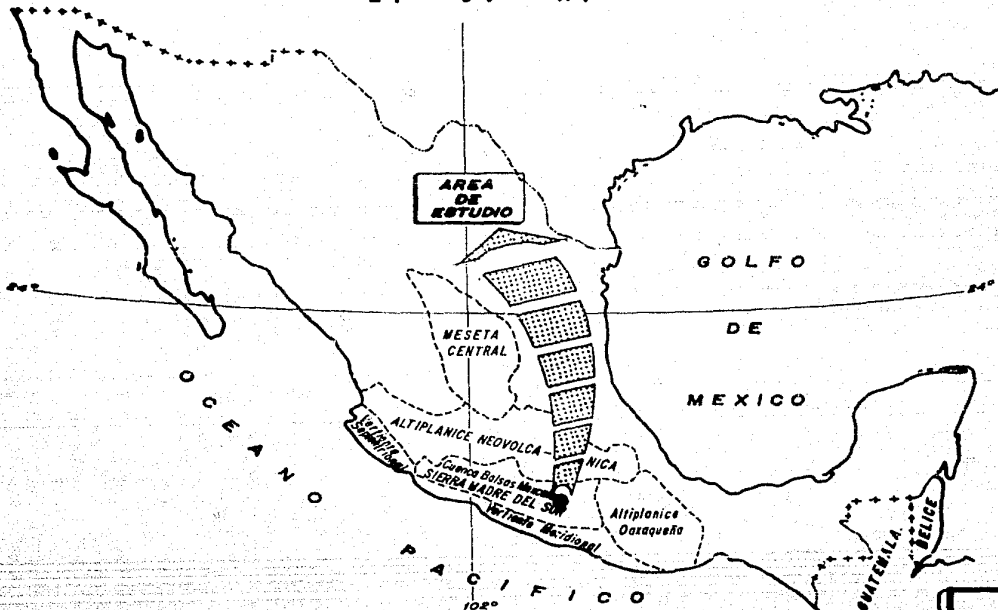
Toda la subprovincia del Balsas Mezcala es una región en donde el relieve ha sido formado en gran parte por la erosión originada por el Río Balsas; también se encuentran afloramientos de rocas que fluctúan desde el Paleozoico hasta el Reciente.

I.5.- Hidrografía.

La cuenca del Río Balsas está situada entre los meridianos 103° 15' y 97° 30' de longitud Oeste y los paralelos 20° y 17° de latitud Norte (Fig. 4).

Tiene una área de drenaje de 108,000 km². Representa el 6% del área total de la República Mexicana.

E. U. A.



<b>U.N.A.M.</b>
FACULTAD DE INGENIERIA
LOCALIZACION DE PROVINCIAS FISIOGRAFICAS
TESIS PROFESIONAL
PABLO BARRIGA LLANOS GUILLERMO O. ORDIZCO FARARONI.
FIG. 3



Sus límites son: El Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre del Sur, abarcando partes de los Estados de Oaxaca, Puebla, México, Morelos, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Tlaxcala y el D.F.

El Río Balsas es uno de los más caudalosos e importantes del país. Se alimenta de varios ríos que nacen en la región montañosa de los Estados de Puebla y Oaxaca, y que al llegar a Guerrero unen sus aguas en un sólo río llamado Mezcala hasta la población del mismo nombre, en el cruce con la carretera México-Acapulco. A partir de este sitio recibe el nombre de Río Balsas; pasa por varios Municipios entre los cuales se encuentran: Apango, Zumpango del Río, Tlacotepec, Apaxtla y otros, y después marca el límite con el Estado de Michoacán, pasando por los municipios de Coyuca de Catalán, Zirándaro, Coahuayutla y La Unión, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

Sus afluentes principales son los Ríos: Acatlán, Atoyac y Nexapa de los estados de Puebla y Oaxaca, Amacuzac o Atenango del Estado de Morelos, Ixtapa y Temascaltepec del estado de México; Tlapaneco, Tepecoacuilco, Cocula, Oxtotitlán, Apizantla, Las Truchas, Ajuchitlán, Cutzamala, San Miguel y Río del Oro del Estado de Guerrero, y Tacámbaro y Tepalcatepec del Estado de Michoacán.

I.6.- Clima

Tomando en cuenta la posición geográfica y las variaciones de altitud que existen en la Cuenca del Río Balsas, se da una gran variedad de climas, desde el húmedo y frío en las cabeceras de los ríos formadores, hasta el seco cálido de la región de Oaxaca; existen regiones con clima caluroso y húmedo cerca de la desembocadura al mar.

El área de embalse del Proyecto Hidroeléctrico "San Juan Tetelcingo" está comprendida entre las Sierras de Zacualpan y de Ocotlán, donde

existe un clima caluroso. La temperatura máxima en la región se presenta generalmente en el mes de Mayo y puede llegar hasta los 46.5° C; la temperatura mínima es de 11° C y se registra en los meses de Diciembre y Enero.

#### I.7.- Bosquejo Geológico

La región se caracteriza por cerros y serranías formados por calizas cretácicas, que son los más prominentes de la zona, en forma de anticlinales de aspectos redondeados, estando los sinclinales constituidos por lutitas y areniscas del Cretácico, localizados en las partes bajas (Chávez et al, 1982). La dirección de los pliegues es NE-SW (Plano 1.). Cubren a estas unidades rocas volcanoclásticas, también del Cretácico, sobre las que descansan depósitos lacustres del terciario. El espesor de las rocas sedimentarias y volcanoclásticas aflorantes en esta zona es aproximadamente de 2,440 m.

El Río Balsas ha mantenido su curso a través de levantamientos locales, por lo que generalmente corta perpendicularmente a las estructuras.

Las rocas más antiguas en esta zona son las de la formación Cuautla que está compuesta por calizas arrecifales del Cretácico Superior, con un espesor de 220 m. Descansando sobre las rocas anteriores se encuentran 1220 m de calizas, lutitas, areniscas y conglomerados polimícticos del Cretácico Superior de la Formación Mexcala. Sobre las rocas sedimentarias del Cretácico descansan en discordancia angular rocas volcanoclásticas del mismo Cretácico, compuestas por 1000 m. de brechas, brechas tobáceas, tobas brechoides y tobas de composición andesítica del Miembro Volcanoclástico Tetelcingo de la Formación Balsas.

Todos los pliegues fueron formados a finales del Cretácico. Las rocas cretácicas fueron afectadas a nivel regional por pliegues y

fallas, las cuales en algunos lugares dieron lugar a fosas tectónicas, donde se acumularon las rocas volcanoclásticas del Cretácico superior.

En el sitio de la Alternativa 4 (Fig. 5 y Plano 1) en su margen derecha afloran areniscas y lutitas interestratificadas, predominando las primeras en estratos gruesos de la Formación Mexcala.

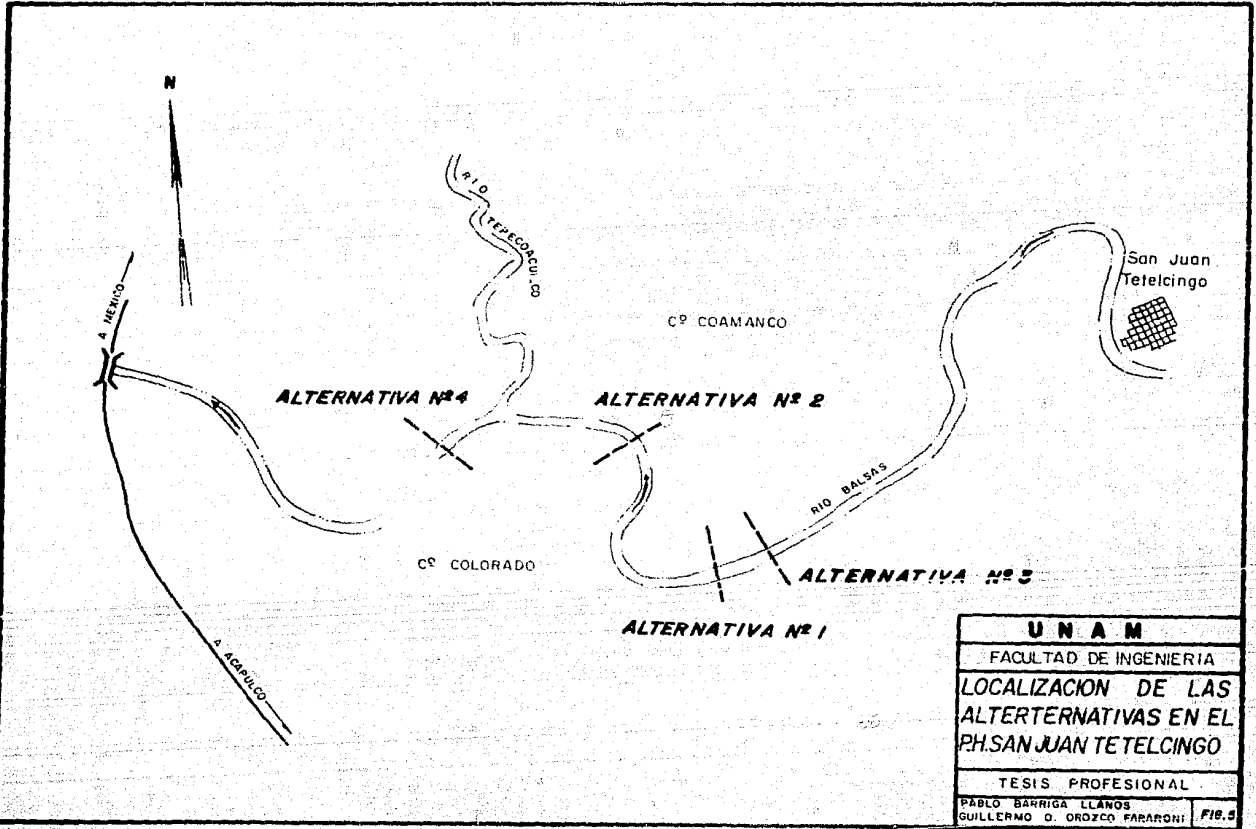
En la margen izquierda afloran además brechas y tobas del Miembro Volcanoclástico Tetelcingo, las que descansan discordantemente sobre las rocas de la Formación Mexcala. Los echados de los estratos de las areniscas y lutitas son hacia el río, partiendo de la margen derecha.

Asimismo, en este sitio se han registrado dos direcciones principales de fracturamiento en las areniscas y lutitas; el primero es sensiblemente perpendicular al cauce del río, y el segundo, más importante, es sensiblemente paralelo al mismo. El relleno más común de las fracturas es la calcita.

En las rocas volcanoclásticas no se observa una orientación preferencial del fracturamiento debido a que no han estado sujetas a esfuerzos compresivos como lo estuvieron las rocas sedimentarias; de esta forma, el fracturamiento que existe es una consecuencia de su origen.

I.8.- Objetivos (Específicos)

Los objetivos fueron planteados de acuerdo a los tipos de roca que predominan en la zona, principalmente el Miembro Superior de la Formación Mexcala, compuesto de areniscas y lutitas, y el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo, compuesto por tobas y brechas; se concretaron a los siguientes:



<b>UNAM</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
<b>LOCALIZACION DE LAS ALTERNATIVAS EN EL PH. SAN JUAN TETELCINGO</b>	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRIGA LLANOS GUILLERMO O. OROZCO FARFANI	
	<b>FIG. 3</b>

- Determinar la calidad de la roca por medio de las velocidades de la onda compresional y la información geológica disponible.
- Delimitar el espesor de material de acarreo en el eje de la cortina.
- Determinar los módulos elásticos dinámicos en la zona de la Alternativa 4.
- Orientar posteriores exploraciones geológicas directas apoyándose en los resultados del estudio geofísico.



## II.- METODO SISMICO

Se utilizó el método sísmico de refracción mediante tendidos superficiales para determinar la calidad de la roca, y tendidos superficiales y dentro de los socavones para calcular los módulos elásticos dinámicos. Además, se efectuó Tomografía sísmica utilizándose el tiempo de los primeros arribos para zonificar el área entre dos socavones.

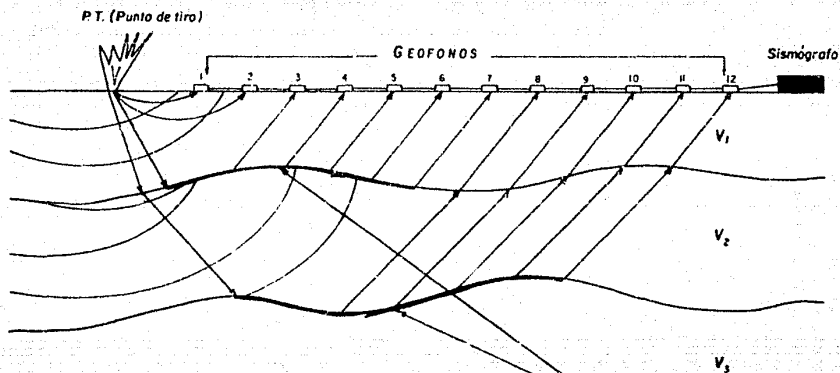
### II.1.-Tendidos Sísmicos de Refracción Superficiales

Para emplear este procedimiento generalmente se trazan brechas en línea recta, se colocan geófonos a una distancia conocida y se conectan mediante un cable al sismógrafo, que es el aparato que tiene como función registrar una señal proveniente de una explosión de cartuchos de dinamita o golpes de marro en cada uno de los extremos de la alineación de geófonos, así como a ciertas distancias de los extremos, e inclusive en puntos intermedios. La Fig. 6 ilustra el arreglo para un tendido sísmico de refracción.

El registro impreso en el sismógrafo es el de la señal amplificada y recibe comúnmente el nombre de sismograma (Fig. 7). De éste se obtienen los tiempos del primer arribo de las ondas longitudinales, ya que los frentes de onda de este tipo son los que primero llegan a cada geófono.

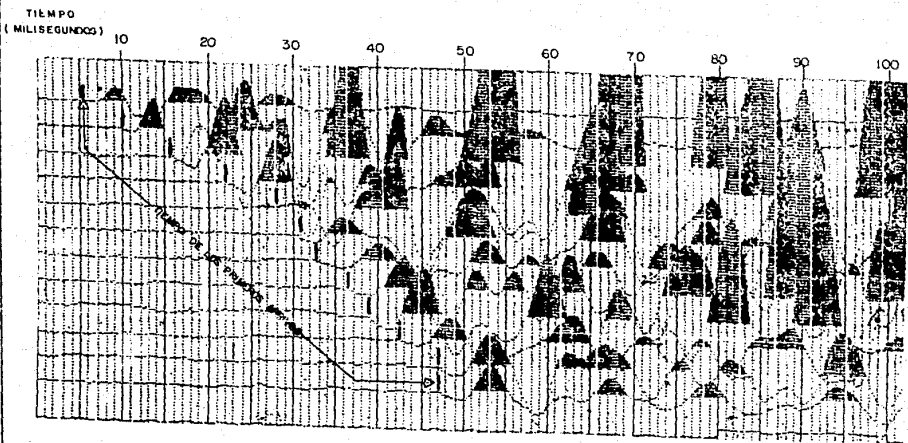
Cada traza mostrada en la Fig. 7 corresponde a un geófono.

Las ondas sísmicas que se propagan en el interior de la tierra son de dos tipos: ondas de cuerpo y ondas superficiales. Al primer grupo pertenecen las ondas longitudinales y las transversales, en tanto que las ondas Love y la ondas Rayleigh son las principales ondas



*Rayos Refractados que viajan en el contacto superior de las capas para efectuar el tiempo mínimo de recorrido.*

<b>U N A M</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
<b>ARREGLO DE UN TENDIDO SISMICO DE REFRACCION</b>	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
PABLO BARRIGA LLANOS	<b>FIG. 6</b>
GUILLERMO G. OROZCO FARFAN	



<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
SISMOGRAMA DE UN TENDIDO SISMICO DE REFRACCION OBTENIDO EN P. H. SAN JUAN TETELCINGO.	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRIGA LLANOS GUILLERMO O. OROZCO FARARON	
FIG 7	

superficiales. Estas últimas tienen poca aplicación en trabajos de exploración debido a que son de baja frecuencia, quedando reducida su utilización en algunos estudios de atenuación.

Con los tiempos de los primeros arribos y las distancias que existen entre los geófonos, se elabora una gráfica tiempo-distancia denominada dromocrónica (Fig. 8).

La confiabilidad en la determinación de velocidades y profundidades es mayor si se tienen dos puntos de tiro, uno en cada extremo del tendido.

Utilizando la ley de Snell y otros principios de la Física se determinan los espesores y velocidades por medio de expresiones matemáticas.

Para el caso de 2 capas con contacto plano horizontal el espesor de la primera capa puede determinarse mediante la distancia crítica ó el tiempo de intercepción (Fig. 8).

Con la distancia crítica se tienen las siguientes fórmulas:

Utilizando el ángulo crítico:

$$Z_1 = \frac{X_{12} (1 - \text{sen } i_{12})}{2 \cos i_{12}} \quad (\text{II}, 1)$$

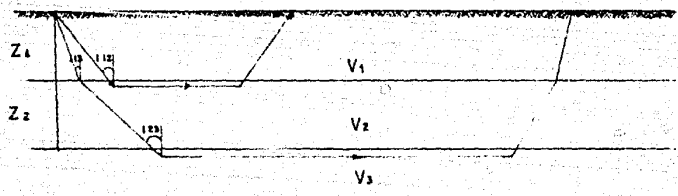
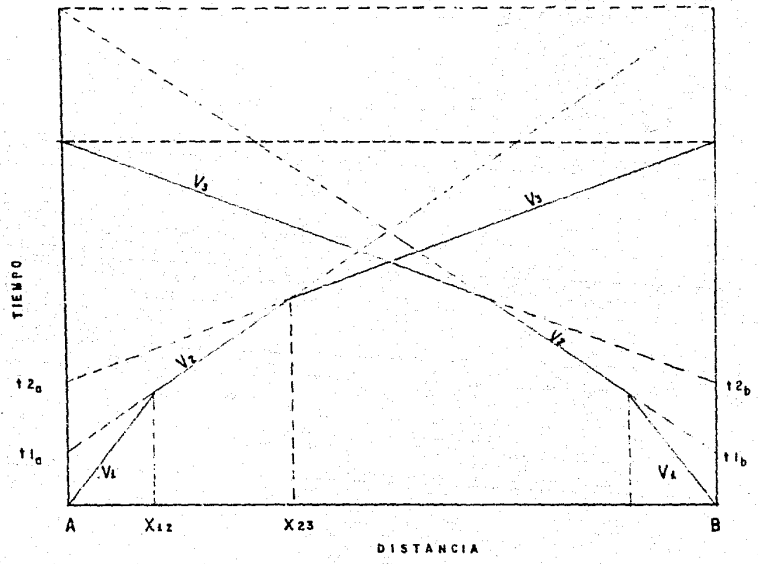
Y utilizando las velocidades reales  $V_1$  y  $V_2$ :

$$Z_1 = \frac{X_{12}}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (\text{II}, 2)$$

Con el tiempo de intercepción se tienen las siguientes fórmulas:

Utilizando el ángulo crítico:

$$Z_1 = \frac{t_{10} V_1}{2 \cos i_{12}} \quad (\text{II}, 3)$$



<b>U N A M</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
<b>DROMOCRONICA DE 3 CAPAS PLANAS HORIZONTALES</b>	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
<b>PABLO BARRIGA LLANOS GUILLELMO D. CROZCO PARARONI</b>	
<b>FIG. 6</b>	

Y utilizando las velocidades reales  $V_1$  y  $V_2$  :

$$Z_1 = \frac{t_{10} V_1 V_2}{2 \sqrt{(V_2^2 - V_1^2)}} \quad (\text{II}, 4)$$

Para el caso de 3 capas con contactos planos horizontales, también es posible determinar el espesor de la segunda capa por medio de las distancias críticas  $X_{12}$  y  $X_{23}$  ó los tiempos de intercepción  $t_{10}$  y  $t_{20}$  (Fig. 8).

Con las distancias críticas se tienen las siguientes fórmulas:

Utilizando las velocidades:

$$Z_2 = \frac{X_{23}}{2} \sqrt{\frac{(V_3 - V_2)}{(V_3 + V_2)}} - \frac{Z_1 (\cos \hat{L}_{13} - \cos \hat{L}_{12})}{\cos \hat{L}_{23} \sin \hat{L}_{12}} \quad (\text{II}, 5)$$

Y utilizando ángulos:

$$Z_2 = \frac{X_{23} (1 - \sin \hat{L}_{23})}{2 \cos \hat{L}_{23}} - \frac{Z_1 (\cos \hat{L}_{13} - \cos \hat{L}_{12})}{\cos \hat{L}_{23} \sin \hat{L}_{12}} \quad (\text{II}, 6)$$

Y con los tiempos de intercepción se tienen las siguientes fórmulas:

$$Z_2 = \frac{t_{20} V_2}{2 \cos \hat{L}_{23}} - \frac{V_2 Z_1 \cos \hat{L}_{13}}{V_1 \cos \hat{L}_{23}} \quad (\text{II}, 7)$$

O bien, cuando se reemplaza  $V_2 / V_1$  por  $t / \sin \hat{L}_{12}$  en el segundo término del lado derecho de la ecuación II.7:

$$Z_2 = \frac{t_{20} V_2}{2 \cos \hat{L}_{12}} - \frac{Z_1 \cos \hat{L}_{13}}{\cos \hat{L}_{23} \sin \hat{L}_{12}} \quad (\text{II}, 8)$$

Para el caso de  $n$  capas planas se tiene:

Con las distancias críticas:

$$Z(n-1) = X(n-1)n \frac{1 - \operatorname{sen} L(n-1)n}{2 \cos L(n-1)n} \sum_{V=1}^{V=n-2} Z_V \frac{\cos L_V n - \cos L_V(n-1)}{\cos L(n-1)n \operatorname{sen} L_V(n-1)} \quad (\text{II}, 9)$$

ó

$$Z(n-1) = \frac{X(n-1)n}{2} \sqrt{\frac{Vn - V(n-1)}{Vn + V(n-1)}} \sum_{V=1}^{V=n-2} Z_V \frac{\cos L_V n - \cos L_V(n-1)}{\cos L(n-1)n \operatorname{sen} L_V(n-1)} \quad (\text{II}, 10)$$

Y con los tiempos de intercepción se tiene:

$$Z(n-1) = \frac{\operatorname{tga} V(n-1)}{2 \cos L(n-1)n} - \frac{V(n-1)}{\cos L(n-1)n} \sum_{V=1}^{V=n-2} \frac{h\nu \cos L_V n}{V_V} \quad (\text{II}, 11)$$

ó

$$Z(n-1) = \frac{\operatorname{tga} Vn V(n-1)}{2 \sqrt{(Vn^2 - V^2(n-1))}} - \frac{Vn V(n-1)}{\sqrt{(Vn^2 - V^2(n-1))}} \sum_{V=1}^{V=n-2} Z_V \sqrt{\left( \frac{1}{V_V^2} - \frac{1}{Vn^2} \right)} \quad (\text{II}, 12)$$

Cuando se tienen capas planas inclinadas las ecuaciones son más complicadas, ya que el ángulo incidente es diferente para cada punto de tiro, y las pendientes de las rectas en la gráfica determinan velocidades aparentes ( $V_{1a}, V_{1b}, \dots, V_{3b}$ ).

Para el caso de 2 capas con contacto plano inclinado (Fig. 9), se determina primero la velocidad  $V_1$  real y el ángulo  $L_{12}$  a partir de las velocidades aparentes  $V_{1a}, V_{1b}, V_{2a}$  y  $V_{2b}$  para lo cual:

$$V_1 = \frac{V_{1a} + V_{1b}}{2} \quad (\text{II}, 13)$$





También se tiene que:

$$i_{12} = \frac{1}{2} \left( \operatorname{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_{2a}} + \operatorname{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_{2b}} \right) \quad (\text{II}, 14)$$

El espesor  $Z_1$  debe calcularse en cada extremo, así:

$$Z_{1a} = \frac{t_{1a} V_1}{2 \cos i_{12}} \quad (\text{II}, 15)$$

Y,

$$Z_{1b} = \frac{t_{1b} V_1}{2 \cos i_{12}} \quad (\text{II}, 16)$$

Para calcular la velocidad  $V_2$  real se utiliza la fórmula:

$$V_2 = 2 \cos \theta \frac{V_{2a} V_{2b}}{V_{2a} + V_{2b}}$$

En donde  $\theta$  es el echado del refractor que se calcula con la fórmula:

$$\theta = \frac{1}{2} \left( \operatorname{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_{2a}} - \operatorname{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_{2b}} \right) \quad (\text{II}, 17)$$

Cuando se tienen 2 contactos planos inclinados la ecuación con que se obtiene el espesor de la segunda capa, adopta una forma más complicada (Mooney, 1977).

## II.2.- Módulos Elásticos Dinámicos

Los módulos elásticos dinámicos permiten determinar algunas propiedades de los materiales que son de utilidad para diseños antisísmicos ante sollicitaciones dinámicas como los temblores y para estimar el asentamiento de una presa.

Los métodos usuales para determinar los módulos elásticos de manera estática se basan en medir las deformaciones inducidas en el terreno por la fuerza que trasmite un gato hidráulico (prueba de placa), y de las pruebas de laboratorio (compresión, esfuerzo cortante, etc.) en especímenes provenientes de sondeos directos.

En el procedimiento del gato hidráulico, aunque las medidas se efectúan "In-Situ" se tiene la desventaja que se invierte mucho tiempo, es caro y se destruye la roca en donde se efectúan las pruebas, por lo que únicamente se pueden aplicar en unos cuantos sitios. Sin embargo, proporcionan información muy valiosa acerca de la resistencia de los materiales, principalmente a compresión.

Las técnicas de laboratorio que se aplican a las muestras se efectúan con un riguroso control de las condiciones esfuerzo-deformación, pero tienen la desventaja de no ser representativas de los grandes volúmenes de materiales. No obstante, constituyen una forma confiable de conocer el comportamiento de los materiales antes de que estos alcancen su estado de falla.

Por otro lado, los módulos elásticos dinámicos, denominados así porque se basan en la propagación de las ondas longitudinales y transversales se obtienen "In-Situ", ya que las velocidades de las ondas longitudinales y transversales se obtienen mediante técnicas sísmicas que pueden aplicarse en el campo y tienen la ventaja de que se efectúan sobre grandes volúmenes de materiales. Por lo tanto se pueden obtener las velocidades promedio en masas de roca homogénea con fracturas y juntas rellenas de diversos materiales, elevando con ésto la importancia de determinar los módulos elásticos dinámicos. También se pueden obtener en núcleos de roca, pero las velocidades y las constantes elásticas resultan más altas debido a que representan una masa más homogénea.

Sin embargo, la reducción, el análisis y la interpretación de estos datos pueden introducir errores subjetivos, por lo cual se requiere

de personas con experiencia y sólidos conocimientos para alcanzar buenos resultados.

Los módulos elásticos dinámicos son los siguientes:

Relación de Poisson: 
$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

Módulo de Young: 
$$E = 2f V_s^2 (1 + \sigma)$$

Módulo de Rigidez: 
$$G = f V_s^2$$

Módulo de Compresibilidad: 
$$K = f V_p^2 - \frac{4}{3} f V_s^2$$

donde:

$f$  = Densidad del material

$V_s$  = Velocidad de propagación de las ondas transversales.

$V_p$  = Velocidad de propagación de las ondas longitudinales.

La densidad  $f$  se determina en el laboratorio, en tablas o bien mediante registros de pozo "Gamma-Gamma".

Las ondas transversales son de dos tipos: ondas transversales horizontales SH que tienen solamente una componente horizontal de movimiento, y las ondas SV que surgen de la energía polarizada que se acopla con la dirección de la propagación de la onda.

Un método para producir ondas SH consiste en fijar en el terreno una tabla de madera de 1.5 m. de largo, 30 cm. de ancho y 5-10 cm. de espesor. Además, se utilizan geófonos de componente horizontal y se golpea en ambos extremos de la tabla para producir la polarización de las ondas.

Por este procedimiento se pueden producir ondas SH hasta una distancia aproximada de 100 m.

Para producir ondas transversales SV se utilizan explosivos o impactos de martillo, y en este caso parte de la energía se irradia como onda elástica transversal. Si no hubiera interferencia de los primeros arribos de las ondas directas y de las ondas refractadas compresionales, se podría observar la onda transversal vertical. Sin embargo, para reconocer este tipo de ondas frecuentemente se recurre a la amplitud que es normalmente más grande que las ondas compresionales, y al cambio de fase.

### II.3.- Tomografía Sísmica

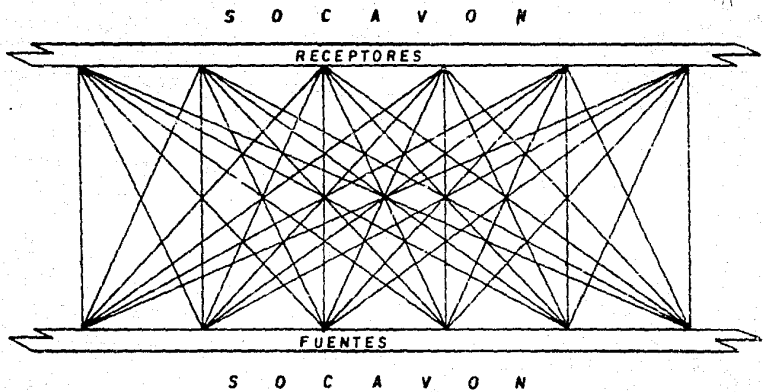
La diferencia principal entre la tomografía sísmica y los levantamientos superficiales es que la tomografía utiliza gran cantidad de posiciones de fuentes y receptores dentro de pozos y socavones para proporcionar mayor detalle y exactitud en las anomalías (Fig. 10).

Como existen varias fuentes y receptores, se generan muchos datos por lo que, para procesarlos se adaptó la tecnología desarrollada en las ciencias médicas.

Para procesar los datos que se obtuvieron en los socavones de la alternativa 4, en este estudio se utilizó el procedimiento descrito en el programa "Vel-Int" (Vázquez, 1982).

En este programa se utilizan los primeros arribos para detectar zonas de alta o baja velocidad y correlacionarlas con la calidad de la roca.

En este proceso se divide la zona en celdas rectangulares; se asigna una velocidad que puede inferirse de medidas superficiales a cada celda, y se determinan los tiempos teóricos de viaje. Después se



U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TOMOGRAFIA SISMICA	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRERA LLANOS	GUILLEMO GONZALEZ FRANCO
FIG. 10	

comparan estos últimos con los tiempos reales y se calcula el error existente, que mediante un método iterativo se reduce progresivamente hasta un cierto límite.

### III.- METODO GEOELECTRICO

Los métodos eléctricos estudian, por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad de alguna de las tres magnitudes electromagnéticas siguientes: La permeabilidad magnética,  $\mu$  ; la constante dieléctrica o permitividad  $\epsilon$  y la resistividad  $\rho$ , de las cuales la resistividad es la única magnitud cuya distribución se estudia en el subsuelo.

Existen varias modalidades en los métodos de exploración eléctrica del subsuelo, cada una de las cuales tiene su propio campo de aplicación, sus ventajas y sus defectos. En la mayoría de los casos, lo que se obtiene es la distribución de las resistividades en el subsuelo, y la forma de aplicarse de la mayoría es por medio de observaciones en la superficie del terreno, aunque algunos pueden efectuarse desde vehículos aéreos, o en la superficie del mar o de lagos, o en el interior de las minas.

A continuación se presenta un bosquejo de clasificación (Orellana, 1982), atendiendo a la fuente de excitación de los más importantes y difundidos métodos geoelectrónicos:

#### METODOS GEOELECTRICOS

##### (METODOS DE FUENTE NATURAL)

- Método del potencial espontáneo
- Método de corrientes telúricas
- Método magneto-telúrico
- Método AFMAG

## MÉTODOS DE FUENTE ARTIFICIAL

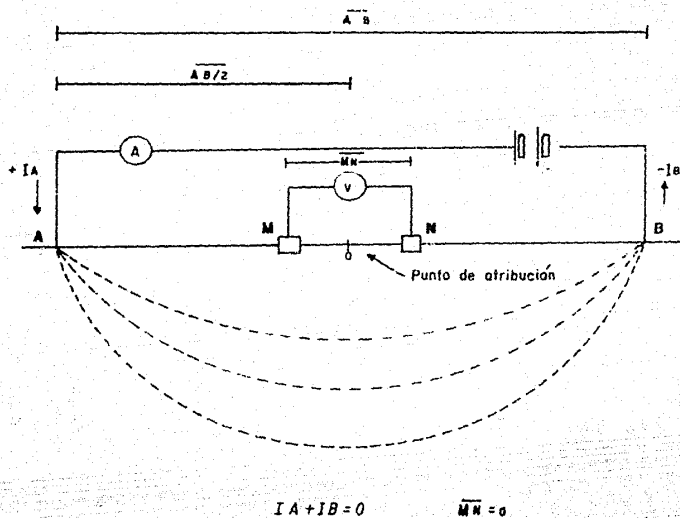
- a) Métodos de campo constante (corriente continua)
- Método de las líneas equipotenciales y del cuerpo cargado (mise-a-la-masse)
  - Sondeos eléctricos (simétricos, dipolares, etc.)
  - Calicatas eléctricas (muchas modalidades)
  - Medición magnética de resistividades
- b) Métodos de campo variable
- Sondeos de frecuencia
  - Sondeos por establecimiento de campo (transitorios)
  - Calicatas electromagnéticas (métodos de inclinación de campo, Turam, Slingram, etc.)
  - Método "Radio-Kip".
  - Método de radiografías hertzianas.
- c) Método de polarización inducida.

En este estudio se utiliza únicamente el sondeo eléctrico que se clasifica dentro de los métodos de fuente artificial, el cual se considera que es el de mayor utilidad en este tipo de estudios.

El sondeo eléctrico consiste en una serie de determinaciones de resistividad aparente, realizadas con un mismo dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión (A y B) y recepción (M y N) Fig. 11. Si el dispositivo es simétrico o asimétrico con un electrodo en el "infinito", y durante la medición permanecen fijos el azimut del dispositivo y el centro de un segmento denominado MN (Fig. 11), entonces se le denomina Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), de los cuales se conocen las modalidades Wenner y Schlumberger.

El dispositivo más aceptado y el que se utilizó en este estudio fue el tipo Schlumberger, ya que permite obtener mejor calidad en las





<b>U N A M</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
SONDEO ELECTRICO	
DISPOSITIVO SCHLUMBERGER ( $AB \geq 5MN$ )	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
PABLO BARRIGA LLANOS GUILLERMO O. OROZCO PARARONI	FIG. II

curvas de campo. En efecto, como, permanecen fijos los electrodos de potencial, el efecto de la zona superficial es constante en toda la curva hasta el próximo empalme; las operaciones de campo son más sencillas y además presenta ventajas económicas.

### III.1.- Sondeos Eléctricos Verticales

Para efectuar este dispositivo en el campo es necesario contar con un transmisor de corriente que permita inyectar una corriente continua al subsuelo y medirla con gran exactitud, así como un receptor que permite detectar las diferencias de potencial que se generan al circular la corriente, y cuatro electrodos (Fig. 11).

Conociendo la corriente  $I$  y la diferencia de potencial  $\Delta v$  se procede al cálculo de la resistividad aparente  $\rho_a$  mediante la fórmula:

$$\rho_a = \pi L^2 \frac{\Delta v}{I} \quad (III, 1)$$

Al coeficiente  $(\pi L^2 / \rho_a)$  se le puede denominar  $k$ , ya que depende únicamente de la geometría del dispositivo electródico y tiene dimensiones de longitud. Así, la ecuación (III.1) queda:

$$\rho_a = k \frac{\Delta v}{I} \quad (III, 2)$$

La expresión anterior de la resistividad aparente  $\rho_a$  se deduce a partir de las leyes físicas que gobiernan al flujo de las corrientes eléctricas en un medio tridimensional (Orellana, 1982). Esta resistividad aparente se obtiene aplicando la fórmula para un medio homogéneo a los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo.

La resistividad aparente obtenida de la ecuación (III.2) se grafica con la distancia semielectródica  $AB/2$  en papel logarítmico. Esta

distancia se aumenta progresivamente hasta la abertura deseada, la cual es función de la profundidad a la que se pretende investigar. La curva resultante indica la variación de la resistividad aparente bajo el punto de atribución o centro del dispositivo.

Para obtener la distribución de resistividades reales en el subsuelo y los espesores correspondientes es necesario interpretar cuantitativamente la curva de resistividad aparente.

La interpretación se puede realizar con diferentes métodos, siendo el más usual el de superposición de curvas patrón complementado con la técnica del punto auxiliar (Orellana y Mooney, 1966). Con este procedimiento se relacionan las curvas patrón con las curvas de campo.

El ajuste o verificación de los resultados obtenidos con curvas patrón, puede efectuarse con algunos algoritmos que resuelven el problema directo en resistividad, es decir, dado el corte geoelectrico, se obtiene la curva tipo para éste, y así es posible compararla con la curva de campo.

En este estudio, se considera que una interpretación es correcta cuando se logra un ajuste gráfico mayor del 95%. Los algoritmos más conocidos son los propuestos por Argelo (1967) y Johansen (1977); este último se utilizó en este estudio.

Estos métodos permiten una interpretación de la curva de resistividad, pero no resuelven el problema de la equivalencia, el cual consiste en que a cortes geoelectricos distintos corresponden curvas de SEV casi iguales.

#### IV.- ESTUDIO GEOFISICO

El estudio geofísico consistió en la aplicación de los métodos de sísmica de refracción y geoelectrónico de resistividad.

El procedimiento general consiste en trazar líneas paralelas y perpendiculares al río, tomando en cuenta la geología del área. Sobre estas líneas se efectúan los tendidos de sísmica de refracción y los SEV considerando la altura de la presa proyectada y en particular el intervalo de profundidad de interés para la construcción de la presa.

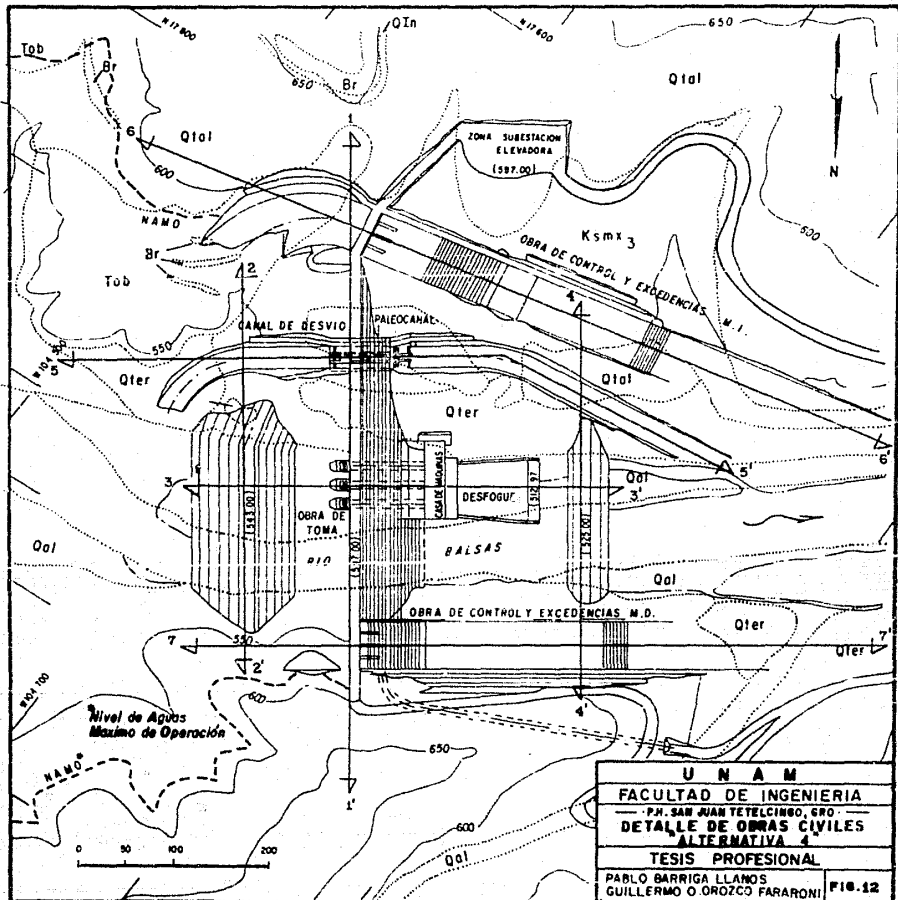
##### IV.1.- Aplicación del Método Sísmico

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante tendidos sísmicos de refracción, tomografía sísmica y tendidos cortos dentro de los socavones. Se utilizaron los tendidos cortos dentro de los socavones y algunos tendidos superficiales para obtener las velocidades de las ondas "P", "S" y que junto con el dato de la densidad de la roca sirvieron para calcular los módulos elásticos dinámicos.

##### IV.1.1.- Tendidos Sísmicos de Refracción

Se efectuó sísmica de refracción en secciones trazadas sobre los ejes de las obras civiles para una presa de gravedad en el sitio de la alternativa Núm. 4 a la elevación 597.00 m.s.n.m. (Fig. 12).

Sólo las secciones del eje de la cortina y de la obra de control y excedencias de la margen izquierda alcanzan a tocar al Miembro Volcanoclástico Tetelcingo; el resto se encuentra totalmente sobre el Miembro Superior de la Formación Mexcala compuesto por areniscas.



— SIMBOLOGIA —

LINEA DE SECCION CON RESULTADOS DE SISMICA DE REFRACCION

<b>UNAM</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
P.R. SAN JUAN TELCELINGO, C.F.O.	
<b>DETALLE DE OBRAS CIVILES</b>	
<b>ALTERNATIVA 1</b>	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
PABLO BARRIGA LLAMOS	<b>FIG. 12</b>
GUILLERMO O. OROZCO FARARONI	

Se realizaron tendidos con 12 geófonos y 4 puntos de tiro cada uno.

Se utilizaron dos tipos de arreglos para formar los tendidos con 160 y 120 m. de longitud: la distancia entre geófonos fue variable (Fig. 13).

Los tendidos de 160 m se utilizaron para levantar las secciones de la casa de máquinas y el canal de desvío: se realizaron en total 8 tendidos y el de 210 m para el resto de las secciones con un total de 17 tendidos.

De los resultados obtenidos se clasificó la roca de acuerdo a sus velocidades de propagación de onda P, para lo cual se utilizó la siguiente tabla 1:

TABLA 1.- CLASIFICACION DE LA ROCA DE ACUERDO A LAS VELOCIDADES SISMICAS.

CLASIFICACION DE LA ROCA	VELOCIDADES (m/s)
Suelo y/o roca sumamente alterada.	300-1000
Roca de mala calidad fracturada y/o intemperizada.	1000-2500
Roca de regular calidad poco fracturada o intemperizada.	2500-3200
Roca de buena calidad compacta no intemperizada.	> 3200

Las secciones sísmicas resultantes de cada uno de los ejes de las obras civiles fueron las siguientes:



- Cortina (Plano 2) En el extremo de la margen izquierda se tiene una zona donde se encuentra el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo constituido por tobas y brechas, donde el espesor de suelo va de 1 a 5 m y una velocidad de 300 m/s; una segunda capa con velocidad de 1300 m/s, que con ayuda del método de resistividad, se determinó que alcanza un espesor hasta de 35 m, y se consideró como roca de mala calidad. El contacto con la Formación Mexcala (arenisca) se encuentra a una profundidad mayor, y se detectó por el método geoléctrico de resistividad.

El Miembro Superior de la Formación Mexcala predomina en el resto de la sección, tiene un espesor de suelo y/o roca sumamente alterada de 1 a 2 m y una velocidad de 300 m/s; subyaciendo a esta capa se encuentran velocidades de 1600 a 2300 m/s que corresponden a una roca de mala calidad y que alcanza un espesor máximo de 15 m.

Con ayuda de la tomografía se detectaron dos zonas inmediatamente abajo de los socavones 20 y 21 con velocidad de 3000 m/s que corresponden a roca de regular calidad.

La última capa es la roca de buena calidad, donde se encontraron velocidades de 3700 a 4500 m/s.

Además se pasó sobre un paleocanal entre el cruce de las secciones 4 y 5. Ahí el material tiene una velocidad de 1500 m/s, y en el cauce del río el espesor mayor de material de acarreo es de 14 m con una velocidad máxima de 2,400 m/s.

- Atagüía Aguas Arriba (Plano No. 3). Esta sección se encuentra totalmente sobre la Formación Mexcala. La capa que corresponde al suelo o roca sumamente alterada tiene velocidades de 500 a 900 m/s, y un espesor de 1 a 5 m. La roca de mala calidad tiene velocidades de 1800 a 2000 m/s y un espesor promedio de 10 m. La roca de buena calidad se encontró con velocidades de 3,700 a 4,300 m/s.



En el cauce la velocidad del material de acarreo es de 2,400 m/s, y su espesor máximo es de 12 m.

- Atagüía Aguas Abajo (Plano 4). En ambos márgenes existen capas de roca que tienden a acuñarse hacia el cauce del río. En la margen izquierda el espesor de suelo o roca muy alterada tiene velocidades de 300 m/s y su espesor varía de 1 a 8 m; la roca de mala calidad tiene velocidades de 1,500 a 1,700 m/s con un espesor promedio de 8 m; subyaciendo a este tipo de roca se encuentra una capa con velocidad de 3,200 m/s, clasificada como de regular calidad, con un espesor en la mayor parte inferido de 5 a 25 m, y finalmente la roca de buena calidad se encontró con una velocidad de 4,500 m/s.

En la margen derecha el espesor de suelo o roca sumamente alterada es de 1 m, debido probablemente a que la pendiente es más abrupta. La roca de mala calidad tiene velocidad de 2,200 m/s con un espesor de 8 m y se acuña antes de llegar al cauce del río; subyaciendo a este tipo de roca se encuentra roca de buena calidad con una velocidad de 4,500 m/s.

- Casa de Máquinas (Plano 5). Esta sección se levantó sobre el playón que se encuentra en la margen izquierda. Se encontró un espesor promedio de 13 m de material de acarreo, con velocidades de 1,800 a 2,200 m/s. Continúa roca de buena calidad con velocidad de 4,500 m/s.
- Obra de Control de Excedencias, Margen Izquierda (Plano 6). En esta sección el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo tiene un espesor de suelo o roca sumamente alterada de 1 a 5 m y velocidad de 400 m/s; le subyace roca de mala calidad con espesor de 8 m y velocidad de 1,300 m/s. Finalmente se encontró una velocidad de 2,300 m/s.

En el Miembro Superior de la Formación Mexcala, compuesto por areniscas, el espesor de suelo o roca sumamente alterada es de 2

m, y su velocidad de 400 a 800 m/s; hacia el centro de la sección se detectó roca de regular calidad con espesor medio de 25 m. La roca de buena calidad subyace a la anterior, con velocidades de 3,800 a 4,500 m/s.

- Canal de Desvío (Plano 7). El espesor de suelo o roca muy alterada es de 2 m y su velocidad es de 300 a 500 m/s, la roca fracturada es de mala calidad, y su velocidad es de 1,300 a 2,500 m/s, con un espesor promedio de 15 m. La roca de regular calidad tiene velocidades de 3,100 a 3,200 m/s y un espesor promedio de 15 m. Finalmente, la roca de buena calidad tiene velocidades de 3,700 a 4,500 m/s.

Aproximadamente en la parte central se encuentra el paleocanal cuyo relleno tiene una velocidad de 1,500 m/s y está constituido por material de acarreo.

- Obra de Control de Excedencias, Margen Derecha (Plano 8). Esta sección se levantó en la margen derecha, donde se encontró el espesor de suelo o roca sumamente alterada de 1 a 8 m, con una velocidad de 600 m/s. El espesor de roca fracturada de mala calidad varía de 3 a 25 m y sus velocidades de 1,250 a 1,471 m/s. Con ayuda de la tomografía se infirió una zona de regular calidad con velocidad de 3000 m/s en el cruce con la sección 1-1'; finalmente, la roca de buena calidad tiene velocidades de 3,800 a 4,300 m/s.

#### IV.1.1.1.- Arabilidad de la Zona

Es conveniente utilizar el método de sísmica de refracción junto con perforaciones y observaciones directas para tener la certeza de que el material por excavar se puede desgarrar, ya que con las velocidades de las ondas sísmicas se puede deducir el grado de consolidación de la roca.

Para el caso de que algún material requiera removerse dentro de la zona de construcción, se propone el plano de arabilidad (Plano 9) que se configuró con toda la información de sísmica de refracción disponible en la Alternativa Núm. 4 (Plano 1).

Se consideró como límite de roca que podría desgarrarse la que tiene hasta 2,500 m/s de velocidad de las ondas longitudinales; hasta 3,200 m/s se consideró de tipo marginal y mayor de 3,200 m/s no desgarrable de acuerdo a la tabla de "Caterpillar Tractor Co".

En el plano de arabilidad se dibujaron las curvas de igual profundidad hasta donde se podría arar. Existen dos zonas de tipo marginal; una hacia el centro y en la orilla de la margen izquierda, en donde se encontraron velocidades de 2,500 a 3,200 m/s y otra en la margen derecha sobre el eje de la cortina con velocidades cercanas a los 3000 m/s.

#### IV.1.2.- Tomografía Sísmica (Planos 10 y 11)

En los socavones excavados sobre el eje de la cortina (Plano No. 2) se efectuó una serie de tiros de dinamita. En el socavón 17 de la margen izquierda se detonaron cartuchos de dinamita cada 20 m a partir del fondo, para recibir la energía sísmica en el socavón 10 inmediato superior; después se detonaron en el socavón 10 (inferior) para recibir en el socavón 18 (Superior). En la margen derecha se detonó en el socavón 19 (inferior), para recibir en el 20 (superior), y se detonó en el 20 (inferior) para recibir en el 21 (superior).

Se utilizó el programa "Vel Int" (Vázquez, 1982) para calcular las velocidades internas entre los socavones de acuerdo a los primeros arribos detectados.

Para este procedimiento se divide el espacio entre socavones por medio de una rejilla rectangular o romboidal, asignándole a cada

división una velocidad inicial con la cual el algoritmo itera, obteniéndose cada vez una disminución del error; por lo tanto, los cambios de velocidad son menores en cada iteración.

La rejilla debe cumplir los siguientes requerimientos:

- 1) Ser ortogonal o romboidal y equiespaciada en las dos direcciones.
- 2) Que todas las celdas sean cruzadas por trayectorias (Preferentemente más de una).
- 3) Que todas las fuentes y detectores queden dentro de los límites de la malla.
- 4) Que el número de tiempos-dato de fuente a geófono sea mayor o igual al número de celdas propuesto; si no es así hay que disminuir el número de celdas.

Además, el programa tiene la ventaja de conservar constante la velocidad en las celdas que se especifiquen durante todas las iteraciones, repartiendo el error entre las demás celdas.

Basándose en lo anterior se proporcionaron condiciones en la frontera, es decir, valores de velocidad que no cambiaran durante las interacciones, por medio de velocidades obtenidas de tendidos cortos dentro de los socavones. Estos valores se disminuyeron de acuerdo a los datos superficiales y se asignaron a los elementos de la rejilla que quedaron junto a los socavones. Para el resto se les asignó una velocidad de 3,500 m/s para empezar a iterar.

### Resultados

En la margen izquierda en la zona entre los socavones 8 y 10, se puede observar (Plano 10) en el ángulo superior izquierdo una zona marcada con velocidades de 2,300 a 3,145 m/s, que de acuerdo al

modelo geológico pertenece a tobas y brechas del Miembro Volcanoclástico Tetelcingo. (Todo el resto del estudio de Tomografía Sísmica se refiere a roca arenisca del Miembro Superior de la Formación Mexcala). Hacia la derecha se detectó una zona que abarca cinco rejillas con velocidades de 2,933 a 3,197 m/s, y que junto al área irregular con velocidades de 2,628 a 3,188 m/s que se extiende por el resto de este contorno estudiado se considera roca de regular calidad; además, existe una pequeña zona con velocidades de 2,265 a 2,378 m/s que se considera de mala calidad y que posiblemente se encuentre fracturada. El resto se considera roca de buena calidad.

El error encontrado para este modelo fue de 11.7% habiéndose realizado 12 iteraciones, es decir, al seguir iterando la disminución del error se hacía cada vez más lenta.

La zona inferior entre los socavones 10 y 17 (Plano 10), sólo presenta dos pequeñas zonas anómalas en su centro, las cuales se consideran de regular calidad, ya que tienen velocidades de 2,636 a 2,869 m/s. En este caso el error encontrado fue de 37.9%, que es bastante elevado e implica que los resultados obtenidos no son confiables para esta zona.

En la margen derecha la zona entre el socavón 21 y 20 (Plano 11), presenta sólo una parte considerada de regular calidad, la cual se localiza en el ángulo superior izquierdo; ahí se tienen velocidades de 3,085 y 3,111 m/s, por lo que esta zona se presenta bastante homogénea. El error encontrado fue de 13.7%.

Por último, la zona comprendida entre los socavones 20 y 19 se presenta con sólo dos zonas clasificadas de regular calidad: una en la parte izquierda hacia la salida de los socavones, con velocidades de 2,796 m/s a 3,050 m/s, la cual se puede cotejar con el índice de calidad de roca (RQD) obtenido de las muestras del barreno 84. Otra zona de regular calidad se encuentra en la parte derecha, hacia el fondo de los socavones, con velocidades de 3,002 a 3,192 m/s. El error detectado en esta última zona fue de 17%.

#### IV.1.3.- Módulos Elásticos Dinámicos

Se realizaron tendidos de sísmica de refracción con geófonos de componente vertical y horizontal instalados por parejas con objeto de registrar la llegada de las ondas longitudinales y transversales, respectivamente. Los tendidos se realizaron en los socavones y en la superficie; en ambos casos se utilizaron golpes de marro como fuente de energía.

##### IV.1.3.1.- Módulos Elásticos Dinámicos en Socavones

En los socavones 10, 17, 18, 19, 20 y 21 que se excavaron sobre el eje de la cortina de la alternativa 4 (Plano 2), se efectuaron tendidos sísmicos de refracción a distancias cortas. La longitud normal de los tendidos fue de 40 m con traslapes cada 20 m. Se trató de investigar hasta 10 m de profundidad. Se exploraron 1,211 m en forma horizontal.

Los tendidos se efectuaron sobre la pared izquierda de todos los socavones; esto se hizo para evitar la influencia de la rezaga presente en el piso, que aumentaría artificialmente el espesor de la zona de alteración provocada por la excavación.

Se empleó un sismógrafo de dos canales con pantalla, y como fuente de energía golpes de marro.

El método de reconocimiento de las ondas transversales se hizo principalmente por los cambios de amplitud y de fase. No se obtuvieron registros impresos debido a que los datos se obtuvieron directamente de la pantalla del equipo.

Para cada socavón se obtuvo el valor medio de las velocidades longitudinales y transversales, así como los valores de los módulos elásticos dinámicos  $\sigma$ , E, G y K. No se tomaron en cuenta los valores de la roca superficial alterada.

En algunos casos se obtuvieron valores muy pequeños para la relación de Poisson como los señalados en los socavones 18 y 17, lo cual probablemente implica que se utilizó un valor de la velocidad de las ondas transversales mayor que el valor real razón por la cual no se tomaron en cuenta al calcular el valor medio.

El valor de la densidad para el Miembro Superior de la Formación Mexcala es de 2.22 gr/cm<sup>3</sup> y para el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo de 2.38 gr/cm<sup>3</sup>; ambos se obtuvieron en el laboratorio petrográfico.

Las siguientes tablas consignan los valores de los módulos elásticos dinámicos para cada socavón.

Con estas tablas se tiene la variación en los valores de los módulos elásticos dinámicos a diferentes profundidades, así como su valor medio en el eje de la cortina.

TABLA 2.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL SOCAVON 18.

CADENAMIENTO (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
8-16	4615	2352	0.32	325.3	122.8	309.08
32-16	3809	2666	0.02**	321.8	157.8	111.7
32-40	3809	1791	0.36	195.4	71.2	227.1
40-80	4000	2654	0.11**	346.1	156.4	146.7
60-66	4070	2356	0.25	307.6	123.2	203.4
86-100	3448	2356	0.06**	261.8	123.2	99.62
102-140	4470	2119	0.36	270.2	99.7	310.7
120-142	3478	1875	0.30	202.2	78.0	164.5
* 160-200	2711	1428	0.31	127.0	48.5	110.2
VALOR MEDIO	4088	2099	0.32	259.7	100.0	243.0

\* Intervalo en donde se encuentra el miembro volcánoclastico Tetelcingo.

\*\* Valores poco confiables debido probablemente a que se utilizó un valor mayor al real de la velocidad de las ondas tranversales.



TABLA 3.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL SOCAVON 10

CADENAMIENTO (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
45-53	3448	1666	0.35	166.1	61.6	181.8
53-85	5500	2758	0.34	452.5	166.9	471.0
85-117	4357	2382	0.29	324.2	126.0	253.5
105-145	3862	2154	0.27	262.5	103.0	193.8
145-157	4482	2272	0.33	304.2	114.6	293.2
157-185	4482	2774	0.19	406.4	170.8	218.2
185-205	4020	2058	0.32	248.7	94.0	233.4
185-225	4333	2178	0.33	280.3	105.3	276.4
205-245	4534	2437	0.30	342.0	131.8	280.6
225-265	4875	2392	0.34	340.8	127.0	358.2
265-305	4193	2209	0.31	283.4	108.3	245.9
285-325	4756	2328	0.34	323.0	120.3	341.7
305-345	5131	2481	0.35	368.2	136.6	402.3
VALOR MEDIO	4467	2314	0.31	315.6	120.6	288.5

TABLA 4.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL SOCAVON 17.

CADENAMIENTO (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
24-36	3243	1666	0.32	162.8	61.6	151.3
36-40	2727	1818	0.30**	161.4	73.4	67.3
48-60	2340	1366	0.24	102.9	41.4	66.3
60-100	3128	1875	0.22	190.4	78.0	113.2
100-112	3861	2123	0.28	256.8	100.1	197.5
108-120	3448	1791	0.32	187.3	71.2	169.0
120-160	4286	2437	0.26	332.5	131.8	232.0
160-180	4501	3007	0.12**	147.9	200.7	194.2
172-192	4878	2155	0.38	284.3	103.1	390.8
184-200	4561	2654	0.24	389.1	156.4	253.3
VALOR MEDIO	3718	2008	0.28	238.3	93.0	196.7

\*\* Valores poco confiables debido probablemente a que se utilizó una valor mayor al real de la velocidad de las ondas transversales.

TABLA 5.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL SOCAVON 19.

CADENAMIENTO (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
10-18	3506	1248	0.43	98.7	34.6	226.8
18-22	2500	1359	0.29	105.8	41.0	84.1
22-38	4306	2006	0.36	243.2	89.3	292.5
38-78	5241	2618	0.33	405.9	152.2	406.9
58-98	4992	2973	0.23	480.8	196.2	291.6
78-118	4782	2654	0.28	399.5	156.4	299.2
106-138	5237	2447	0.36	361.7	132.9	431.6
138-142	4996	2187	0.38	293.4	106.2	412.5
142-158	5326	3077	0.25	525.3	210.2	349.5
158-198	5209	2641	0.23	411.0	154.8	395.0
VALOR MEDIO	4610	2321	0.32	332.5	127.4	319.1

TABLA 6.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL SOCAVON 20

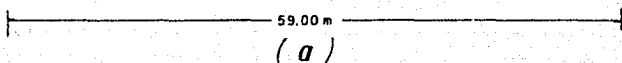
CADENAMIENTO (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
33-57	3888	2461	0.17	313.5	134.5	156.3
41-72	4148	2388	0.25	317.0	126.6	213.2
53-85	5340	2540	0.35	387.8	143.2	442.1
81-113	4444	2742	0.19	398.1	166.9	215.9
113-121	5000	2105	0.39	273.9	98.4	423.8
121-145	5693	2553	0.37	397.7	144.7	526.6
145-153	5693	2068	0.42	270.4	94.9	592.9
VALOR MEDIO	4886.6	2408.1	0.31	336.9	129.9	357.3

TABLA 7.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL SOCAVON 21.

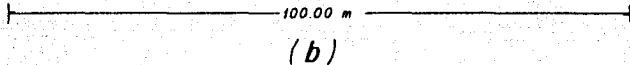
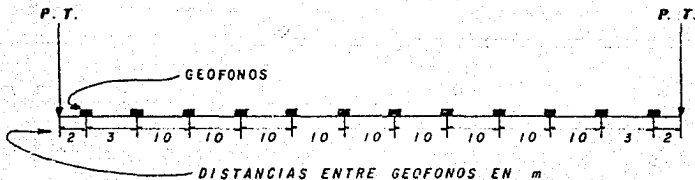
CADENAMIENTO (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
11-46	3434	2230	0.14	250.7	110.4	114.6
35-66	4295	2755	0.15	387.7	168.5	184.5
47-71	4762	2526	0.30	369.5	141.7	314.6
75-87	4762	2895	0.21	449.1	186.1	255.3
95-107	5588	2894	0.32	489.6	185.9	445.3
VALOR MEDIO	4568	2660	0.22	389.3	158.5	262.9

#### IV.1.3.2.- Módulos Elásticos Dinámicos de Tendidos Superficiales

Se realizaron tendidos superficiales de sismica de refracción con golpes de marro como fuente de energía. Se utilizaron dos tipos de arreglos de geófonos, de 59 y 100 m, tal como se muestra en la siguiente figura.



P.T. = Punto de tiro



Se utilizaron dos tipos de geófonos: De componente vertical y de componente horizontal para captar las ondas longitudinales y transversales, respectivamente.

Para obtener las ondas transversales se fijó una tabla de madera sobre el terreno y se golpeó en sus extremos.

Con este método se obtuvieron tres sismogramas para cada punto de tiro: Uno para las ondas longitudinales y los dos restantes para las ondas transversales con el objeto de observar la polaridad de las ondas.

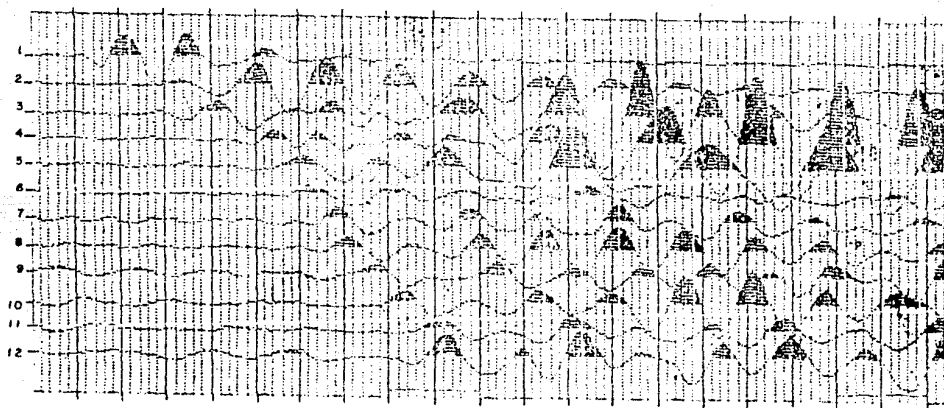
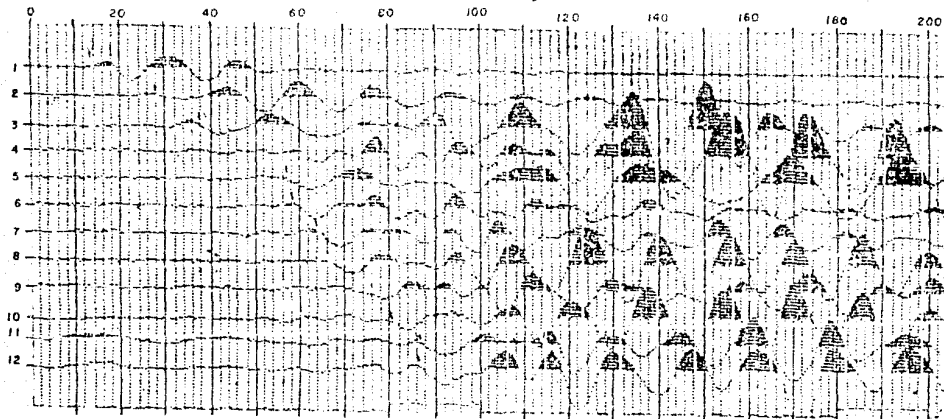
La figura 7 muestra un sismograma que ejemplifica la obtención de los arribos de la onda "P", mientras que la figura 14 expone los dos sismogramas para obtener las ondas "S" del mismo tendido. En la figura 15 se puede observar la polarización de las ondas transversales al sobreponer los sismogramas de un mismo punto de tiro, pero de golpes opuestos.

Estos tendidos se levantaron sobre los ejes de las obras civiles para la Alternativa 4 que es una presa de gravedad a la elevación 597 m.s.n.m. (Fig. 12). Previamente se habían realizado tendidos sísmicos de refracción convencionales, por lo que se escojieron los sitios donde la roca compacta se encontraba más somera.

Los tendidos que se utilizaron para obtener los módulos elásticos dinámicos se designan con la letra M en las secciones correspondientes.

Los resultados obtenidos se consignan en las siguientes tablas:

TIEMPO (mseg)



U N A M

FACULTAD DE INGENIERIA

SISMOGRAMAS DE ONDAS TRANSVERSALES DE LA SECCION DE ATAGUIA AGUAS ABAJO.

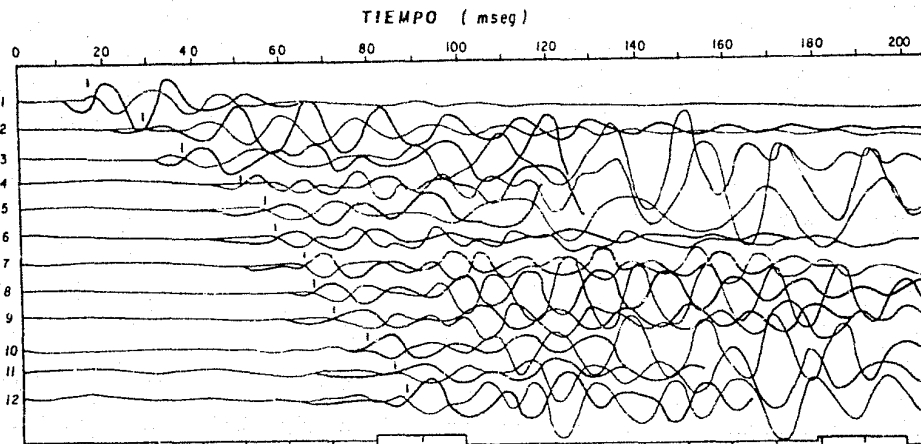
TESIS PROFESIONAL

PABLO BARRIGA LLANOS

GUILLERMO O. OROZCO FARARON

FIG. 14





U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
SISMOGRAMAS SOBREPUESTOS DE LA SECCION DE ATAGUIA DE	
AGUAS ABAJO	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRISA LLANOS GUILLERMO O. CRUZZO PARRON	FIG. 15

TABLA 8.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS SOBRE EL EJE DE LA CORTINA DE LA ALTERNATIVA 4 DEL P.H. SAN JUAN TETELcingo (PLANO 2).

MATERIAL F. MEXCALA (ARENISCA)	LOCALIZACION	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
ROCA DE MALA CALIDAD FRACTURADA E INTEMPERIZADA	M <sub>1</sub>	2254	1140	0.33	76.6	28.9	74.3
	M <sub>3</sub>	1274	646	0.33	24.6	9.3	23.7
ROCA DE BUENA CALIDAD ROCA COMPACTA	M <sub>1</sub>	3809	2010	0.31	234.5	89.7	202.5
	M <sub>3</sub>	3830	1970	0.32	227.5	86.2	210.8
MATERIAL: M.V. TETELcingo (TOBAS Y BRECHAS)							
ROCA DE MALA CALIDAD INTEMPERIZADA	M <sub>2</sub>	1308	466	0.43	14.8	5.2	33.8

TABLA 9.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL EJE DE LA ATAGUIA AGUAS ARRIBA DE LA ALTERNATIVA 4 DEL P.H. SAN JUAN TETELCINGO (PLANO 3).

MATERIAL F. MEXCALA (ARENISCA)	LOCALIZACION	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
ROCA DE MALA CALIDAD FRACTURADA Y/O INTEMPERIZADA	M <sub>1</sub>	2000	980	0.34	57.2	21.3	60.4
	M <sub>2</sub>	1662	833	0.33	41.0	15.4	40.8
ROCA DE BUENA CALIDAD ROCA COMPACTA	M <sub>1</sub>	3752	1960	0.31	223.8	85.3	198.8
	M <sub>2</sub>	4324	2280	0.31	301.8	115.4	261.2

TABLA 10.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL EJE DE LA ATAGUIA AGUAS ABAJO DE LA ALTERNATIVA 4 DEL P.H. SAN JUAN TETELCINGO (PLANO 4).

MATERIAL F. MEXCALA (ARENISCA)	LOCALIZACION	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
ROCA DE MALA CALIDAD FRACTURADA Y/O INTEMPERIZADA	M <sub>1</sub>	1683	856	0.33	43.1	16.3	41.2
	M <sub>2</sub>	1573	804	0.32	38.0	10.3	35.8
ROCA DE REGULAR CALIDAD: ROCA POCO FRACTURADA Y/O INTEMPERIZADA	M <sub>1</sub>	3200	1675	0.31	163.3	62.3	144.3
ROCA DE BUENA CALIDAD: COMPACTA	M <sub>2</sub>	3700	1953	0.31	221.3	84.7	191.0

TABLA 11.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL EJE DE LA OBRA DE CONTROL DE EXCEDENCIAS M.I. DE LA ALTERNATIVA 4 DEL P.H. SAN JUAN TETELcingo (PLANO 6)

MATERIAL F. MEXCALA (ARENISCA)	LOCALIZACION	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
ROCA DE MALA CALIDAD FRACTURADA Y/O INTEMPERIZADA	M <sub>2</sub>	1578	816	0.32	39.0	10.7	35.6
ROCA DE BUENA CALIDAD ROCA COMPACTA	M <sub>2</sub>	3841	2100	0.29	252.0	97.9	197.0
MATERIAL M.V. TETELcingo (TOBAS Y BRECHAS)							
ROCA DE MALA CALIDAD INTEMPERIZADA	M <sub>1</sub>	1346	501	0.42	17.0	6.0	35.2
ROCA DE MALA CALIDAD NO CONSOLIDADA	M <sub>1</sub>	2300	1104	0.35	78.3	29.0	87.2

TABLA 12.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL EJE DEL CANAL DE DESVIO M.I. DE LA ALTERNATIVA 4 DEL P.H. SAN JUAN TETELCINGO (PLANO 7).

MATERIAL F. MEXCALA (ARENISCA)	LOCALIZACION	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
ROCA DE MALA CALIDAD FRACTURADA Y/O INTEMPERIZADA	M <sub>1</sub>	1272	556	0.38	20.3	7.4	28.7
	M <sub>2</sub>	1934	938	0.35	52.6	19.5	57.0
	M <sub>3</sub>	1907	883	0.36	47.2	17.3	57.7
ROCA DE REGULAR DE POCO FRACTURADA Y/O INTEMPERIZADA	M <sub>2</sub>	3152	1726	0.28	168.8	66.1	125.9
ROCA DE BUENA CALIDAD: COMPACTADA	M <sub>1</sub>	3920	2000	0.32	235.1	83.8	222.7
	M <sub>2</sub>	3800	2100	0.28	250.7	97.9	190.0

TABLA 13.- MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DETERMINADOS EN EL EJE DE LA OBRA DE CONTROL DE EXCEDENCIAS M.D. DE LA ALTERNATIVA 4 DEL P.H. SAN JUAN TETELCINGO (PLANO 8).

MATERIAL F. MEXCALA (ARENISCA)	LOCALIZACION	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	$\sigma$	E(Ton/cm <sup>2</sup> )	G(Ton/cm <sup>2</sup> )	K(Ton/cm <sup>2</sup> )
ROCA DE MALA CALIDAD FRACTURADA Y/O INTEMPERIZADA	M <sub>1</sub>	1200	581	0.35	20.2	7.5	22.0
	M <sub>2</sub>	2496	1300	0.31	98.6	37.5	88.3
ROCA DE BUENA CALIDAD COMPACTA	M <sub>1</sub>	4000	2030	0.32	244.5	92.3	232.13
	M <sub>2</sub>	3863	2062	0.30	215.6	94.4	205.4

#### IV.2.- Aplicación del Método Geoelectrico

Se realizaron sondeos electricos verticales tipo Schlumberger con aberturas electródicas AB/2 que variaron entre 100 y 500 m, procurando un espaciamento de 100 m entre cada uno.

Se levantaron secciones en las 4 alternativas según se muestra en el plano 1.

El objetivo primordial fue el de investigar posibles zonas fracturadas que no pudieran detectarse por el método de sísmica de refracción.

Se configuraron planos de isorresistividad aparente para las aberturas electródicas AB/2 = 50, 100, 200 y 300 m.

La interpretación de los sondeos eléctricos verticales se realizó primeramente por el método de superposición de curvas patrón de 3 capas y por el método del punto auxiliar. Se utilizó la colección holandesa del Rijkswaterstaat editada por la European Association of Exploration Geophysicists (1969). Después se comprobó y mejoró esta interpretación mediante el algoritmo de Johansen (1977). Este programa resuelve el problema directo. A partir de los espesores y resistividades obtenidos por la interpretación manual calcula la curva teórica correspondiente y la compara con la curva de campo emitiendo un porcentaje de error; variando los espesores y resistividades se puede lograr disminuir este error. En este estudio se procuró que el error no fuera mayor del 5% tomando 11 puntos de las curvas de campo por ciclo.

La figura 16 muestra una curva de campo y la figura 17 esa misma curva interpretada manualmente. En la figura 18 se tiene el resultado mediante el algoritmo de Johansen.

Los perfiles de isorresistividad aparente se formaron uniendo puntos de igual valor de resistividad. Estos valores de resistividad se

### SONDEO SCHLUMBERGER

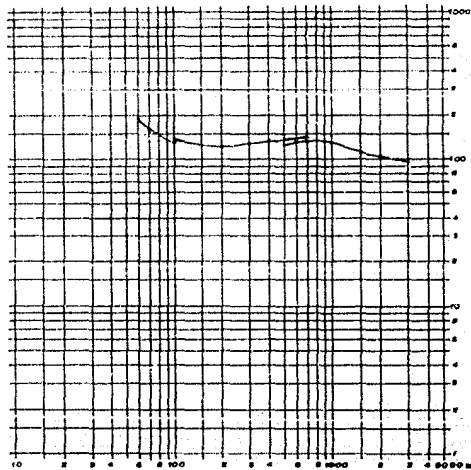
CAMPO: Sa. Juan Tebalcingo FECHA: \_\_\_\_\_  
 LINEA: Sa. CRISTAL N. T. OPERADOR: \_\_\_\_\_  
 SONDEO: 4 COTA: \_\_\_\_\_  
 OBSERVACIONES: Esta sondeo es Hacia a la O. y V.  
por haber Ranaje en la O. y V.

### COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

— SONDEO ELECTRICO —

CAMPO: \_\_\_\_\_ COTA S. N. M. \_\_\_\_\_ FECHA: \_\_\_\_\_  
 LINEA: \_\_\_\_\_ UBICACION: \_\_\_\_\_ OPERADOR: \_\_\_\_\_  
 NUMERO: \_\_\_\_\_ OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

LARGO	CORTO	R Constante	X Constante	AV	P	OBSERVACIONES
				Resistencia	Resistiv.	
1	0.15	5.00				
1.5	0.25	13.75				
2	0.35	24.70				
3	0.45	35.15				
4	1	45.97				
5	1	53.10				
7	1	75.00	271	2.22	112.50	
10	1	103.51	377	2.60	134.87	
15	1.5	148.70	528	3.00	152.25	
18	1.8	157.4	547	3.10	152.82	
20	2.0	207.4	620	3.31	165.91	
30	2.5	261.4	683	3.50	175.00	
40	2.8	1000.3	278	3.00	152.25	
80	2.0	1866.8	452	3.51	176.11	
10	377.0	267	29.3	1.00	97	
70	2.8	2074.8	452	3.7	190.25	
10	794.0	528	36.3	1.00	100	
100	10	1888.1	452	3.50	175.00	
180	10	3078.8	620	3.50	175.00	
200	10	3287.4	620	3.50	175.00	
40	1808.0	122	3.22	126.00		
300	10	14121.4	528	3.77	19.25	
40	3171.4					
10	3171.0					
400	40	3220.3				
200	40	379.4				
40	3204.4					
780	100	3078.8				
180	3284.8					
40	3207.0					
1000	10	12550.8				
180	12550.8					
180	4818.8					
180	3284.8					
280	13764.4					
800	100	3224.7				
180	3182.8					
280	3275.0					
280	3087.2					
280	3188.0					

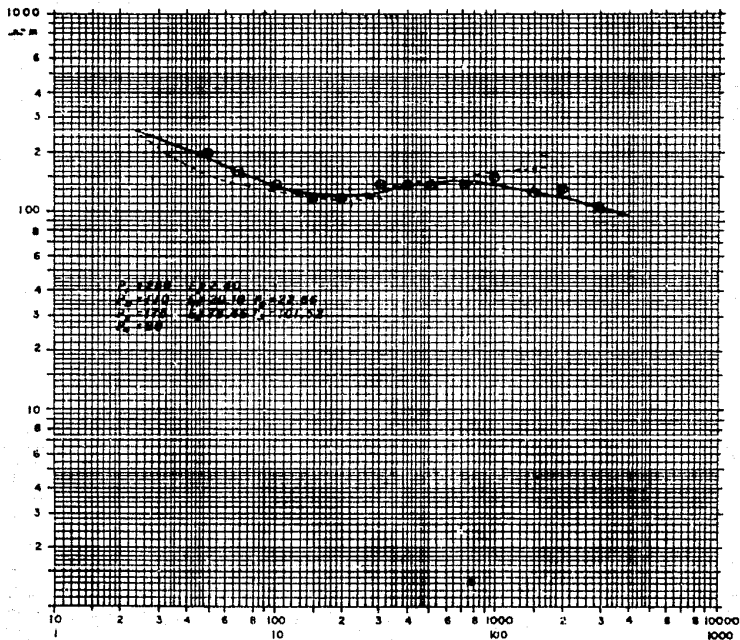


DISTANCIA SEMIELECTRODICA EN M

UNAM	
FACULTAD DE INGENIERIA	
CURVA DE CAMPO SONDEO SCHLUMBERGER	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRIA LLANOS GUILLERMO O. ORCOZ PASTORIN	
FIG. 16	

## SONDEO ELECTRICO

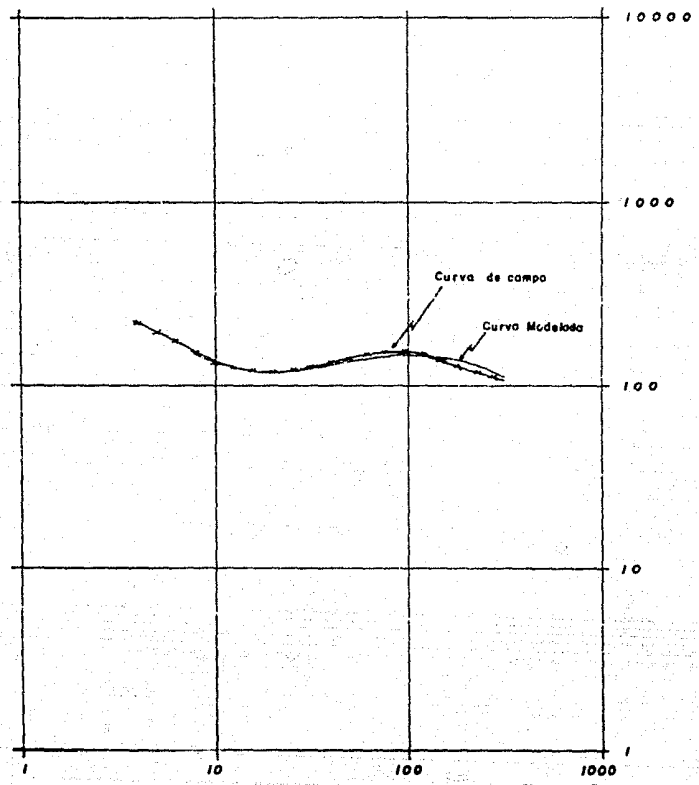
campo San Telmo      cota s.n.m. \_\_\_\_\_      fecha \_\_\_\_\_  
 linea Eje Cortina M.I.      ubicación Est. 0+140      operador David Mdz.  
 número 4      observaciones Rezagó sobre estaca 0+150



<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
CURVA INTERPRETADA DE SONDEO SCHLUMBERGER	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRIGA LLANOS GUILLERMO O. OROZCO FARARONI	FIG. 17



# SONDEO ELECTRICO VERTICAL



ERROR = 2.73 %

<b>U. N. A. M.</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
VERIFICACION DE UN S.E.V. POR COMPUTADORA	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
PABLO MARINA LLANOS GUILLERMO C. BROZCO F.	FIG. 18

obtuvieron directamente de las curvas de campo corregidas para ser interpretadas, tal como la mostrada en la figura 17. La corrección consiste en pasar de la curva de la figura 16 a la curva de la figura 17, bajando o subiendo paralelamente los tramos de la curva hasta que coincidan (Orellana, 1982).

Análogamente, los planos de isorresistividad aparente (Planos 12, 13, 14 y 15) se configuraron con los valores de resistividad aparente para una misma abertura electródica AB/2. Para configurar estos planos la información se obtuvo de los estudios efectuados entre los años de 1978 y 1983 (Pérez y Pérez 1978 a, 1978 b, 1978 c; Pérez, 1979 a, 1979 b; Pérez, 1980; Orozco y Barriga, 1980 y Saucedo et al, 1983).

#### IV.2.1.- Resultados

Al analizar las secciones se determinó que en la zona donde aflora el Miembro Superior de la Formación Mexcala Ksmx3, generalmente existen cuatro capas. Las primeras tres se correlacionan con los resultados de sismica de refracción, correspondiendo la primera capa a suelos con un espesor medio de 1 m; la segunda capa corresponde a una zona alterada y decomprimida y la tercera capa a la zona sana; la última capa indica una zona sana pero probablemente con un contenido mayor de lutitas en su estratificación, lo cual se infiere de los valores de resistividad, los cuales disminuyen del orden de 100 a menos de la mitad (40  $\Omega$  -m).

En los perfiles de isorresistividad aparente únicamente se observan contrastes de resistividad en el contacto del Miembro Superior de la Formación Mexcala con el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo y en algunas zonas superficiales.

En los planos de isorresistividad aparente (Planos 12, 13, 14 y 15) se observan algunas anomalías de baja resistividad que probablemente estén asociadas a fracturas.

A continuación se detallan las secciones levantadas en la alternativa 4 para una presa de gravedad a la elevación 597 m.s.n.m. figura 12, y los planos de resistividad aparente que comprenden las cuatro alternativas.

- Cortina (Plano 2)

Como cubierta general se tiene un pequeño estrato de suelo y areniscas muy alteradas con resistividades variables de 46 a 780  $\Omega$ -m. Abajo se encuentra una unidad que presenta valores resistivos de 44 a 520  $\Omega$ -m que en la margen izquierda coincide con la zona alterada detectada por sísmica de refracción. En la margen derecha ésto no sucede, probablemente debido a que la topografía es más abrupta que en la margen izquierda. Subyaciendo a esta capa se observa una capa a partir del cruce con la sección 6-6' en la margen izquierda, que en general, acusa valores altos de resistividad, de 100 a 220  $\Omega$ -m. Además, presenta un espesor variable de 15 a 20 m y pertenece a la roca sana del Miembro Superior de la Formación Mexcala Ksmx3. Abajo de esta capa se encuentra una zona con resistividades bajas, generalmente menores a 100  $\Omega$ -m que también pertenece a la roca sana pero se supone que con un contenido mayor de lutitas. Finalmente existe otro paquete resistivo con las características de la tercera capa, el cual se detectó en la margen izquierda hasta llegar al cruce con la sección 5-5', y en la margen derecha pasando el cruce con la sección 7-7'.

En esta sección el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo aflora en la margen izquierda con resistividades bajas de 7-15  $\Omega$ -m debido a los minerales arcillosos que contiene.

El perfil de resistividad aparente muestra en el extremo de la margen izquierda valores bajos de resistividad debido a la presencia del Miembro Volcanoclástico Tetelcingo; hacia la margen derecha aumentan los valores de resistividad hasta los 900  $\Omega$ -m debido al Miembro Superior de la Formación Mexcala Ksmx3.

#### - Ataguía Aguas Arriba (Plano 3)

Esta sección muestra una distribución de resistividades similar a la descrita en el eje de la cortina. La cubierta superficial presenta resistividades de 40 a 550  $\Omega$ -m. Bajo esta zona se detectó un horizonte con resistividades de 44 a 140  $\Omega$ -m que es similar a la zona alterada determinada por sismica de refracción. Subyaciendo a esta capa y a partir del cruce con la sección 5-5' se detectó una capa con resistividades de 90 a 500  $\Omega$ -m y un espesor que alcanza hasta 80 m, perteneciente a la roca sana. Bajo esta unidad se encuentra una zona con resistividades bajas de 36 a 100  $\Omega$ -m que también pertenece a la roca sana pero con un mayor contenido de lutitas. Por último, se tiene la roca con características similares a la tercera capa cuyas resistividades fluctúan entre 125 y 220  $\Omega$ -m.

#### Ataguía Aguas Abajo (Plano 4)

En esta sección el suelo y la roca sumamente alterada tienen un espesor promedio de 3 m y resistividades de 30 a 100  $\Omega$ -m. Le subyace en la margen izquierda una capa con un espesor promedio de 30 m y resistividades de 38 a 77  $\Omega$ -m, que corresponde aproximadamente a los espesores de roca de mala y regular calidad que tienen velocidades de 1500 y 2000 m/s. Sobre el cauce se encontró que el material de acarreos del río tiene una resistividad de 140  $\Omega$ -m. En la margen derecha se delimitó una capa con resistividad de 150  $\Omega$ -m; aunque este valor de resistividad concuerda con la zona de roca sana, se supone que tiene influencia de la roca de mala calidad que se detectó mediante sismica de refracción. Abajo de esta se delimitó una zona alargada de 40 a 50  $\Omega$ -m, que se supone es de roca de buena calidad con un aumento en el contenido de lutitas. Subyaciendo a estas capas en toda la sección se encontraron resistividades de 55 a 250  $\Omega$ -m, que corresponden a roca de buena calidad, y después resistividades bajas de 24 a 54  $\Omega$ -m que pertenecen a roca de buena calidad con un aumento en el contenido de lutitas.

### Casa de Máquinas (Plano 5)

Se levantó totalmente en la zona de material de acarreos. Las dos primeras capas corresponden al espesor de material de acarreos; la capa superficial tiene resistividades que varían de 30 a 750  $\Omega$ -m que corresponde a la zona seca y la subyacente, con resistividades de 55 a 155  $\Omega$ -m, identifica la zona saturada. Abajo de este material se encuentra la roca sana donde las resistividades encontradas variaron de 92 a 178  $\Omega$ -m y cuyo espesor aumenta a partir del cruce con la sección 1-1', de 25 m a aproximadamente 90 m. Le subyace la roca que contiene mayor cantidad de lutitas, con resistividades de 40 a 54  $\Omega$ -m.

La sección de resistividad aparente presenta un máximo superficial al centro de la sección debido a la influencia de la zona seca superficial del material de acarreos, y otro en el mismo sitio pero profundo, debido a que la capa resistiva que corresponde a la roca sana aumenta de espesor.

### - Obra de Control de Excedencias, Margen Izquierda (Plano 6)

A la izquierda de la sección aflora el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo. Se detectaron tres capas de 4,7 y 33  $\Omega$ -m. En el resto de la sección aflora el Miembro Superior de la Formación Mexcala. La capa superficial tiene resistividades de 30 a 300  $\Omega$ -m y, con excepción de algunas zonas, corresponde con la roca de mala calidad detectada por sísmica de refracción.

Debajo de la capa anterior se tienen dos zonas inferidas, una a la altura del cruce con la sección 4-4' con resistividad de 40  $\Omega$ -m que corresponde a roca de regular calidad, y la otra hacia aguas abajo con resistividades de 30 a 43  $\Omega$ -m que se asocia a roca de mala calidad. Por debajo de éstas se encontró una capa cuyo límite inferior es irregular y corresponde al tipo de roca sana de buena calidad, con resistividades que varían de 60 a 305  $\Omega$ -m. Subyaciendo

se encuentra una zona de bajas resistividades de 15 a 40  $\Omega$ -m, razón por la cual se supone que es una roca sana con mayor contenido de lutitas. Por último, en la parte izquierda junto al contacto con el Miembro volcanoclástico Tetelcingo, se detectó una zona resistiva de 120 a 260  $\Omega$ -m, que corresponde a roca sana.

La sección de resistividad aparente correspondiente muestra en el extremo izquierdo una disminución en las resistividades debido a que es la zona donde aflora el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo. En el resto de la sección las resistividades más bajas se encuentran en el límite inferior, debido probablemente a un aumento de lutitas.

#### - Canal de Desvío (Plano 7)

La cubierta superficial tiene resistividades de 55 a 190  $\Omega$ -m. Entre el cruce de las secciones 2-2' y 1-1' empieza una capa que tiene resistividades de 27 a 85  $\Omega$ -m y un espesor máximo de 40 m. Por los resultados de sismica de refracción corresponde en parte a roca poco fracturada y en parte a roca sana. Subyaciendo y abarcando toda la sección se detectó una unidad que tiene resistividades de 88 a 275  $\Omega$ -m; su espesor aumenta de 5 m en el extremo izquierdo a 100 m en la parte derecha; a la izquierda donde el espesor es menor corresponde roca fracturada y a la derecha roca sana. La siguiente capa tiene resistividades más bajas, de 20 a 78  $\Omega$ -m y corresponde a roca sana con un aumento de lutitas. Sólo en el extremo izquierdo se alcanzó a detectar una última zona con resistividades de 135  $\Omega$ -m, que corresponde a roca sana.

La sección de isorresistividad aparente presenta dos mínimos; uno en el extremo izquierdo, de 40  $\Omega$ -m debido probablemente al espesor de la capa, que tiene un aumento en su contenido de lutitas, y el otro de 60  $\Omega$ -m a la izquierda de la deflexión y que puede deberse al efecto superficial del material que ocupa el paleocanal.

#### Obra de Control de Excedencias, Margen Derecha (Plano 8)

La cubierta superficial tiene un espesor promedio de 4 m y resistividades de 90 a 280  $\Omega$ -m. Subyaciendo a esta capa se tiene una zona con resistividades altas, de 105 a 3000  $\Omega$ -m, que en su mayor parte corresponde a roca de mala calidad. Abajo de esta se tiene una zona alargada con resistividades de 46 a 70  $\Omega$ -m que tiene una interrupción en el cruce con la sección 1-1'; se supone que corresponde a roca de buena calidad con un aumento en el contenido de lutitas. Subyaciendo se encuentra una zona de resistividades altas, de 100 a 300  $\Omega$ -m que corresponde a roca sana. La última zona detectada tiene bajas resistividades, de 12 a 44  $\Omega$ -m y análogamente a las otras secciones, se supone que es roca sana con un contenido elevado de lutitas.

La sección de isorresistividad aparente muestra en general valores altos; los valores mínimos aparecen en la zona inferior debido a la influencia de la capa con resistividades bajas.

#### IV.2.1.1.- Planos de Isorresistividad Aparente

Se configuraron cuatro planos de isorresistividad aparente para las separaciones electródicas AB/2 de 50, 100, 200 y 300 m, que se describen brevemente a continuación.

- Para Ab/2 = 50 m (Plano 12).

Se observan dos máximos resistivos con valores superiores a los 150  $\Omega$ -m; el primero queda al NW del área estudiada y puede indicar que la roca sana del Miembro Superior de la Formación Mexcala Ksmx3 se encuentra a poca profundidad, mientras que el segundo, localizado al S, se estima que lo originan las rocas calizas de la Formación Cuautla. También se denotan 3 mínimos que presentan alineamientos perpendiculares al río, al NW de la zona estudiada, los cuales se pueden asociar a fracturas o zonas con mayor contenido de materiales arcillosos (Plano 12).

Otros alineamientos de resistividad baja, más bien señalan contactos litológicos, uno al centro, con el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo, y otro al SE, con la Formación Cuautla.

- Para AB/2 = 100 m (Plano 13)

La configuración en este plano es similar a la anterior. Se hacen más notorios los valores bajos al sur del Río Tepecoacuilco que se encuentran asociados al Miembro Volcanoclástico Tetelcingo. También aparece otro alineamiento casi paralelo en la margen izquierda de la zona NW que como los otros pudiera estar asociado a una fractura.

- Para Ab/2 = 200 m (Plano 14)

En general las curvas conservan los rasgos de los dos planos anteriores; sin embargo, desaparece el alineamiento central que se encontraba perpendicular al río al NW de la zona.

- Para AB/2 = 300 m (Plano No. 15)

Los valores de resistividad aparente disminuyen en comparación con las secciones anteriores. En la zona NE este efecto puede deberse a un aumento local de lutitas en el Miembro Superior de la Formación Mexcala Ksmx3. Sin embargo, los alineamientos perpendiculares al río en esta zona todavía pueden notarse. En el resto del área la tendencia de las curvas se conserva como en el caso de las plantas anteriores.



## V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para diseñar una presa que sea confiable y económica, se requiere el conocimiento detallado de la geología del área y sus rasgos estructurales, así como de las condiciones y propiedades mecánicas del volumen de roca donde se efectuará la cimentación. Por esta razón se requiere una investigación multidisciplinaria.

Los métodos geofísicos como el de sísmica de refracción y los sondeos eléctricos verticales son de gran utilidad en el estudio de la geología y las relaciones estructurales.

Además, las investigaciones sísmicas se utilizan para el diagnóstico de las condiciones y propiedades mecánicas de las rocas de interés, con el fin de construir en el mejor sitio posible.

Las investigaciones sísmicas dentro de los socavones son útiles para obtener los módulos elásticos dinámicos en roca que se encuentra a profundidades considerables, y que de otra forma serían inaccesibles para los métodos superficiales.

La investigación de sísmica de refracción empleando golpes de marro como fuente de energía puede utilizarse para determinar los módulos elásticos dinámicos de la roca de cimentación de una presa.

Los procedimientos anteriores se complementaron en el estudio realizado en el sitio del proyecto de "San Juan Tetelcingo".

En este caso particular, con la sísmica de refracción se obtuvo la calidad de la roca, principalmente en el sitio de la alternativa

69  
ESTADO DE GUERRERO  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

4. En el Miembro Superior de la Formación Mexcala Ksmx3, el suelo y la roca sumamente alterada tienen velocidades menores a 1000 m/s y un espesor promedio de 2 m. Para la roca fracturada de mala calidad las velocidades varían de 1000 a 2500 m/s con un espesor medio de 10 m. Se encuentra una roca intermedia de regular calidad con velocidades entre 2500 y 3200 m/s que solamente se encuentran en dos porciones del área estudiada; la roca de buena calidad es roca sana con velocidades mayores de 3200 m/s.

Para el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo que presenta características diferentes, el espesor de suelo y roca muy alterada es de 5 m y tiene velocidades menores a 1000 m/s; a la roca considerada de mala calidad se le calcularon dos velocidades, ya que en este el área estudiada fue pequeña; la velocidad menor fue de 1300 m/s con un espesor variable de 8 a 35 m y la velocidad mayor fue de 2300 m/s. Sin embargo, con el estudio de tomografía se detectaron velocidades hasta de 3000 m/s; con este valor de velocidad se puede clasificar como roca de regular calidad.

El plano de Arabilidad muestra la configuración de las isopacas de la roca de mala calidad que puede descapotarse.

La tomografía sísmica en cierto sentido es una variación de los tiros en abanico; es una técnica en donde se reconstituye la distribución de velocidad dentro de una región de interés utilizando los primeros arribos de rayos que han cruzado esa región. En el caso de este estudio ayudó mucho el modelo geológico previo con que se contaba así como la información de una perforación. No obstante, entre los socavones 10 y 17 el menor error en que se detuvo el procesamiento fue de 37.9%, lo cual indica que para esta zona el modelo obtenido no puede considerarse aceptable. Para el resto de las zonas estudiadas el error fue mucho menor, por lo que sí son aceptables los resultados obtenidos.

Lo anterior se debe a que la tomografía sísmica todavía está sujeta a una considerable investigación, y es inevitable que muchos de los problemas que se tienen serán superados en un futuro cercano.

Los estudios realizados con el método de resistividad verificaron en general la existencia de las tres capas que se habían detectado por sísmica de refracción. Además, se detectó una cuarta capa dentro de la Formación Mexcala en donde las resistividades bajan de un rango de 100 a 40  $\Omega$ -m, lo que supone un aumento en la proporción de lutitas y una subdivisión de la roca dentro del Miembro Superior de la Formación Mexcala.

Por lo anterior, se considera que para la construcción de la presa tipo gravedad a la elevación 597 m.s.n.m. en el sitio de "San Juan Tetelcingo", será necesario valorar el espesor de roca de mala calidad.

Dentro de las recomendaciones es necesario señalar que la información obtenida del Miembro Volcanoclástico Tetelcingo en el sitio de la Alternativa 4 es muy reducida, por lo que es recomendable levantar un mayor número de secciones de sísmica de refracción y de resistividad. Además, en la Sección del eje de la obra de control y excedencias de la margen izquierda (Plano 6), el contacto entre el Miembro Volcanoclástico Tetelcingo y el Miembro Superior de la Formación Mexcala Ksmx3 semeja un contacto falla, lo cual sería deseable investigar con mayor detalle en términos geológicos.

Asimismo, para las alineaciones de isorresistividad aparente marcadas en los planos 12, 13, 14 y 15 en la zona de la Alternativa 4, se recomienda efectuar un levantamiento geológico de detalle para verificar la existencia de posibles fracturas que podrían afectar las obras.

De manera general se recomienda que los métodos geofísicos se apliquen antes, durante y después de la construcción, ya que pueden estar dirigidos a problemas geotécnicos específicos. Como ejemplo de esto se puede señalar que las investigaciones sísmicas dentro de las obras subterráneas pueden utilizarse para zonificar la roca de acuerdo a las velocidades de las ondas "P" y "S", a fin de determinar la zona de compresión y tensión, así como la profundidad de la zona intacta, es decir, la zona que no ha sido afectada por la excavación. Esto puede contribuir al diseño del recubrimiento óptimo para estructuras subterráneas.

Además, es factible obtener relaciones entre el fracturamiento, el Índice de Calidad de Roca (RQD) y la permeabilidad con las velocidades sísmicas.

## BIBLIOGRAFIA

Chávez, Q.R., Palacios N. M., Maicotte, I.J. Hernández P.G. y Landgrave, N. J. 1982, Informe Geológico Final P.H. San Juan Tetelcingo, Gro. C.F.E. Informe inédito.

Johansen, H. K. 1977 A man/computer interpretation system for resistivity sounding over a horizontally stratified earth. Geophysical prospecting 25, p.667-691.

Mooney, H.M.1977, Handbook of Engineering Geophysics. Bison Instruments, Inc. Minneapolis, Minnesota. U.S.A.

Orellana, E. 1982, Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo. Madrid.

Orellana, E. y Mooney H.M. 1966, Tablas y curvas para Sondeos Eléctricos Verticales. Interciencia. Madrid.

Orozco, F. O. y Barriga, Ll. P. 1980, Estudio Geotécnico del P.H. San Juan Tetelcingo, Gro. C.F.E. Informe inédito.

Pérez, A. R. y Pérez, M. J. 1978, Estudio de resistividad en la Margen Izquierda de la Alternativa 2 para el P.H. San Juan Tetelcingo, Gro. C.F.E. Informe Inédito.

Pérez, A.R. y Pérez, M.J. 1978, Informe del Estudio Geoeléctrico en la Margen Derecha de la alternativa 2 para el P.H. San Juan Tetelcingo, Gro. C.F.E. Informe Inédito.

Pérez, A.R. y Pérez, M.J. 1978, estudio Geoeléctrico complementario en la Margen Izquierda de la Alternativa 2 para el P.H. San Juan Tetelcingo, Gro. C.F.E. Informe Inédito.

Pérez, M.J. 1979, Análisis por el método Geofísico de Resistividad de las condiciones estructurales del subsuelo en el P.H. San Juan Tetelcingo, Gro. C.F.E. Informe Inédito.

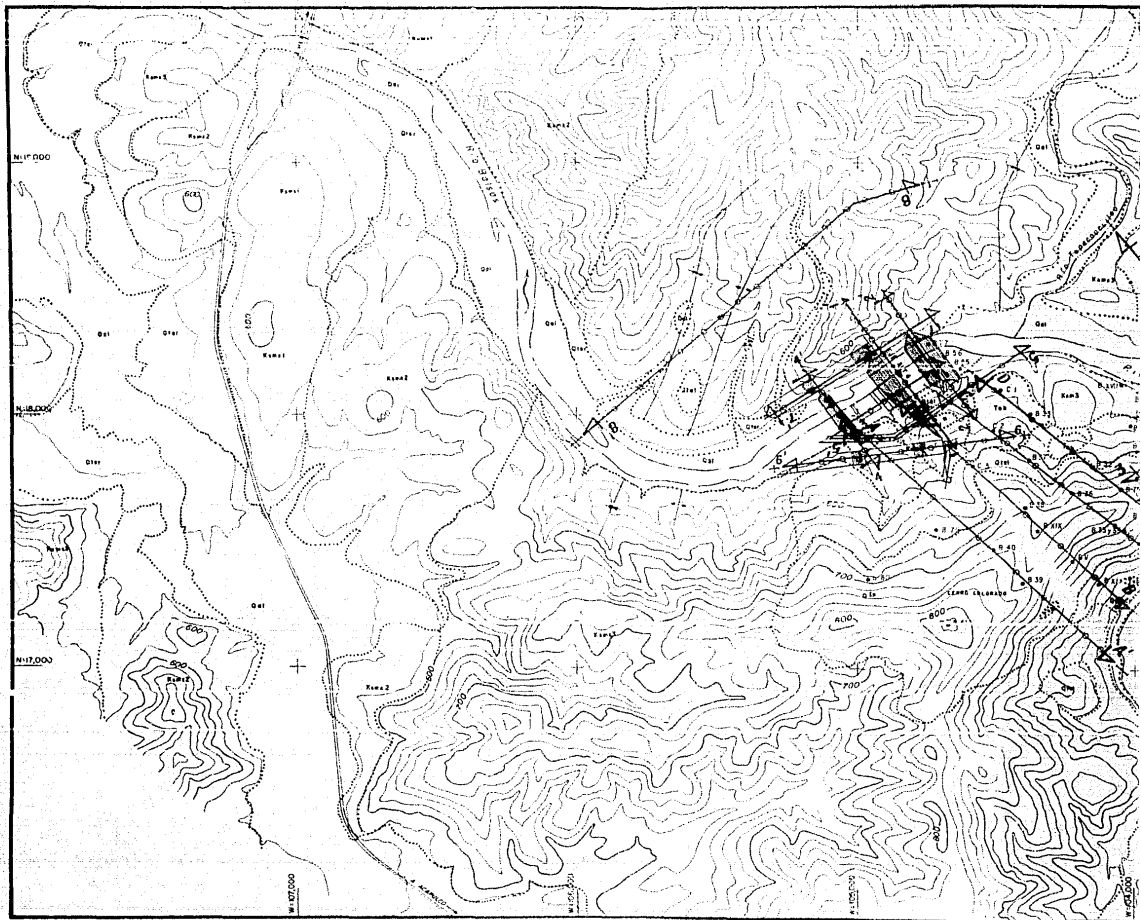
Pérez, M.J. 1979, estudio geoelectrico en la alternativa 1 y 3 del P.H. San Juan Tetelcingo, Gro. C.F.E. Informe Inédito.

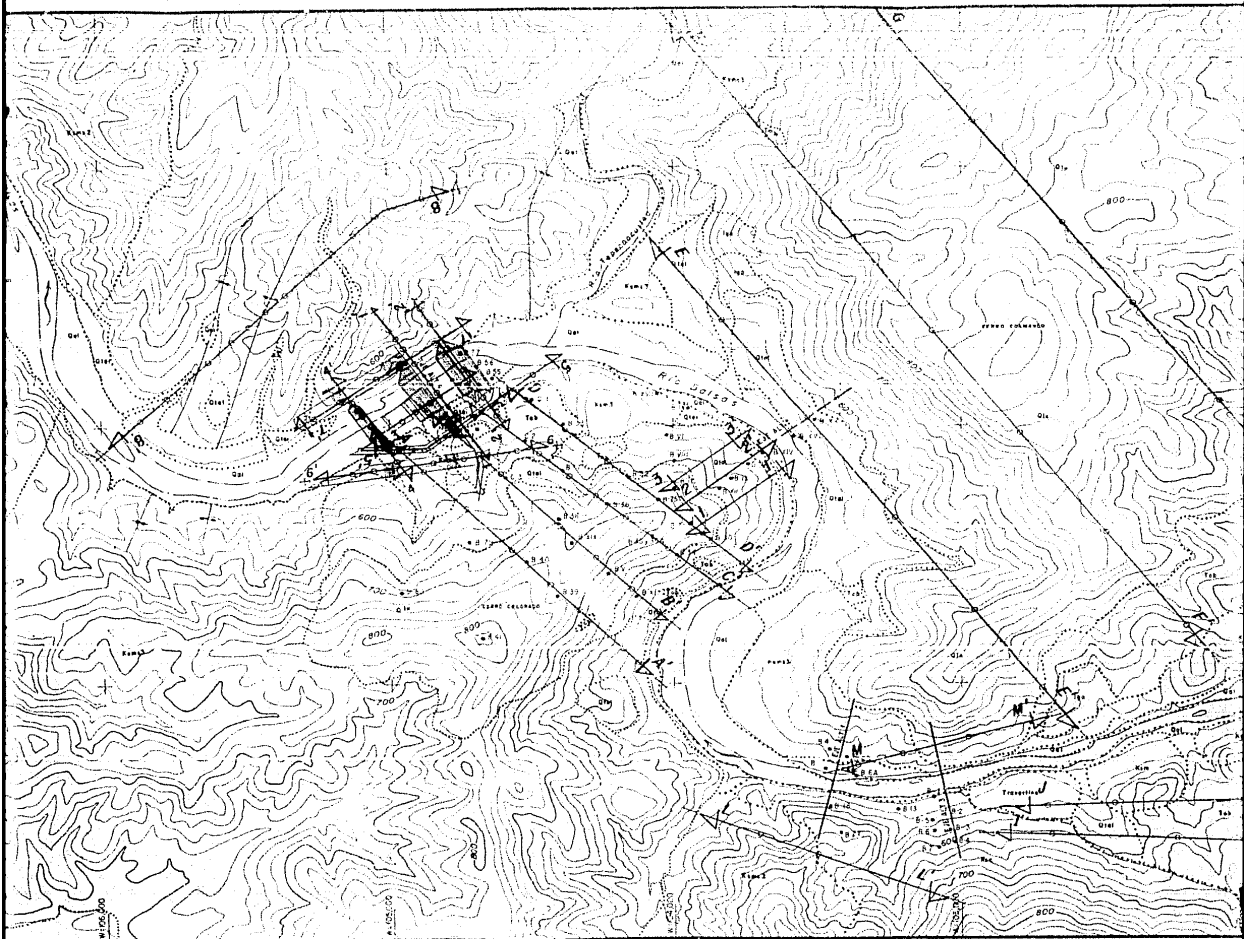
Raisz, E. 1959, Landforms of Mexico, Geography, Branch of the office of Naval Research. Cambridge, Mass. (Mapa).

Rijkswaterstaat, 1969, Standard Graphs for Resistivity Prospecting. European Association of Exploration Geophysicists, La Haya. The Netherlands.

Saucedo, Q.D., Barriga, Ll. P. Alcalá, A.J.A. y Delgado, V.M.A. 1983, Informe Geofísico Final P.H. San Juan Tetelcingo, Estado de Guerrero. C.F.E., Informe Inédito.

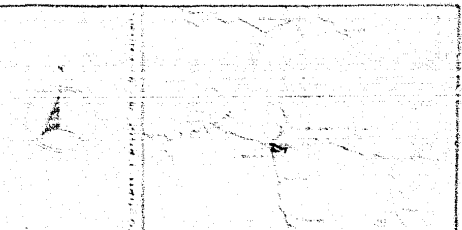
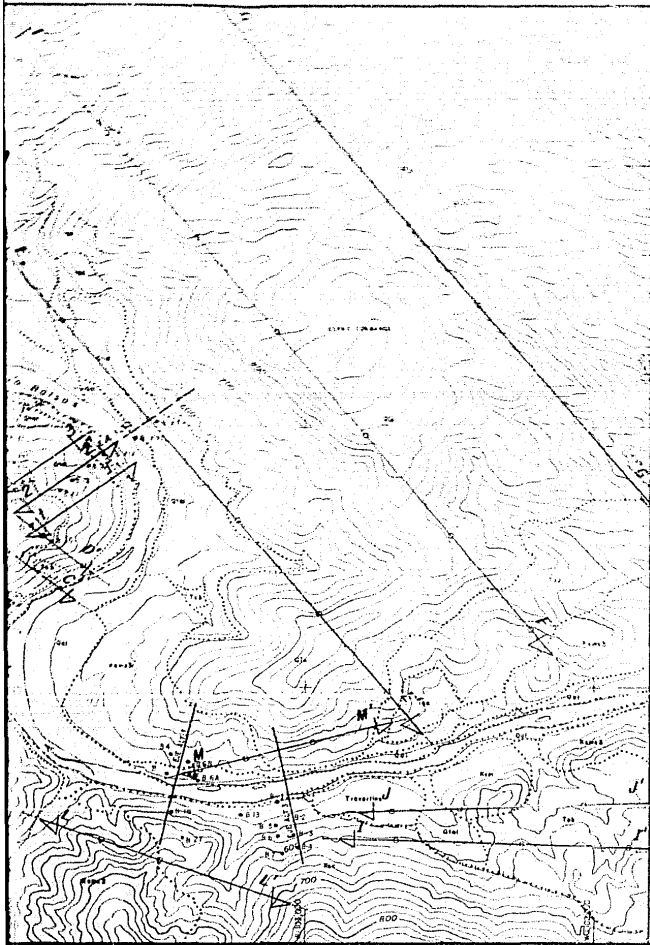
Vázquez, C.A. 1982, Programa "Vel Int", C.F.E. Manuscrito Inédito.





1:50,000





**ESTRATEGIA**

- 1. ...
- 2. ...
- 3. ...
- 4. ...
- 5. ...
- 6. ...
- 7. ...
- 8. ...
- 9. ...
- 10. ...
- 11. ...
- 12. ...
- 13. ...
- 14. ...
- 15. ...
- 16. ...
- 17. ...
- 18. ...
- 19. ...
- 20. ...
- 21. ...
- 22. ...
- 23. ...
- 24. ...
- 25. ...
- 26. ...
- 27. ...
- 28. ...
- 29. ...
- 30. ...
- 31. ...
- 32. ...
- 33. ...
- 34. ...
- 35. ...
- 36. ...
- 37. ...
- 38. ...
- 39. ...
- 40. ...
- 41. ...
- 42. ...
- 43. ...
- 44. ...
- 45. ...
- 46. ...
- 47. ...
- 48. ...
- 49. ...
- 50. ...

- 51. ...
- 52. ...
- 53. ...
- 54. ...
- 55. ...
- 56. ...
- 57. ...
- 58. ...
- 59. ...
- 60. ...
- 61. ...
- 62. ...
- 63. ...
- 64. ...
- 65. ...
- 66. ...
- 67. ...
- 68. ...
- 69. ...
- 70. ...
- 71. ...
- 72. ...
- 73. ...
- 74. ...
- 75. ...
- 76. ...
- 77. ...
- 78. ...
- 79. ...
- 80. ...
- 81. ...
- 82. ...
- 83. ...
- 84. ...
- 85. ...
- 86. ...
- 87. ...
- 88. ...
- 89. ...
- 90. ...
- 91. ...
- 92. ...
- 93. ...
- 94. ...
- 95. ...
- 96. ...
- 97. ...
- 98. ...
- 99. ...
- 100. ...

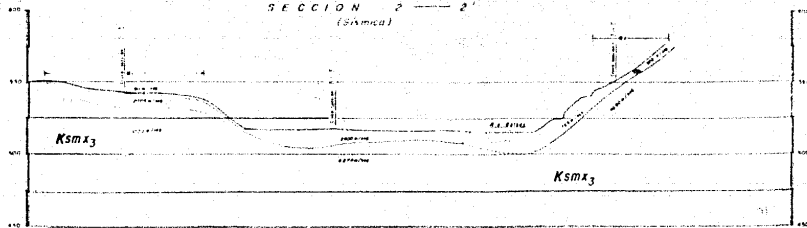
**SIMBOLOGIA**

● PUNTO DE ANILAJA	○ PUNTO DE VISUAL
— LINEA DE SECCION GEOLÓGICA	— LINEA DE SECCION DE AGUA
— LINEA DE SECCION HIDRICA	— LINEA DE SECCION DE ENERGIA
— LINEA DE SECCION DE ELECTRICIDAD	— LINEA DE SECCION DE TELECOMUNICACIONES
— LINEA DE SECCION DE TELEFONIA	— LINEA DE SECCION DE TELEVISION
— LINEA DE SECCION DE RADIO	— LINEA DE SECCION DE TELECOMUNICACIONES

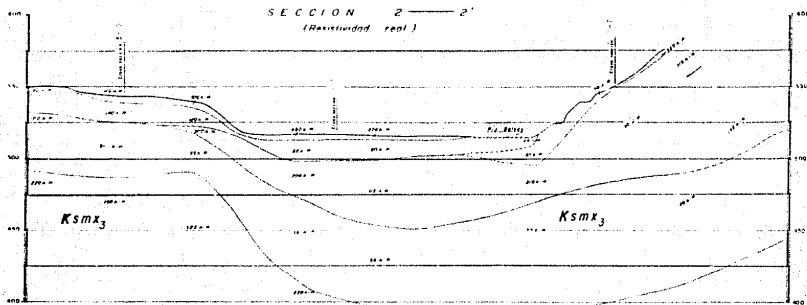


**U N A M**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**GEOLOGIA de la ZONA del PROYECTO**  
**HIDROELECTRICO**  
**"SAN JUAN TELEFONIA"**  
**EL DIB. PROFESIONAL**  
**PAUL HERRERA LLANOS**  
**BULEVAR D. ORTIZ FERRAZ**      **PLANO No. 1**

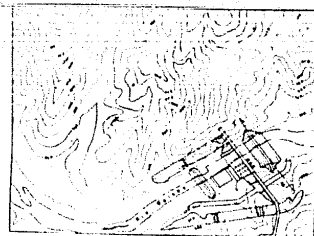
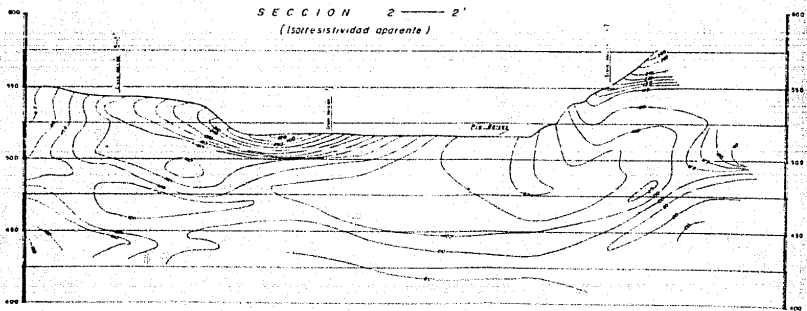
SECCION 2 — 2'  
(simulada)



SECCION 2 — 2'  
(Resistividad real)



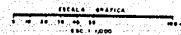
SECCION 2 — 2'  
(Isorresistividad aparente)



CRUCES DE LOCALIZACIÓN

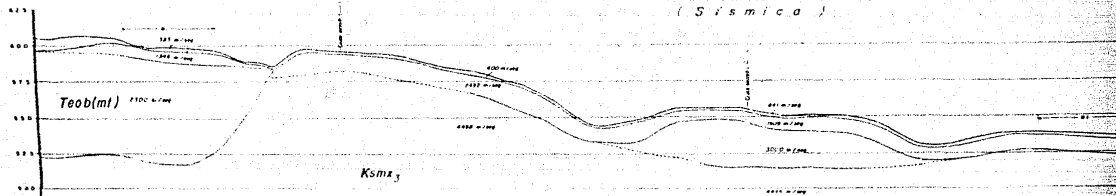
— SIMBOLOGÍA —

- Línea de Neutralidad aparente
  - Línea de Resistividad aparente
  - Isorresistividad aparente
  - Línea sobre para adición de datos futuros
- [Ksmx3]** Muestra Superficial de la Formación Muzila

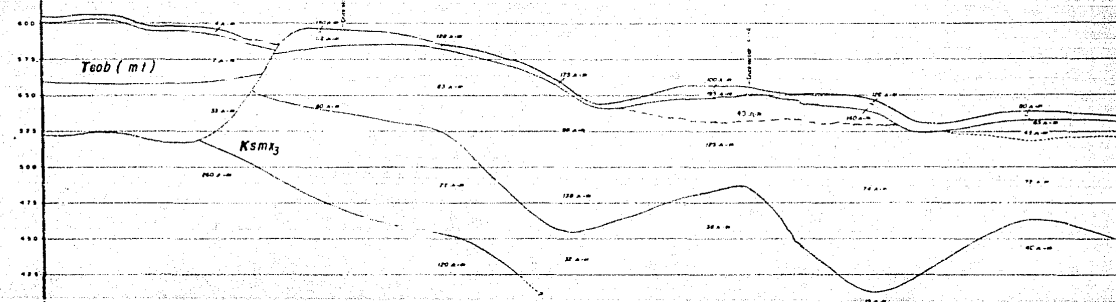


<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
P. H. SAN JUAN TETELCINGO, GRO.	
SECCION 2-2' ATAGUIA AGUIAS	
ARRIBA	ALTERNATIVA 4
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRIGA LLANOS	PLANO No. 3
GILBERTO O. OMOZCO FARARONI	

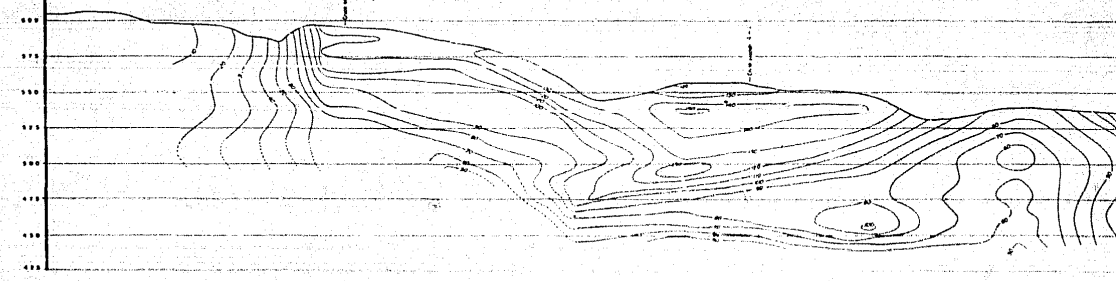
SECCION 6 — 6' M. I  
( Sismica )



SECCION 6 — 6' M. I  
( Resistividad real )

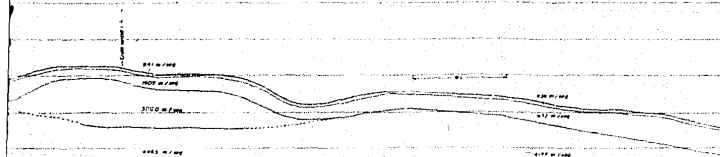


SECCION 6 — 6' M. I  
( resistividad aparente )

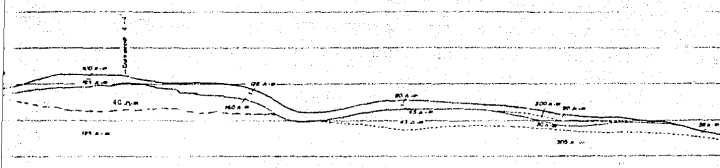




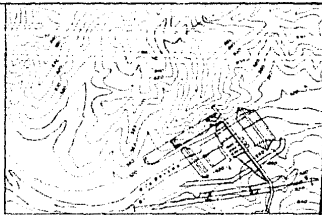
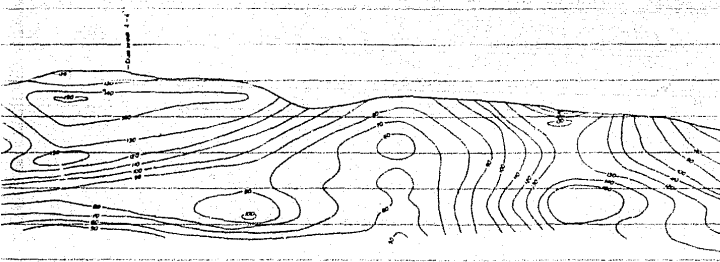
C I O N 6 — 6' M I  
( S i s m i c a )



C I O N 6 — 6' M I  $Ksm_3$   
( Resistividad real )



C I O N 6 — 6' M I  
resistividad aparente 1



CRUCIOS DE LOCALIZACION

S I M B O L O G I A

- 100 m — Perfil del subterráneo
- 200 m — Perfil del real
- 300 m — Perfil de resistividad aparente
- 400 m — Perfil de resistividad aparente
- 500 m — Perfil de resistividad aparente
- 600 m — Perfil de resistividad aparente
- 700 m — Perfil de resistividad aparente
- 800 m — Perfil de resistividad aparente
- 900 m — Perfil de resistividad aparente
- 1000 m — Perfil de resistividad aparente
- 1100 m — Perfil de resistividad aparente
- 1200 m — Perfil de resistividad aparente
- 1300 m — Perfil de resistividad aparente
- 1400 m — Perfil de resistividad aparente
- 1500 m — Perfil de resistividad aparente
- 1600 m — Perfil de resistividad aparente
- 1700 m — Perfil de resistividad aparente
- 1800 m — Perfil de resistividad aparente
- 1900 m — Perfil de resistividad aparente
- 2000 m — Perfil de resistividad aparente
- 2100 m — Perfil de resistividad aparente
- 2200 m — Perfil de resistividad aparente
- 2300 m — Perfil de resistividad aparente
- 2400 m — Perfil de resistividad aparente
- 2500 m — Perfil de resistividad aparente
- 2600 m — Perfil de resistividad aparente
- 2700 m — Perfil de resistividad aparente
- 2800 m — Perfil de resistividad aparente
- 2900 m — Perfil de resistividad aparente
- 3000 m — Perfil de resistividad aparente
- 3100 m — Perfil de resistividad aparente
- 3200 m — Perfil de resistividad aparente
- 3300 m — Perfil de resistividad aparente
- 3400 m — Perfil de resistividad aparente
- 3500 m — Perfil de resistividad aparente
- 3600 m — Perfil de resistividad aparente
- 3700 m — Perfil de resistividad aparente
- 3800 m — Perfil de resistividad aparente
- 3900 m — Perfil de resistividad aparente
- 4000 m — Perfil de resistividad aparente

— 1000 m — Perfil de resistividad aparente

— 1100 m — Perfil de resistividad aparente

— 1200 m — Perfil de resistividad aparente

— 1300 m — Perfil de resistividad aparente

— 1400 m — Perfil de resistividad aparente

— 1500 m — Perfil de resistividad aparente

— 1600 m — Perfil de resistividad aparente

— 1700 m — Perfil de resistividad aparente

— 1800 m — Perfil de resistividad aparente

— 1900 m — Perfil de resistividad aparente

— 2000 m — Perfil de resistividad aparente

— 2100 m — Perfil de resistividad aparente

— 2200 m — Perfil de resistividad aparente

— 2300 m — Perfil de resistividad aparente

— 2400 m — Perfil de resistividad aparente

— 2500 m — Perfil de resistividad aparente

— 2600 m — Perfil de resistividad aparente

— 2700 m — Perfil de resistividad aparente

— 2800 m — Perfil de resistividad aparente

— 2900 m — Perfil de resistividad aparente

— 3000 m — Perfil de resistividad aparente

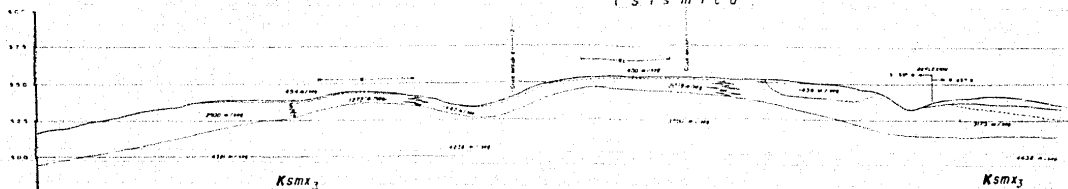
— 3100 m — Perfil de resistividad aparente

— 3200 m — Perfil de resistividad aparente

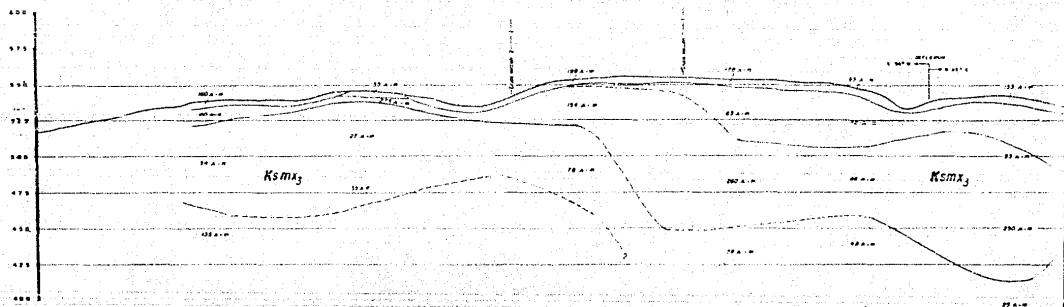
<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
P.R. SAN JUAN TETELCENO, G.R.O.	
SECCION 6-6' OBRA DE CONTROL	
DE EXCEDENCIAS ALTERNATIVA 4	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO BARRIGA LLANOS	PLANO No 6
SULLERBES O OROZCO FARARONI	

ESCALA GRAFICA 1:1,000

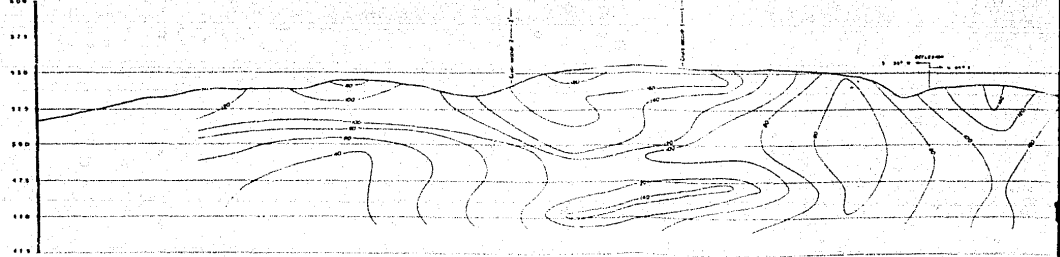
SECCION 5 — 5' M I  
(sismica)



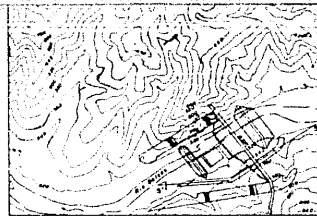
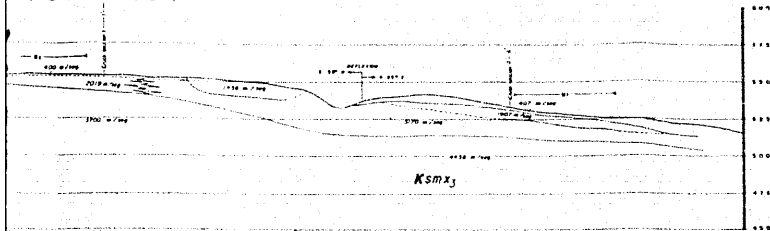
SECCION 5 — 5' M I  
( Resistividad real )



SECCION 5 — 5' M I  
( Isorresistividad aparente )

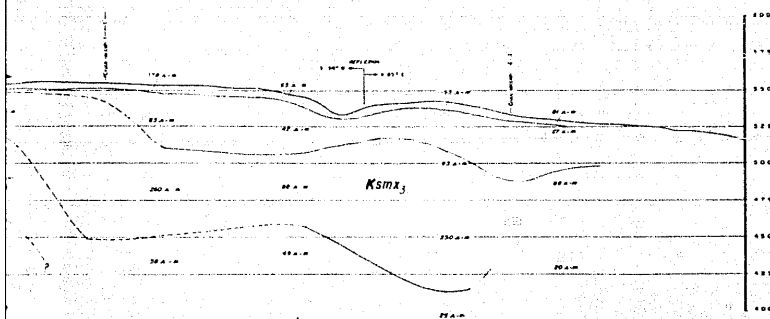


1 0 N 5 — 5' M I  
( S í s m i c a )

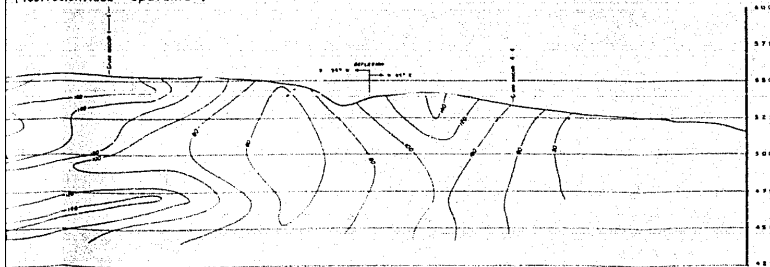


GRUPO DE LOCALIZACION

1 0 N 5 — 5' M I  
( Resistividad real )



1 0 N 5 — 5' M I  
( Isorresistividad aparente )



— SIMBOLOGIA —

- Topografía
- Resistividad real
- Curva de resistividad aparente
- Isorresistividad
- Perfil de elevación
- Límite superior del terreno
- Límite inferior del terreno

[Ksmx3] Muestra Superficie Formada Masas

ESCALA GRAFICA 1:1000

U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
SECCION 5-5' CANAL DE DESVIO ALTERNATIVA 4 "SAN JUAN TETELCINGO"	
T E S I S   P R O F E S I O N A L	
PAULO BARRERA LLANOS	PLANO No. 7

600

580

560

540

520

Socavón 21

Socavón 20

Bno. 84

Socavón 19

1564

1564

	0+000	0+020	0+040	0+060	0+080
1564	3700	3434	3434	3700	3700
3111	3207	3389	3421	3441	3441
3085	3289	3424	3362	3441	3441
3291	3372	3436	3321	3441	3441
3331	3480	3320	3435	3512	3512
3686	3700	3888	3888	3888	3888

	0+000	0+020	0+040	0+060	0+080
1564	3700	3333	3888	3700	3888
3073	3295	3370	3398	3517	3460
2906	3252	3419	3410	3533	3489
2796	3404	3506	3419	3519	3449
306	3382	3359	3482	3551	3418
3034	3377	3303	3501	3512	3398
3215	3314	3197	3528	3562	3386
3800	3800	3709	3709	3800	3700

0+000 0+020 0+040 0+060 0+080 0+100 0+120

0 R.O.D. 100% FROM R.O.D. TO 45%

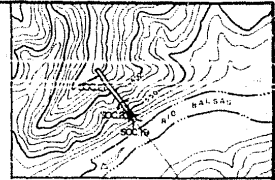
PROF. TOTAL 161.03 m.



Socavón 21

	0+000	0+020	0+040	0+060	0+080	0+100	0+120	0+140	0+160	0+180		
	3700	3434	3434	3700	3700	3700	3700	3229	3229	3700	3700	
	3297	3329	3421	3445	3466	3468	3454	3325	3406	3412	3388	
	3289	3424	3362	3471	3454	3470	3412	3411	3464	3414	3359	
	3372	3436	3321	3441	3481	3447	3406	3405	3464	3350	3295	
	3331	3480	3320	3435	3512	3443	3450	3463	3370	3401	3376	3295
	3888	3700	3888	3888	3868	3700	3700	3700	3700	3700	3700	
	3333	3888	3700	3888	3888	3700	3700	3700	3700	3700	3700	
	3370	3398	3217	3565	3460	3417	3392	3206	3170	3500	3500	
	3419	3410	3533	3388	3489	3540	3434	3265	3192	3500	3500	
	3506	3418	3518	3477	3449	3473	3410	3134	3228	3500	3500	
	3359	3482	3521	3410	3521	3470	3339	3212	3002	3500	3500	
	3303	3501	3512	3472	3398	3357	3451	3247	3002	3500	3500	
	3197	3528	3562	3567	3386	3360	3375	3367	3070	3500	3500	
	3708	3708	3800	3700	3700	3700	3800	3800	3800	3800	3800	

0+060      0+080      0+100      0+120      0+140      0+160,m      0+180



CROQUIS DE LOCALIZACION

	0+060		0+080		0+100	
00	3700	3700	3529	3529	3700	3700
66	3468	3454	3325	3406	3412	3386
94	3470	3412	3411	3464	3414	3354
81	3447	3436	3405	3464	3350	3295
3	3450	3463	3370	3401	3376	3295
7	3700	3700	3700	3700	3700	3700




	0+120		0+140	
700	3700	3700	3700	3700
417	3392	3306	3170	3500
3540	3434	3265	3192	3500
3473	3410	3134	3226	3500
3470	3339	3272	3002	3500
3357	3451	3247	3002	3500
3380	3375	3367	3070	3500
3700	3800	3800	3800	3800

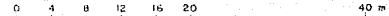
  

	0+140	0+160 m	0+180	0+200
--	-------	---------	-------	-------

SIMBOLOGIA

MIEMBRO SUPERIOR DE LA FORMACION MEXICALA (Areniscos) Ks ms 3

-  ROCA FRACTURADA DE MALA CALIDAD VELOCIDADES 1000-2500 m/s
-  ROCA POCAMENTE FRACTURADA DE REGULAR CALIDAD VELOCIDADES 2500-3200 m/s
-  ROCA DE BUENA CALIDAD VELOCIDADES > 3200 m/s



ESCALA GRAFICA 1:400

UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA

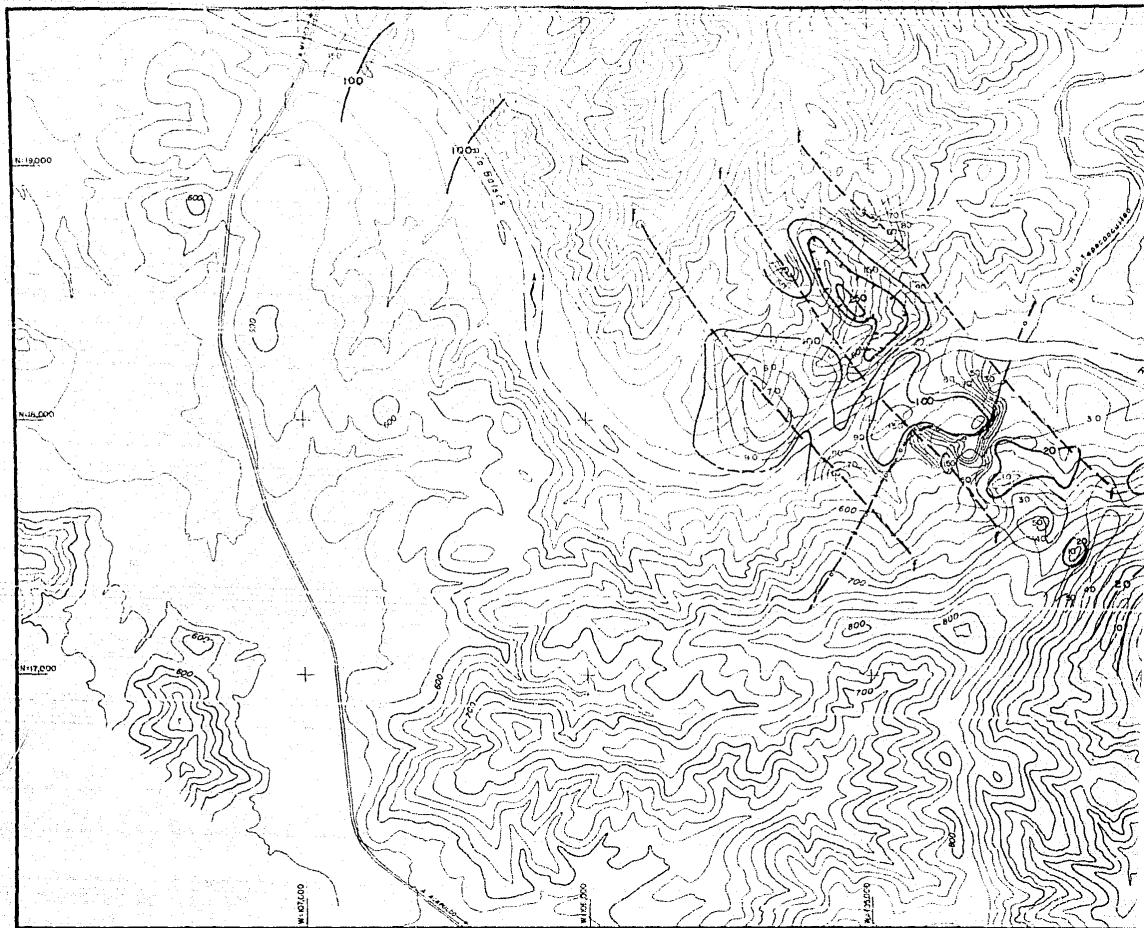
PROYECTO HIDROELECTRICO SAN JUAN TETELCINGO

TOMOGRAFIA SISMICA ENTRE SOCAVONES MARGEN DERECHA

TESIS PROFESIONAL

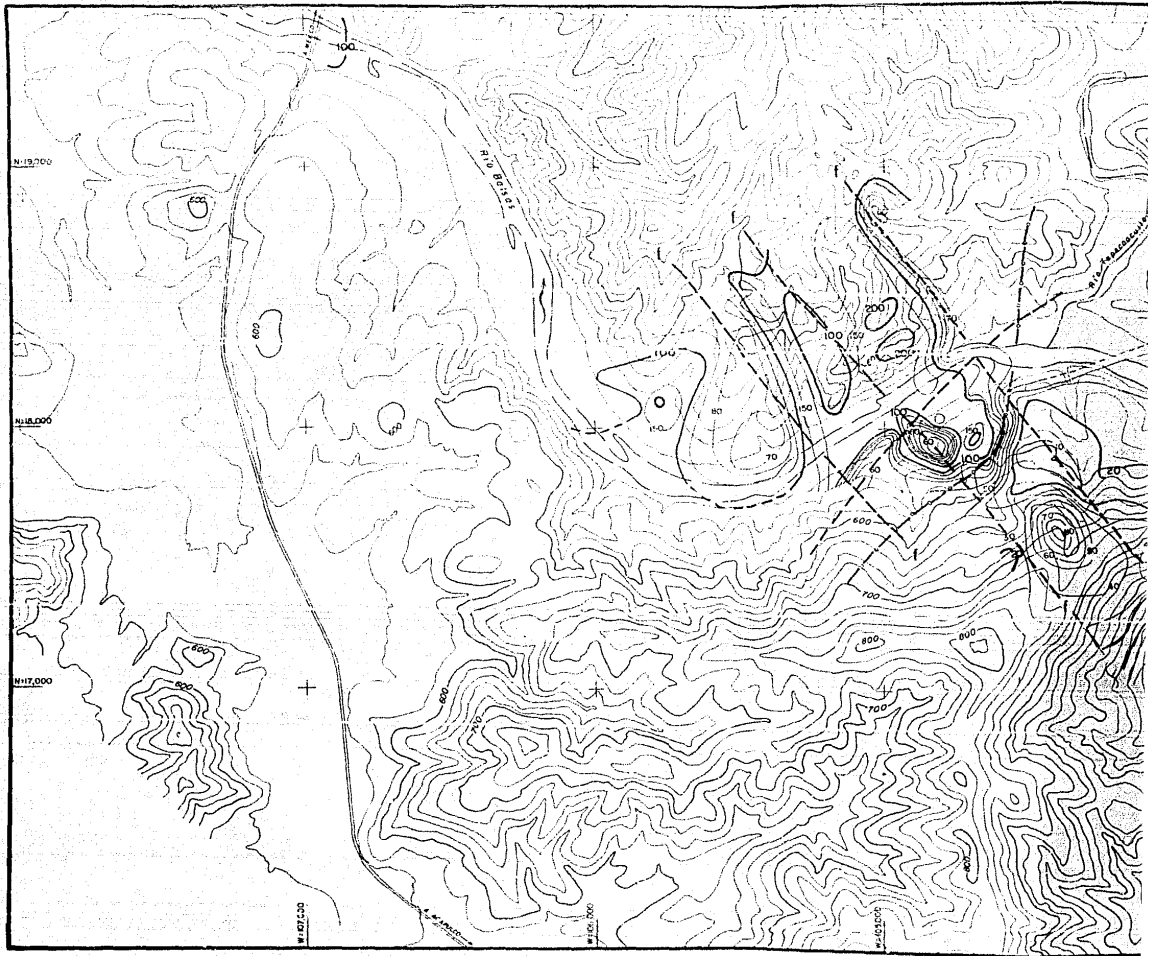
PABLO BARRIGA LLANOS  
GUILLERMO O. OROZCO FARARONI

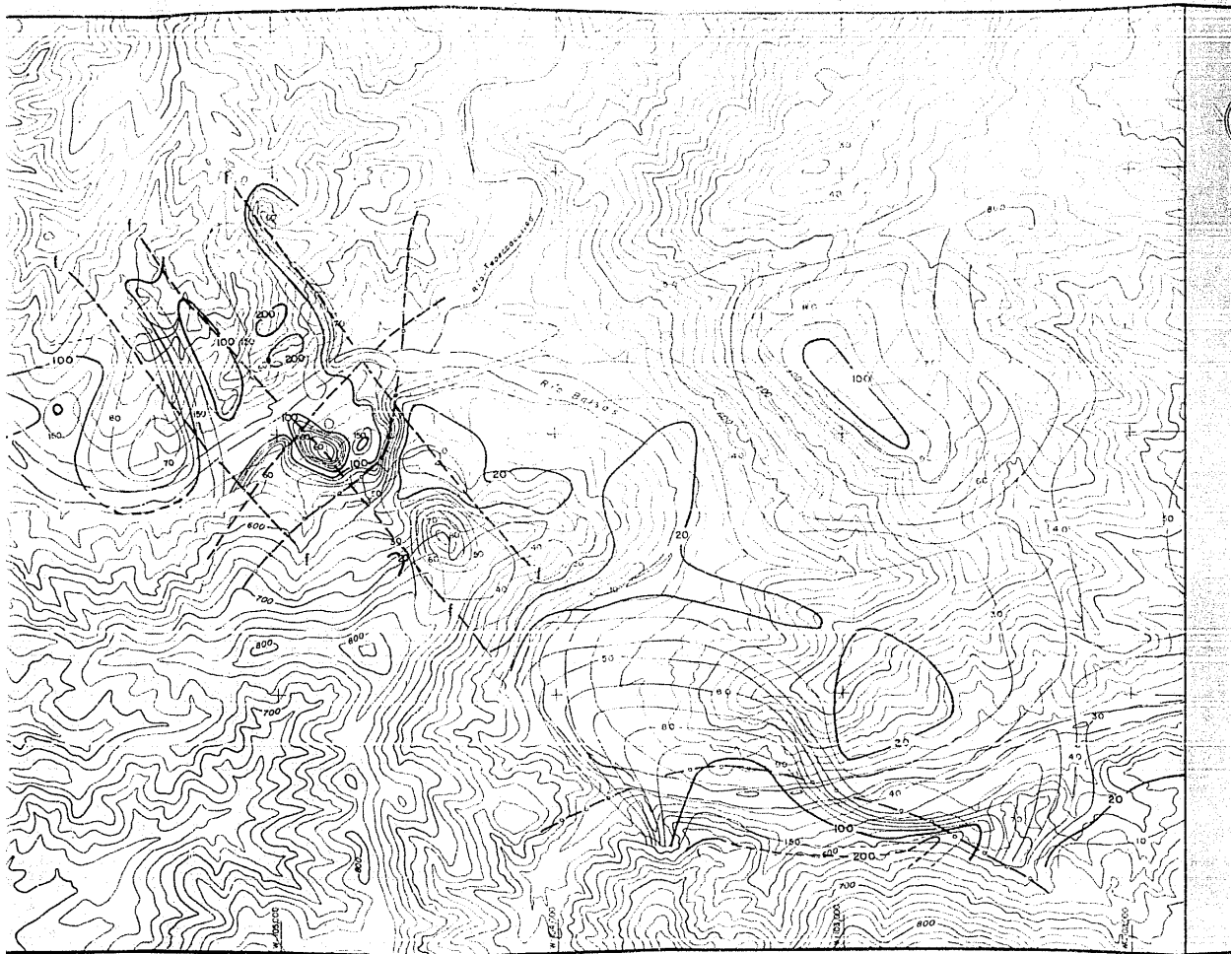
PLA NO 11

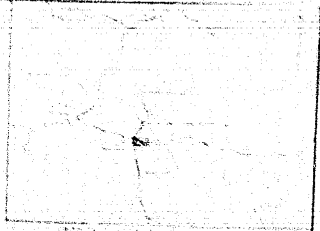
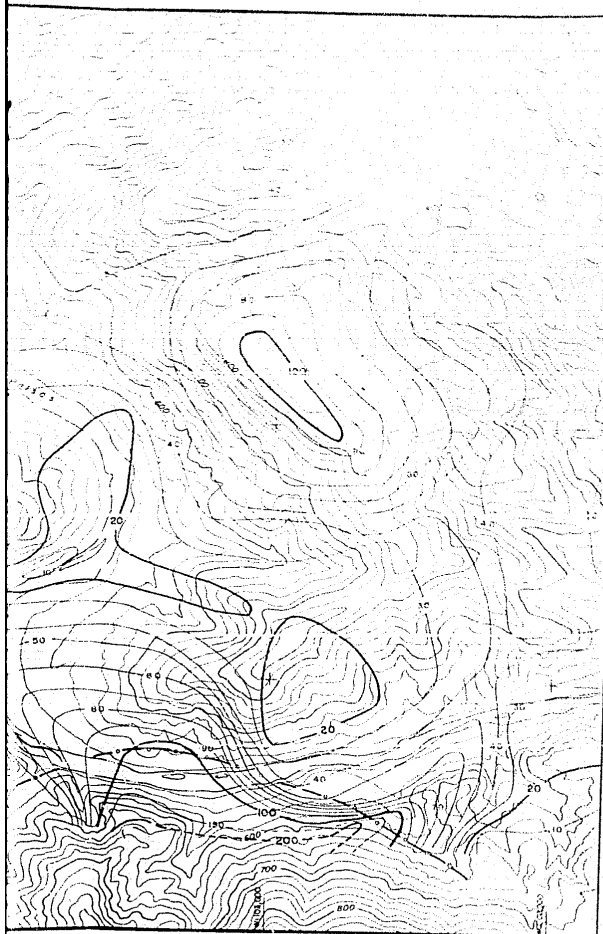






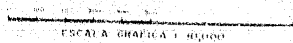






**SIMBOLOGIA**

- Línea gruesa de contorno del terreno  
 - Línea fina de contorno del terreno  
 - Línea de contorno que indica el terreno

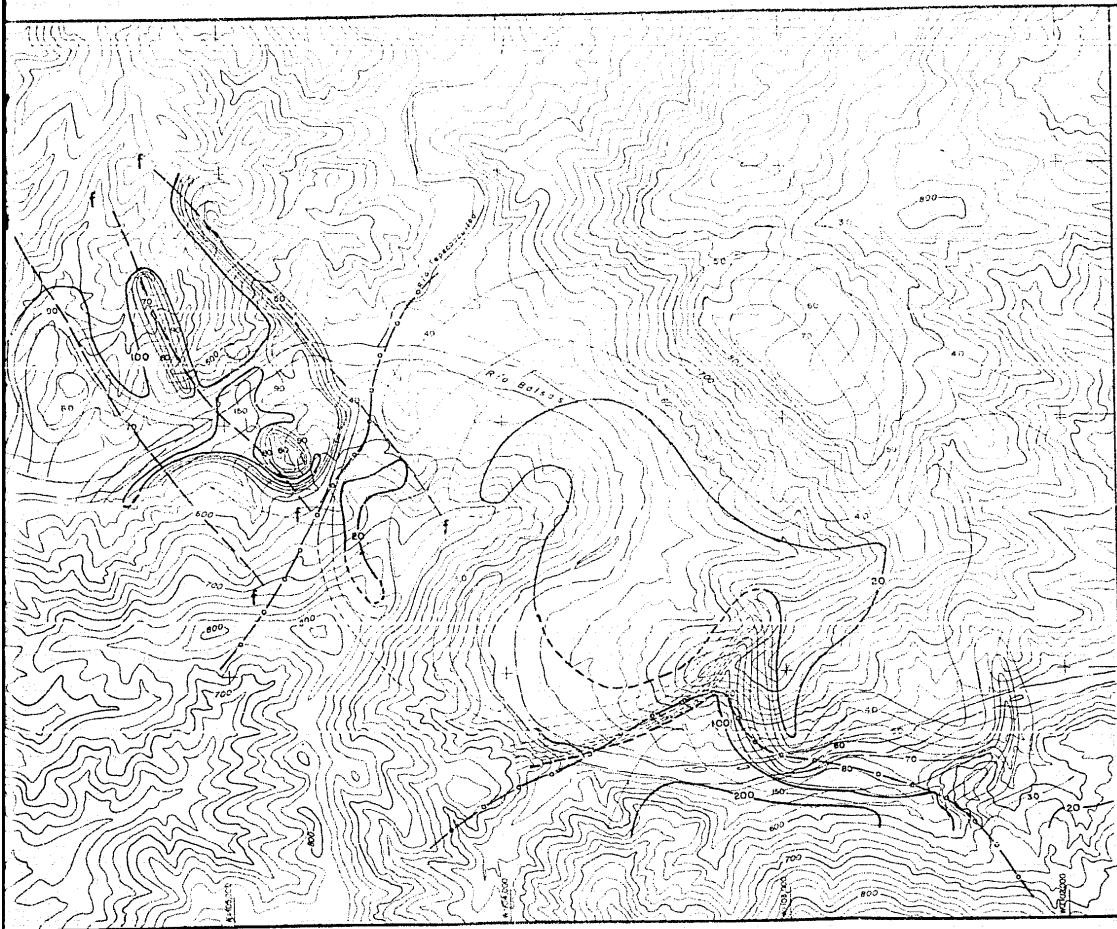


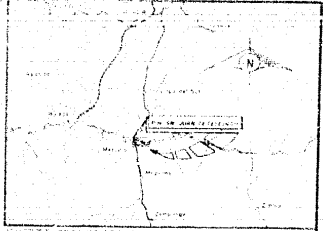
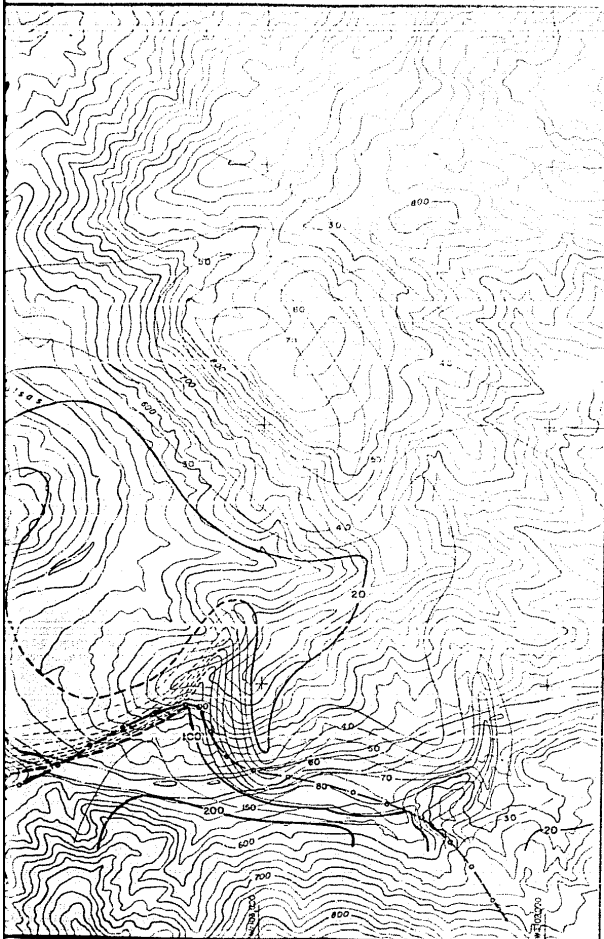
ESCALA GRAFICA 1:50,000

U N A M  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE AMBIENTE Y  
 COM. AMBIENTALES Y E. INDUSTRIAL  
 AÑO 2011  
**TESIS PROFESIONAL**  
 PROYECTO DE...  
 TITULO...









SIMBOLOGIA	
	Curva de igual resistividad aparente
	Fractura inferida
	Contacto geológico inferido

0 100 200 300 400 500 600  
 ESCALA GRAFICA 1 10,000

<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
RESISTIVIDADES APARENTES CON ABERTURAS ELECTRODICAS 25 / 2 ± 300m.	
TESIS PROFESIONAL	
PABLO HERRERA LLANOS UNOZUO PARRALINI	