

2 Ejen. 3



# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

## IMPLICACIONES GEOTECNICAS DE LOS ESTUDIOS GEOFISICOS DE LAS ALTERNATIVAS 1 Y 3 DEL PROYECTO DE PRESA LA ZURDA, JAL.

T E S I S  
Que para obtener el Título de:  
INGENIERO GEOFISICO  
p r e s e n t a  
**SERGIO BENIGNO PAREDES**



México, D. F.

1994

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



## **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

AUTÓNOMA DE

JALISCO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIRECCION

60-I-067

SR. SERGIO BENIGNO PAREDES

Presente

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

IMPPLICACIONES GEOTECNICAS DE LOS ESTUDIOS GEOFISICOS DE LAS ALTERNATIVAS 1 Y 3 DEL PROYECTO DE PRESA "LA ZURDA", JAL.

- I INTRODUCCION
  - II GEOLOGIA
  - III GEOFISICA
  - IV PRUEBAS DE LABORATORIO
  - V ZONIFICACION GEOTECNICA
  - VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA

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

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

Atentamente

"POR MI RAZA HABARA EL ESPIRITU"

Universitaria, a 21 de septiembre de 1992

EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\EGLM\gtg

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la madre naturaleza y al padre tiempo,**  
por brindarme la familia en la que nací.

**A mi madre**  
por su nobleza, sus consejos,  
atenciones y la vida misma.

**A mi padre**  
por enseñarme el valor de la vida,  
por apoyarme y corregirme en ella.

**A mi hermana**  
por su ejemplo y motivación.

**A mi sobrino**  
por enseñarme la ternura y dulzura de la vida.

**A mis profesores**  
que me formaron académicamente a lo largo de mis estudios,  
que me dieron su conocimiento, comprensión, consejo y  
voz de aliento en los momentos de flaqueza.

**A mis compañeros de trabajo y directivos**  
por compartir y engrandecer nuestro conocimiento en  
aras de la superación personal y profesional,  
por su confianza y su apoyo para la elaboración de este trabajo.

**A mis amigos**  
con los que he compartido momentos agradables y difíciles,  
que nos han dado unión y cariño de hermanos.

**Y muy especialmente a ti Mitzi**  
por tu amor y comprensión.

**Sergio Benigno Paredes**

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCION	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO	3
2.	GEOLOGIA	5
2.1	GEOLOGIA REGIONAL	5
2.2	GEOLOGIA DEL CAÑON DE LA ZURDA	6
2.2.1	ESTRATIGRAFIA	7
2.2.2	GEOLOGIA ESTRUCTURAL	12
2.3	GEOLOGIA DEL SUBSUELO	13
2.3.1	PERFORACIONES EXPLORATORIAS	13
2.3.2	PRUEBAS DE PERMEABILIDAD	18
3.	GEOFISICA	22
3.1	METODOLOGIA	23
3.1.1	GEOFISICA SUPERFICIAL	23
3.1.1.1	Geosísmica de Refracción	23
3.1.1.2	Geoeléctrica	27
3.1.2	GEOFISICA DE POZOS	30
3.1.2.1	Método de Up-Hole	30
3.1.2.2	Método de Cross-Hole	34
3.1.3	Parámetros elásticos dinámicos y estáticos	37
3.2	RESULTADOS	38
3.2.1	EJE 1	39
3.2.2	EJE 3	44

4.	PRUEBAS DE LABORATORIO	51
5.	GEOTECNIA	54
5.1	ZONIFICACION GEOTECNICA	54
5.2	EVALUACION DE LAS ALTERNATIVAS 1 Y 3	58
5.2.1	ALTERNATIVA 1 (EJE 1)	58
5.2.2	ALTERNATIVA 3 (EJE 3)	64
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
6.1	CONCLUSIONES	70
6.2	RECOMENDACIONES	72

## INDICE DE FIGURAS

1. Localización del Cañón La Zurda
2. Localización de las Alternativas 1 y 3
3. Dispositivo de Exploración de Geosísmica de Refracción.
4. Dispositivo de Exploración de Geoeléctrica
5. Dispositivo de Exploración mediante el Método de Up-Hole
6. Dispositivo de Exploración mediante el Método de Cross-Hole
7. Tomografía sísmica
8. Gráfica de Shneider
9. Zonificación Geotécnica del Eje 1.
10. Zonificación Geotécnica del Eje 3
11. Tratamiento al macizo rocoso en el Eje 1
12. Tratamiento al macizo rocoso en el Eje 3
13. Configuración de espesores de limpia en el Eje 1
14. Configuración de espesores de limpia en el Eje 3

## INDICE DE PLANOS

1. Plano geológico del Cañón La Zurda.
2. Plano geológico y localización de exploraciones en el Eje 1.
3. Perfil geológico del Eje 1.
4. Plano geológico y localización de exploraciones en el Eje 3
5. Perfil geológico del Eje 3.
6. Perfiles geosísmicos Eje 1
7. Perfiles geosísmicos Eje 3
8. Exploración por Up-Hole y Cross-Hole Eje 1
9. Perfiles geosísmicos Eje 1
10. Perfiles geoelectricos Eje 3
11. Exploración por Up-Hole y Cross-Hole Eje 3

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES

*Actualmente la ciudad de Guadalajara cuenta con un abastecimiento suficiente de agua, tanto para uso potable como industrial; este suministro se obtiene, en parte, por la explotación del acuífero ubicado en el Valle Tesisdán - Atemajac y otra parte proviene del Lago de Chapala.*

*Si se toma en cuenta el crecimiento demográfico y la expansión industrial que va a tener la ciudad y área metropolitana de Guadalajara, para el año 2010 se prevee un déficit en el abastecimiento de agua, por lo que será necesario recurrir a fuentes más lejanas, a fin de no sobreexplotar el acuífero del valle de Tesisdán - Atemajac, actualmente en equilibrio, así como el Lago de Chapala.*

*Una de las principales alternativas para el suministro de agua es el aprovechamiento del Río Verde, potencialmente utilizable mediante la construcción de una presa en la zona del Cañón de La Zurda, que podría almacenar un volúmen de agua de aproximadamente 750 millones de metros cúbicos y derivar 10 metros cúbicos por segundo. La conducción a la zona metropolitana de Guadalajara se realizaría por un acueducto de aproximadamente 90km de longitud.*

*El cañón de "La Zurda" ha sido elegido por estar ubicado a una altura que permite la conducción del agua por gravedad a Guadalajara y por que cuenta con las condiciones topográficas y geológicas adecuadas para la construcción de una corina, asimismo por presentar una amplia zona de embalse.*

*Sin embargo, las rocas que se presentan en el cañón plantean problemas geotécnicos para la construcción y operación de la presa, ya que está formado por rocas blandas situadas en el límite permisible para la construcción de grandes presas.*

*Este sitio se ha estudiado desde el año de 1949 e incluso se empezaron a realizar trabajos de regularización y construcción del vertedor de demasas y túnel de desvío a fines de los años cincuenta; pero, al parecer, por motivos económicos se suspendieron las obras de construcción.*

*Desde el primer informe técnico hasta la fecha, se han estudiado cinco alternativas de ejes en la zona del cañón, y se ha planteado un modelo estratigráfico tanto del vaso como del cañón.*

*Estos estudios definieron 3 unidades litológicas como conformantes del cañón. Presentándose una unidad andesítica en la cima (UI), misma que descansa sobre una unidad estratificada (UII), la cual a su vez sobreyacen sobre una toba masiva (UIII), que es la roca más antigua en la zona de las boquillas.*

*Las rocas blandas del cañón de La Zurda y del área de embalse plantearon serias interrogantes sobre su petrogénesis y distribución, por un lado, y por otro sobre su comportamiento geomecánico.*

*Asimismo, las unidades II y III plantearon problemas primordiales sobre su comportamiento al saturarse. A la Unidad II se le atribuyó un fuerte contenido de arcillas expansivas, mientras que a la Unidad III se le consideró con grandes posibilidades para manifestar tubificación con los consiguientes problemas de estabilidad en la cortina.*

*La campaña de exploración, realizada entre los años de 1985 y 1986, se avocó principalmente a evaluar estos dos problemas señalados, así como a definir un modelo petrológico del área del cañón y del embalse, a conocer la estabilidad de las laderas del cañón y, además, a efectuar una evaluación de las diferentes alternativas.*

*En el informe que integra los resultados obtenidos se llegó a la conclusión de que las alternativas de eje 2, 4 y 5 presentan desventajas sustanciales, respecto a los ejes 1 y 3, para la construcción de la cortina. Sin embargo, se recomendó ampliar los estudios en los dos últimos ejes para, de esta manera, tener un mayor conocimiento de los mismos.*

## **1.2 OBJETIVOS**

*El objetivo principal del estudio es definir con detalle las unidades litológicas que aparecen en cada una de las alternativas, Ejes 1 y 3, atendiendo a su distribución y características geotécnicas; estableciendo para cada unidad, sus parámetros elásticos y permeabilidad. De manera que sea posible definir, en cada alternativa, espesores de limpia, tratamientos al macizo rocoso y conclusiones sobre la factibilidad del proyecto.*

*Así, conociéndolas, aunado al factor geométrico de la cortina, será posible discriminar entre las dos alternativas y definir el sitio más adecuado para desplazar la cortina.*

*Para lo anterior se establecieron objetivos particulares, que son similares en cada alternativa, de acuerdo a cada uno de los tipos de exploración a realizar: perforación con recuperación de muestras y pruebas de laboratorio en núcleos, pruebas de permeabilidad en perforaciones, sondeos eléctricos verticales, sísmica de refracción superficial y sísmica en pozos por los métodos de Cross-Hole y Up-Hole.*

- *El objetivo de las perforaciones con recuperación continua de muestras es detallar el modelo petrológico preexistente en, cada alternativa. Las perforaciones, asimismo, se aprovecharon para estudios de geofísica y pruebas de permeabilidad.*
- *Con el objetivo de detallar el conocimiento de las propiedades geomecánicas, y sus variaciones, en la unidad III se plantearon estudios de laboratorio en los núcleos recuperados. Estos estudios consistieron en obtención de peso específico en seco y saturado, resistencia a la compresión simple y obtención de módulos de elasticidad en terminos dinámicos y estáticos en laboratorio.*
- *Dado que se han encontrado ambigüedades en las pruebas de permeabilidad realizadas en la etapa previa de exploración, y con el objetivo de conocer posibles variaciones horizontales y verticales en la permeabilidad de las tobas, se realizaron pruebas de tipo Lugeon y Lefranc en tramos de 3 y 5m, ambas pruebas en cada tramo, a todo lo largo de las perforaciones.*
- *En este estudio el objetivo de la exploración geoelectrica con el método de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), fue ayudar a la caracterización geotécnica del macizo rocoso y en la definición de espesores de limpiu (compuesta por acarreos, suelos, depósitos de talud y roca decomprimida) y zonas con mayor contenido de materiales finos en la unidad III.*
- *El objetivo de la sísmica de refracción en sus tres modalidades practicadas (Superficial, Cross-Hole y Up-Hole) fue definir un perfil continuo del contacto de la roca sana en el subsuelo. Asimismo, de los estudios de sísmica se pretendió evaluar cuidadosamente la calidad geomecánica del macizo rocoso en función del grado de compactidad y fisuramiento.*

### 1.3 LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO

*El Cañón de La Zurda fue formado por el Río Verde en la porción nororiental del Estado de Jalisco. Dista unos 25km, hacia el noroeste, de la población Valle de Guadalupe y unos 5km, hacia el norte, de la población de Villa Obregón (Figura 1).*

*Las coordenadas geográficas del Cañón La Zurda en la alternativa designada Eje 1, tomadas de la cartu topográfica F13-D47, escala 1:50,000, publicada por el INEGI, son:*

*21° 12' de Latitud Norte y Oeste*

*102° 41' de Longitud*

*La alternativa de Eje 1 se localiza a la salida del cañón, mientras que la alternativa de Eje 3 se ubica en la porción central del estrechamiento, a unos 1500m aguas arriba del Eje 1 (figura 2).*

*El acceso a la zona del cañón, a partir de la Ciudad de Guadalajara, es como sigue, se toma la Carretera Federal No. 80 (tramo Guadalajara-San Luis Potosí) recorriéndola hacia el Este, 5km después del poblado del Valle de Guadalupe se toma, una carretera pavimentada estatal hacia el poniente, que tras de recorrerla por 28km conduce a la población de Villa Obregón. Al llegar a este último punto se toma hacia el Norte un camino de terracería, transitable en todo tiempo, que conduce hacia la población de Temacapulín; después de recorrer 7km se llega al Río Verde por su margen izquierda. De aquí se toma un camino transtable en tiempo de secas que conduce al Eje 1 tras de recorrer unos 800m hacia aguas arriba.*

*El acceso al Eje 3, a partir del Eje 1, sólo es posible por veredas ubicadas en ambas márgenes del río.*

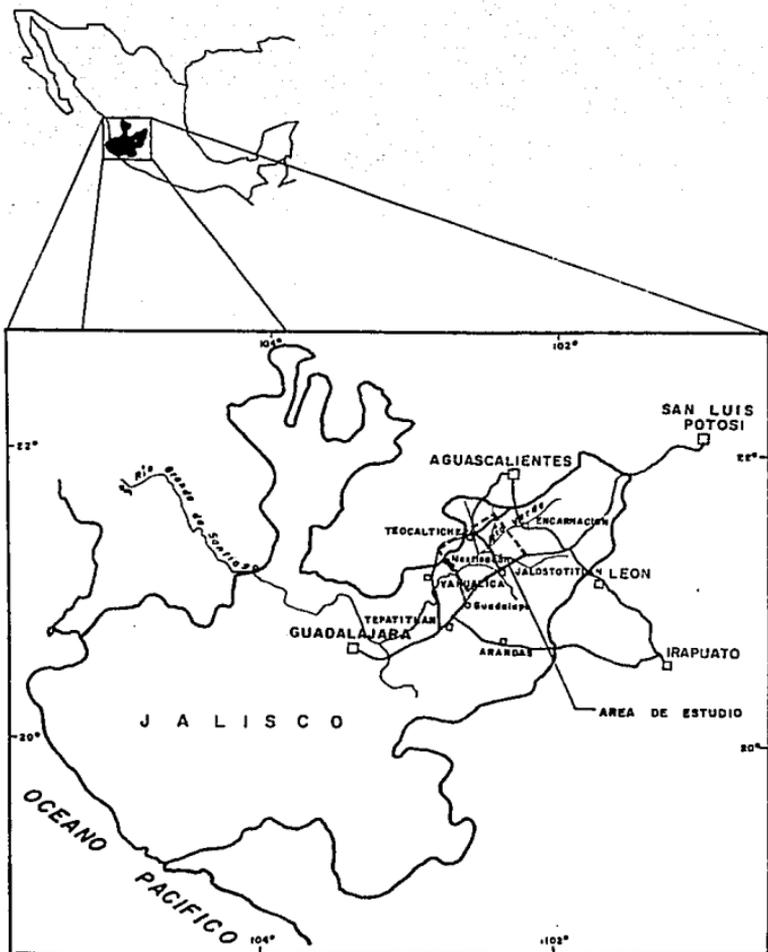


FIGURA NUMERO 1 ESQUEMA DE LOCALIZACION

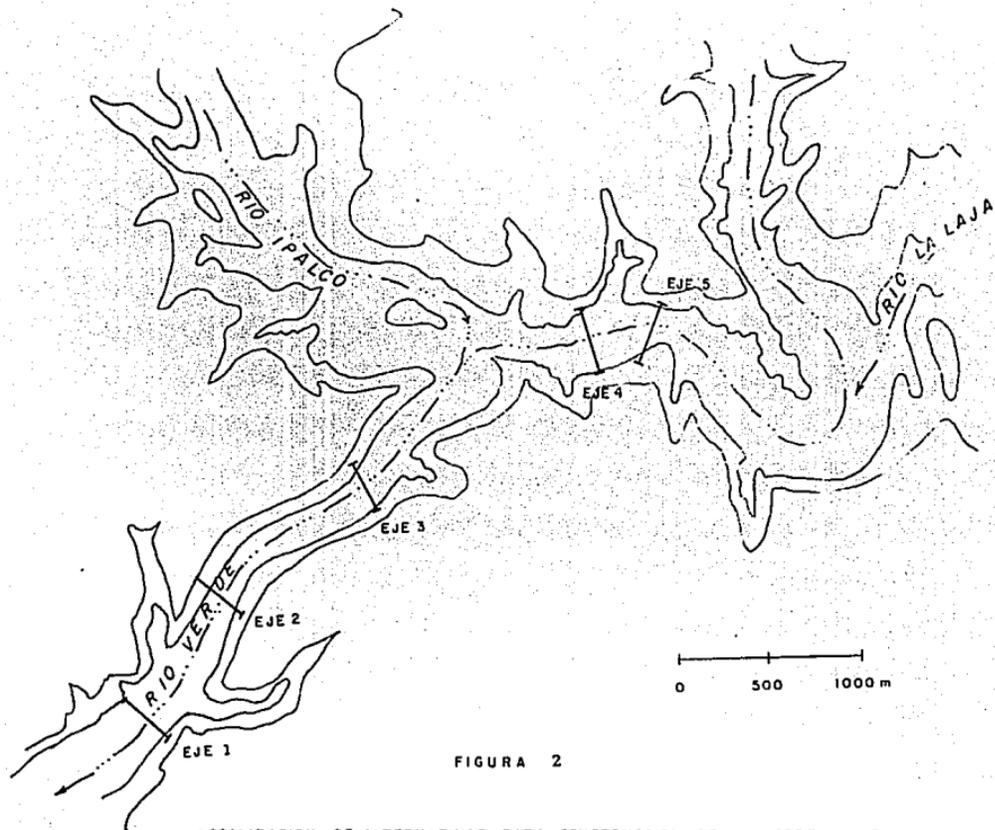


FIGURA 2

LOCALIZACION DE ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCION DE LA CORTINA DE LA  
"PRESA LA ZURDA"

## 2. GEOLOGIA

### 2.1 GEOLOGIA REGIONAL

La zona del Cañón La Zurda se ubica en la porción meridional de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, dentro de la Subprovincia de Mesetas y Cuencas (Raisz, 1964); pero en los límites con las provincias fisiográficas de la Mesa Central hacia el oriente y del Eje Neovolcánico hacia el sur, por lo mismo presenta características geológicas de las tres provincias y se le ha considerado como una zona de transición.

Esta zona forma parte de uno de los grandes valles formados tectónicamente en la Sierra Madre Occidental, (Graben de Aguascalientes), con orientación NNE-SSW, donde se depositaron sedimentos lacustres a manera de rellenos. Las rocas sedimentarias se encuentran dispuestas horizontalmente y no se han observado estructuras plegadas. Sobre los depósitos lacustres afloran mesetas de basalto de edad Mioceno Tardío.

Regionalmente, hacia el noreste del cañón, el área se caracteriza por presentar una morfología de lomas redondeadas con suaves pendientes y amplias terrazas aluviales a los lados del Río Verde y tributarios. Dichas características se presentan hasta la zona de Apánico, a partir de donde el Río Verde presenta un estrechamiento parcial con laderas de mayor inclinación y terrazas aluviales reducidas. El cañón de La Zurda contrasta fisiográficamente con las zonas de aguas arriba, al formarse un estrechamiento de unos 300m de amplitud a lo largo de unos 5km, con muy fuertes pendientes. Este encañonamiento se produjo por una resistencia diferencial a la erosión de las unidades litológicas, así las unidades blandas, formadas por sedimentos lacustres o híbridos (tobáceo-lacustre), son fácilmente erosionables y removibles, mientras que los basaltos que afloran en la porción superior son muy resistentes y propiciaron la formación del cañón.

La historia geológica en el área es relativamente sencilla. Regionalmente, las ignimbritas de la Sierra Madre Occidental de edad oligoceno mioceno constituyen la roca más antigua, estas ignimbritas sufrieron un fallamiento distensivo formando bloques a manera de horst y grabens, alineados burdamente NE-SW. Posteriormente las fosas, o graben, conformaron grandes lagos que trajeron como consecuencia el azolve paulatino de las depresiones con materiales fluvio-lacustres (arcillas, limos, arenas y conglomerados, así como calizas y pedernales de agua dulce) fuertemente contaminados con materiales volcánicos tobáceos o bien se conformaban por derrames de lavas basálticas-andesíticas que flutan de conos volcánicos o de fisuras. Posteriormente por algún fenómeno de rejuvenecimiento y erosión el drenaje del área se ordenó, canalizándose hacia el sur-suroeste por medio del Río Verde y afluentes.

Las fallas más importantes son de tipo normal y orientación NE-SW, en los flancos de la estructura y E-W en el borde sur de la misma. En la región no se evidencia fallamiento de tipo inverso. Las unidades lacustres y fluvio-lacustres no manifiestan fallas regionales, acaso pequeñas fallas normales por reacomodos gravitacionales, con salto de unos cuantos metros; sin embargo, están afectadas por fracturamiento en dos direcciones principales, NW-SE y WNW-ESE, direcciones que reconocen los escurrimientos principales, incluido el Río Verde; por otro lado, la estratificación es prácticamente horizontal, con algunos basculamientos de mínima intensidad, de máximo 10 grados hacia el SW.

## 2.2 GEOLOGIA DEL CAÑON DE LA ZURDA

El Cañón de La Zurda tiene una longitud aproximada de cinco kilómetros, amplitud que varía de 150 a 250m y alcanza profundidades de 100m aproximadamente, en él afloran cuatro unidades litológicas con características geológico-geotécnicas diferentes, las cuales en etapas previas de exploración se han denominado como Unidad Masiva (U111), Unidad Estratificada (U11), Unidad Andesítica (U1) y Unidad Superior Vulcanoclástica (Us). Asimismo, también se presentan materiales recientes que se identificaron como terrazas aluviales (Qte), o material de talud (Qt) y materiales de acarreo (Qac). La nomenclatura de estas unidades es la misma que la del vaso y la de los estudios anteriores.

Las rocas más antiguas de la región son ignimbritas de edad Oligoceno - Mioceno, mismas que se encuentran afectadas por fallamiento regional distensivo. Afloran unos 1500 aguas abajo del Eje 1, por la margen izquierda, fuera de la zona del cañón.

Sobre dichas ignimbritas descansa, en discordancia erosional la unidad masiva, aunque el contacto se llega a observar únicamente a unos 10kms aguas abajo de la zona encajonada.

La Unidad Estratificada descansa concordantemente sobre la Unidad Masiva y subyace por discordancia erosional a la Unidad Andesítica, esta última de edad Mioceno-Tardío que a su vez, subyace a la Unidad Superior Vulcanoclástica, la cual es la cima de la secuencia. Las unidades recientes (Qte, Qt y Qac) cubren de manera indiscriminada a las anteriores.

Las características geológicas que permiten diferenciar a las unidades de roca compacta que afloran en la zona del cañón son las que a continuación se señalan.

*Unidad Masiva. Como su nombre lo indica, carece de planos de estratificación y de fracturamiento importantes; debido a que no tiene cementante se comporta como un material deleznable; no se observó cambio alguno de compacidad o cementación notable a lo largo de todo el cañón.*

*Unidad Estratificada. Se distingue por la notable estratificación y la presencia de diversos materiales intercalados; por lo que se ha subdividido en cuatro unidades, a las que se han identificado características geológico-geotécnicas diferentes.*

*Unidad Andesítica. Está formada por una roca andesítica compacta que presenta moderado fracturamiento. Aflora en la porción central del Cañón.*

*Unidad Superior Vulcanoclástica. Se encuentra siempre por arriba de la zona donde se va a construir la cortina, y en general se puede considerar como una unidad poco compacta, deleznable y con escaso fracturamiento.*

## **2.2.1 ESTRATIGRAFIA**

*Las unidades se irán describiendo en secuencia cronológica, empezando por la más antigua y con el siguiente orden: litología, distribución, espesor, origen y características geotécnicas.*

### *Unidad Masiva (UIII)*

*La Unidad Masiva está representada por una arenisca puntítica de composición dacítica-riolítica.*

*Es la unidad más antigua que aflora, en el Cañón, en la zona de las alternativas y está formada por un grueso paquete de ceniza dacítica-riolítica de color café claro, sin cementante y con abundantes fragmentos de pómez del tamaño de arenas y gravas. La unidad es compacta, y en su mayor parte masiva.*

*Se encuentra distribuida en todo el Cañón sin tener cambios notables en su composición, granulometría, compacidad, ni grado de fracturamiento.*

*En cuanto a sus aspectos geotécnicos, la unidad está formada por una arenisca de grano fino con matriz limosa sin cementar, sin embargo, se encuentra compacta. La estructura masiva y el espa-*

*ciamiento amplio de las fracturas favorecerán el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Superficialmente presenta un ligero intemperismo con costras oscuras más duras que la roca; en algunas zonas se observó un moderado intemperismo al encontrarse el material parcialmente desintegrado.*

#### *Unidad Estratificada (U11)*

*La Unidad Estratificada ha sido dividida en cuatro subunidades de acuerdo con la litología predominante. A estas subunidades se les ha denominado U11a, U11b, U11c y U11d.*

#### *Paquete Lacustre Inferior (U11a)*

*Esta unidad se integra por horizontes y lentes de caliza y pedernal, de color verde, blanco y crema en estratos delgados con espesores que van desde 10 a 50 cm; interestratificados con arcillas y limos de color verdoso, en horizontes con espesor promedio de 50 cm, siendo el paquete con mayor porcentaje de arcilla en la zona del cañón.*

*El espesor de esta unidad en el cañón varía de 15m en la zona del Eje 1, margen izquierda, a solo escasos 8m en la margen derecha. En la zona más encañonada mide 10m, en ambas márgenes.*

*Se encuentra descansando directamente sobre la Unidad Masiva (U111) y subyace a la subunidad (11b) en los lugares donde ésta existe. La posición estructural de la secuencia es sensiblemente horizontal, lo que favorece la estabilidad del macizo rocoso.*

#### *Paquete Fluvial (U11b)*

*Se constituye principalmente por areniscas y areniscas conglomeráticas o limosas, bien compactas y cementadas, intercaladas con algunos horizontes y lentes de limos arenosos, pedernal y calizas. El paquete no está bien estratificado ya que forma lentes tanto en las rocas como en los horizontes arcillosos.*

*En la zona del Eje 1 tiene un espesor promedio de 20m en ambas márgenes; mientras que en la zona del Eje 3 no fue posible determinarlo debido a que está cubierto por talud.*

*Descansa directamente y en contacto transicional con la subunidad (UIIb) y le subyace a la subunidad (UIIc) en la misma forma.*

*Las areniscas están bien compactas y duras; algunas de ellas se muestran bien cementadas y con intemperismo moderado a ligero; el pedernal y caliza se encuentran en espesores más pequeños, compactos y duros, con ligero intemperismo. Los limos arenosos se presentan en menor proporción y son blandos y poco compactos.*

#### *Paquete Lacustre Superior (UIIc)*

*La Unidad Lacustre Superior está integrada por horizontes y lentes de calizas y pedernales, color crema a verdoso, compactos; interestratificados con limos y arcillas color verdoso, poco compactos y deleznales. Los horizontes de ambos materiales presentan un espesor que varía entre 10 y 20cm, aunque los pedernales y calizas llegan a medir de 40 a 60cm.*

*Este paquete es el que menos afloramientos tiene en la zona del Cañón, debido a que está cubierto aproximadamente en un 50% por material de talud.*

*En la zona del Eje 1, margen derecha, tiene un espesor de 9m. En la zona del Eje 3, en ambas márgenes está cubierto por talud. Esta subunidad sobreyace a la subunidad I1b y le subyace a la subunidad I1d, este contacto es transicional, no observándose claramente por estar cubierto por talud.*

#### *Arenisca Pumítica Andestítica (UIIId).*

*El paquete superior de la Unidad II está representado por una arenisca de grano grueso de color gris verdoso, constituida por fragmentos de pómez y cuarzo, empacados en una matriz arcillosa, presentando una estratificación luminar que varía de 2 a 5cm.*

*Este es el paquete que más fácilmente se diferencia dentro de la Unidad Estratificada (UII) y se presenta parcialmente en todo el Cañón.*

*Aguas arriba del Eje 1, en la margen derecha, tiene un espesor de 6m, mientras que en la margen izquierda está cubierta parcialmente por talud, y sólo afloran 4m. En la zona del eje 3 tiene unos 10m en ambas márgenes.*

*Esta subunidad descansa sobre el paquete Ullc en un contacto más o menos claro en buena parte del cañon, y subyace a los derrames andesíticos en las zonas donde hay, y donde no se presentan subyaciendo a la Unidad Superior Vulcanoclástica (Us). Se encuentra a una altura que no será afectada por el agua del embalse, sin embargo es importante ya que es la que soporta el peso de los basaltos y se llegó a observar que algunos de los deslizamientos del Cañón son propiciados por la debilidad de la arenisca.*

#### *Unidad Andesítica-Basáltica (UI)*

*La unidad está formada por rocas andesíticas que megascópicamente presentan un color gris oscuro. La parte inferior, que está en contacto con la Unidad Ullc, presenta una estructura brechoide debido a que la colada de andesita fluyó por sedimentos húmedos, y la presión de los vapores que se generaron provocaron el brechamiento de los materiales.*

*En la margen derecha los basaltos se presentan a lo largo de 2km en una superficie de 1 km<sup>2</sup> aproximadamente, desde 400 m aguas arriba del Eje 1 hasta la confluencia de los Ríos Ipalco y Verde. Tiene un espesor de 40m en la zona del Eje 3.*

*En la margen izquierda se presentan en una longitud de poco más de 2 kilómetros, desde 300m aguas arriba del Eje 1, hasta unos 200m antes de llegar al Eje 4. En la zona del Eje 3, su espesor es de unos 35m. Esta unidad descansa en la subunidad Ullc y subyace a la Unidad Superior Vulcanoclástica.*

*La roca basáltica se presenta muy dura y compacta, con un ligero intemperismo; sin embargo, el macizo rocoso está afectado por tres familias principales que delimitan bloques inestables, que caen por el mecanismo de volteo o por la debilidad de la roca subyacente.*

#### *Unidad Superior Vulcanoclástica (Us)*

*La Unidad Superior, en el área del cañón, se encuentra constituida principalmente por material volcánico, representado por cenizas y lapilli, de color blanco y gris; así como por cantidades menores de material limo-arenoso. En menor cantidad se presentan intercalaciones de caliza y pedernal de color verde o crema, compactos y duros, con espesores de 5 a 20cm.*

*El espesor que presenta en la margen derecha de la zona del Eje 1 es mayor a 20m. En la zona del Eje 3 no se presenta en ambas margenes.*

*Esta unidad se presenta en las partes topográficamente altas del Cañón, y con un relieve plano (normalmente arriba de la cota 1700).*

*La Unidad Superior Vulcanoclástica es la cima de la secuencia que se presenta en el cañón; descansa en donde hay andesitas sobre éstas y, cuando no, sobreyacen a la subunidad IId.*

#### *Terrazas Aluviales (Q1e).*

*Las terrazas están constituidas esencialmente por material areno- limoso de color pardo claro y con una mínima cantidad de arcillas, presentan baja compacidad y generalmente tienen graduación normal (fragmentos gruesos en la base y finos en la parte superior).*

*Se presentan a lo largo de todo el cañón en ambas márgenes, con una forma alargada, y alcanzando espesores de 3-4m aproximadamente. En un meandro del Río Verde, situado a 2 kilómetros aguas abajo del Eje 1, existe una gran terraza aluvial que por debajo de las arenas-limosas presenta una mayor cantidad de gravas, procedentes de rocas andesíticas e ignimbríticas; aunque también contiene arenas y limos, pero en mucho menor proporción.*

#### *Material de Talud (Q1)*

*Los taludes están formados principalmente por materiales limo- arenosos, producto de la desintegración de las rocas blandas existentes; así como por gravas y cantos de calizas, pedernales y, donde aflora la andesita, por bloques de roca de hasta 2 m<sup>3</sup> de tamaño. En la mayoría de los afloramientos se ha desarrollado vegetación, por tanto una capa de suelo orgánico, que permite identificar mejor las zonas de derrumbes.*

*Generalmente se encuentra en estado suelto a poco compacto. Su espesor, en la mayor parte del cañón, es pequeño; sin embargo, hay zonas donde el espesor llega a ser de unos 20m.*

### *Material de Acarreo (Qac)*

*Los acarreos están compuestos por fragmentos de rocas volcánicas extrusivas (andesitas e ignimbritas) así como por materiales fluvio-lacustres (calizas, pedernales y areniscas), mismos que varían su tamaño desde arenas medias hasta bloques; estos materiales están presentes en la zona del actual cauce de los ríos Verde e Ipalco.*

### **2.2.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL**

*El Cañón de La Zurda tiene una longitud aproximada de 5 kilómetros, y una orientación E-W en el primer kilómetro, desde el Eje 5 hasta la confluencia de los Ríos Verde e Ipalco. En este punto sufre un quiebre moderado y toma una dirección SW 60 grados hasta que termina un kilómetro aguas abajo del Eje 1; presenta un ancho promedio de 300m y profundidad de 100m.*

*Las estructuras encontradas en el cañón, como fracturas, estratificación y algunas fallas, son semejantes a las que se observaron en el vaso, esto es lógico, ya que los procesos que originaron dichas estructuras no son locales, sino que se relacionan a condiciones regionales.*

*Las unidades fluvio-lacustres del Cañón de la Zurda (VII y VIII) se encuentran en posición sensiblemente horizontal. Aunque la estratificación de la Unidad Masiva (VIII) es burda y muy gruesa es clara su tendencia. Por otro lado, la unidad Estratificada (VII) muestra inclinaciones de 0 a 6 grados sin una orientación preferencial.*

*Por otro lado, en el área de estudio del Cañón de La Zurda se presentan muy pocas fallas, ya que las rocas no han sufrido eventos tectónicos de importancia desde su depósito; de hecho tan solo han sufrido reacomodos gravitacionales, así como la influencia del vulcanismo que llega a afectarlas localmente.*

*Localmente, en el cañón se definieron los sistemas de fracturamiento que afectan a cada una de las tres unidades que se presentan. La Unidad III presenta un sistema principal (ALFA, definido por la orientación del echado de 306/86) y dos secundarios (BETA, 148/86 y GAMMA, 180/88). La unidad II también presenta un sistema principal (DELTA 306/88) y dos secundarios (EPSILON, 36/87 y LAMDA, 80/86). Asimismo, la unidad I está afectada por un sistema principal (OMEGA, 176/87) y dos secundarios (RHO, 012/08 y PSI 295/88).*

*Al igual que el fracturamiento y la estratificación que fueron analizados en etapas previas de exploración, las siete principales fallas (F1 a F7) observadas en la zona del cañón se cartografiaron con anterioridad.*

*Los análisis cinemáticos de estabilidad de taludes y laderas indican la poca probabilidad de deslizamientos en las Unidades II y III; se estableció que tan sólo se podrían presentar caídas de bloques por volteo en algunos cortes en las andesitas de la Unidad I.*

*Por su parte, los análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite en falla circular indican que la mayoría de las unidades litológicas se mantienen en aceptable equilibrio en todos los ejes para condiciones drenadas y semisaturadas; sin embargo, si se asume una condición completamente saturada algunas combinaciones de unidades litológicas y pendientes topográficas dan lugar a situaciones precarias de estabilidad, como sucede en la margen derecha de los ejes 4 y 5, así como en los ejes 2 y 3, por la presencia de las andesitas.*

### **2.3. GEOLOGIA DEL SUBSUELO**

*Como parte de los trabajos realizados en esta etapa de exploración se programaron y ejecutaron 7 perforaciones exploratorias con recuperación de muestras en cada uno de los ejes de los dos ejes estudiados. Las perforaciones fueron objeto de pruebas de permeabilidad Lefranc y Lugeon.*

*En este capítulo se discuten las características litológicas y distribución de los materiales encontrados en las perforaciones y los resultados obtenidos en la aplicación de pruebas de permeabilidad.*

#### **2.3.1 PERFORACIONES EXPLORATORIAS**

*Las perforaciones se realizaron con máquinas Longyear modelo 34, se utilizó broca de diamante en diámetro NQ (2 7/8") y barril inestrador doble giratorio para roca compacta poco deleznable; los materiales sueltos o deleznales se recuperaron con tubo dentado y canasta, obteniéndose muestras representativas. Al finalizar las perforaciones, se ampliaron a 3 1/2" para poder utilizarlos en los estudios geofísicos y se protegieron con tubo de PVC de 3" de diámetro a manera de ademe.*

*La presión de agua durante la perforación siempre se mantuvo al mínimo indispensable, a fin de no desintegrar o lavar lo menos posible la matriz de los materiales atravesados. Cabe señalar que durante las perforaciones prácticamente no se perdió agua de perforación.*

*En general se cortaron suelos vegetales, materiales de talud y acarreos en estado totalmente suelto, así como la toba masiva (U111) con diversos grados de compactación. La recuperación de materiales utilizando el barril muestreador doble giratorio y broca de diamante fue generalmente baja, con un RQD nulo, mientras que la recuperación con tubo dentado y canasta (utilizado únicamente en los casos de material suelto o muy deleznable) fue alta, aunque se recuperaron sólo muestras representativas, alteradas. Los materiales cortados durante las perforaciones permitieron, luego de su clasificación y estudio, modificar sustancialmente la interpretación previa de la distribución de materiales de acarreos y terrazas fluviales, misma que originalmente se consideraba reducida.*

*A continuación se comenta brevemente, por eje de exploración, los resultados obtenidos en cada sondeo exploratorio.*

## **EJE 1**

*En el eje 1 se realizaron un total de 7 perforaciones, tal como se muestra en el los planos (2 y 3). Las características de los materiales cortados se resumen a continuación.*

### **Sondeo P-1**

*Se perforaron 30.00m con recuperación promedio de 33%. Los primeros 0.50m fueron de suelos vegetales arenosos, a continuación se encontraron 12m de toba arenosa poco compacta, con mínima recuperación. Cabe señalar que entre los 6 y 10m de perforación, la recuperación fue nula o bien fue de canal. A partir de 12.50m, hasta el final de la perforación, se cortó toba arenosa compacta, su recuperación media fue de 43%. El nivel de las aguas freáticas se encontró a los 10.30m.*

### **Sondeo P-2**

*Se perforaron 30.00m con recuperación promedio de 24%. Los primeros 1.70m se cortaron en acarreos compuestos de gravas y arenas en estado suelto. Posteriormente, hasta los 15m de profundidad se perforó en toba arenosa poco compacta, la cual incluye un lente de gravillas a los 10m de profundidad. De estas dos primeras unidades se recuperaron únicamente muestras alteradas ya que se utilizó el tubo dentado. El resto del barreno se desarrolló en toba arenosa compacta, con recuperación media de 36%. El nivel de las aguas freáticas se encontro a los 4.07m de profundidad.*

### *Sondeo P-3*

*En esta perforación se llevó la exploración a los 30.00m de profundidad. Aquí los primeros 2.00m cortaron arenas sueltas de acarreo fluviales. A continuación, y hasta los 7.50m de profundidad, se cortó toba arenosa poco compacta, alterada, por lo que se utilizó el tubo dentado. De 7.5 a 30.0m de profundidad se cortó la toba arenosa compacta, con algunas zonas poco compactas en los 5m finales; la recuperación en este tramo fue de 50% en promedio. El nivel de las aguas fráticas se encontró a los 5.0m. Los tramos en que se encontró roca alterada, y por lo mismo requirieron del uso de tubo dentado, fueron de 0 a 7.5, de 25 a 28.0 y de 29 a 30.0m.*

### *Sondeo P-4*

*Tiene un desarrollo total de 30.95m y se ubicó sobre el cauce del Río Verde. Los primeros 5.5m son de acarreo fluviales compuestos de gravas, arenas y finos mismos que tuvieron una mínima recuperación. El resto del barreno cortó toba arenosa compacta, excepto los últimos 5.95m donde se encontró poco compacta; también se detectó un horizonte delgado de gravas a los 26m de profundidad; la recuperación promedio fue de 45%. El nivel de las aguas fráticas se encontró a unos centímetros por debajo del brocal. Los tramos donde se usó tubo dentado, recuperando muestra alterada, fueron de 25.0 a 28.0m y de 29.0 a 30.95m.*

### *Sondeo P-5*

*Esta perforación tiene un desarrollo de 30m. El barreno cortó un fuerte espesor de acarreo, 13.40m, consistentes en gravas y arenas, así como un horizonte arcilloso con espesor de 1m; la recuperación promedio en este material es de 18%. De 13.40 a 15.00m se recuperó un 90% de toba arenosa poco compacta, con tubo dentado y canasta. El último tramo recuperado fue de toba arenosa compacta, de 15.00 a 30.00m, donde la recuperación fue de un 60%; aquí se alterno el uso de barril muestreador y tubo dentado con canasta. El nivel de las aguas fráticas se encontró a los 0.97m.*

### *Sondeo P-6*

*El Sondeo P-6 tiene un desarrollo total de 30.45m. Este barreno cortó el mayor espesor de acarreo con 18.50m, que consistieron en boleos gravas, arenas y arcillas; su recuperación media fue de 65%.*

Finalmente, entre 18.50 y 30.45m se cortó una toba arenosa compacta con recuperación de 78%. La totalidad de la exploración se desarrolló con tubo dentado (canasta). El nivel freático se encontró a los 3.40m.

#### Sondeo P-7

En esta perforación se llevó la exploración a los 30.50m de profundidad. Los primeros 13.0m de desarrollo se realizaron con tubo dentado (canasta), el cual recuperó arcillas, arenas y gravas; su recuperación promedio fue de 44%. El resto de la perforación alternó tubo dentado y barril muestreador; se recuperó toba arenosa compacta en un 53%. El nivel freático se encontró a los 0.95m.

#### EJE 3

Al igual que en el EJE 1, se realizaron un total de 7 perforaciones, mismas que se ubican en los Planos 4 y 5.

Las características de los materiales cortados se resumen a continuación.

#### Sondeo P-1

El Sondeo P-1 tiene desarrollo total de 30m. Los primeros 10.10m cortaron materiales de talud compuestos por fragmentos de basalto empaçados en una matriz areno-arcillosa con abundante materia vegetal, aquí la recuperación media obtenida fue de 67%. De 10.10 a 13.00m de profundidad se cortó toba arenosa deleznable con 76% de recuperación media, la misma roca se encontró en el tramo de 20 a 27.00 (con recuperación media de 81%) y en el de 29 a 30m (con recuperación media de 70%). Además se cortó toba arenosa compacta en los tramos de 13 a 20m (con recuperación media de 72%) y de 27 a 29m (con recuperación media de 73%). El nivel freático se encontró a 20m de profundidad.

#### Sondeo P-2

Esta perforación tiene un desarrollo total de 25m. Los primeros 12.50m se cortaron en materiales de talud compuestos por bloques de basalto empacados en una matriz arcillo-arenosa y materia vegetal, su recuperación media fue de 61%. Se cortaron dos tramos de toba arenosa poco compacta a las profundidades de 12.5 a 19m (con 58% de recuperación media) y 20 a 24m (con recuperación media de 60%). También se cortó toba compacta en los tramos de 19 a 20m (recuperación de 55%) y de 23 a 25m (94% de recuperación). El nivel freático se encontró a 11.5m de profundidad.

#### Sondeo P-3

Al igual que en segundo sondeo, el P-3 tiene un desarrollo de 25m. Los primeros 10m correspondientes a materiales de talud, donde se recupero un 73% en promedio. En este barreno se cortaron dos tramos de toba arenosa compacta y parcialmente cementada, entre los 10 a 16.5m (con recuperación de 56% en promedio) y entre los 22.20 y 23.60m de profundidad (con recuperación del 100%). También se cortaron dos tramos de toba poco compacta, entre los 16.50 y 20.20m de profundidad (con recuperación de 68% en promedio) y entre los 23.60 y 25.00m de profundidad (con recuperación de 71%). El nivel freático se encontró a 4.20m por debajo del brocal.

#### Sondeo P-4

El sondeo P-4 se ubicó en la zona del cauce del Río Verde, su desarrollo total es de 30m. Sus primeros 11m fueron de acarreo consistentes en gravas y arenas gruesas así como una pequeña proporción de arena fina arcillosa; su recuperación promedio fue de 54%. Se presentaron tres tramos de toba poco compacta, en los tramos de 11 a 13m (con recuperación de 60%), de 20 a 26m (con recuperación promedio de 61%) y de 28.5 a 30m de profundidad (con recuperación de 47%). De toba compacta parcialmente cementada se cortaron dos tramos de 13 a 20m (con recuperación promedio de 58%) y de 26 a 28.5m de profundidad (con recuperación de 47%). El nivel freático se encontró a unos centímetros por debajo del brocal.

#### *Sondeo P-5*

*El Sondeo P-5 se realizó con un desarrollo total de 30m. Esta barrenación perforó el mayor espesor de acarreo encontrado en las exploraciones con un desarrollo de 21.20m, de los cuales se recuperó un 13%. El resto del barreno se cortó en toba arenosa poco compacta, con una recuperación promedio de 23%. En esta exploración se encontró el nivel freático a 4.20m de profundidad.*

#### *Sondeo P-6*

*El Sondeo P-6 tuvo un desarrollo total de 30m, cortó un fuerte espesor de materiales de talud entre los 0 y 14m de profundidad, con una recuperación promedio de 15%. El resto del barreno cortó toba arenosa poco compacta, con recuperación también pobre del 15%. El nivel freático se encontró a los 19m. de profundidad.*

#### *Sondeo P-7*

*El Sondeo P-7 tiene un desarrollo total de 30m. Esta en la única exploración que inició directamente en roca. Presentó tres tramos de toba arenosa poco compacta, de 0 a 12.5m (con recuperación de 53% en promedio) y de 21.5 a 30m de profundidad (con recuperación de 70% en promedio). De toba arenosa compacta sólo se cortaron dos tramos, de 12.5 a 13.5m (con recuperación de 75%) y de 19 a 21.5m (con recuperación de 72%). El nivel de las aguas freáticas se encontró a los 22m.*

### **2.3.2 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD**

*Objetivo primordial de este estudio fue la realización e interpretación de pruebas de permeabilidad a lo largo de todos y cada uno de los sondeos exploratorios realizados en ambos ejes. Se realizaron pruebas de tipo Lefranc y Lugeon.*

*En principio se programaron tramos de 3m de prueba con la finalidad de efectuar un trabajo lo más detallado posible. Realizando, primeramente, dos pruebas Lefranc y posteriormente una prueba Lugeon por tramo. Sin embargo, en la práctica se presentaron inconvenientes que obligaron a modificar el programa.*

Así, al realizar las pruebas Lugeon no siempre fue factible que los obturadores (mecánicos y neumáticos, ya que se ensayó con ambos tipos) sellaran adecuadamente el tramo de prueba. Debiendo, entonces, subir y/o bajar el obturador hasta encontrar un sitio donde sellaran adecuadamente. De esta forma se definió que los tramos de prueba fuesen de 5m.

Un detalle digno de mencionar fueron los intervalos en que se incrementó la presión durante las pruebas; primeramente se incrementó en intervalos de 0.5kg/cm<sup>2</sup>, tanto en carga ascendente como descendente, pero en las últimas pruebas los intervalos de carga fueron de 1 y 2kg/cm<sup>2</sup>. Se tuvo especial cuidado en definir la Presión crítica (Pc) cuando se llegó a ésta. En general, los tramos en que se levantó la presión a 10kg/cm<sup>2</sup> registraron permeabilidades de 0 a 3 U.L., pero cuando se llegó a una presión crítica (Pc), las permeabilidades extrapoladas estuvieron en el rango de 3 a 7 U.L., aunque en algunas pruebas se llegó hasta 20 U.L. y otras fueron no determinadas analíticamente (NDA).

Las pruebas de permeabilidad Lefranc se realizaron del tipo flujo variable realizándose por lo general dos ensayos por tramo a fin de tener mayor certeza en esta importante propiedad del macizo rocoso. Aunque hubo tramos con 1 ó 3 pruebas, los barrenos ubicados en el cauce, con el brocal a unos cuantos centímetros del nivel freático, como es de esperar, no fueron sometidos a este tipo de pruebas, pero si a las de tipo Lugeon en zonas por debajo de los materiales de acarreo. En general la toba masiva de la Unidad III manifestó permeabilidad de 10 E(-4) y en sólo algunos casos de 10 E(-5). Por lo cual la roca es poco permeable a permeable.

A continuación se presenta en las tablas 1 y 2 el resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los ejes.

TABLA 2.1  
 RESULTADOS DE PERMEABILIDAD LUGEON Y LEFRANC  
 EJE 1

SONDEO	Tramo (m) No. P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.	0-3	3,6	6-10	10-15	15-20	20-25	25-30
		1 1 E-4	2 2,2 E-4	2 5,0 E-5	2 2,1 E-4	2 0,8 E-5	2 6,5 E-T	2 2,4 E-5
E	P-1	-	-	-	10	-	-	2,7
	P-2	0-5 1 4,4 E-5	5-10 2 4,3 E-5	10-15 2 1,7 E-5	15-20 2 13 E-4	20-25 2 3,6 E-4	25-30 2 3,0 E-4	
	P-3	0-5 2 1,2 E-5	5-10 2 2,1 E-4	10-15 2 5,5 E-4	15-20 2 1,0 E-4	20-25 2 8,5 E-5	25-30 3 9,9 E-5	
J	P-4	0-5 - - - -	5-10 - - - -	10-15 - - 1 1,9	15-20 - - 1 0,5	20-25 - - 1 3,0	25-30 - - 1 4,4	
	P-5	0-5 - - - -	5-10 - - - -	10-15 2 2,1 E-4	15-20 2 2,7 E-4	20-25 - - - -	25-30 - - - -	
I	P-6	0-5 - - - -	5-10 - - - -	10-15 2 1,9 E-4	15-20 2 5,5 E-5	20-25 2 1,5 E-5	25-30 2 1,0 E-5	
	P-7	0-5 - - - -	5-10 2 3,4 E-4	10-15 2 1,6 E-4	15-20 2 2,0 E-4	20-25 2 3,9 E-4	25-30 2 2,5 E-4	

N = número; P = prueba; NLP = no levanta presión; NDA = no determinada analíticamente.

TABLA 2.2  
RESULTADOS DE PERMEABILIDAD LUGEON Y LEFRANC

EJE 3

E	P-1	Tramo (m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
		N.P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.	1 2.8 E-5 - -	1 1.25 E-5 NDA	1 2.46 E-4 NDA	1 3.18 E-4 1.5	1 2.29 E-4 2.0	1 1.24 E-4 2.4
	P-2	Tramo (m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
		N.P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.	1 3.67 E-3 - -	1 1.79 E-4 NDA	1 1.18 E-4 NDA	1 1.69 E-4 1.4	1 1.47 E-4 0.5	
	P-3	Tramo (m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
		N.P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.	1 1.59 E-5 - -	1 7.0 E-4 NDA	1 6.59 E-4 2.0	1 5.86 E-4 0.98	1 6.95 E-4	
	J	P-4	Tramo (m)					
N.P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.								
E	P-5	Tramo (m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
		N.P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.	1 1.92 E-3 - -	1 1.23 E-3 NDA	1 6.74 E-4 NDA	1 4.83 E-4 3.5	1 4.34 E-4 4.0	1 9.87 E-4 1.6
3	P-6	Tramo (m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
		N.P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.	1 7.25 E-5 - -	1 1.95 E-4 NDA	1 9.8 E-5 4.8	1 9.65 E-5 6.9	1 1.02 E-4 2.3	1 1.41 E-4 2.2
	P-7	Tramo (m)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
		N.P. Lefranc K (cm/s) N.P. Lugeon U.L.	1 2.02 E-4 - -	1 1.88 E-4 NDA	1 7.96 E-5 7.0	1 4.8 E-5 4.0	1 2.95 E-4 1.6	1 3.58 E-4 2.4

### 3. GEOFISICA

Los métodos geofísicos existentes nos brindan una gran variedad y versatilidad, para ser aplicados en geotecnia, por lo que de acuerdo con las necesidades y objetivos planteados se puede elegir el método más idóneo, siendo, incluso, posible combinar algunos de ellos. Se obtienen así una correlación de resultados que nos permite conocer con mayor detalle las características del suelo y del subsuelo.

En este estudio se eligió una combinación de los métodos geosísmico de refracción superficial, geoelectrico y geosísmico dentro de barrenos (Up-Hole y Cross Hole). Siendo el objetivo de esta conjugación de métodos, por un lado, el conocer con detalle las características del macizo rocoso en los sitios de las dos boquillas (Geofísica Superficial) y, por otro lado, conocer de manera particular las características elásticas, dinámicas y estáticas, sobre el eje de cada una de las boquillas, además de definir zonas anómalas en el subsuelo (Geofísica en barrenos).

En la Tabla 3.1 se muestran los métodos empleados en cada una de las alternativas.

TABLA 3.1 METODOS GEOFISICOS

ALTERNATIVA	SISMICA DE REFRACCION $V_p$	SISMICA DE REFRACCION $V_s$	GEOELECTRICA SEV'S SCHLUMBERGER	UP-HOLE	CROSS-HOLE
EJE 1	SI	SI	SI	SI	SI
EJE 3	SI	SI	SI	SI	SI

A continuación se describe la metodología seguida en cada una de las técnicas empleadas, tanto de la geofísica superficial como en la de barrenos. Posteriormente se comentarán los resultados obtenidos para cada eje y de cada técnica usada.

En el capítulo siguiente se efectúa una integración geológica- geofísica para cada uno de los ejes explorados.

### 3.1 METODOLOGIA

*Se describe la metodología de cada una de las técnicas empleadas, siguiendo la secuencia: método, dispositivo empleado, equipo de medición, trabajo de campo e interpretación.*

#### 3.1.1 Geofísica Superficial

*Los métodos de Geofísica superficial aplicados en este proyecto fueron como ya se dijo, geosísmica de refracción y geoelectrica, para ambos ejes.*

##### 3.1.1.1 Geosísmica de Refracción

*Este método consiste en la medición (en instrumentos colocados a lo largo de la superficie del terreno) de los tiempos de tránsito de las ondas longitudinales y transversales (ondas P y S) generadas mediante alguna fuente de energía.*

*En este caso, la fuente de energía fué generada por una pequeña carga de dinamita; esta energía es detectada, amplificada y almacenada por un equipo especialmente diseñado para este propósito. El momento del disparo o "tiempo cero" es almacenado en la memoria del equipo y posteriormente se registra en papel (sismograma) a fin de mostrar los tiempos de arribo de las ondas elásticas en cada uno de los sismodetectores.*

*La información obtenida en campo consiste en tiempos de tránsito y distancia medida, los cuales se procesan para traducirse en términos de velocidades de capa y profundidades de contactos entre cada una de las unidades detectadas.*

*La estructura del subsuelo (capas refractoras) se infiere utilizando las técnicas de interpretación basadas en las leyes de propagación de la energía.*

*La refracción, desviación angular que un impulso sísmico sufre cuando pasa de un medio a otro, está fundamentada en la ley de Snell y en el fenómeno de incidencia crítica.*

## DISPOSITIVO EMPLEADO

El dispositivo empleado fue un arreglo como el que se muestra en la figura 3, el cual consistió, en general, por 3 puntos de tiro, uno en cada extremo del tendido y otro en la parte central del arreglo. La separación entre geófonos fue entre 7 y 15m para el caso de la obtención de ondas "P". En los tendidos para ondas "S" la separación entre geófonos fue de 10m también con tres puntos de tiro, dos laterales y uno central. Cabe mencionar que las líneas de exploración están constituidas por uno o más tendidos.

## EQUIPO DE MEDICION

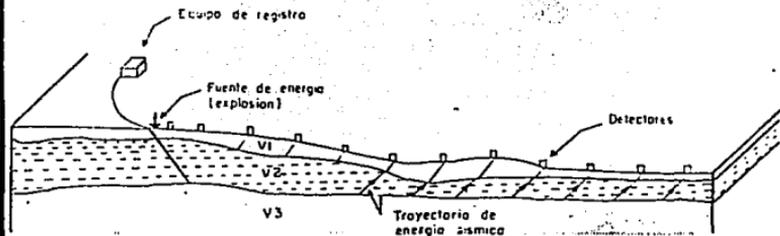
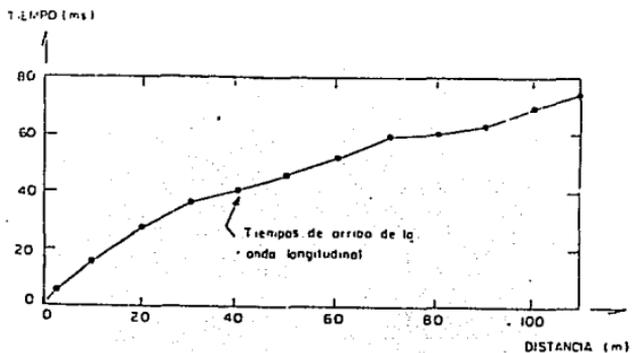
El equipo de medición utilizado consistió de lo siguiente:

- Sismógrafo Marca Geometrics Modelo 1210 F de 12 canales.
- Detonador de dinamita sincronizado al sismógrafo.
- Dos juegos de 12 geófonos, con bobina vertical y horizontal, respectivamente.
- Cable de conexión con diferentes entradas para cada detector.
- Batería de 12 volts para el sismógrafo.
- Dinamita y estopines eléctricos instantáneos.

## TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo de sísmica se dividió en dos etapas. La primera consistió en el levantamiento de sísmica de refracción superficial, mientras que la segunda lo fue por los métodos de Up-Hole y Cross-Hole, para la cual se auxilió de las perforaciones exploratorias realizadas.

Para el caso de la geosísmica superficial, la distribución de la exploración quedó sujeta a lo marcado en los términos de referencia del presente estudio. Es decir, en el Eje 1 se efectuaron dos líneas de exploración paralelas al eje y una sobre el eje mismo, así como, también, en forma perpendicular al eje se realizaron 3 líneas en cada una de sus márgenes (Planos 2 y 6). Cabe mencionar que en estas últimas líneas se efectuaron mediciones de ondas "P" y "S", con la finalidad de obtener los módulos elásticos dinámicos de macizo rocoso.



$V3 > V2 > V1$  Velocidades de cada capa

FIGURA 3 ESTUDIO SISMICO DE REFRACCION

Para el Eje 3 se realizaron dos líneas paralelas al eje y una coincidente con éste, catorce líneas paralelas al cauce, siendo siete en cada margen en estas últimas líneas se hicieron mediciones simultáneas para ondas "P" y "S" (Planos 4 y 9).

El volumen de trabajo realizado para el presente trabajo se muestra en la Tablas 3.2A y 3.2B.

**TABLA 3.2A VOLUMEN DE TRABAJO EFECTUADO  
MEDIANTE SISMICA DE REFRACCION EN LA  
ALTERNATIVA DEL EJE 1**

LÍNEA	No. TENDIDO Op	No. TENDIDO Os	No. TOTAL TENDIDOS	LONG. TEN. Op (m)	LONG. TEN. Os (m)	LONG. TOTAL (m)
L1	2	2	4	240	240	480
L2	2	2	4	240	240	480
L3	2	2	4	240	240	480
L4	2	2	4	240	240	480
L5	2	2	4	240	240	480
L6	2	2	4	240	240	480
L7	2	2	4	240	240	480
L8	2	2	4	240	240	480
L9	1	-	1	170	-	170
LA	2	-	2	136	-	136
LB	2	-	2	156	-	156
LC	2	-	2	132	-	132
<b>TOTAL</b>	<b>23</b>	<b>16</b>	<b>39</b>	<b>2514(m)</b>	<b>1920(m)</b>	<b>4434(m)</b>

**TABLA 3.2B VOLUMEN DE TRABAJO EFECTUADO  
MEDIANTE SISMICA DE REFRACCION EN LA  
ALTERNATIVA DEL EJE 3**

LINEA	No. TENDIDO Op	No. TENDIDO Os	No. TOTAL TENDIDOS	LONG. TEN. Op (m)	LONG. TEN. Os (m)	LONG. TOTAL (m)
L1	2	2	4	240	240	480
L2	2	2	4	240	240	480
L3	2	2	4	240	240	480
L4	2	2	4	240	240	480
L5	2	2	4	240	240	480
L6	2	2	4	240	240	480
L7	2	2	4	240	240	480
L8	2	2	4	240	240	480
L9	2	2	4	240	240	480
L10	2	2	4	240	240	480
L11	2	2	4	240	240	480
L12	2	2	4	240	240	480
L13	2	2	4	240	240	480
L14	2	2	4	240	240	480
LA	2	-	2	175	-	175
LB	2	-	2	195	-	195
LC	2	-	2	175	-	175
<b>TOTAL</b>	<b>34</b>	<b>18</b>	<b>62</b>	<b>3905(m)</b>	<b>3360(m)</b>	<b>7265(m)</b>
<b>EJE 1 + EJE 3</b>	<b>57</b>	<b>44</b>	<b>101</b>	<b>6419(m)</b>	<b>5280(m)</b>	<b>11699(m)</b>

**INTERPRETACION**

*Una vez obtenida la información de campo se llevó a cabo la construcción de gráficas tiempo-distancia (dromocrónica), a fin de obtener los espesores y velocidades asociadas a las diferentes capas interpretadas.*

*Dentro de las técnicas empleadas para el procesamiento e interpretación de datos sísmicos se puede mencionar la de "tiempo de intercepción", con la que es posible obtener modelos sísmicos de 2, 3 ó más capas, ya sean horizontales o inclinadas.*

*En nuestro caso se realizó un procesamiento gráfico preliminar y se empleó un programa de computadora basado en el concepto de tiempo de intercepción para modelos de dos y tres capas.*

*La interpretación, proplamente dicha, consiste en asociar los resultados obtenidos en el procesamiento de datos (velocidades sísmicas y espesor de capas) con las características del subsuelo, tales como grado de fracturamiento, compacidad, decompresión, etc., que nos ayuda asignar una calidad geotécnica al macizo rocoso.*

### **3.1.1.2 Geoelectrica**

*El estudio de geoelectrica relaciona variaciones de las características eléctricas de la roca con variaciones en las condiciones de la misma.*

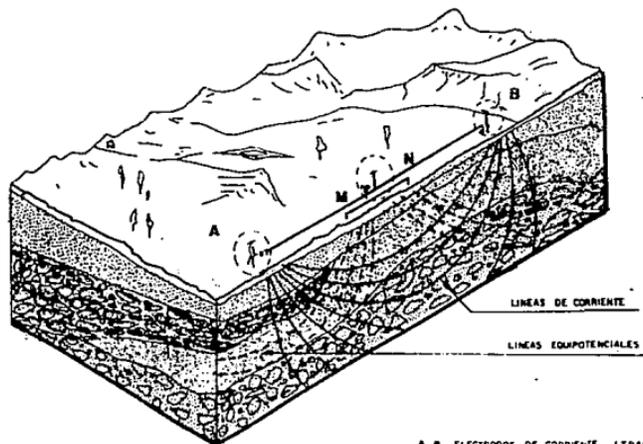
*La resistividad eléctrica es un parámetro que depende de las condiciones físico-químicas en el subsuelo, tales como composición mineralógica, grado de saturación, alteración, compacidad y fracturamiento.*

### **DISPOSITIVO EMPLEADO**

*En la prospección geoelectrica existen varios dispositivos, los cuales tienen cierta versatilidad de acuerdo al objetivo del estudio. En este caso se empleó un dispositivo lineal y simétrico de cuatro electrodos, tipo Schlumberger.*

*En este arreglo se integran dos electrodos al circuito de transmisión y dos al circuito de recepción. Los electrodos exteriores A y B constituyen al circuito de emisión y son los encargados de suministrar corriente continua en la superficie del terreno; la energía eléctrica circula por los materiales del subsuelo en forma tridimensional, creando un campo eléctrico cuyo potencial es medido a través de los electrodos M y N que constituyen el circuito de recepción (Fig. 4). La distancia electrodica  $AB/2$  manejada en este estudio fue de 100m.*

# DISPOSITIVO SCHLUMBERGER



A, B ELECTRODOS DE CORRIENTE (TRANSMISION)

M, N ELECTRODOS DE POTENCIAL (RECEPCION)

$AB > 5 MN/2$

FIG 4

Al realizar las medidas en campo se obtiene una resistividad aparente, la cual se transforma, mediante algoritmos matemáticos, a resistividad y espesores verdaderos.

La resistividad aparente queda definida como:

$$R_a = K \cdot \Delta V / I$$

donde:

- $R_a$  = Resistividad aparente  
 $K$  = factor geométrico  
 $\Delta V$  = diferencia de potencial  
 $I$  = corriente suministrada al terreno

#### EQUIPO DE MEDICION

El equipo utilizado en la obtención de los datos de campo lo constituyó un equipo de recepción o resistivímetro modelo RESU- 688, un motor generador de corriente acoplado a un transmisor modelo TRSU-2.5 KW, cuatro carretes con sus respectivos cables y electrodos metálicos de cobre.

El resistivímetro es liviano (5kg) y de fácil manejo; presenta pantalla digital con alta legibilidad, donde se pueden medir valores de voltaje de su fuente de poder, de potencial natural y de voltaje primario; es de alta precisión, las escalas permiten leer desde varias decenas de volts a fracciones de milivolt, con resolución de hasta 0.1 milivolt. Presenta un sistema de compensación para el potencial natural del terreno y tiene una impedancia de entrada de 10 mega-ohms.

El transmisor genera corriente continua con un amplio intervalo de valores de voltaje de salida (50, 100, 150, 200, 250, 300, 600, 800 y 1000 Volts). Permite proporcionar corriente de hasta 10 amperes, combinado con un motor generador de 2.5 KW.

Presenta las lecturas de corriente en una pantalla digital de alta legibilidad, tiene varias escalas de corriente (10 mA, 200 mA y 10A), con un sistema que permite medir la resistividad del terreno y seleccionar de forma adecuada las escalas de voltaje y corriente.

#### TRABAJO DE CAMPO

En cada uno de los ejes a explorar se efectuaron 12 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en dos secciones paralelas al eje y dos perpendiculares a éste en cada una de sus márgenes (Planos 7 y 10).

En la Tabla 3.3 se muestra el volumen de trabajo realizado con este método para cada uno de los ejes.

**TABLA 3.3 VOLUMEN DE EXPLORACION GEOELECTRICA  
EN LOS EJES 1 Y 3**

ALTERNATIVA	No. DE SEV's	No. DE SECCIONES
EJE 1	12	6
EJE 3	12	6
TOTAL	24	12

#### INTERPRETACION

La finalidad de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), y de la mayoría de los métodos geoeléctricos, es determinar las condiciones de resistividad eléctrica el subsuelo y la distribución de la misma.

En la interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) se tiene el problema inverso para medios estratificados, es decir el determinar los parámetros del corte geoeléctrico (espesores y resistividades) a partir de la curva de resistividades aparentes encontrada al hacer el SEV.

*La interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales se inicia con la construcción de una gráfica de valores de resistividad aparente calculados contra la abertura de los electrodos de corriente AB. Esta gráfica se hace en hojas de papel bilogarítmico, con tres ciclos por lado y módulo de 62.5mm.*

*En lo que respecta a la interpretación cuantitativa, ésta se inicia a partir de los valores de resistividad aparente de cada curva, los cuales fueron previamente procesados con un programa automático que utiliza las curvas de Dar Zarrowk. Los valores de resistividad aparente obtenidos son los datos de entrada al programa automático de interpretación, como resultado se obtienen los espesores y resistividades del corte geoelectrico.*

*El programa crea una curva de resistividad verdadera y la compara con la curva de resistividad aparente hasta que entre ellas exista un error mínimo. Obteniendo así los espesores y resistividades verdaderas del SEV.*

### **3.1.2 Geofísica de pozos**

*Dado que uno de los objetivos más importantes del estudio es el definir con detalle las anomalías en el macizo rocoso a lo largo de cada uno de los ejes, es de importancia realizar mediciones a profundidad, dentro de perforaciones.*

*Los métodos geofísicos contemplan varias técnicas que pueden adecuarse para este objetivo. De entre éstos, los que se eligieron fueron Up-Hole y Cross-Hole (tomografía sísmica). A continuación se explica brevemente la metodología seguida para cada una de estas técnicas.*

#### **3.1.2.1 Método de Up-Hole**

*El método de Up-Hole consiste en el registro de ondas sísmicas generadas por una fuente ubicada a profundidad, en un pozo, y recepción con sismodetectores instalados en la superficie, en forma colineal, a una distancia determinada.*

*De esta manera se construyen dromocrónicas (gráficas tiempo- profundidad), pudiéndose calcular la velocidad de cierto intervalo a lo largo de todo el pozo.*

*Estas velocidades se pueden utilizar para calcular los módulos elásticos dinámicos.*

## DISPOSITIVO EMPLEADO

El dispositivo empleado para el EJE 1 fue el siguiente. Ya que la profundidad de los pozos fue variable, se eligió como profundidad común los 27m; a partir de ésta profundidad se comenzaron a realizar detonaciones a cada 3m hacia la superficie siendo 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 y 27m las profundidades de detonación en cada uno de los pozos.

En superficie se colocaron 6 geófonos de componente vertical y otros 6 de componente horizontal, de tal manera que se pudieran registrar simultáneamente ondas compresionales "P" y transversales "S" (Fig. 5).

Cabe mencionar que los métodos de Up-Hole y Cross-Hole se llevaron a cabo en forma simultánea, es decir se sincronizaron dos sismógrafos a un solo disparo. Mientras en uno se registraron arribos de Up-Hole en otro se registraron los correspondientes al Cross-Hole, para un mismo punto de tiro.

Además, para no causar mayor daño a las perforaciones y concentrar la energía en un punto específico, se utilizó como fuente de energía un dispositivo tipo cilindro contenedor, en el cual se colocó un estopin eléctrico instantáneo.

## EQUIPO DE MEDICION

El equipo empleado es el siguiente:

- Sismógrafos marca Geometrics modelos 1210 F y 1225, de 12 canales.
- Dispositivo para sincronizar dos sismógrafos mediante una detonación común.
- Dispositivo - Interface para grabar datos directamente del sismógrafo a disco de computadora Lab Top.
- Computadora marca Toshiba, Mod. 1200 HB.
- Juego de 6 geófonos de bobina vertical y horizontal respectivamente.
- Cable de conexión con diferentes entradas para cada detector. - Batería de 12 volts para el sismógrafo.
- Dispositivo para detonar estopines eléctricos instantáneos dentro de pozos (cilindro contenedor).

# METODO DE UP - HOLE

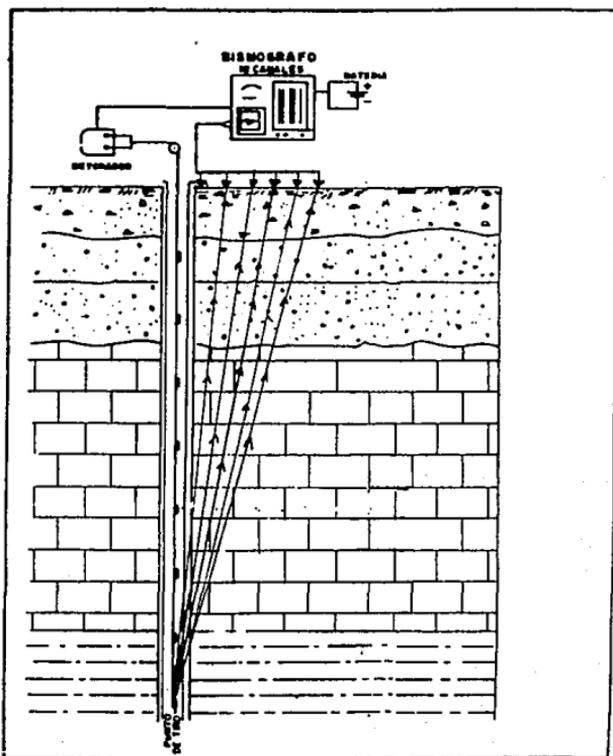


Fig. 5

## TRABAJO DE CAMPO

*El trabajo de campo se desarrolló de la siguiente manera:*

*En el Eje 1 se decidió hacer la separación entre geófonos según el dispositivo de 5m, en atención a su topografía prácticamente plana y atendiendo a la separación entre pozos.*

*Los puntos de tiro se realizaron dentro de los pozos 1, 2, 3, 4, 5 y 6, siempre de abajo hacia arriba, y en el siguiente orden 27, 24, 21, 18, 15, 12, 9, 6 y 3m de profundidad, en forma secuencial.*

*También se contó con un control topográfico para cada uno de los geófonos, en cada posición de Up-Hole.*

*Se denominó como arreglo de Up-Hole al constituido por una serie de tiros secuenciales en un pozo, recibiendo en superficie los arribos de ondas "P" y "S".*

*En el EJE 3 la técnica se siguió casi en forma similar. En este caso la separación entre geófonos fue de 3m; dado que los pozos no tuvieron la misma profundidad se determinó realizar detonaciones a cada 3m desde la profundidad máxima de exploración hacia arriba.*

*En este caso la topografía jugó un papel muy importante ya que en ambas márgenes es abrupta, por lo cual la separación entre geófonos se fijó en 3m, no siendo factible dar un espaciamiento mayor (Planos 8 y 11)*

**TABLA 3.4 VOLUMEN DE VOLUMEN DE TRABAJO  
REALIZADO POR EL METODO DE UP-HOLE  
PARA LOS EJES I Y 3**

ALTERNATIVA	POZO	1	2	3	4	5	6	TOTAL
EJE I	No. de Med. Vp	72	72	72	72	72	72	432
	No. de Med. Vs	72	72	72	72	72	72	432
EJE 3	No. de Med. Vp	66	72	66	78	78	78	438
	No. de Med. Vs	66	72	66	78	78	78	438
<b>TOTAL</b>								<b>1740</b>

*No. Total de Med. Vp* 870  
*EJE 1 y EJE 3*

*No. Total de Med. Vs* 870  
*EJE 1 y EJE 3*

---

*Total mediciones Vp y Vs* 1740

#### **INTERPRETACION**

*Después de haber concluido la etapa de campo, se procedió al procesado de la información obtenida, siguiendo la siguiente metodología.*

*De los sismogramas se obtuvieron, para un tiro "X", seis tiempos de arribo de onda P y seis de onda S. Estos tiempos observados son reducidos a tiempos verticales que equivalen a una proyección sobre el eje del pozo. Esto se realiza para cada uno de los detectores.*

*La reducción a tiempos verticales considera la distancia horizontal del detector al pozo, su elevación con respecto a un nivel cero del brocal del pozo y la profundidad del punto de tiro. Se procede a realizar una gráfica con tiempos verticales contra profundidad, pudiendo así determinar las velocidades sísmicas, ya sean compresionales (onda P) o transversales (onda S).*

*Con ésto se pueden conocer velocidades de intervalo y definir zonas de mayor o menor velocidad dentro del mismo macizo rocoso.*

*Esta es una manera de interpretar la presencia de discontinuidades, mismas que se traducen en anomalías existentes en el macizo rocoso.*

*También se aplicó la técnica seguida por Meissner, en la cual los tiempos observados son configurados en una malla de distancia horizontal contra profundidad para analizar el comportamiento de las curvas isocronas.*

*En este estudio se realizó una conjugación de ambos métodos. En efecto, inicialmente se calcularon los tiempos verticales para cada uno de los detectores, considerando su topografía y velocidades de intervalo.*

*Con ésto se realizó una configuración tipo Meissner, no con tiempos sino con velocidades de intervalo, pudiendo definir claramente la distribución de horizontes anómalos.*

*Cabe mencionar que en los Up-Hole realizados en el EJE 1 la topografía no causó deformaciones significativas a los horizontes definidos. Sin embargo, en el EJE 3 la topografía jugó un papel muy importante, por lo cual se requirió realizar ajustes, tales como no considerar algunos geófonos y algunas áreas de la gráfica Meissner, que se veían sumamente afectadas por la topografía.*

*Cabe señalar que, por lo general, las zonas anómalas coinciden con baja a nula recuperación en las perforaciones y altas permeabilidades en las pruebas Lugeon y/o Lefranc.*

### **3.1.2.2 Método de Cross-Hole**

*El método de Cross-Hole es una variante de los métodos sísmicos, se utiliza para determinar espesores y velocidades de propagación, tanto longitudinales (P) como transversales (S), de las diferentes capas que constituyen el subsuelo. Para su aplicación es necesario contar con dos o más pozos que*

hayan cruzado las capas de interés y, preferentemente, que se encuentren ademados con tubería de PVC; de tal forma que las mediciones sísmicas se realicen dentro de ellos sin ocasionar derrumbes de paredes.

#### DISPOSITIVO EMPLEADO

La técnica consiste en realizar pequeñas detonaciones o perturbaciones en uno de los pozos a diferentes profundidades, y registrar en el pozo adyacente las vibraciones u ondas sísmicas mediante geófonos de pozos. Los geófonos se sitúan a profundidades semejantes a las que se realizan las detonaciones (figura 6). Por otro lado, la separación entre pozos debe diseñarse de acuerdo con los espesores de las capas que se quieran delimitar, de tal forma que se pueda garantizar que al menos una de las trayectorias fuente-geófono pase a través de la capa de interés.

En este caso la separación entre pozos fluctuó entre 20 y 25m y la separación entre geófonos fue de 3m. La profundidad para los siete pozos fue de 27m en cada uno de ellos. Los puntos de tiro se realizaron en forma secuencial a 27, 24, 21, 18, 15, 12, 9, 6 y 3m de profundidad, realizándose traslapes de puntos de tiro y posición de geófonos a las profundidades de 18, 15 y 12m.

#### EQUIPO DE MEDICION

El equipo utilizado consistió en lo siguiente:

- Sismógrafo Marca Geometrics Mod. 1225 de 12 canales.
- Detonador de dinamita sincronizado a dos sismógrafos.
- Cadena de geófonos de pozo con 6 componentes horizontales y 6 verticales, acoplados en pares.
- Batería de 12 volts para el sismógrafo.
- Dispositivo para detonar estopines eléctricos instantáneos.

# METODO DE CROSS - HOLE

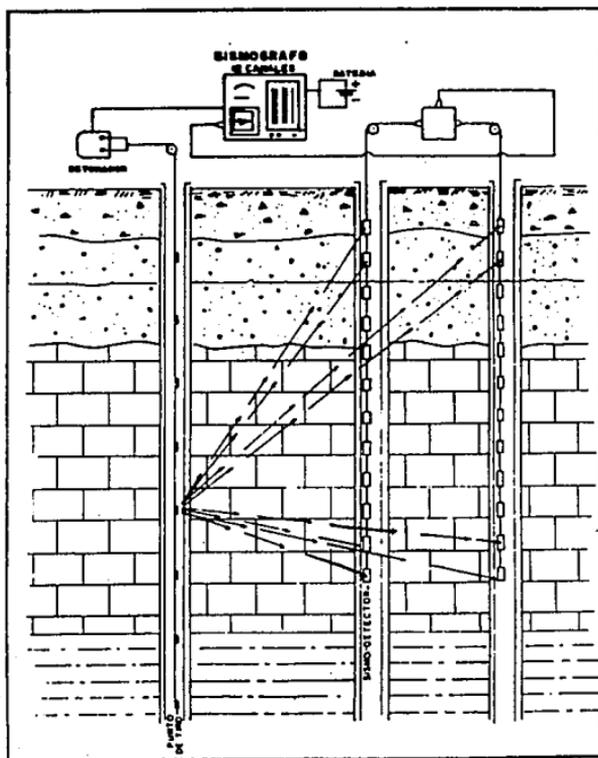


Fig. 6

## TRABAJO DE CAMPO

Para la medición de las velocidades longitudinales (VP) y transversales (VS) es necesario contar con una fuente rica en frecuencias que permita a definir los tiempos de arribo de las ondas.

Comunmente se utilizan estopines sismográficos instantáneos y pequeñas cargas de hidrogel encapsulados en un recipiente especial que impide la destrucción del pozo. Con esta técnica se utilizan varios sismodetectores igualmente espaciados en el pozo de recepción (figura 7), a fin de aprovechar íntegramente la perturbación producida en el pozo fuente. Este dispositivo permite, además de obtener las velocidades de propagación de cada uno de los estratos atravesados por la perforación, hacer una caracterización de la homogeneidad del subsuelo a través de un algoritmo matemático conocido como tomografía sísmica. (Planos 8 y 11). En la Tabla 3.5 se muestra el volumen de trabajo efectuado con el método de Cross-Hole, para ambas alternativas.

**TABLA 3.5 VOLUMEN DE TRABAJO REALIZADO  
CON EL METODO DE CROSS-HOLE**

ALTERNATIVA	POZO/MEDICIONES	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	TOTAL
EJE 1	No. de Med. Vp	72	72	72	72	72	72	432
	No. de Med. Vs	72	72	72	72	72	72	432
EJE 3	No. de Med. Vp	60	60	66	72	72	72	402
	No. de Med. Vs	60	60	66	72	72	72	402
<b>TOTAL</b>								<b>1668</b>

No. Total de Med. Vp  
EJE 1 y EJE 3

834

No. Total de Med. Vs  
EJE 1 y EJE 3

834

Total mediciones Vp y Vs

1668

## INTERPRETACION

*La tomografía sísmica es una técnica geofísica que permite estimar la geometría de cuerpos con velocidad sísmica contrastante a la de una roca encajonante. Para ello se utilizan 2 líneas paralelas de información que pueden ser 2 socavones ó 2 barrenos, uno de los cuales se emplea como emisor mientras que el otro aloja los mecanismos de recepción.*

*La figura 7 muestra el número de trayectorias fuente-geófono que cruzan un medio homogéneo y una celda de velocidad anómala. Si la celda es de baja velocidad, las trayectorias que la cruzan sufrirán un retraso en los tiempos de arribo, y si es de mayor velocidad que la de la roca encajonante ocasionará un adelanto de ellos.*

*Estas diferencias en los tiempos de arribo se utilizan para alimentar un algoritmo de inversión propuesto por Dines y Litle (1979), Newman (1981) y Vázquez (1981), para determinar la velocidad de cada una de las celdas rectangulares en que se ha subdividido el modelo.*

*Finalmente, la configuración de las velocidades de propagación de todas las celdas delimitará a grosso modo la forma, posición y número de los cuerpos de velocidad anómala.*

### 3.1.3 Parámetros Elásticos, Dinámicos y Estáticos

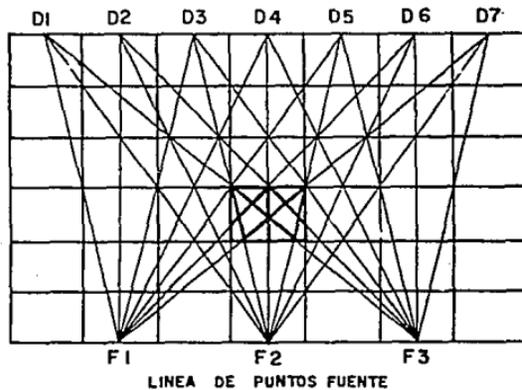
*El definir los parámetros elásticos en términos dinámicos y estáticos es importante para saber el comportamiento del macizo rocoso al sufrir deformaciones y cargas. Es por ello que para determinar parámetros tales como Relación de Poisson, Módulo de Young y Módulo de Corte, se requiere usar cierta metodología y criterios que a continuación se mencionan.*

## PROCESADO DE LA INFORMACION

*A partir de las velocidades de onda "P" y onda "S" determinados para cada unidad, mediante la geosísmica de refracción superficial y considerando los valores de densidad de cada una de las unidades, se calculan los módulos elásticos dinámicos, los cuales posteriormente se pueden correlacionar con los obtenidos en roca intacta mediante registros sísmicos con el fin de encontrar el grado de fracturamiento de los diferentes materiales a través del RQD teórico, el cual tiene por expresión:*

# TOMOGRAFIA SISMICA

LINEA DE PUNTOS DETECTORES



MODELO DE TRAYECTORIAS Y CELDAS

FIG 7

$$RQD = (V_f/V_l) **2$$

En donde  $V_f$  es la velocidad longitudinal del macizo y  $V_l$  la velocidad longitudinal de la muestra de roca intacta. Por otro lado, los sismógramas obtenidos en los registros de Up-Hole se utilizaron para determinar el período dominante de las ondas transversales "S" y, por consiguiente, su longitud de onda, con el fin de estimar los módulos de Young Estáticos del macizo rocoso a partir del uso de la gráfica de Schneider (figura 8), la cual proporciona el parámetro K, de reducción del módulo dinámico al estático tangente. Si aun se requiere determinar el módulo de Young estático secante es necesario aplicarlo nuevamente al módulo estático tangente ya reducido.

Para predecir el comportamiento elástico de un macizo rocoso es necesario realizar una prueba de placa, que en la práctica es complicada y costosa. Sin embargo, se han establecido algoritmos matemáticos que involucran a los módulos de Young de laboratorio (estáticos y dinámicos) así como dinámicos de campo, para llegar a un valor bastante aproximado al de placa. Para ésto es necesario conocer el período ( $T_s$ ) característico de las ondas transversales "S" de cada una de las unidades definidas mediante el Up-Hole para, posteriormente, calcular su longitud de onda ( $X_s$ ) según la siguiente relación

$$X_s = V_s / T_s$$

Con lo que podemos utilizar la gráfica de Schneider (figura 8) donde el factor de reducción del Módulo de Young dinámico o estático se puede obtener a partir de la longitud de onda.

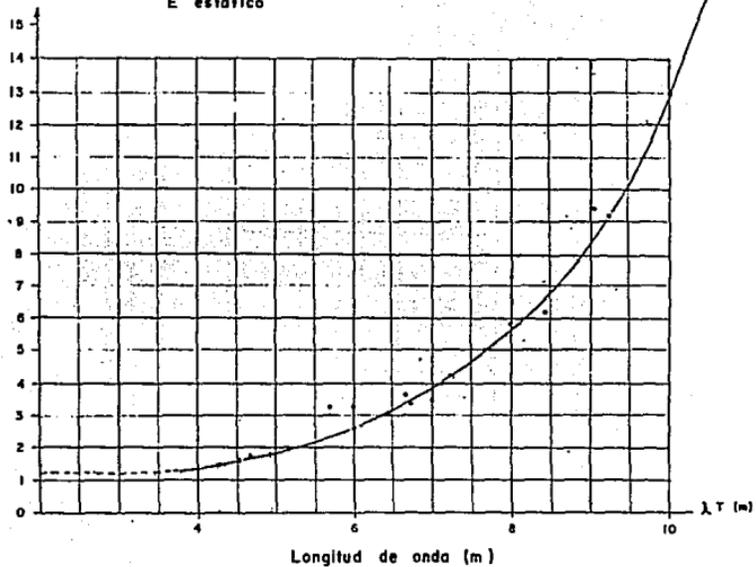
Cabe aclarar que dentro de los módulos estáticos, existen los tangentes y secantes, en nuestro caso la reducción que se hace es de módulos dinámicos a módulos estáticos tangentes. Para transformar a módulos estáticos secantes se requiere volver a aplicar el factor de reducción encontrado.

Es conveniente aclarar que el factor de reducción se aplica a los parámetros elástico-dinámicos calculados para el macizo rocoso mediante sismica de refracción superficial.

### 3.2 RESULTADOS

Después de terminar el procesado de la información y obtener una interpretación de los resultados, éstos se presentan para cada eje explorado y para cada método aplicado.

$$\kappa = \frac{E \text{ dinámico}}{E \text{ estático}} \quad (\text{Modulos de Young})$$



RELACION DE SCHNEIDER

FIG: 8

### 3.2.1 Eje 1

En este eje se aplicaron cuatro métodos geofísicos, los resultados obtenidos se presentan a continuación para cada método aplicado.

#### GEOSISMICA DE REFRACCION

Mediante el método de sísmica de refracción superficial se pudieron diferenciar dos unidades geosísmicas, en la Tabla 3.6 se presentan las características geosísmicas de las unidades diferenciadas.

TABLA 3.6 UNIDADES GEOSISMICAS DEFINIDAS  
EN EL EJE 1

UNIDAD	VELOCIDAD (m/s)	ESPESOR (m)	TIPO DE MATERIAL
A1	200-625	1.0-4.0	Suelo y acarrees poco compactos.
A2	400-1020	9.0-17.0	Acarrees de poco compactos a compactos.
B1	615-1080	0.5-14.0	Toba areno-arcillosa alterada y decomprimida.
B2	1080-1820	6.0-17.0	Toba areno-arcillosa poco compacta.
B3	1845-2450	indefinido	Toba areno-arcillosa compacta.

Cabe mencionar que a nivel del cauce y laderas, en ambas márgenes, las unidades B2 y B3 corresponden a la toba arenosa masiva y, en su parte superior, el vertedor de demasías corresponde a la toba estratificada (Plano 6). Es necesario mencionar que para efectos del comportamiento geosísmico de ambos macizos rocosos, éste es muy similar. Lo cual se puede observar en el Plano No. 6 en las líneas 8 y 9 respectivamente.

Otro aspecto importante es la existencia de un material hacia aguas abajo a nivel del río, el cual no se considera como acarreos, sino como toba alterada decomprimida. Es decir, la Unidad B2 se considera como remanente de las obras de limpia previas a la construcción de la cortina en la década de los años cincuentas.

#### GEOELECTRICA

Al igual que el método anterior, una vez realizado el procesamiento de la información se procede a la interpretación (Plano 7).

TABLA 3.7 UNIDADES GEOELECTRICAS DEFINIDAS  
EN EL EJE 1

UNIDAD	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)	TIPO DE MATERIAL
A1	61-833	0.5-1.0	Acarreos poco compactos y secos.
A2	2-69	0.5-14.0	Acarreos poco compactos y saturados.
B1	17-42	0.5-11.0	Toba areno-arcillosa alterada poco compacta.
B2	7-18	indefinido	Toba areno-arcillosa compacta.

La exploración geoelectrica nos ayudó a determinar que el macizo rocoso se comporta como una toba de matriz areno-arcillosa en su parte superficial y a profundidad con matriz de predominancia arcillo-arenosa. De la misma manera la exploración geoelectrica definió, a su vez, los contactos entre unidades de manera muy similar a la exploración geosísmica. Cabe aclarar que el contenido de material arcilloso en el macizo rocoso (tobáceo de origen) se correlaciona directamente con la permeabilidad obtenida durante las pruebas realizadas en barrenos.

## UP-HOLE

Para realizar el procesado de la información se construyeron configuraciones tipo Meissner en cada uno de los pozos estudiados. A su vez, éstas se conjuntaron para construirse un perfil continuo sobre el eje, con lo cual se definieron claramente horizontes de baja velocidad, asociables a materiales poco compactos, conformados dentro de un macizo rocoso más compacto.

Para este fin se configuró y realizó una separación por intervalos de velocidades. En la Tabla 3.8 se presenta la diferenciación de velocidades realizadas (Plano 8).

**TABLA 3.8 VELOCIDADES DEFINIDAS  
POR UP-HOLE EN EL EJE 1**

UNIDAD	VELOCIDAD (m/s)	TIPO DE MATERIAL
B1	menor a 500	Toba alterada y/o material de acarreo.
B2	500-1000	Toba areno-arcillosa poco compacta.
B3	1000-2500	Toba areno-arcillosa compacta.

Cabe mencionar que la extensión lateral de los horizontes encontrados se definió en conjugación con la tomografía sísmica o cross-hole.

También se correlacionó con la sísmica superficial realizada para definir las velocidades características de los horizontes establecidos. De la misma manera, se realizó una configuración para onda S y se definieron las velocidades para ondas P y S de los intervalos de velocidades bajas y medianas, y así calcular sus módulos elásticos dinámicos y, posteriormente, su reducción a estáticos.

## CROSS-HOLE O TOMOGRAFIA SISMICA

*De manera similar al método Up-Hole se realizó una configuración de curvas de isovelocidades, con la finalidad de conocer la extensión lateral de los horizontes de bajas y medianas velocidades. Cabe mencionar que estas configuraciones se realizaron para velocidades de onda P y S. En el presente trabajo sólo se presentan los resultados de onda P, ya que son más representativas del macizo rocoso.*

*Se diferenciaron intervalos de velocidades similares a los de Up-Hole, para así tener el mismo parámetro de comparación (Tabla 3.8 y Plano 8).*

## MODULOS ELASTICOS

*Las propiedades elásticas de los materiales se obtuvieron a partir de diferentes técnicas. a) De tendidos superficiales paralelos al cauce, b) Dentro de pozos con técnicas de Up-Hole, y c) En muestras de roca con pruebas sónicas de laboratorio.*

*Cabe mencionar que las unidades diferenciadas mediante sismica de refracción superficial, geoelectrica, up-hole y cross-hole son las mismas que fueron muestreadas para la obtención de sus módulos dinámicos en sus diversas modalidades los factores de reducción y módulos estáticos respectivos.*

*En la tabla 3.9 se presentan los resultados de los módulos dinámicos de macizo rocoso.*

*En la tabla 3.10 se presentan los resultados de los módulos dinámicos mediante up-hole.*

*En la tabla 3.11 se presentan los resultados obtenidos mediante el método ultrasónico de laboratorio.*

*Finalmente en la Tabla 3.12 se muestran las características elásticas-dinámicas, factores de reducción y los módulos estáticos pronosticado, tangente y secante, obtenidos a partir de los primeros parámetros.*

**TABLA 3.9 MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DE MACIZO ROCOSO DEFINIDOS PARA EL EJE 1 A PARTIR DE TENDIDOS SUPERFICIALES**

UNIDAD	VELOCIDAD Op (m/s)	VELOCIDAD O <sub>s</sub> (m/s)	ESPESOR (m)	U RELACION DE POISSON	E MODULO DE YOUNG (ton/cm <sup>2</sup> )	G MODULO DE CORTE (ton/cm <sup>2</sup> )
A1	200-625	-	1-4	-	-	-
A2	400-1020	-	9-17	-	-	-
B1	615-1080	85-345	0.5-13	.38-.38	2.3-4.7	1.07-1.7
B2	1085-1820	525-850	6-17	.35-.38	12.5-35.0	4.5-12.7
B3	1845-2450	730-1250	indefinido	.37-.39	41.6-58.1	14.8-20.9

**TABLA 3.10 PROPIEDADES ELASTICAS DINAMICAS OBTENIDAS MEDIANTE UP-HOLE PARA EL EJE 1**

UNIDAD	VELOCIDAD Op (m/s)	VELOCIDAD O <sub>s</sub> (m/s)	TS PUNTO DE ONDA S (m/s)	U RELACION DE POISSON	E MODULO DE YOUNG (ton/cm <sup>2</sup> )	G MODULO DE CORTE (ton/cm <sup>2</sup> )
B1	605-1015	220-480	8.5	.33-.4	2.3-10.9	.81-4.0
B2	1180-1790	455-760	7.0	.33-.4	10.2-28.0	3.6-10.1
b3	2110-2180	1070-1390	6	.31-.34	64.8-90.6	24.9-39.6

**TABLA 3.11 MODULOS ELASTICO-DINAMICOS OBTENIDOS DE PRUEBAS ULTRASONICAS EN ROCA INTACTA, EJE 1**

UNIDAD	VELOCIDAD Op (m/s)	VELOCIDAD O <sub>s</sub> (m/s)	U RELACION DE POISSON	E MODULO DE YOUNG (ton/cm <sup>2</sup> )	G MODULO DE CORTE (ton/cm <sup>2</sup> )
B1	980-1050	350-360	.42-.43	5.1-8.7	1.2-3.2
B2	1110-1290	480-610	.33-.38	9.5-17.4	3.4-6.4

**TABLA 3.12 CARACTERISTICAS ELASTICAS DINAMICAS, ESTATICAS Y FACTORES DE REDUCCION APLICADOS PARA EL EJE 1.**

UNIDAD	B1	B2	B3
V P M (m/s)	615-1000	1035-1820	1845-2450
V P U H (m/s)	600-1015	1180-1740	2110-2180
Longitud de onda (m)	2.97	4.25	6.4
<b>PARAMETROS DIAMICOS</b>			
Relación de Poisson $\nu$	.38-.39	.35-.38	.37-.39
Módulo de Young E (ton/cm <sup>2</sup> )	2.3-4.7	12.5-35	41.6-58.1
Módulo de Corte G (ton/cm <sup>2</sup> )	1.07-1.7	4.5-12.7	41.6-58.1
Factor de reducción K	1.3	1.5	2
Módulo de Young tangente E (ton/cm <sup>2</sup> )	1.7-3.6	8.3-23.0	20.8-29
Módulo de Young secante E (ton/cm <sup>2</sup> )	1.3-2.8	5.5-15.5	10.9-14.5

### 3.2.2 Eje 3

Al igual que en el Eje 1, se aplicaron cuatro métodos diferentes de exploración geofísica. Los resultados se discuten a continuación:

#### GEOSISMICA DE REFRACCION

Mediante este método de exploración geofísica, se pudieron definir dos unidades, las cuales se caracterizaron mediante su velocidad de propagación de onda P, asociándose con las condiciones del tipo de material del subsuelo. En la Tabla 3.13 se muestran las unidades definidas (Plano 9).

**TABLA 3.13 UNIDADES GEOSISMICAS DEFINIDAS  
EN EL EJE 3**

UNIDAD	VELOCIDAD (m/s)	ESPESOR (m)	TIPO DE MATERIAL
A1	120-520	1.0-3.5	Suelo y material de talud suelto.
A2	300-1050	7.0-18.9	Material de talud semicompacto y terrazas aluviales.
B2	1210-1570	1.5-6.0	Toba poco compacta.
B3	1815-2480	indefinido	Toba compacta.

Uno de los aspectos más importantes definidos por este método de exploración es la caracterización de un gran espesor de talud en las laderas, mismo que en las campañas anteriores de exploración se consideró como toba alterada. De la misma manera, también se definieron horizontes de toba poco compacta que más adelante se integran a los resultados obtenidos mediante otros métodos de exploración Geofísica.

#### GEOELECTRICA

Mediante este método se definieron dos unidades geoelectricas. En la Tabla 3.14 se muestran las unidades definidas y el tipo de material asociado.

**TABLA 3.14 UNIDADES GEOELECTRICAS DEFINIDAS EN EL EJE 3**

UNIDAD	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)	TIPO DE MATERIAL
A1	24-405	0.5-16.0	Material de talud poco compacto
A2	15-27	7.5-20.0	Acarreos saturados poco compactos.
B1	24-40	0.5-10.0	Toba areno-arcillosa poco compacta.
B2	2-18	indefinido	Toba areno-arcillosa compacta.

Al igual que en el Eje 1 se definió a las unidades B1 y B2 por una predominancia de matriz arcillosa en el caso de la B2 y por un mayor contenido de material arenoso en la B1.

Cabe hacer la observación que el contacto entre la toba (B) y los acarreos (A2) se definió muy bien, teniéndose un espesor máximo de 21m, cosa que mediante la sísmica de refracción superficial no se pudo definir por existir un depósito de acarreos compactos (Plano 10).

En este caso también el contenido de arcilla no es muy alto, lo que hace que el material sea poco permeable.

#### UP-HOLE

Al igual que en el EJE 1 se construyeron las configuraciones tipo Meissner para cada uno de los pozos estudiados. Cabe mencionar que aquí la topografía jugó un papel muy importante, por lo cual, al construir el perfil continuo, se tomaron sólo las zonas más representativas de las gráficas Meissner, con lo que se definieron claramente horizontes de baja velocidad, asociados a material de talud y/o material de acarreo, mismos que se encuentran encajonados por un material más compacto, aunque éste presenta zonas anómalas de mediana velocidad.

Para este fin se configuró y se separó por intervalos de velocidad, asociados al tipo de material encontrado (Plano 11) En la Tabla 3.15 se presentan las unidades definidas.

**TABLA 3.15 VELOCIDADES DEFINIDAS POR UP-HOLE EN EL EJE 3**

UNIDAD	VELOCIDAD (m/s)	TIPO DE MATERIAL
A1, A2	menor a 500	Material de talud y acarreos fluviales.
B2	500-1000	Toba arcillo-arenosa poco compacta.
B3	1000-2500	Toba areno-arcillosa compacta.

*Cabe mencionar que para definir claramente la extensión lateral de los horizontes de la toba poco compacta se conjugaron los resultados con los de la tomografía sísmica o cross-hole.*

*También se correlacionó con los resultados de la sísmica superficial para definir las velocidades características de cada uno de los horizontes. Se realizó la configuración tipo Meissner por Velocidades de onda "S", presentándose en este trabajo sólo las de onda P por ser las más representativas.*

*Las velocidades de Onda P, definidas para los diferentes estratos mediante Up-hole, se utilizaron también para la obtención de los módulos elásticos dinámicos y, posteriormente, para obtener el factor de reducción y cálculo de los estáticos, de placa (pronosticados).*

#### **CROSS-HOLE O TOMOGRAFIA SISMICA**

*Al igual que en el EJE 1, se realizó una configuración de curvas de isovelicidad, para ondas "P" y "S", con la finalidad de conocer la extensión lateral de los horizontes de baja velocidad. En el caso de este eje al realizar las configuraciones de cada una de las tomografías, para formar el perfil del eje algunas de estas configuraciones sufrirán una deformación considerable a causa de los efectos topográficos, por lo cual se evaluó su influencia y no se consideraron ciertas áreas de las configuraciones mencionadas, para así tener una mayor visión de los resultados obtenidos.*

*Para el caso de las velocidades predominaron entre 600-900 m/s por lo cual se pueden asociar a un material poco compacto, pero no obstante ello, en la configuración se muestran los efectos asociados a los horizontes de bajas velocidades.*

*La diferenciación de velocidades y materiales se observa y es la misma que para el método de Up-Hole, Tabla 3.15 (Plano 11).*

#### **MODULOS ELASTICOS**

*De la misma manera en que se procedió para el Eje 1 se hizo en el Eje 3. Así, los parámetros elásticos de los diferentes materiales presentes en el Eje 3 se obtuvieron de las diferentes técnicas aplicadas.*

En la Tabla 3.16 se presentan las propiedades elasto-dinámicas de las unidades geosísmicas definidas a partir de tendidos superficiales. Las unidades geosísmicas son las mismas que las definidas para el Eje 1.

En la tabla 3.17 se muestran las propiedades elásticas-dinámicas calculadas a partir de los resultados de Up-Hole. Cabe señalar que se calcularon únicamente para las subunidades A1/B1 y B2 y B3.

Por otro lado, en la Tabla 3.18 se muestran los parámetros elasto-dinámicos obtenidos de roca intacta de pruebas de laboratorio por el método ultrasónico. Al igual que en el Eje 1 las muestras corresponden a las subunidades B1 y B2.

Finalmente, en la Tabla 3.19 se muestran las características elásticas dinámicas, factores de reducción y los módulos elásticos pronosticados, tangente y secante, obtenidos a partir de los primeros parámetros.

**TABLA 3.16 MODULOS ELASTICOS DINAMICOS DE MACIZO ROCOSO  
DEFINIDOS PARA EL EJE 3**

UNIDAD	VELOCIDAD O <sub>p</sub> (m/s)	VELOCIDAD O <sub>s</sub> (m/s)	ESPESOR (m)	$\mu$ RELACION DE POISSON	E MODULO DE YOUNG (ton/cm <sup>2</sup> )	G MODULO DE CORTE (ton/cm <sup>2</sup> )
A1	120-520	-	1.0-3.5	-	-	-
A2/B1	630-1050	240-400	7.0-18	.38-.4	2.3-6.3	.34-2.2
B2	1210-1570	475-830	1.5-16	.34-.39	9.5-13.6	3.4-4.5
B3	1820-2480	715-1075	Indefinido	.33-.43	31.5-62.5	10.9-22.9

**TABLA 3.17 PROPIEDADES ELASTICAS-DINAMICAS OBTENIDAS  
MEDIANTE UP-HOLE PARA EL EJE 3**

UNIDAD	VELOCIDAD Op (m/s)	VELOCIDAD Os (m/s)	T5 PUNTO DE ONDA S (m/s)	$\nu$ RELACION DE POISSON	E MODULO DE YOUNG (ton/cm <sup>2</sup> )	G MODULO DE CORTE (ton/cm <sup>2</sup> )
B1	610-950	200-460	8	.34-.43	2.05-9.5	.71-3.5
B2	1190-1790	410-740	7.5	.32-.39	8.4-29.9	2.9-11.4
B3	1850-2250	650-1000	6	.37-.41	22.5-58.9	7.8-21.4

**TABLA 3.18 MODULOS ELASTICO-DINAMICOS OBTENIDOS DE  
PRUEBAS ULTRASONICAS EN ROCA INTACTA. EJE 3**

UNIDAD	VELOCIDAD Op (m/s)	VELOCIDAD Os (m/s)	$\nu$ RELACION DE POISSON	E MODULO DE YOUNG (ton/cm <sup>2</sup> )	G MODULO DE CORTE (ton/cm <sup>2</sup> )
B1	990-1080	470-535	.35-.37	8.5-11.1	3.1-4.2
B2	1210-1440	520-740	.33-.37	11.3-14	3.9-5.2

**TABLA 3.19 CARACTERISTICAS ELASTICAS DINAMICAS, ESTATICAS Y  
FACTORES DE REDUCCION APLICADOS PARA EL EJE 3**

<i>UNIDAD</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
<i>V P M (m/s)</i>	<i>630-1050</i>	<i>1210-1570</i>	<i>1820-2480</i>
<i>V P U H (m/s)</i>	<i>610-950</i>	<i>1190-1790</i>	<i>1850-2255</i>
<i>Longitud de onda (m)</i>	<i>2.64</i>	<i>4.29</i>	<i>4.95</i>
<b>PARAMETROS DIAMICOS</b>			
<i>Relación de Poisson <math>\mu</math></i>	<i>.38-.4</i>	<i>.34-.39</i>	<i>.33-.44</i>
<i>Módulo de Young E (ton/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>2.3-6.3</i>	<i>9.5-13.6</i>	<i>31.5-62.5</i>
<i>Módulo de Corte G (ton/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>1.84-2.2</i>	<i>9.5-13.6</i>	<i>31.5-62.5</i>
<i>Factor de reducción K</i>	<i>1.2</i>	<i>1.5</i>	<i>1.85</i>
<i>Módulo de Young tangente E (ton/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>1.9-5.25</i>	<i>6.33-9</i>	<i>17.02-33.8</i>
<i>Módulo de Young secante E (ton/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>1.59-4.37</i>	<i>4.22-6</i>	<i>9.2-18.3</i>

#### 4. PRUEBAS DE LABORATORIO

*De los núcleos de roca recuperados en las perforaciones exploratorias se seleccionaron 25 muestras, todas de la toba arenosa de la UIII, para someterlas a pruebas de laboratorio.*

*De todos los especímenes se obtuvo peso volumétrico en estado tanto seco como saturado y a 10 muestras se les sometió a la prueba de Resistencia a la Compresión Simple (Rc) y Módulo de Deformación (E50). Los resultados se muestran en la Tabla 4.1, misma en la que, además, se indica el eje de exploración y número de la perforación de que se obtuvieron, así como la profundidad a la que se recuperó el espécimen.*

*Por otro lado, a todos los especímenes se les midió su velocidad de propagación de ondas P ( $V_p$ ) y S ( $V_s$ ), a partir de las cuales se calculó su Relación de Poisson, Módulo de Deformación (Edin) y Módulo de Rigidez dinámicos (G). Estos parámetros se muestran en la Tabla 4.2.*

*Para comparación de los resultados obtenidos, en las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran, también, la media y rango obtenidos en las pruebas realizadas tanto en esta campaña de exploración como en la previa.*

*Como se observa, el rango y media de todos los parámetros obtenidos en ambas fases de exploración es similar y del mismo orden.*

*Cabe aclarar que todos los estudios de laboratorios se realizaron conforme a los lineamientos de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.*

*Los resultados de estas pruebas se involucran en la obtención de módulos estáticos de macizo rocoso (Capítulo 3), así como en la caracterización geotécnica de las unidades de roca (Capítulo 5).*

TABLA 4.1

RESULTADOS DE LABORATORIO DE PROPIEDADES INDICE Y CARACTERISTICAS  
 GEOMECANICAS DE MUESTRAS DE LA UNIDAD III  
 PROVENIENTES DE PERFORACIONES

MUESTRA A No.	EJE	BARRENO	PROF (m)	PESO VOLUMETRICO		RESISTENCIA COMPRESION kg/cm2	RELACION ESBELTEZ H/D	E50 Ton/cm2
				SAT. g/cm3	SECO g/cm3			
1	1	4	13.6	1.73	1.45	26.69	2.67	3.576
2	1	4	23.5	1.72	1.43			
3	1	1	17.6	1.72	1.44			
4	1	5	20.0	1.72	1.44	24.9	2.75	3.490
5	1	5	18.0	1.73	1.46			
6	1	3	11.0	1.72	1.44			
8	1	7	13.5	1.75	1.47	22.9	1.67	3.231
9	1	4	6.5	1.64	1.38	24.2	2.79	3.472
10	1	4	9.7	1.72	1.42			
11	1	3	28.5	1.70	1.45			
13	1	1	23.0	1.68	1.39	24.9	2.59	3.560
14	1	2	18.0	1.70	1.42	23.0	2.39	3.380
15	1	2	16.0	1.73	1.51			
16	1	3	12.5	1.72	1.42	29.1	2.81	3.963
17	1	3	15.0	1.74	1.46	16.6	2.64	3.138
18	3	3	11.0	1.72	1.43	32.2	1.91	4.112
19	3	3	12.2	1.74	1.46			
20	3	2	19.5	1.68	1.39			
21	3	2	22.7	1.66	1.38			
22	3	1	18.5	1.64	1.38			
23	3	1	15.0	1.71	1.47			
25	3	4	14.7	1.67	1.39			
27	3	4	17.0	1.69	1.40			
*28	3	4	28.0	2.33	2.32	328.6	2.55	86.300
29	3	7	13.0	1.72	1.46			
<i>Promedio</i>				1.71	1.73	24.9		3.47
<i>Rango</i>				1.64-175	1.38-1.51	16.6-32.2		3.38-4.112
<b>CAMPAÑA PREVIA DE EXPLORACION</b>								
<i>Promedio</i>				1.77		25.4		4.0
<i>Rango</i>				1.61-2.10		7.5-59.1		1.0-12.0

\* Muestra no considerada en rango y promedio por tener parámetros contrastantemente fuera de rango.

TABLA 4.2

RESULTADOS DE LABORATORIO DE PARAMETROS ELASTICOS-DINAMICOS DE  
MUESTRAS DE LA UNIDAD III PROVENIENTES DE PERFORACIONES.

MUESTRA	V <sub>p</sub> m/s	V <sub>s</sub> m/s	RELACION DE POISSON	E <sub>din</sub> ton/cm <sup>2</sup>	G ton/cm <sup>2</sup>
1	1154	480	0.39	9.5	3.4
2	978	350	0.42	5.1	1.7
3	1154	572	0.33	12.8	4.8
4	1161	607	0.31	14.2	5.4
5	1111	563	0.32	12.4	4.7
6	1119	537	0.35	11.4	4.2
8	1350	657	0.34	16.4	6.4
9	1678	823	0.34	24.7	9.2
10	1140	493	0.38	9.7	3.5
11	1045	465	0.37	8.7	3.2
13	1249	493	0.40	9.7	3.4
14	1048	363	0.43	5.4	1.2
15	1266	649	0.32	17.1	6.4
16	1264	624	0.33	15.0	5.9
17	1283	657	0.32	16.9	6.4
18	1077	535	0.33	11.1	4.2
19	992	496	0.33	9.7	3.9
20	1263	606	0.35	14.0	5.2
21	1211	316	0.46	4.1	1.4
22	1058	470	0.37	8.5	3.1
23	1439	740	0.32	21.6	8.2
25	1233	436	0.42	7.7	2.7
27	1210	600	0.33	13.7	5.1
28*	3225	1488	0.36	52.6	52.3
29	1375	518	0.42	11.3	3.9
Promedio	1203	544	0.36	12.2	4.5
Rango	978-1678	316-823	0.23-0.46	4.1-24.7	1.2-9.2
<b>CAMPAÑA PREVIA DE EXPLORACION</b>					
Promedio	1346	698	0.31	26.6	10.1
Rango	625-300	375-1500	0.30-0.33	4.4-54.0	1.7-20.6

\* Muestra no considerada y promedio por tener parámetros contrastantemente fuera de rango.

## 5. GEOTECNIA

### 5.1 ZONIFICACION GEOTECNICA

*A partir de los datos obtenidos durante las diferentes etapas de exploración se llegó a una zonificación geotécnica que se basó en parámetros, tales como: litología, permeabilidad, velocidad de ondas sísmicas (P y S) y módulos de elasticidad estáticos- dinámicos.*

*Se definieron dos unidades geotécnicas, la primera, denominada como A donde se agruparon los siguientes materiales sueltos: suelos, terrazas aluviales, acarrees y depósitos de talud; mientras que la segunda (B), es la unidad VIII, que corresponde a la toba arenosa. En las dos unidades fue posible establecer subunidades con parámetros geomecánicos característicos.*

*El presente apartado señala la zonificación geotécnica de cada alternativa, así como las características y distribución de las unidades y subunidades geotécnicas.*

*La presente etapa de exploración incluyó la aplicación de varias técnicas para el estudio de los materiales alojados en la zona del cauce, acarrees (Qac), y terrazas aluviales (Qe), materiales de talud (Qt), así como de la toba arenosa (VIII).*

*Sobre la toba arenosa (y posiblemente parte de la VII, según la altura final de la presa) se desplantará la cortina, mientras que el resto de unidades corresponde a materiales de limpia. En términos generales se definieron dos unidades geotécnicas con algunas características variables que permitieron su subdivisión.*

*La Tabla 5.1 muestra a las unidades geotécnicas con sus características distintivas. En ésta, primeramente se señala la litología asociada y posteriormente los parámetros que permitieron diferenciarlos.*

*En efecto, se mencionan los rangos de permeabilidad obtenidos durante las pruebas Lugeon y LeFranc, las velocidades sísmicas y sus correspondientes módulos de Young para el macizo rocoso. Se obtuvo, asimismo, un factor de reducción para llegar a módulos estáticos de macizo, tangente y secante.*

*El factor de reducción involucra las frecuencias de ondas P y S obtenidas en pruebas de laboratorio y en los estudios de Cross-Hole, Up-Hole y tendidos superficiales, así como los pesos volumétricos de laboratorio.*

TABLA 5.1  
 CARACTERÍSTICAS GEOTECNICAS DE LAS UNIDADES QUE AFLORAN EN LOS EJES 1 Y 3 DEL CAÑON LA JURDA

PARAMETROS	UNIDADES GEOTECNICAS									
	EJE 1					EJE 3				
	A1	A2	B1	B2	B3	A1	A2	B2	B3	
LITOLOGIA	SUELOS	TALUD TERRAZAS CLASURAS Y	TOBA ARENOSA DECONFINADA	TOBA POCO PACTA	TOBA ARENOSA CON COMPACTA	SUELOS	TALUD TERRAZAS CLASURAS Y	TOBA ARENOSA CON COMPACTA	TOBA ARENOSA COMPACTA	
PERMEABILIDADES										
Lefranc (cm/s)	(1)	10 <sup>(-4)</sup> a 10 <sup>(-5)</sup>	10 <sup>(-4)</sup> a 10 <sup>(-5)</sup>	10 <sup>(-4)</sup>	10 <sup>(-4)</sup> a 10 <sup>(-5)</sup>	10 <sup>(-3)</sup> a 10 <sup>(-5)</sup>	10 <sup>(-3)</sup> a 10 <sup>(-5)</sup>	10 <sup>(-4)</sup>	10 <sup>(-4)</sup> a 10 <sup>(-5)</sup>	
Límite (U.L.)	(1)	(1)	(1)	1 a 2	0 a 3	(1)	NOA	0.5 a 4	1 a 2	
Presión Crítica (kg/cm2)	-	-	2.5 a 8	8 a 10	6.3 a 8.6	-	1 a 4	3 a 8.7	6 a 7.6	
VELOCIDADES SÍSMICA DE MACIZO ROCOSO										
V <sub>o</sub> (m/s)	200-625	400-1120	615-1080	1085-1820	1845-2450	1120-520	630-1050	1210-1570	1515-2480	
V <sub>s</sub> (m/s)	-	-	285-365	525-650	790-1250	-	-	475-630	715-1675	
MÓDULOS DE YOUNG DEL MACIZO ROCOSO										
Edín (ton/cm2)	-	-	2.3-6.7	12.5-35	61.6-58-1	-	-	9.5-13.6	31.5-62.5	
Factor de rotación	-	-	1.3	1.3	2.0-20.8	-	-	3.5	1.85	
Estáticos pronosticados										
Tanente (ton/cm2)	-	-	1.7-3.6	8.3-23	20.8-29	-	-	6.3-9.0	17.0-33.8	
Secante (ton/cm2)	-	-	1.2-2.8	5.1-15.5	10.4-14.5	-	-	4.2-6.6	9.2-18.3	
CLASIFICACION G (BARTON)										
ROD	-	-	10	10	80	-	-	10	80	
J <sub>n</sub>	-	-	0.75	0.75	0.75	-	-	75	0.75	
J <sub>r</sub>	-	-	3	3	3	-	-	3	3	
J <sub>e</sub>	-	-	3	3	0.75	-	-	3	0.75	
J <sub>v</sub>	-	-	0.66	0.5	1	-	-	0.5	1	
SRF	-	-	10	10	5	-	-	10	5	
u	-	-	0.88	0.66	85	-	-	0.66	85	
Calidad	-	-	muy mala	muy mala	muy buena	-	-	muy mala	muy buena	
PMR = f (Q)	-	-	43	40	84	-	-	40	84	
CLASIFICACION RMR (ORIENTANSU)										
Resistencia	-	-	1	1	1	-	-	1	1	
ROD	-	-	4	3	16	-	-	3	16	
Esquecimiento	-	-	20	20	20	-	-	20	20	
Características de discontinuidades	-	-	20	10	25	-	-	10	25	
Condición de agua	-	-	7	0	15	-	-	0	15	
Agente	-	-	-2	-2	-2	-	-	-2	-2	
Valor	-	-	50	32	75	-	-	32	75	
Clase	-	-	III	IV	II	-	-	IV	II	
Calidad	-	-	regular	poor	buena	-	-	poor	buena	

NOTAS SOBRE PERMEABILIDAD

(1) Tramo no probado. (2) Una prueba llegó a 2.5, otra a 8 y algunas a 10kg/cm2; en algunos casos no se obtuvo. (3) Solo se pudieron realizar 4 pruebas una se llevó a 8.6kg/cm2 y las demás a 10kg/cm2. (4) Entre 6.3 y 8.6 pero la mayor parte de las pruebas se llevó a 10kg/cm2. (5) Entre 3 y 8.7, pero algunas pruebas se llevaron a 10kg/cm2. (6) Las pruebas se llevaron a 10kg/cm2 pero algunas alcanzaron 6 y 7.6kg/cm2.

*Cabe aclarar que para la unidad geotécnica A, por ser representativa de materiales sueltos, no se obtuvieron módulos elásticos dinámicos y por lo tanto estáticos.*

*También la Tabla 5.1 muestra para las subunidades de la unidad B las calidades de roca obtenidas a partir de las clasificaciones Q de Barton y RMR de Bieniawski, así como las puntuaciones respectivas para cada uno de los parámetros en el cálculo de las mismas.*

*La distribución en el subsuelo de las subunidades geotécnicas, en los ejes 1 y 3, se ilustra en las figuras 9 y 10.*

#### **- UNIDAD GEOTECNICA A**

*Esta unidad corresponde a materiales sueltos, no litificados, y muy permeables, con valores del orden de 10 E(-3) a 10 E(-4) cm/s en pruebas Lefranc. Sus velocidades de onda P son bajas, entre 200 y 1049 m/s, indican materiales en estado suelto. En base a velocidades esta unidad se subdividió en dos: A1 y A2.*

*La Subunidad A1 presenta el rango más bajo de velocidades, entre 200 y 625 m/s, corresponde a la capa de suelos residuales y vegetales, así como materiales de talud en estado prácticamente suelto, su espesor varía de unos cuantos centímetros hasta un máximo de 2m.*

*La Subunidad A2 presenta velocidades más altas que la A1, del orden de 333 a 1049 m/s, lo que implica materiales un poco más compactos, aunque no litificados, incluye principalmente a los acarreos, aunque también a las terrazas aluviales y depósitos de talud. Su espesor es variable, en el Eje 1 oscila entre 0 y 2m en la margen izquierda, 6 a 7m en el cauce actual y llega hasta 18m del lado de la margen derecha. En el Eje 3 cuenta con un espesor de 6 a 10m en la margen izquierda, unos 11m en el actual cauce y 21m en la margen derecha. Es decir, esta unidad tiene un notable engrosamiento hacia la margen derecha, en ambos ejes de exploración, el cual no se había interpretado en los estudios previos.*

*Dado que la Unidad Geotécnica A es de mala calidad y que por sus características geotécnicas deberá ser removida, como se detallará más adelante (material de limpieza), no se consideró de utilidad para la caracterización geotécnica por los sistemas Q y RMR.*

## - UNIDAD GEOTECNICA B

La unidad B presentó una amplia gama de valores en sus parámetros que permitieron diferenciarla en tres subunidades, mismas que se muestran en la Tabla 5.1. Cabe señalar que su clasificación geomecánica resultó igual en cada subunidad, sin importar el eje estudiado, esto se debe a que las condiciones geotécnicas consideradas son, a su vez, similares.

Como Subunidad B1 se diferenció a la porción decomprimida y permeable a poco permeable de la toba arenosa. Presenta el rango más bajo de velocidades de ondas sísmicas ( $V_p$ : 614 a 1082 m/s y  $V_s$ : 237 a 398 m/s), por lo que su módulo de elasticidad estático ( $E_s$ ) pronosticado la caracteriza como la subunidad más deformable de la toba arenosa (1.7-3.6 ton/cm<sup>2</sup>). Su calidad geomecánica es Muy Mala, según Barton ( $Q=0.88$ ) y Regular, según Bieniawski ( $RMR=50$ , clase III). Esta subunidad sólo se detectó en la margen izquierda del Eje 1, con espesor variable, de 0 a 10m. Mientras que en el Eje 3 su distribución fue muy aleatoria no definiéndose claramente en ningún caso.

La Subunidad B2 corresponde a lentes menos compactos que se distribuyen de una manera errática en la toba arenosa. En las pruebas Lefranc resultaron ser permeables; sin embargo, en las pruebas Lugeon, en algunos casos, se llegó a subir presión de hasta 10 kg/cm<sup>2</sup>, con permeabilidades de 0.5 a 4 U.L., pero por lo general la presión crítica encontrada oscila entre 3 y 8.7 kg/cm<sup>2</sup>, lo que hace pensar en heterogeneidades dentro de estos lentes menos compactos.

El rango de velocidades sísmicas de esta subunidad varía de 1085 a 1818 m/s para la onda P y de 474 a 850 m/s para la onda S. El Módulo de Young estático tangente, pronosticado a partir de sus parámetros dinámicos, es de 6.3 a 23.0 ton/cm<sup>2</sup>, lo cual la señala como muy deformable. Su clasificación geomecánica según Barton es de Muy Mala calidad, con  $Q$  de 0.66, mientras que la clasificación de Bienawski la considera como de Pobre Calidad, Con  $RMR$  de 32 puntos; es decir que para ambas clasificaciones geomecánicas es de calidad inferior a la subunidad B1.

A pesar de que se habían detectado zonas muy permeables con distribución errática en los diferentes ejes explorados previamente, esta anomalía se había relacionado con zonas de fracturas. Sin embargo, al analizar toda la información generada, tanto en esta etapa de estudios como como en campañas previas, se llegó a la conclusión de que dichas zonas tienen una distribución horizontal a manera de lengüetas, por lo mismo se separó como una subunidad menos compacta dentro de la toba arenosa.

Finalmente, el grueso de la toba arenosa se incluyó en la Subunidad B3. Esta resultó permeable a poco permeable en las pruebas Lefranc y prácticamente impermeable en las Lugeon, sin embargo, cabe aclarar que algunas de las pruebas llegaron a presiones críticas entre 6 y 9 kg/cm<sup>2</sup>. El rango

de sus velocidades sísmicas es de 1817 a 2478 m/s para onda P y de 716 a 1750 m/s para onda S, por lo mismo, el módulo de elasticidad estático-dinámico varía entre 17 y 33.8 ton/cm<sup>2</sup>, de manera que es la menos deformable de las subunidades.

Su clasificación según Barton es Muy Buena con  $Q=85$ , mientras que según Bieniawski es buena con  $RMR=75$ . La alta calidad que se tiene es función de la prácticamente nula presencia de discontinuidades en el macizo rocoso, sin embargo es necesario no dejar de señalar que resulta ser de resistencia muy baja (Resistencia a la compresión simple en muestras decomprimidas del orden de 25 kg/cm<sup>2</sup>) y que tiene un módulo relativo bajo (también de pruebas de laboratorio en las mismas muestras decomprimidas).

Al comparar los Módulos de Young estáticos de laboratorio, así como los pronosticados para el macizo rocoso, en las dos últimas etapas de exploración se observa similitud en ambos casos, así los de laboratorio son del orden de 4 ton/cm<sup>2</sup>, mientras que los pronosticados para el macizo son del orden de 20 a 30 ton/cm<sup>2</sup>. Es decir que los rangos son correspondientes en ambas etapas de exploración.

Sin embargo, llama la atención que los módulos de laboratorio sean entre una quinta y una sexta parte de los pronosticados para el macizo rocoso.

Por otro lado, también la existencia de la subunidad geotécnica B1 llama la atención. En efecto, su distribución coincide con la zona de limpia realizada en la abandonada campaña de construcción en el Eje 1, de fines de los años cincuentas. Por lo tanto la roca se decomprimió rápidamente, hasta unos 10m de profundidad, en tan sólo unos 30 años. Es decir que al quitarle confinamiento la toba arenosa se decompone de forma acelerada.

Es probable que ambos fenómenos (relación Módulos de Young estáticos de laboratorio-ponosticados de macizo rocoso y rápida decompresión del macizo rocoso), a su vez, se relacionan. Es decir, los núcleos de roca obtenidos de perforación se alteran y decomprimen rápidamente durante el lapso de tiempo que transcurre entre su extracción y pruebas de laboratorio; y por lo mismo, resultan más bajos que los esperados para el macizo rocoso. Por lo anterior los resultados de resistencia y deformabilidad obtenidos en laboratorios deben tomarse con reservas.

## EJE 1

## ZONIFICACION GEOTECNICA

UNIDAD	PERMEABILIDAD	V <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	MODULO DE YOUNG (DINAMOS) ESTADO PROMEDIADO (ton/cm <sup>2</sup> )	CALIDAD GEOTECNICA	Q	RNR
A	1	NOY PERMEABLE	850-900	--	--	--	--
	2	NOY PERMEABLE	900-1000	--	--	--	--
B	1	PERMEABLE	814-1032	185-340	2.3 - 6.7	1.7 - 3.8	0.88 (100' mm) SE (Ecuador)
	2	NOY PERMEABLE	605-1000	800-950	12.5 - 33	0.5 - 13	0.78 (100' mm) SE (Ecuador)
3	Frío permeable (saturado)	840-1470	700-1200	4.4-9.1	10.8-29	0.3 (100' mm)	7.9 (Ecuador)

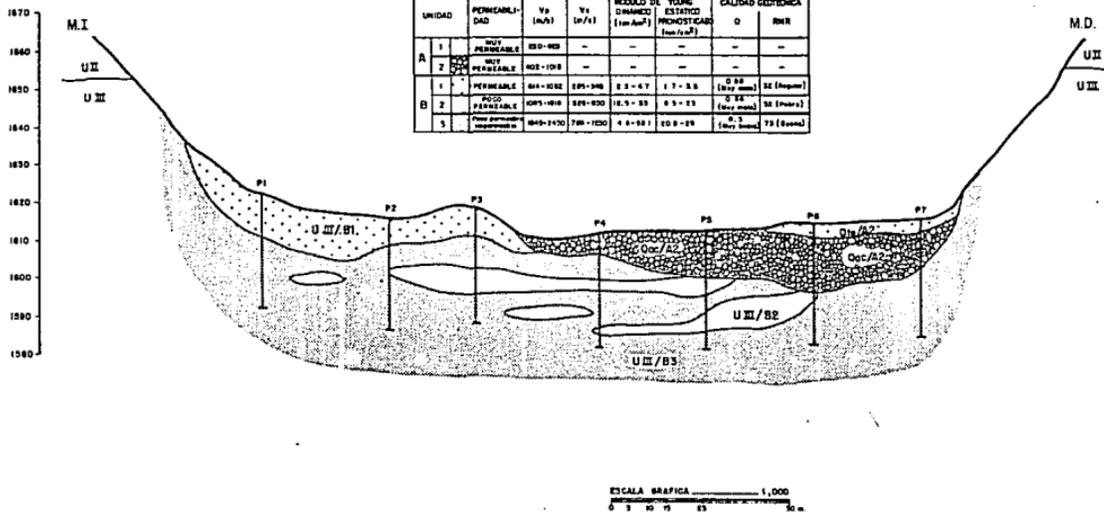
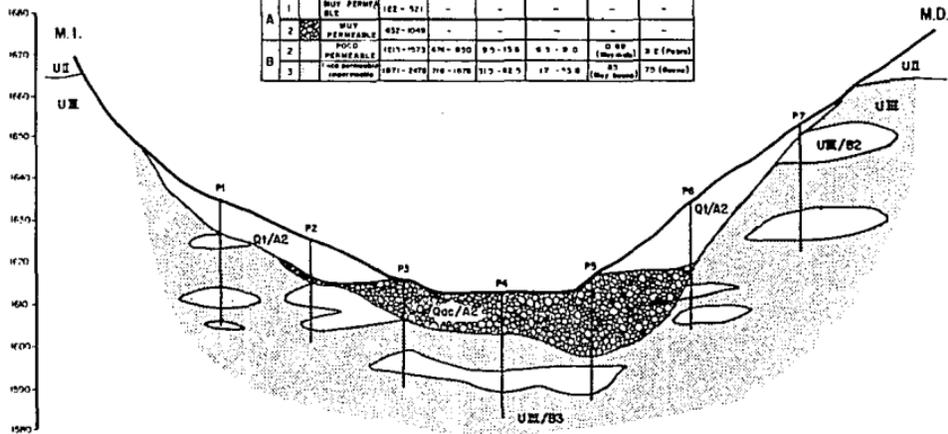


FIGURA 9

EJE 3

ZONIFICACION GEOTECNICA

LINEA	PERMEABILIDAD	Vp (m/s)	Vs (m/s)	MODULO DE YOUNG DINAMICO (kg/cm <sup>2</sup> )	ESFUELO PERMEABILIDAD (cm/cm <sup>2</sup> )	CALIDAD GEOLOGICA	Q	RNR
A	1	MUY PERMEABLE	182 - 421	-	-	-	-	-
	2	MUY PERMEABLE	432 - 1048	-	-	-	-	-
B	2	POCO PERMEABLE	1813 - 1973	434 - 830	9.9 - 19.0	9.1 - 9.0	0.89 (Med. med.)	3.2 (Fajal)
	3	NO PERMEABLE (impermeable)	1871 - 2476	710 - 1076	31.3 - 62.9	17 - 53.8	8.7 (Med. Buena)	7.0 (Buena)



SIMBOLOGIA



FIGURA 40

## 5.2 EVALUACION DE LAS ALTERNATIVAS 1 Y 3

En el presente capítulo se discutirán las condiciones geotécnicas particulares que prevalecen en las dos alternativas. La discusión se hará atendiendo a sus características geométricas, geología, módulos elásticos pronosticados, permeabilidad, estabilidad de laderas (resumen de estudios previos, ya que el presente no aportó parámetros que permitan modificar los análisis anteriormente efectuados), zonas de mala calidad, tratamiento de macizo rocoso, de obras auxiliares y materiales para construcción.

### 5.2.1 ALTERNATIVA 1 (EJE 1)

El Eje 1 se ubica a la salida del cañón La Zurda. En este sitio se inició la construcción de la presa a fines de la década de los años 50's; en ese entonces se realizó la limpieza de los respaldos y de la zona de cimentación y se inició la excavación del túnel de desvío en margen izquierda y del vertedor de demasías en margen derecha.

#### - CARACTERISTICAS GEOMETRICAS

Altura	70m
Longitud de corona	330m (para una altura de 50m, la longitud es de 273m)
Pendiente de laderas	40° en margen izquierda y 46° en margen derecha
Boquilla	Simétrica

#### - GEOLOGIA

Las unidades litológicas que afloran en la Alternativa 1 son:

Us, Unidad Superior Aflora en margen derecha, a una altura superior a la de la corona Vulcanoclástica:

U11, Unidad Estratificada: Se presenta en ambas márgenes con sus cuatro subunidades.

- UIII, Toba Arenosa:** Aquí muestra las tres condiciones geotécnicas. En la zona de Umpia, en margen izquierda, se detectó decomprimida hasta los 10m de profundidad. Se presentan varios lentes de toba arenosa poco compacta a diferentes profundidades dentro del macizo rocoso.
- Qre, Terraza Aluvial:** En margen izquierda no se detectó, mientras que en la derecha tiene un espesor de hasta 5m.
- Qac, Acarreos Fluviales:** Su espesor varía entre 5 y 18m, el engrosamiento mayor detectó hacia la margen derecha.

**- CARACTERISTICAS GEOTECNICAS**

**UII, Unidad Estratificada (1):**

<b>UII,</b>	<b>Unidad Estratificada (1):</b>	
	Velocidad longitudinal	1400 a 2000 m/s
	Módulo estático pronosticado	39 a 40 ton/cm <sup>2</sup>
	Espesor de roca decomprimida e intemperizada	5 a 16m
	Calidad de roca	mala a regular
<b>B1,</b>	<b>Toba arenosa decomprimida:</b>	
	Velocidad longitudinal	615 a 1080 m/s
	Módulo estático pronosticado	1.3 a 1.6 ton/cm <sup>2</sup>
	Espesor	5 a 10m
	Calidad de roca	muy mala
<b>B2,</b>	<b>Toba arenosa poco compacta</b>	
	Velocidad longitudinal	1085 a 1820 m/s
	Módulo estático pronosticado	8.3 a 23.0 ton/cm <sup>2</sup>
	Espesor	lentes de 3 a 5m
	Calidad de roca	muy mala
<b>B3,</b>	<b>Toba arenosa compacta:</b>	
	Velocidad longitudinal	1845 a 2450 m/s
	Módulo estático pronosticado	20.8 a 29 ton/cm <sup>2</sup>
	Espesor	indeterminado
	Calidad de roca	buena

- PERMEABILIDAD

	LEFRANC (cm/s)	LUGEON (U.L.)	PRESION CRITICA (kg/cm <sup>2</sup> )
Q <sub>1c</sub> y Q <sub>2c</sub> , terrazas y acarros	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup>	-	-
UII, Unidad Estratificada (I)	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-7</sup>	2 a 40	3 a 5 (en zonas)
B1, Toba arenosa decomprimida	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup>	-	-
B2, Toba arenosa poco compacta	10 <sup>-4</sup>	1 a 2	8.6
B3, Toba arenosa compacta	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup>	0 - 3	6.3 a 8.6

(I) PARAMETROS TOMADOS DE EXYCO, 1986.

- ESTABILIDAD DE LADERAS

Los análisis cinemáticos concluyeron que las laderas no tienen inestabilidad potencial, ya que los sistemas de discontinuidades que afectan a las diferentes unidades litológicas no se conjugan para formar cuñas o fallas planas con salida hacia las laderas.

Del análisis de equilibrio límite se concluye que para condiciones saturadas y drenadas y semisaturadas se tiene una situación aceptable de estabilidad. Pero si se consideran en conjunto las unidades II y III para condiciones saturadas se tiene una situación de estabilidad precaria. Lo anterior se ilustra en el siguiente cuadro:

UNIDAD	MARGEN	FACTOR DE SEGURIDAD		
		DRENADO	SEMISAT.	SATURADO
IIc	Ambas	2.3	2.1	1.9
II	Ambas	1.6	1.4	1.2
II y III	M.I.	1.4	1.3	1.1 (condición precaria)
II y III	M.D.	1.9	1.6	1.1 (condición precaria)

#### - ZONAS DE MALA CALIDAD

Las zonas de mala calidad que se detectaron en la alternativa del Eje 1 se agrupan en dos: a) materiales sueltos y toba fuertemente decomprimida y b) zonas de roca poco compacta en la toba arenosa (fig. 13).

La primera zona es superficial e involucra a la Unidad Geotécnica A, que se conforma por suelos, talud y acarreos, como materiales sueltos; así como por la subunidad B1, que es la toba arenosa decomprimida. En ambos casos implican altas permeabilidades, ya sea por tratarse de materiales sueltos no litificados o por tratarse de roca alterada.

Se distribuyen a todo lo largo del eje, en la margen izquierda tienen espesores entre 5 y 12m e involucran a suelos (subunidad A1, con un espesor delgado, menor a 2m) y principalmente a la subunidad B1. En la zona del actual cauce corresponden a acarreos con espesor entre 5 y 12m. La margen derecha es un paleocauce, por lo que tiene un fuerte engrosamiento, llegando hasta 18m; aquí se presenta una terraza aluvial y acarreos, así como materiales de talud y suelos al pie de la ladera.

La segunda zona de mala calidad es mas profunda y corresponde a lentes poco compactos dentro de la toba arenosa, de forma alargada y delgada, que se distribuyen de forma errática. A estos lentes se les agrupó en la subunidad geotécnica B2. Los lentes, por encontrarse poco compactos, resultaron ser permeables en las pruebas Lefranc, por lo mismo son más susceptibles de tubificación.

Durante esta etapa de exploración se les detectó a una profundidad entre 12 y 27m bajo el cauce, sin embargo es seguro que se ubiquen a todo lo largo de la toba arenosa, desde su contacto con la Unidad estratificada (UII) y hasta su base.

#### - TRATAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

Se consideraron dos tipos de tratamientos para el macizo rocoso, remoción de materiales y pantalla plástica de impermeabilización, tal como se muestra en la Tabla 5.2.

TABLA 5.2 TRATAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO EN EL EJE 1

UNIDAD GEOTECNICA	LITOLOGIA	CONDICION	TRATAMIENTO	FACILIDAD	ESPESOR
A1	Suelos y talud	Muy sueltos	Remoción	Muy fácil	0 - 2m
A2	Talud, terrazas y scarreos fluviales	Poco compactos	Remoción	Regular en zonas someras y muy difícil en las profundas.	5 - 18m
B1	Toba arenosa	Decomprimida	Remoción	Regular a difícil	5 - 12m
B2	Toba arenosa	Poco compacta	Pantalla plástica de impermeabilización hasta 30m de profundidad.	Regular a difícil	Lentes alargados de 3 a 8m de espesor en profundidades de hasta 25m como mínimo.
B3	Toba arenosa	Compacta	Pantalla plástica de impermeabilización hasta 30m de profundidad	Regular a difícil	Indefinido

Se consideró necesaria la remoción de los materiales que afloran y que presentan alta permeabilidad, mismos que corresponden a las subunidades geotécnicas A1, A2 y B1. Las primeras dos implican materiales no litificados, mientras que la subunidad B1 corresponde a la toba fuertemente decomprimida.

El espesor de remoción es variable y se muestra en la Figura 11, entre unos 5 y 12m en la margen izquierda, y entre 5 y 18m en la zona del cauce y margen derecha.

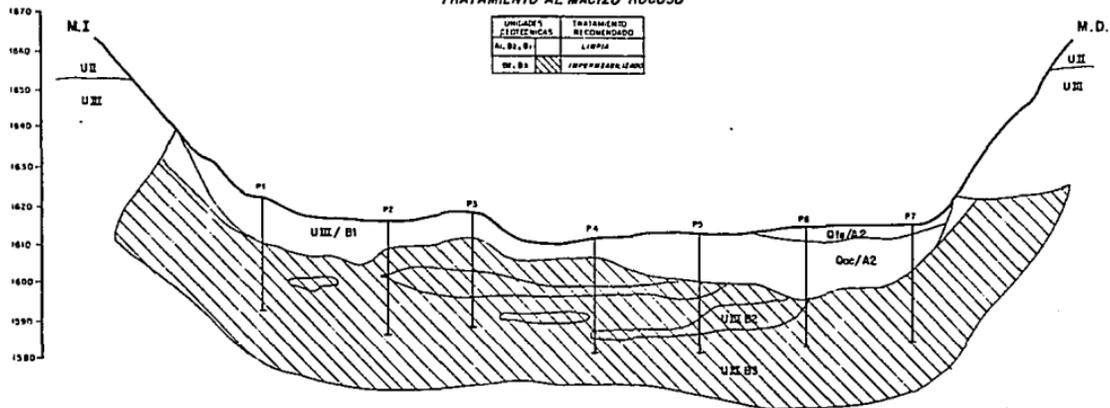
Por otro lado, aunque no se exploraron las laderas, mismas que corresponden a respaldos previamente sujetos a limpia en la suspendida etapa de construcción, es probable que también se encuentren fuertemente decomprimidas (como es el caso de la unidad B1) y requieran remoción en un espesor aproximado de 5m.

La toba arenosa manifestó zonas permeables a poco permeables en las pruebas de permeabilidad Lugeon, este fenómeno se observó principalmente en los lentes poco compactos de la unidad geotécnica B2, donde se tuvieron permeabilidades Lefranc de 10 E(-4) cm/s, mientras que en la unidad B3 la permeabilidad fue de 10 E(-4) a 10 E(-5) cm/s.

### EJE 1

#### TRATAMIENTO AL MACIZO ROCOSO

UNIDADES LITOLÓGICAS	TRATAMIENTO RECOMENDADO
U. B1, B2	LIEPJA
U. B3	CONCRETO ARMADO



ESCALA GRAFICA 1:1000  
0 5 10 20 30 m.

FIGURA 11

*Ahora bien, no se consideró la opción de inyecciones para impermeabilizar en virtud de que la roca es permeable en pequeño y de que se llegó a una presión de 10 kg/cm<sup>2</sup> en un buen número de pruebas Lugeon; lo anterior a pesar de que en algunas pruebas, las menos, se llegó a presiones críticas entre 2.5 y 8.6 kg/cm<sup>2</sup>.*

*Por lo anterior, se consideró que el tratamiento más indicado para evitar la tubificación y disminuir las filtraciones en la zona de la cortina es la construcción de una pantalla plástica.*

#### **- OBRAS AUXILIARES**

*En la abandonada campaña de construcción realizada en la alternativa 1 se excavó el vertedor de demasías en margen derecha y se inició la excavación de los túneles de desvío en la margen izquierda.*

*Cabe señalar, sin embargo, que la altura de la cortina considerada en ese entonces es del orden de 70m, por lo cual en caso de que se construya una cortina de menor elevación sería necesario modificar la actual excavación del vertedor, profundizándola.*

*En cuanto al túnel de desvío, éste se inició con la excavación de unos 30m en dos frentes. Actualmente, en el frente de entrada la roca se muestra estable a pesar de los años transcurridos y de la alteración y decompresión actuantes; sin embargo, en el frente de salida el túnel se encuentra afectado por caídos que obstruyen su acceso. La ubicación de estos frentes de excavación es alejada y debe de considerarse en caso de que se construya en la alternativa 1.*

*Por otro lado en la campaña de exploración de 1985 se concluyó que dado lo masivo de la toba arenosa y su prácticamente ausencia de discontinuidades, una cierta orientación del túnel, no implica condiciones favorables o desfavorables.*

*De la misma manera, del estudio de elemento finito para túneles de 5, 10 y 15m de diámetro, se concluyó que el más estable resulta ser de 10m de diámetro, para el cual se requeriría de un soporte a base de 5cm de concreto lanzado y anclaje de fricción de 6m de longitud y diámetro de 1", en arreglo sistemático de 1.5 x 2m.*

### 5.2.2 ALTERNATIVA 3 (E/E 3)

La alternativa 3 se localiza en la parte media del Cañón La Zurda, a 1500m aguas arriba del Eje 1.

#### - CARACTERISTICAS GEOMETRICAS

Altura	80m
Longitud de la corona	256m (para una altura de 50m la longitud es de 194m).
Pendiente de laderas	40 a 45° en la margen izquierda y de 30 a 35° en la margen derecha.
Boquilla	margen derecha ligeramente asimétrica.

#### - GEOLOGIA

Las unidades litológicas que afloran en la alternativa 3 son:

U1, Basáltica:	Se presenta en ambas márgenes con espesor de 35 a 40m y laderas subverticales.
U11, Unidad Estratificada:	Se presenta en ambas márgenes con sus cuatro subunidades, su espesor es de unos 50 a 25m.
U111, Toba arenosa:	En ambas márgenes se encuentra prácticamente cubierta por materiales de talud. Se presenta en dos subunidades, poco compacta y compacta.
Qt, Depósito de talud:	Se encontró en ambas márgenes; en la izquierda presenta mayor espesor (hasta 15m) que en la derecha (hasta 9m).
Qac, Acarreos Fluviales:	En la margen izquierda y zona del cauce tiene espesor de 8 a 10m, mientras que en la margen derecha se engrosa hasta 20m.

- CARACTERISTICAS GEOTECNICAS

U11, Unidad Estratificada: No se tienen datos de perforaciones ni de exploración geofísica.

B2,	Toba arenosa poco compacta:	
	Velocidad longitudinal	1215 a 1575 m/s
	Módulo estático pronosticado	6.3 a 9.0 ton/cm <sup>2</sup>
	Espesor	lentes de 3 a 9m
	Calidad de roca	muy mala
B3,	Toba arenosa compacta:	
	Velocidad longitudinal	1820 a 2400 m/s
	Módulo estático pronosticado	17 a 33.8 ton/cm <sup>2</sup>
	Espesor	indeterminado
	Calidad de roca	Buena

- PERMEABILIDAD

	LEFRANC (cm/s)	LUGEON (U.L.)	PRESION CRITICA (kg/cm <sup>2</sup> )
Q <sub>1</sub> y Q <sub>2</sub> , talud y scarros	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-5</sup>	N.D.A.	1 a 4
U11, Unidad Estratificada (1)	No probada	0 a 4 y 10 a 19	2 en zonas someras (de 0 a 15m)
B2, Toba arenosa poco compacta	10 <sup>-4</sup>	0.5 a 4	3 a 8.7
B3, Toba arenosa compacta	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup>	1 a 2	6 a 7.6 (en algunos casos).

(1) PARAMETROS TOMADOS DE EXYCO, 1986.

- ESTABILIDAD DE LADERAS

En este sitio no hay evidencias de grandes deslizamientos de talud, solamente se presentan, en la margen izquierda y a los lados del eje, pequeños desplazamientos locales de la parte superior de la Unidad II y la Unidad I, de 20 a 40m de ancho, alineados de forma perpendicular al Río Verde y de reducido espesor. En la margen derecha no hay evidencias de desplazamientos, ya que hay una notable continuidad de las unidades litológicas.

El resultado del análisis cinemático fue que las laderas de este sitio no presentan inestabilidad cinemática potencial, ya que los sistemas de fracturamiento, en las diferentes unidades litológicas aflorantes, no se conjugan para formar cuñas ni fallas planares con salidas hacia las laderas. Sin embargo hay que señalar que el fracturamiento vertical que afecta a las andesitas basálticas favorece el desprendimiento de bloques por volteo.

Del análisis de equilibrio límite se obtuvieron los siguientes factores de seguridad:

UNIDAD	MARGEN	FACTOR DE SEGURIDAD		
		DRENADO	SEMISAT.	SATURADO
II	Ambas	1.5	1.3	1.2
I y II	M.I.	1.4	1.2	1.0 (condición precaria)
	M.D.	1.5	1.2	1.2 (condición precaria)
I, II y III	M.I.	1.6	1.4	1.2
	M.D.	1.7	1.4	1.1 (condición precaria)

Se concluye que la presencia de la roca andesítico-basáltica representa un elemento de carga que puede desfavorecer los factores de seguridad; sin embargo en los estados drenados y semisaturados se tienen relaciones de equilibrio aceptables.

#### - ZONAS DE MALA CALIDAD

Las zonas de mala calidad que se detectaron en el Eje 3 también se agruparon en dos: a) materiales sueltos y b) zonas de roca poco compacta dentro de la toba arenosa. La primera zona es superficial, se compone por suelos, talud y acarreos, mismos que se agrupan en la unidad geotécnica A. Aquí las permeabilidades obtenidas durante la ejecución de pruebas es alta y su velocidad de propagación de ondas P es muy baja; es decir que se trata de un material suelto, poco compacto, no cementado.

La unidad geotécnica A se distribuye prácticamente a todo lo largo del Eje 3. En la margen izquierda se encuentra desde unos 15m por debajo del contacto con la unidad estratificada y muestra un espesor de 5m en su porción superior, que se incrementa hasta 10m en la parte inferior de la ladera. Los materiales aflorantes son de talud y acarreos.

En la zona del cauce la unidad A aflora con acarreos, mismos que tienen un espesor que varía entre 10 y 18m. Esta unidad cubre toda la margen derecha desde su contacto con la unidad estratificada, en la porción superior de la ladera hasta la zona del cauce. Aquí el espesor varía desde un metro en la porción superior hasta 21m en la parte más baja. El engrosamiento en margen derecha, al igual que en el Eje 1, se interpreta como un paleocauce.

Por otro lado, la segunda zona es profunda, y corresponde a lentes de baja compacidad dentro de la toba arenosa. Estos tienen forma delgada y alargada y se distribuyen de una manera errática. A los lentes se les agrupó en la subunidad geotécnica B2. Los lentes, por encontrarse poco compactos, resultaron ser permeables en pruebas Lefranc y, por lo mismo, potencialmente susceptibles de tubificación.

Durante esta etapa de exploración se les ubicó a diferentes niveles, desde 10m por debajo del contacto entre las unidades VII y VIII (en margen derecha), hasta 24m por debajo del nivel del cauce en la porción central de la boquilla. Sin embargo se considera que se ubiquen en todo el cuerpo de la toba arenosa, desde su contacto con la unidad estratificada (VII) hasta la base de la unidad.

#### - TRATAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

Se consideraron dos tipos de tratamientos por el macizo rocoso, remoción de materiales y una pantalla plástica, tal como se muestra en la Tabla 13.

**TABLA 13 TRATAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO EN EL EJE 3**

UNIDAD GEOTECNICA	LITOLOGIA	CONDICION	TRATAMIENTO	FACILIDAD	ESPESOR
A1	Suelos y talud	Muy sueltos	Remoción	Muy fácil	0 - 2m
A2	Talud, terrazas y scarros fluviales	Poco compactos	Remoción	Regular en zonas someras y muy difícil en las profundas.	6 - 21m
B2 y B3	Toba arenosa	Poco compactos	Pantalla plástica de hasta 30m de profundidad.	Regular a difícil	Lentes alargados de 3 a 8m de espesor en profundidades de hasta 25m como mínimo en B2. Indefinido para B3.

Como se ve, se consideró necesaria la remoción de los materiales sueltos y altamente permeables aflorantes, mismos que corresponden a las subunidades geotécnicas A1 y A2. Este espesor de remoción es variable, siendo reducido en las partes altas de las laderas (con unos 5m) y considerable en la parte baja del cauce, en su margen derecha (hasta 21m) (Fig. 12).

Por otro lado, en las laderas posiblemente se tendrá toba arenosa decomprimida y/o suelos que deberán removerse, con un espesor estimado de 5m.

La toba arenosa de la unidad B3 fue permeable a poco permeable con  $10E(-4)$  a  $10E(-5)$  cm/s) e incluye lentes poco compactos (unidad B2) más permeables (con  $10E(-4)$  cm/s). Por lo mismo se consideró tratar al macizo rocoso.

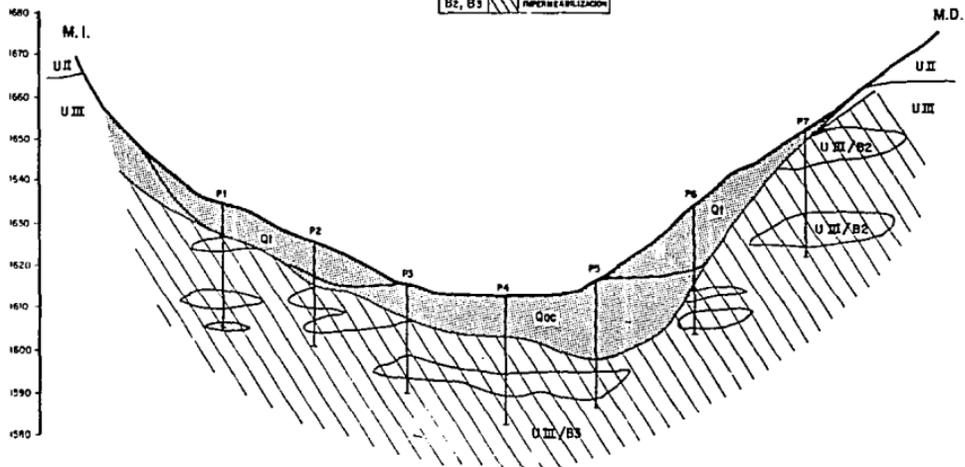
Ahora bien, no se consideró la posibilidad de inyecciones para impermeabilización; en efecto, dado que en las pruebas Lugeon se alcanzó la presión de 10 kg/cm<sup>2</sup> en buen número de pruebas y a pesar de que en algunas la presión crítica se encontró entre 3 y 8.7 kg/cm<sup>2</sup>, no se consideró adecuado un tratamiento a base de inyecciones.

Igual que la alternativa 1 se ve conveniente la construcción de una pantalla plástica.

EJE 3

TRATAMIENTO AL MACIZO ROCOSO

UNIDADES ROCIÓGENAS	TRATAMIENTO RECOMENDADO
A1, A2	LIMPIA
B2, B3	IMPERMEABILIZACION



SIMBOLOGIA

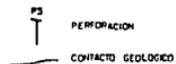


FIGURA 12

ESTA TESIS NO PUEDE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

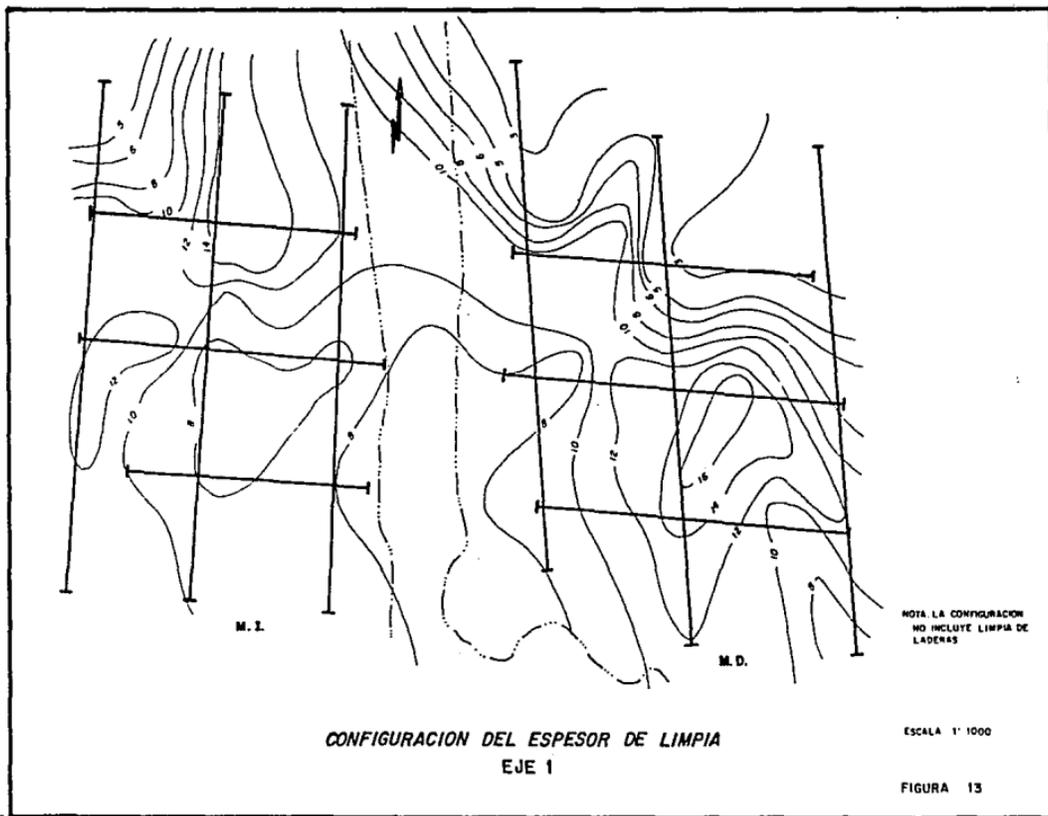
#### - OBRAS AUXILIARES

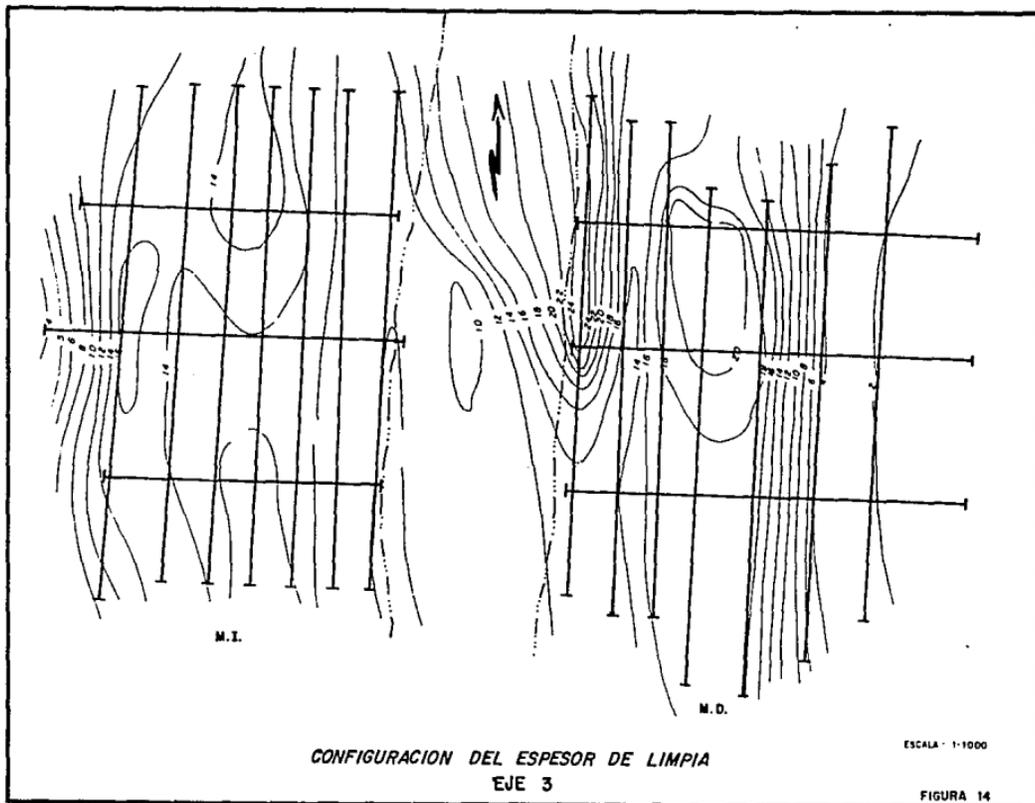
*Dado lo angosto del cañón la construcción del vertedor de demasías implicará la remoción de una gran cantidad de material de las unidades I y II, para lo cual se requerirá del uso de explosivos en ambas unidades, ya que aún en la unidad estratificada (UIII) se presentan estratos duros, de caliza y pedernal.*

*Dado que las condiciones litológico-estructurales son similares en ambas márgenes, el vertedor se situaría en la margen derecha que es aquella que por tener menor pendiente implica una menor cantidad de remoción de materiales.*

*En cuanto al túnel de desvío, la roca que lo alojaría comprende únicamente a la toba arenosa igual que en la alternativa 1, (UIII) la cual, para fines de túneles, resultó ser de muy buena calidad en las clasificaciones de Barton (Q) y Bieniawsky (RMR). En los estudios previos se concluyó que no existe una orientación del túnel que implique condiciones favorables o desfavorables, ya que la roca prácticamente carece de discontinuidades. De la misma manera, un análisis de elemento finito en el cual se compararon túneles con diámetro de 5, 10 y 15m señaló a 10m como el diámetro más adecuado; al mismo estudio señaló que se requerirá una protección de 5cm de concreto lanzado y anclaje de fricción de 6m de longitud y 1" de diámetro, en patrón sistemático de 1.5 por 2m.*

*Dado que la roca es masiva y presenta condiciones prácticamente similares en ambas márgenes, en la ubicación del túnel no intervierían posibles variaciones en los parámetros geomecánicos de la roca; sin embargo, el relativo grueso espesor de materiales de talud ubicado en margen derecha, mismo que habría de remover en los emportalamientos, hace favorable la excavación del túnel en margen izquierda.*





## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación y combinación de diversas técnicas de exploración geológica y geofísica tanto en la superficie del terreno (geoeléctrica y geosísmica de refracción) como en el subsuelo (perforación con recuperación de núcleos, pruebas de permeabilidad y sísmica de pozos) y pruebas de laboratorio, permitió un conocimiento detallado de las condiciones que guardan la unidad geotécnica B que corresponde con la toba arenosa masiva (U111) y los materiales de la unidad geotécnica A que la cubren (acarreos, terrazas fluviales y talud) en los Ejes 1 y 3, conocimiento a partir del cual se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones.

### 6.1 CONCLUSIONES

- En ambos ejes la zonificación geotécnica agrupó a dos unidades de características geomecánicas contrastantes (A y B). La unidad A es la que se encuentra en la superficie del terreno y corresponde a los materiales sueltos que cubren a la toba arenosa; se subdividió en A1, que comprende suelos, y A2, que integra acarreos, materiales de talud y terrazas aluviales (Figuras 10, 11, 12 y 13).

La unidad B comprende a la toba arenosa (U111). En ésta se definieron tres condiciones geotécnicas distintivas, por lo que fue factible subdividirla. La subunidad B1 corresponde a la toba arenosa inmensamente decomprimida, la B2 corresponde a lentes poco compactos, mientras que la B3 es representativa de la mayor parte de la toba arenosa, es decir comprende a la porción sana y compacta (Figuras 10, 11, 12 y 13).

- Por sus características, las subunidades A1 y A2 presentarían serios problemas de deformabilidad y, sobre todo, de altas permeabilidades, por lo mismo se les catalogó como de muy mala calidad geotécnica.

De la misma manera, las subunidades B1 y B2 de la toba arenosa resultaron ser permeables a poco permeables y su compactación es baja, de tal forma que son potencialmente tubificables; por lo mismo involucran inconvenientes geotécnicos que implican mala calidad. Cabe señalar que la diferenciación de estas dos unidades es contribución medular del presente estudio, ya que anteriormente a la toba arenosa (U111) se le consideró como una roca masiva, muy compacta y sin heterogeneidades.

Finalmente, la subunidad B3 es la que presenta las mejores condiciones geotécnicas en ambas boquillas. Por lo mismo se le consideró como de buena calidad.

Esta buena calidad está en relación con las anteriores cuatro subunidades (A1, A2, B1 y B2), ya que no se debe perder de vista que corresponde a una roca de resistencia muy baja (unos 25 kg/cm<sup>2</sup>), deformable (con módulo elástico tangente pronosticado entre 17 y 33.8 ton/cm<sup>2</sup>), y que su matriz es esencialmente arenosa fina, no cementada, porosa y poco permeable (con 10 E(-4) a 10 E(-5) cm/s en pruebas Lefranc).

- De las condiciones anteriores se llegó a la conclusión de que el desplante de la cortina deberá hacerse sobre la subunidad B3, misma que presenta las mejores características geotécnicas, a pesar de su deformabilidad y baja resistencia.

- Los tratamientos por aplicar al macizo rocoso están supeditados a las características geotécnicas de las subunidades. Dado que las subunidades presentan condiciones similares a lo largo del cañón, el tratamiento será el mismo independientemente de la alternativa seleccionada.

A las subunidades A1 y A2, por encontrarse en estado suelto y ser muy permeables, además de ser superficiales, se les consideró como susceptibles de remoción total. Esta remoción se llevaría hasta encontrar a la toba compacta (B3), es decir hasta 18m en el Eje 1 y hasta 21m en el Eje 3.

De la misma manera, la subunidad B1 del Eje 1, por encontrarse superficialmente del lado de la margen izquierda está fuertemente decomprimida y es permeable a poco permeable, por lo cual deberá de removerse completamente. El espesor de limpa en esta margen variará de 5 a 12m.

Las subunidades B2 y B3 requieren de impermeabilización, en especial la primera de éstas, que resulta ser poco compacta, más permeable y, por lo mismo, más susceptible de ser afectada por tubificación. Cabe señalar que se considera poco factible un tratamiento a base de inyecciones, ya que la granulometría fina y distribución errática de la compactación en la toba no permitirían una aplicación adecuada del tratamiento. En estas condiciones una opción de impermeabilización es la construcción de una pantalla impermeable, de espesor y profundidad tal que garantice la impermeabilidad del macizo rocoso.

Respecto a obras auxiliares, los túneles de desvío se alojardn en la toba masiva, misma que para fines de tuneleo resultó ser de buena calidad en las clasificaciones geomecánicas Q y RMR.

La buena calidad de la toba masiva, es función, en buena parte, de la prácticamente nula presencia de discontinuidades, lo cual implica que la estabilidad cinemática de la excavación está garantizada y no está supeditada a la dirección en que se haga la excavación, ya que para cualquier orientación se tienen condiciones similares. Por otro lado, de estudios previos de estabilidad por el método de elemento finito, se llegó a la conclusión de que el diámetro más adecuado para un túnel es de 10m; mismo que sería estable con la protección de 5cm de concreto lanzado y anclaje sistemático de fricción, de 1 pulgada de diámetro y 6m de largo en arreglo sistemático de 1.5 por 2m.

El vertedor de demasías, en la alternativa de Eje 1, se ha construido parcialmente en la Unidad Estratificada y deberá de excavar en esta misma unidad; además de la Unidad Andesítico-Basáltica en la alternativa de Eje 3. Dado lo poco resistente de las unidades II, donde se aloje el vertedor, y Unidad III donde se recibirá la descarga de las aguas, la estructura, independientemente del eje seleccionado, deberá protegerse adecuadamente, en la zona de descarga, del fenómeno de erosión regresiva.

Por otro lado, en el Eje 3 la construcción del vertedor implica la remoción de una gran cantidad de materiales como consecuencias de lo estrecho del cañón. La remoción requerirá del uso de explosivos tanto en la unidad andesítico-basáltica (UI), como en la estratificada (UII). Cabe señalar que la posibilidad de utilizar tractor con desgarrador (ripper), aunque la remoción de la unidad estratificada se contempla difícil por la presencia de estratos muy duros, de caliza y pedernal, en el resto de los materiales será sumamente fácil.

## 6.2 RECOMENDACIONES

No se recomienda la construcción de una presa en el Cañón de La Zurda por los siguientes motivos:

- a) La unidad de toba arenosa masiva (UIII), donde se desplantaría la mayor parte de la cortina, es una unidad de roca con heterogeneidades que la hacen susceptible a ser afectada por el fenómeno de tubificación. Por otro lado, la roca es poco permeable, suave y muy deformable.

- b) *Los espesores de limpia alcanzan valores de 18 metros en el Eje 1 y hasta 21 metros en el Eje 3.*
- c) *Se tienen factores de seguridad precarios en la estabilidad de laderas al tenerse condiciones saturadas en el conjunto de unidades II y III para la alternativa de Eje 1, y para el conjunto de unidades I, II y III en la alternativa de Eje 3.*
- d) *Existe la posibilidad de construcción de presas aguas abajo del Cañón La Zurda en los sitios conocidos como Acatíc, Sandoval y Purgatorio, en los cuales las dificultades geotécnicas son menores. En estos sitios la condición de agua hasta la Ciudad de Guadalajara es menor.*

*Si aún considerando los puntos anteriores es conveniente la construcción de la presa, se hacen las siguientes recomendaciones.*

- *Dado que las condiciones geotécnicas de ambas boquillas son similares los tratamientos al macizo rocoso que se recomiendan para cada alternativa son iguales. A saber: a) remoción total de las subunidades geotécnicas A1 (suelos), A2 (acarreo, materiales de talud y terrazas fluviales) y B1 (toba arenosa intensamente decomprimida). b) Desplante de la cortina directamente sobre la subunidad B3, (toba arenosa compacta). c) Impermeabilización del macizo rocoso con un tratamiento que pudiera ser la construcción de una pantalla plástica.*
- *En la selección de la alternativa más adecuada para el desplante de la cortina no influyen las características geotécnicas de las unidades litológicas, ya que son similares en ambas alternativas. Por lo tanto en la selección de la misma se requerirá un posterior análisis de costos que contemple principalmente longitud de la corona, volumen de materiales de limpia, volumen de tratamientos de impermeabilización y construcción de obras auxiliares.*

*Por supuesto, el análisis de costos tomará en cuenta que:*

- a) *Para una misma altura de cortina, la longitud de la corona en el Eje 3 es de aproximadamente dos tercios partes de la longitud requerida en el Eje 1. Por lo anterior, el volumen de materiales de limpia es mucho mayor en el Eje 1; esto a pesar de tener que llevar la limpia hasta 21m en el Eje 3 y a 18m en el Eje 1.*
- b) *El volumen de trabajos en la impermeabilización del macizo rocoso, por la misma razón, será mucho mayor en el Eje 1.*

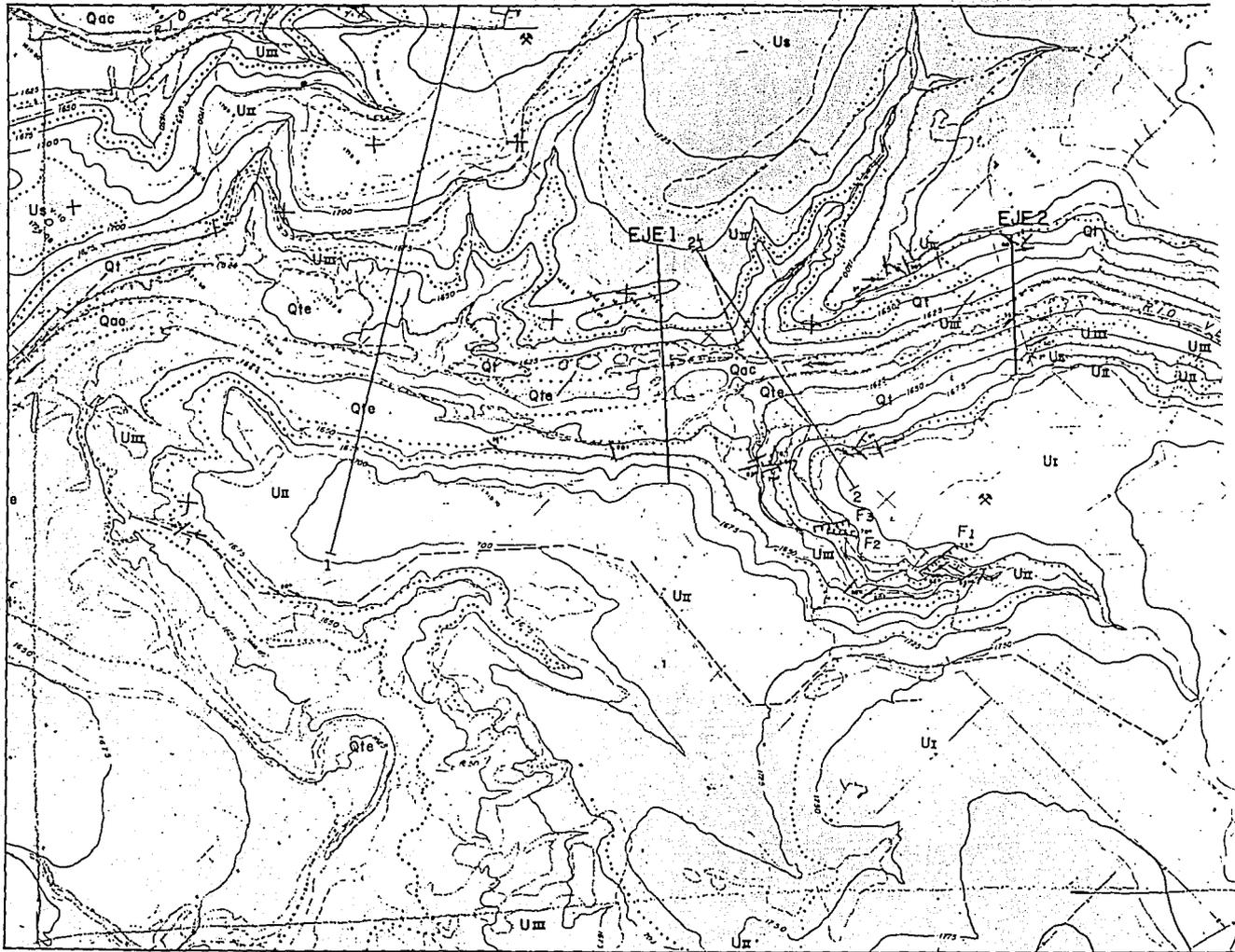
- c) *Las condiciones de excavación del túnel de desvío son similares en ambas alternativas, sin embargo, ya se iniciaron obras de emportalamiento y excavación en dos frentes en el Eje 1. Por otro lado, el espesor de materiales de talud por remover en los emportalamientos del Eje 3 es fuerte, de unos 3 a 10m en margen izquierda y hasta 15m en margen derecha.*
- d) *En el Eje 1 ya se excavó parcialmente el vertedor de demasías en la zona del canal de descarga, al cual tan sólo le hará falta llevarlo a la profundidad conveniente en la parte del tanque amortiguador de acuerdo a la altura definitiva de la cortina, revestirlo y protegerlo para evitar erosión regresiva; dado lo estrecho del cañón, la excavación del vertedor en el Eje 3 implica un fuerte movimiento de materiales en las unidades I y II.*

## BIBLIOGRAFIA

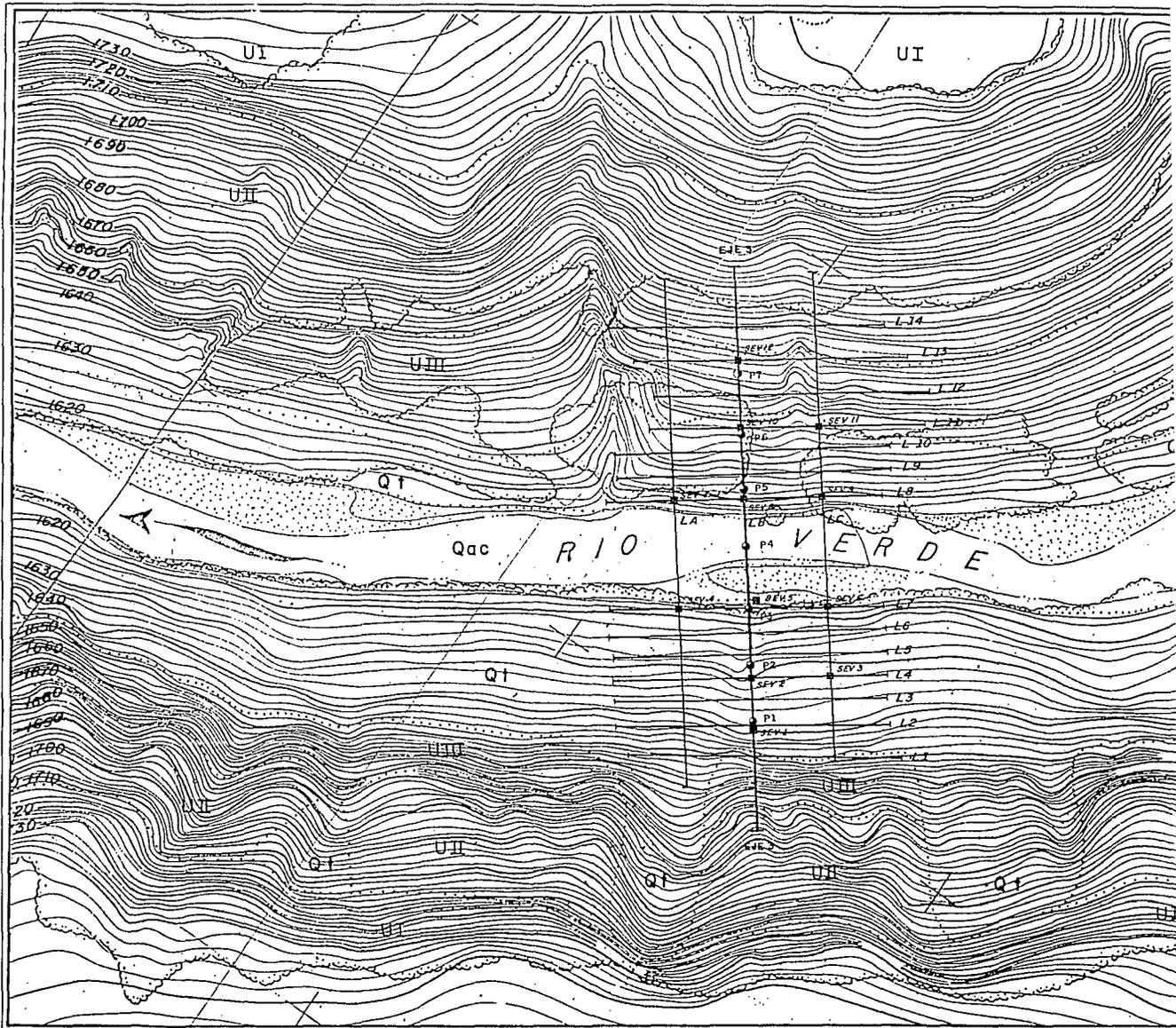
- **Aranda L. R. y Benhumera L. M.** Tomografía Sísmica de la C. T. Xcaret, Q. Roo. Reunión Técnica, Geofísica Aplicada a la Geotecnia. SMMS. (México 1985)
- **Barton N. Lien R. and Lunde J.** Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- **Benhumera L. M y Vázquez C. A.** Estudios Geofísicos del Valle de México CFE (México 1988).
- **Benhumera L. M. y Ruiz R. J. A.** Estudios geofísicos en el P. H. Bacurato, Sin.; Reunión Técnica, Geofísica Aplicada a la Geotecnia, SMMS. (México 1985).
- **Bienawski Z. T.** Geomechanics, Classification of Rock Masses and his Application in Tunnelling. *Tunnelling in Rock Pretonia*.
- **Davenport G. C. Maldonado Z. A.** Técnicas Geofísicas para la Determinación de Propiedades Elásticas, *Tecniterras S-156* (1976).
- **Exyco, S.A.** Estudio Fotogeológico, Geológico e Integración Geológico, Geofísica del Proyecto la Zurda, Rio Verde, Jal (1985).
- **Exyco, S.A.** Estudio Geológico Detallado de los Ejes 1 y 3 del Proyecto la Zurda para Suministrar Agua Potable a la Cd. de Guadalajara, Jal (1990).
- **Geometrics, Seisview Seismic Refraction Processing Software user's Manual, EG&G Geometrics, (1986)**
- **Grant F. S. and West. G. F.** Interpretation Theory in Applied Geophysics, McGraw-Hill Book Company, 1965.
- **J.R. Lylle** Geophysical Characterization Using Advanced data Processing. Site Characterization and Exploration. American Society of Civil Engineers (1979).

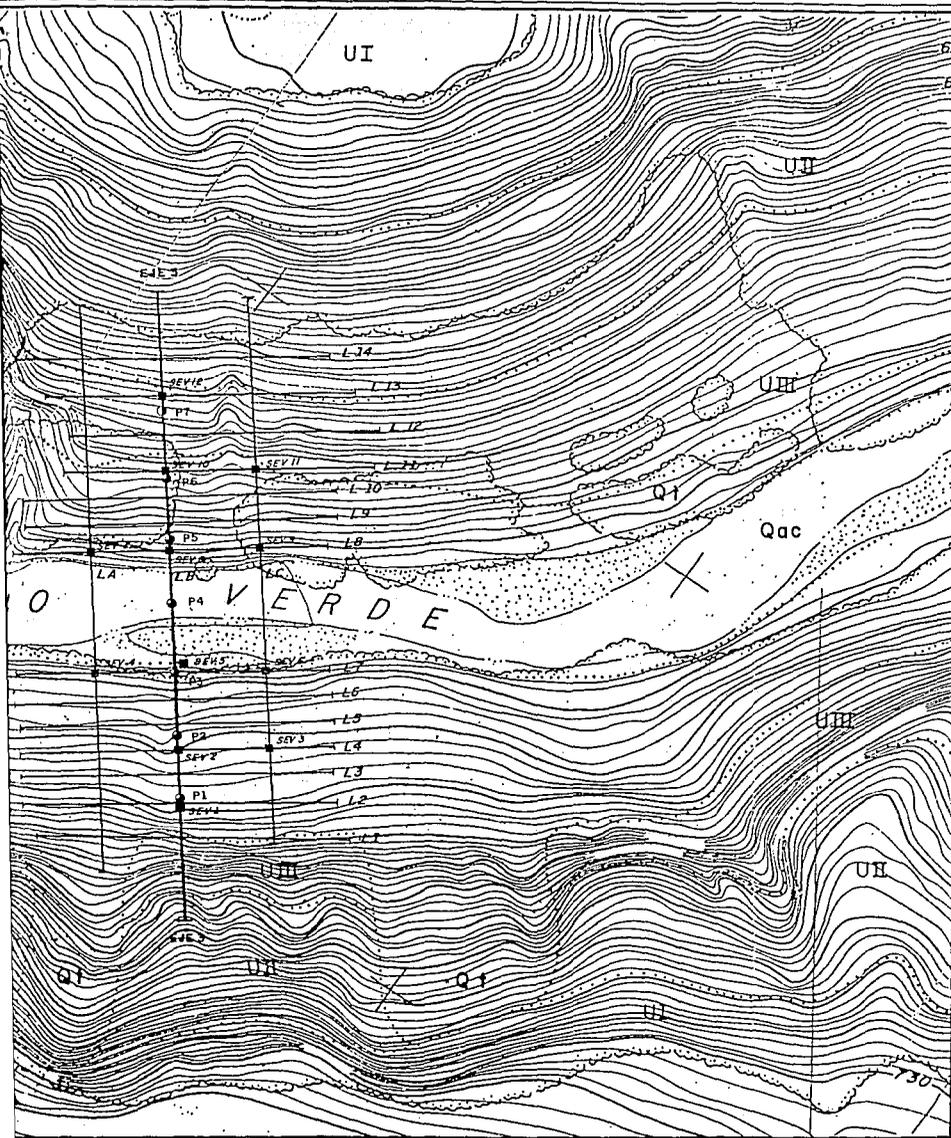
- **K. A. Dimes and J. R. Lytle.** Computerized Geophysical Tomography. Proceedings of the IEEE. Vol. 67. No. 7. pp 1065-1072 (July 1979).
- **Menke W.** The Resolving Power of Cross-Borehole Tomography. Geophysical Research Letters Vol. 11 No. 2, pp. 105-108 (Feb. 1984).
- **Nieto O.J., Delgado A., and Damon E.,** Paúl. Relaciones Petroológicas y Geocronológicas del Magmatismo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico en Nayarit, Jalisco y Zacatecas. A.I.M.M.G.M. XIV Convención Nacional, Memoria (1981).
- **Orellana E. Mooney Harold M.** Tablas y Curvas Patrón para Sondas Eléctricas Verticales sobre Terrenos Estratificados, Arreglo Schlumberger, Interciencia Costinilla de los Angeles 15 (Madrid, 1966).
- **Orellana E.** Prospección Geolétrica en Corriente Continua, Editorial Paraninfo, S.A. (Madrid, 1982).
- **Palmer D.,** The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation; Society of Exploration Geophysicist (1980).
- **Peréz, A. R.** Estudio Sismológico de Pozos en una de las Areas del Reactor (Bno. 18) para el Proyecto Nucleoeléctrico Cazonas, Ver. CFE (T. inédito 1983).
- **Redpath B. B.,** Seismic Refraction Exploration of Engineering Site Investigations; NTIS, U. S. Department of Commerce (1973).
- **Roussell, J. M.,** Etude théorique et expérimentale du modele dynamique des massifs rocheux; Vol. 50, Revue de l' Industrie Minérale, (Paris, 1968).
- **Ruiz R. J. A.** Métodos Sísmicos en Pozos en la Ingeniería Civil. CFE (T. inédito, México 1983).
- **Sjögren Bengt,** Shallow Refraction Seismic; Chapman and Hall Ltd. (1984).
- **Society of Exploration Geophysicist,** Seismic Refraction Prospecting (1967).
- **Telford W. M., Geldart P., Scheriff R. E., Keys D. A.** Applied Geophysics, Cambridge University Press (1976).

- **Zodhy, A. R. A Computer Program for the Automatic Interpretation of Schlumberger Sounding Curves over Horizontally Stratified Media. Not Tech. Inform. Serv. PB 232-703,27 (1973).**
- **Zodhy, A. R. A Use of Dar Zarrouk Curves in the Interpretation of Vertical Electrical Sounding Data. U. S. Geol. Surv. Bull. 1313-D41 (1974).**
- **Zodhy, A. R. Automatic Interpretation of Schlumberger Sounding Curves Using Modified Dar Zarrouk Function: U. S. Geol. Surv. Bull. 1313-E 39 (1974).**
- **Zodhy, A. R. A New Method for the Automatic Interpretation of Schlumberger and Wenner Sounding Curves. Geophysics Vol. 54-No.2 pp. 245-253.**









### LEYENDA

Qac	MATERIALES DE ACARREO
Q1	DEPOSITOS DE TALUD
Q1b	TERRAZAS FLUVIALES
UI	UNIDAD ANDESITICA
UII	UNIDAD ESTRATIFICADA
UIII	UNIDAD MASIVA

### SIMBOLOGIA

— 120 —	CURVA DE NIVEL MAESTRA
— 150 —	CURVA DE NIVEL SECUNDARIA PA 2m
— · · · · · —	CONTACTO GEOLOGICO
○ P <sub>1</sub>	PERFORACION EXPLORATORIA
○ P <sub>2</sub>	PERFORACION EXPLORATORIA CON ESTUDIO DE SISMICA, METODO CROSS-HOLE
○ P <sub>3</sub>	PERFORACION EXPLORATORIA CON ESTUDIO DE SISMICA, METODO UP-HOLE
— L <sub>1</sub> —	LINEA DE EXPLORACION DE GEOSISMICA SUPERFICIAL
■ SEV <sub>1</sub>	SONDEO ELECTRICO VERTICAL
○	ZONA CON VEGETACION

ESCALA GRAFICA 1:11,000  
(A PROXIMADA)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS PROFESIONAL

PLANO GEOLOGICO Y LOCALIZACION DE EXPLORACIONES EN EL EJE 3

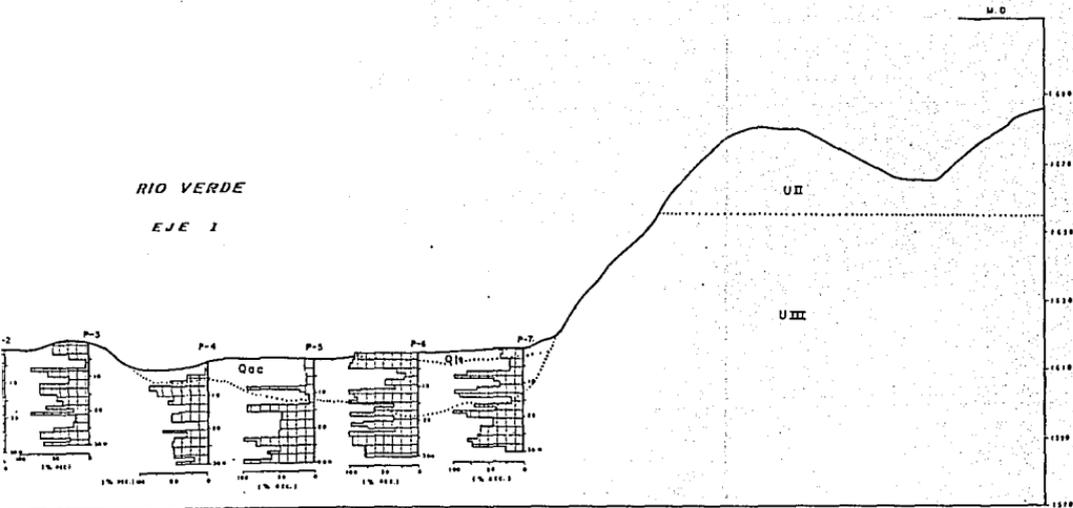
POR: SERGIO BENIGNO PAREDES

FECHA: ABRIL 1994

PLANO: 4



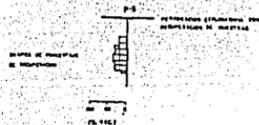
RIO VERDE  
EJE 1



LEYENDA

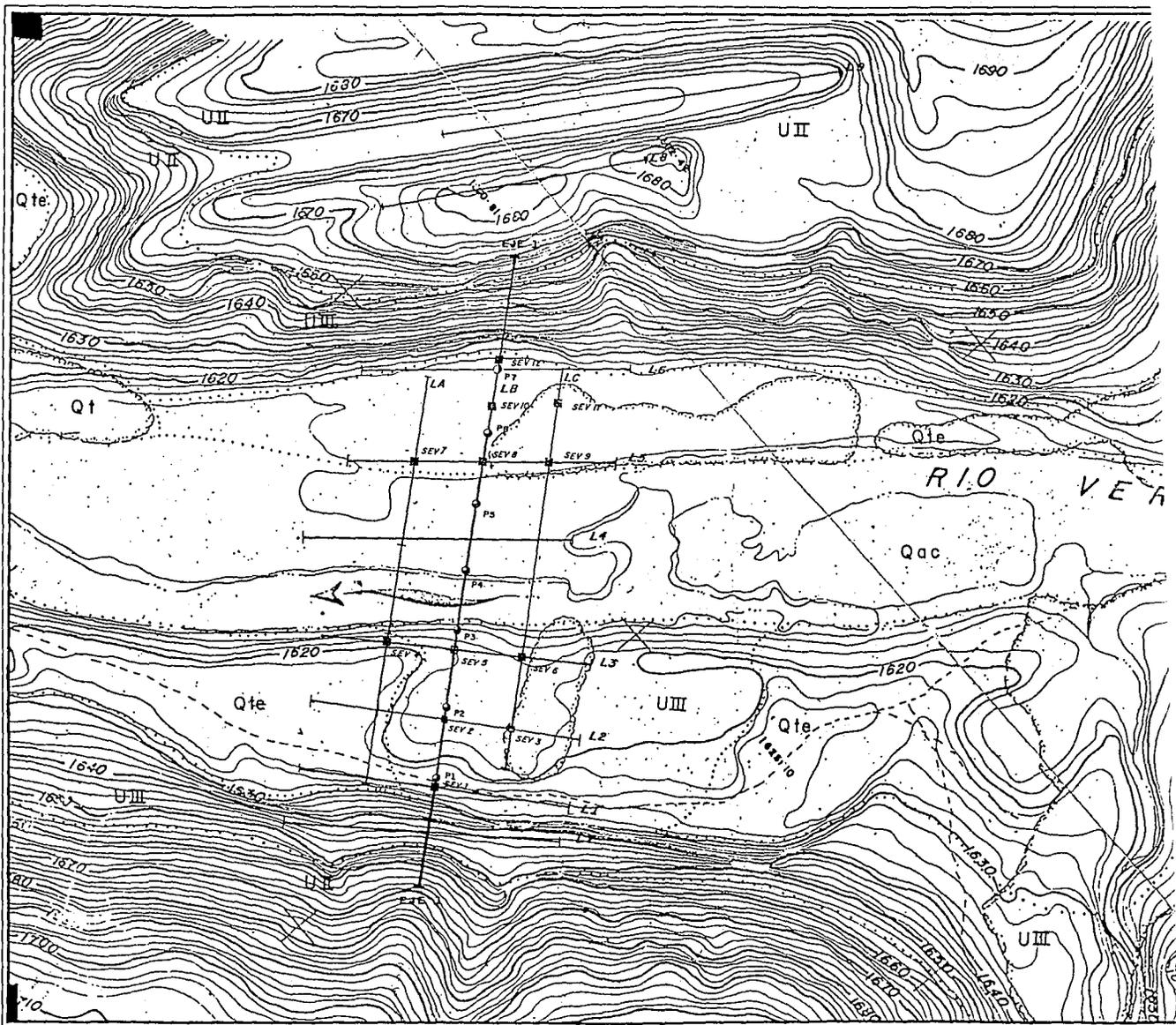
- Qdc MATERIALES DE ACARREOS
- Qta TERRAZAS ALUVIALES
- Ql MATERIALES DE TALUD
- U I UNIDAD ANDESITICA
- U II UNIDAD ESTRATIFICADA
- U III UNIDAD MASIVA

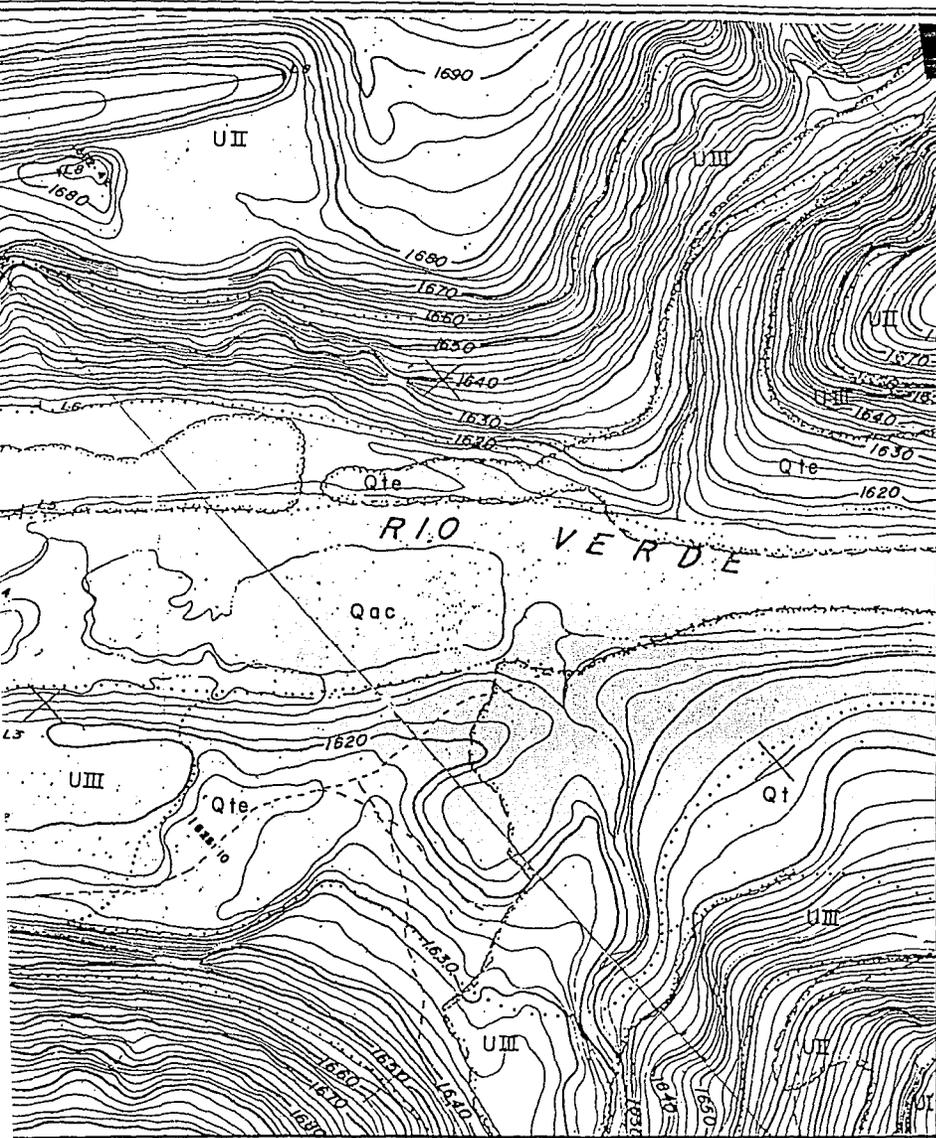
RESERVA DE MUESTRAS



ESCALA HORIZONTAL: 1:10000

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
PERFIL GEOLOGICO DEL EJE 1	
POR: SERGIO BENIGNO PAREDES	
FECHA: ABRIL 1954	PLANO: 3





### LEYENDA

Qac	MATERIALES DE ACARREOS
QI	DEPOSITOS DE TALUS
Qie	TERRAZAS FLUVIALES
UI	UNIDAD ANDÉSTICA
UII	UNIDAD ESTRATIFICADA
UIII	UNIDAD MASIVA

### SIMBOLOGIA

— 1620	CURVA DE NIVEL MAESTRA
—	CURVA DE NIVEL SECUNDARIA 1/2" = 1'
.....	CONTACTO GEOLOGICO
○ <sub>P2</sub>	PERFORACION EXPLORATORIA
○ <sub>P3</sub>	PERFORACION EXPLORATORIA CON ESTUDIO DE SISMIKA, METODO CROSS-HOLE
○ <sub>P4</sub>	PERFORACION EXPLORATORIA CON ESTUDIO DE SISMIKA, METODO UP-HOLE
— L4	LÍNEA DE EXPLORACION DE SEDISMIKA SUPERFICIAL
MEEVA	SONDOO ELECTRICO VERTICAL
○	ZONA CON VEGETACION

ESCALA GRAFICA 1:10,000  
(APROXIMADA 1)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL

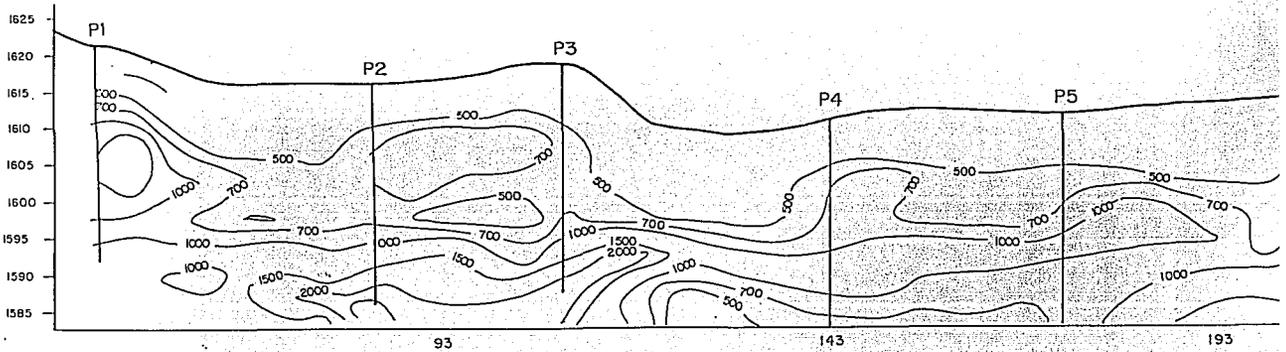
PLANO GEOLOGICO Y LOCALIZACION DE EXPLORACIONES EN EL EJE 1

POR: SERGIO BENIGNO PAREDES

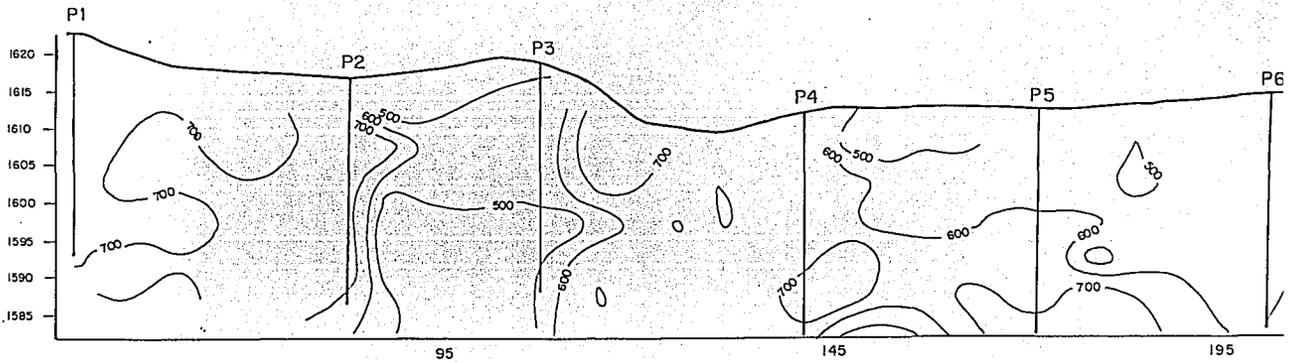
FECHA: ABRIL 1994

PLANO: 2

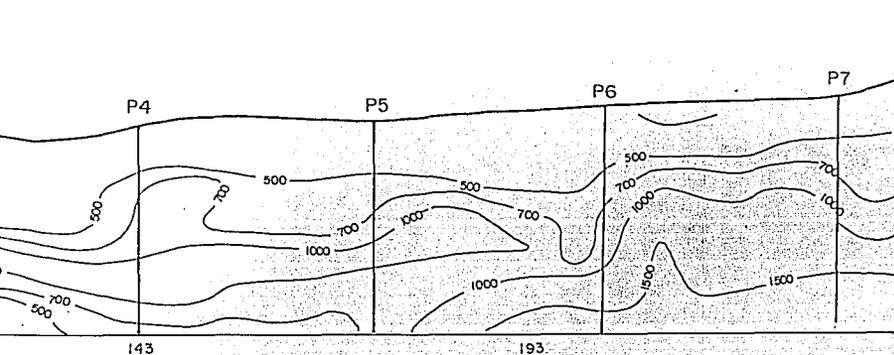
### EJE 1 UPHOLE VP



### EJE 1 TOMOGRAFIA VP



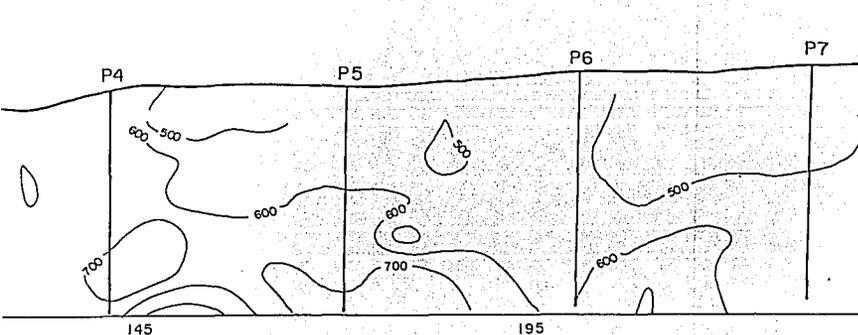
EJE 1 UPHOLE VP



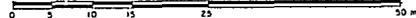
LEYENDA

VELOCIDAD (m/s)	TIPO DE MATERIAL
< 500	TOBA ALTERADA y/O MATERIAL DE ACARREO
500 - 1000	TOBA ARENARCILLOSA POCO COMPACTA
1000 - 2500	TOBA ARENARCILLOSA COMPACTA

EJE 1 TOMOGRAFIA VP

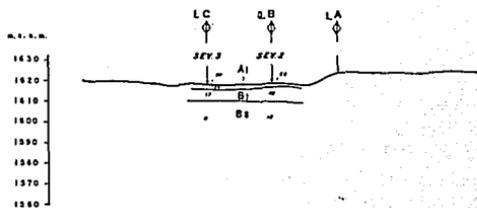


ESCALA GRAFICA 1:500

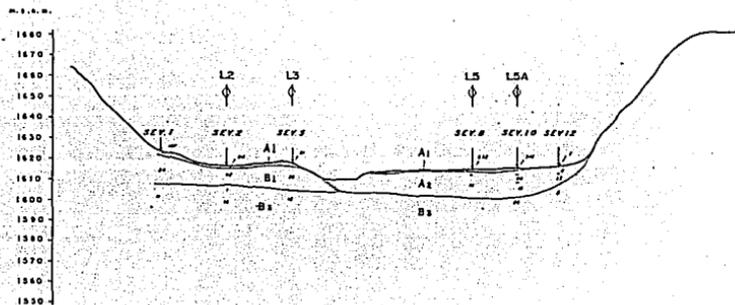


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
EXPLORACION POR UP - HOLE Y CROSS - HOLE, EJE 3	
POR: SERGIO BENIGNO PAREDES	
FECHA: ABRIL 1994	PLANO: 8

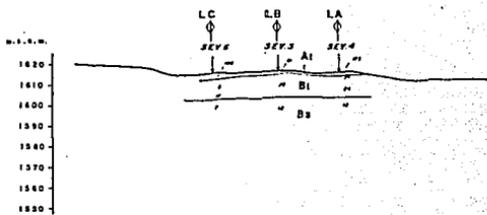
**LINEA 2**



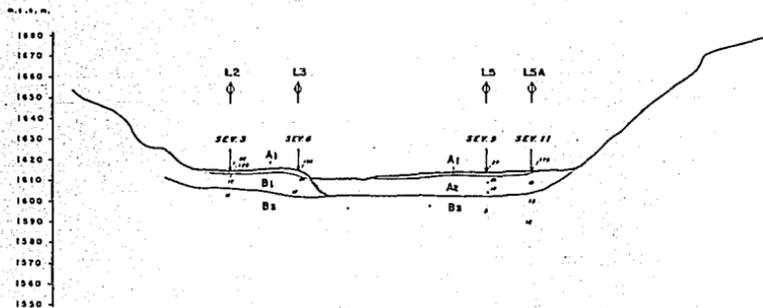
**EJE 1 LINEA B**



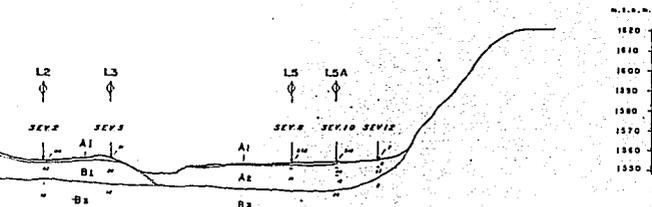
**LINEA 3**



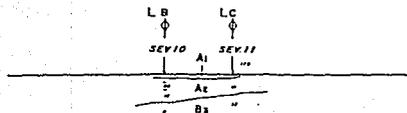
**LINEA C**



EJE I LINEA B



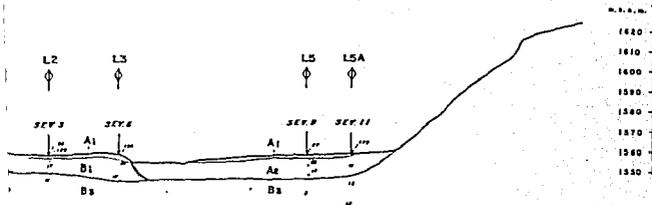
LINEA 5A



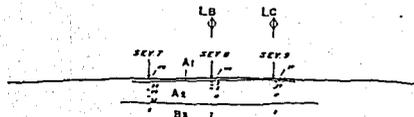
SIMBOLOGIA.

- SEV.IV PUNTO DE ATERRAJE DEL SEV
- || VALOR DE RESISTIVIDAD EN OHM.M
- LI CAUCE DE SECCION
- M UNIDAD GEOELECTRICA
- CONTACTO GEOELECTRICO
- CONTACTO GEOELECTRICO LATERAL

LINEA C



LINEA 5



UNIDADES GEOELECTRICAS			
UNIDAD	RESISTIVIDAD (Ohm.m)	ESPEZOR (m)	TIPO DE MATERIAL
A1	81 - 832	83 - 118	ACERAMICO POCO COMPACTO Y SECCO
A2	11 - 46	83 - 118	ACERAMICO COMPACTO Y SECCO
B1	1 - 12	18 - 80	TIERRA ALTERADA POR CONTACTO
B2	1 - 12	variable	TIERRA COMPACTA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
PERFILES GEOELECTRICOS EJE I	
POR: SERGIO BENIGNO PAREDES	
FECHA: ABRIL 1994	PLANO: 7

LINEA 7



LINEA 1



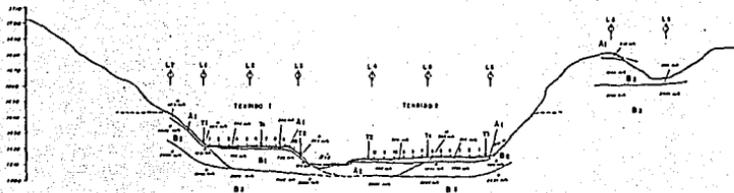
LINEA 2



LINEA 3

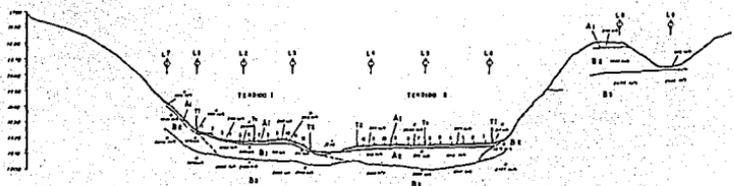


LINEA A

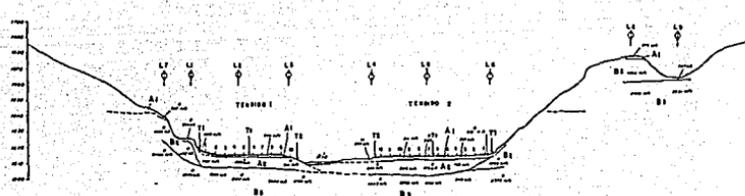


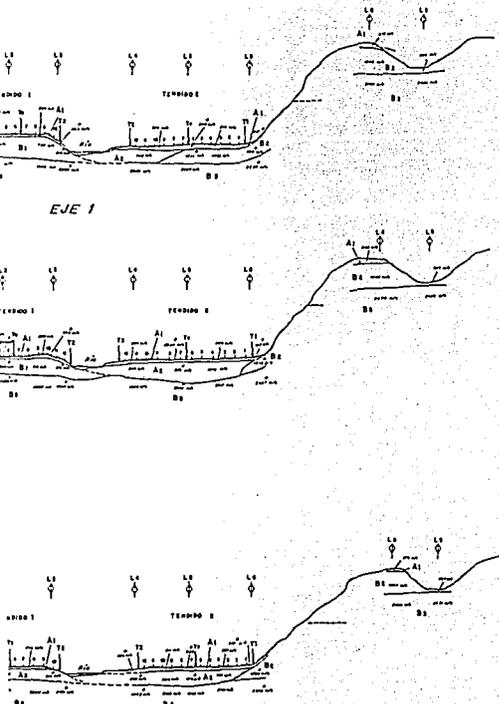
LINEA B

EJE 1



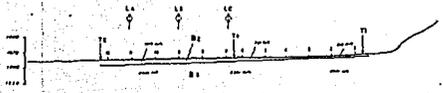
LINEA C





EJE 1

LINEA 9



LINEA 8



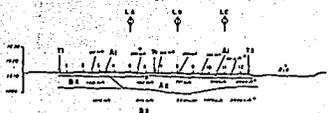
LINEA 6



LINEA 5



LINEA 4



**SIMBOLOGIA**

- PUNTO DE TIPO RESPONSA
- ORIGEN DE LINEA
- CONTACTO ESTRATIGICO
- CONTACTO LATERAL RESERVA
- CONTACTO INCLINADO
- VELOCIDAD DE ONDA P
- VELOCIDAD DE ONDA S
- VELOCIDAD DE ONDA P DE FUERZA DE TRACCION

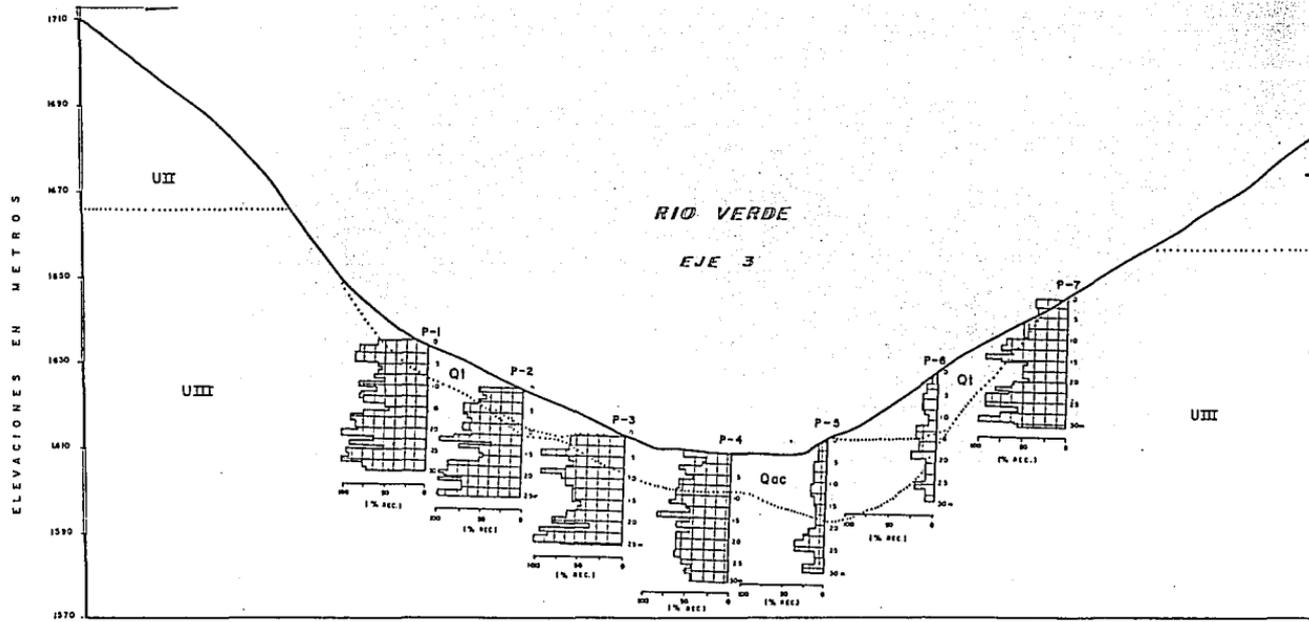
**UNIDADES GEOSISMICAS**

UNIDAD	VELOCIDAD (cm/s)	ESPESOR (m)	MODULO ELASTICO DINAMICO DE MASAS		TIPO DE MATERIAL
			$\mu$	$\nu$	
A1	200-225	10-15	-	-	ARCILLAS Y LIMOSAS POCAS COMPACTAS
A2	400-450	20-25	-	-	ARCILLAS Y LIMOSAS POCAS COMPACTAS
B1	510-600	25-30	0.3-0.35	0.15-0.17	TIERRAS APENAS-ARCILLAS O ALTERNAN POCAS COMPACTAS
B2	1000-1100	25-30	0.3-0.35	0.2-0.23	TIERRAS APENAS-ARCILLAS O POCAS COMPACTAS
B3	1100-1200	25-30	0.3-0.35	0.2-0.23	TIERRAS APENAS-ARCILLAS O POCAS COMPACTAS

● = MODULO DE TRACCION  
 ○ = MODULO DE COMPRESION

ESCALA HORIZONTAL: 1:1000

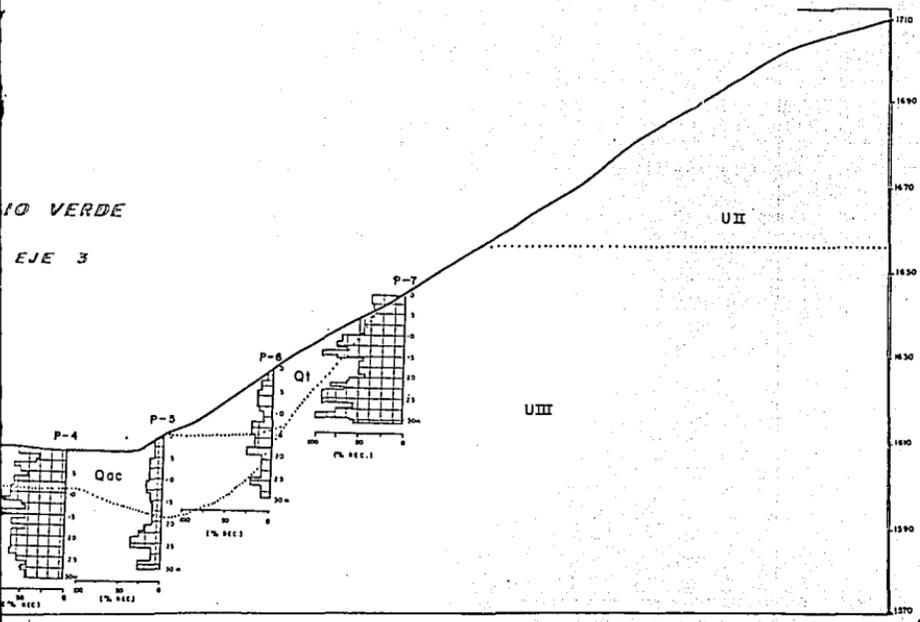
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 TESIS PROFESIONAL  
 PERFILES GEOSISMICOS EJE 1  
 POR: SERGIO BENIGNO PAREDES  
 FECHA: ABRIL 1954 PLANO: G



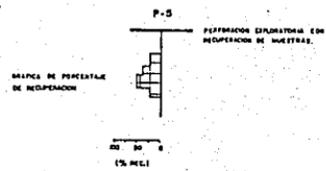
# LEYENDA

- Qoc MATERIALES DE ACARREOS
- Qia TERRAZAS ALUVIALES
- Q1 MATERIALES DE TALUD
- UI UNIDAD ANDESITICA
- U II UNIDAD ESTRATIFICADA
- U III UNIDAD MASIVA

IO VERDE  
EJE 3



## RECUPERACION DE MUESTRAS



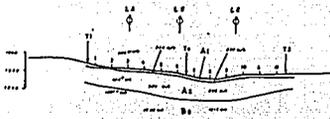
## ESCALA GRAFICA 1:1000



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
PERFIL GEOLOGICO DEL EJE 3	
POR: <b>SERGIO BENIGNO PAREDES</b>	
FECHA: ABRIL 1994	PLANO: 5

ESCALA 1:500

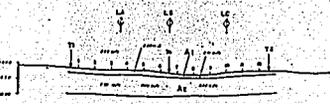
LINEA 1



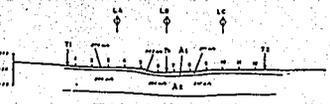
LINEA 2



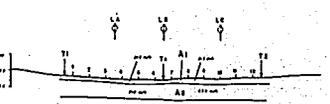
LINEA 3



LINEA 4



LINEA 5



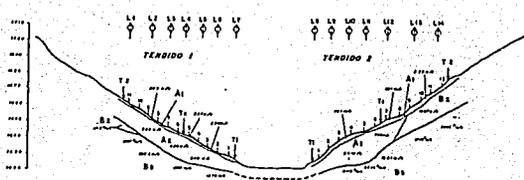
LINEA 6



LINEA 7

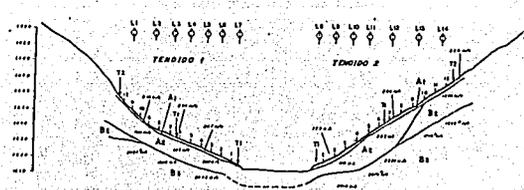


LINEA A

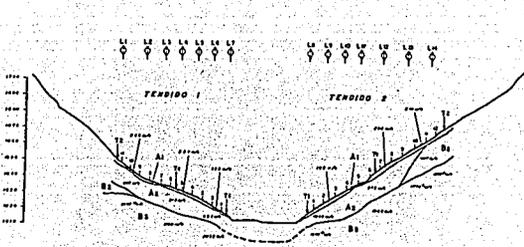


LINEA B

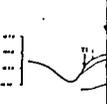
EJE 3



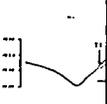
LINEA C



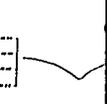
LINEA 14



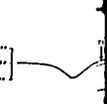
LINEA 13



LINEA 12



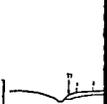
LINEA 11



LINEA 10

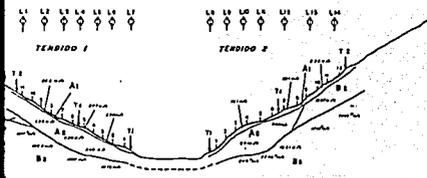


LINEA 9

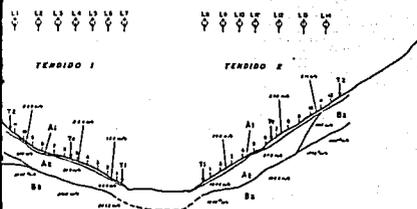
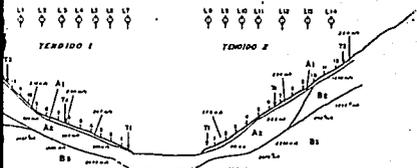


LINEA 8

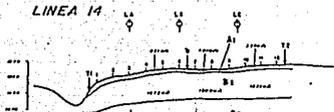




EJE 3



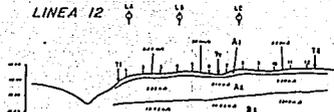
LÍNEA 14



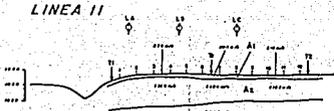
LÍNEA 13



LÍNEA 12



LÍNEA 11



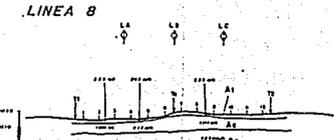
LÍNEA 10



LÍNEA 9



LÍNEA 8



**SIMBOLOGIA**

- PUNTO DE TRO
- SEÑALOS
- CRUCE DE LINEA
- CONTACTO GEOSISMICO
- CONTACTO GEOSISMICO LATERAL
- CONTACTO INTERFO
- VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDA P
- A1 UNIDAD GEOSISMICA
- VELOCIDAD DE ONDA P DE CRUCE DE SECCION

**UNIDADES GEOSISMICAS**

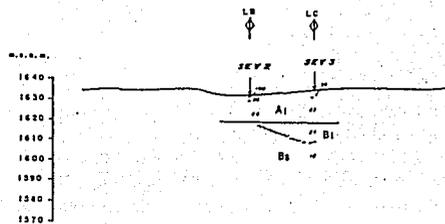
UNIDAD	VELOCIDAD (m/s)	ESPESOR (m)	MÓDULO ELÁSTICO (DINÁMICO) DE MILES		TIPO DE MATERIAL	
			$\mu$ (Ton/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (Ton/cm <sup>2</sup> )		
A1	127-221	1.0-2.2	—	—	SUELO MATERIAL DE FALDA INTERIO	
A2	222-249	2.0-10.0	0.20-0.25	2.2-2.5	0.20-2.2	MATERIAL DE TALUD PARA POCO COMPACTA (TERMINALES ALTERNAS)
B1	170-175	2.5-10.0	0.20-0.25	2.2-2.5	2.0-2.2	TIERRA POCO COMPACTA
B2	187-221	INDETERMINADO	0.20-0.25	2.2-2.5	2.0-2.2	TIERRA POCO COMPACTA

1 = MÓDULO DE TORSION  
2 = MÓDULO DE COMPRESION

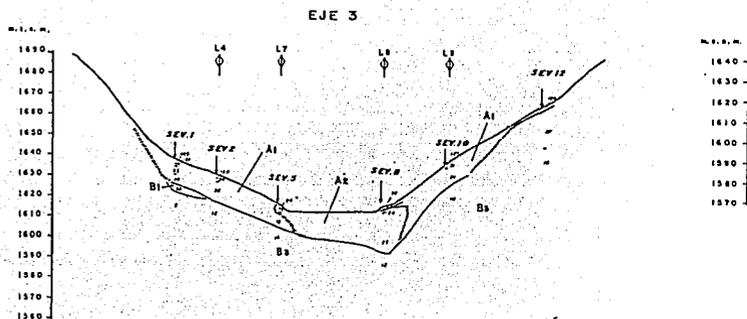
ESCALA 1:1000

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 TESIS PROFESIONAL  
 PERFILES GEOSISMICOS  
 EJE 3  
 POR SERGIO BENIGNO PAREDES  
 FECHA: ABRIL 1994 PLANO: 9

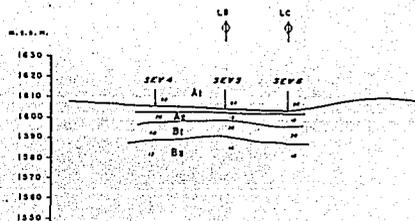
LINEA 4



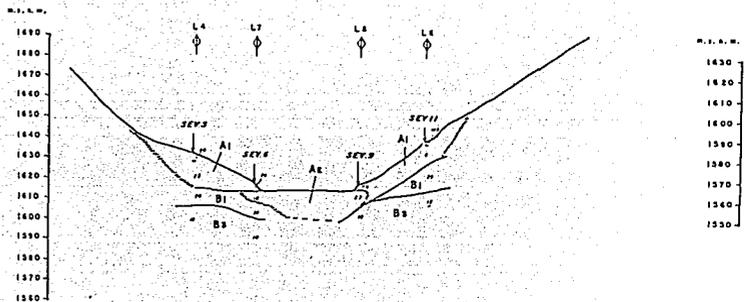
LINEA B

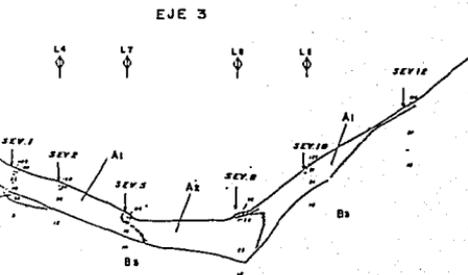


LINEA 7

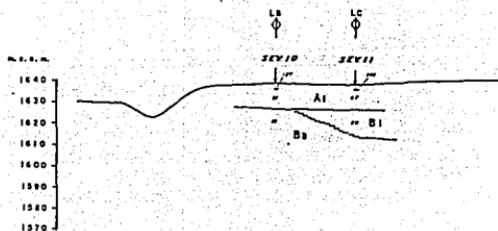


LINEA C





**LINEA 11**



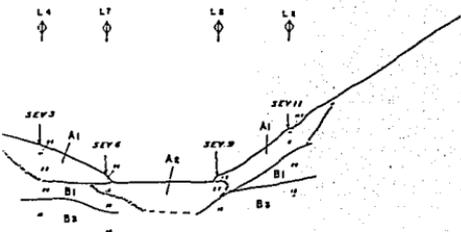
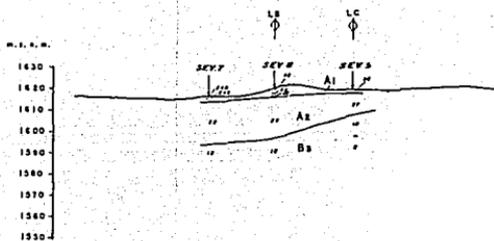
**SIMBOLOGIA**

- SEV P PUNTO DE ATRIBUCION DEL SEV
- AO VALOR DE RESISTIVIDAD EN OHM-M
- C CRUCE DE SECCION
- ⊕ UNIDAD GEOELECTRICA
- CONTACTO GEOELECTRICO
- CONTACTO GEOELECTRICO LATERAL

**UNIDADES GEOELECTRICAS**

UNIDAD	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)	TIPO DE MATERIAL
A1	24-40	0.5-16.0	BAHIA DE TALUD POCO COMPACTA
A2	15-27	7.5-20.0	ACAPOTES SATURADOS POCO COMPACTOS
B1	24-40	0.5-10.0	TIERRA POCO COMPACTA O COMPACTA
B2	2-8	INDEFINIDO	TIERRA COMPACTA

**LINEA 8**

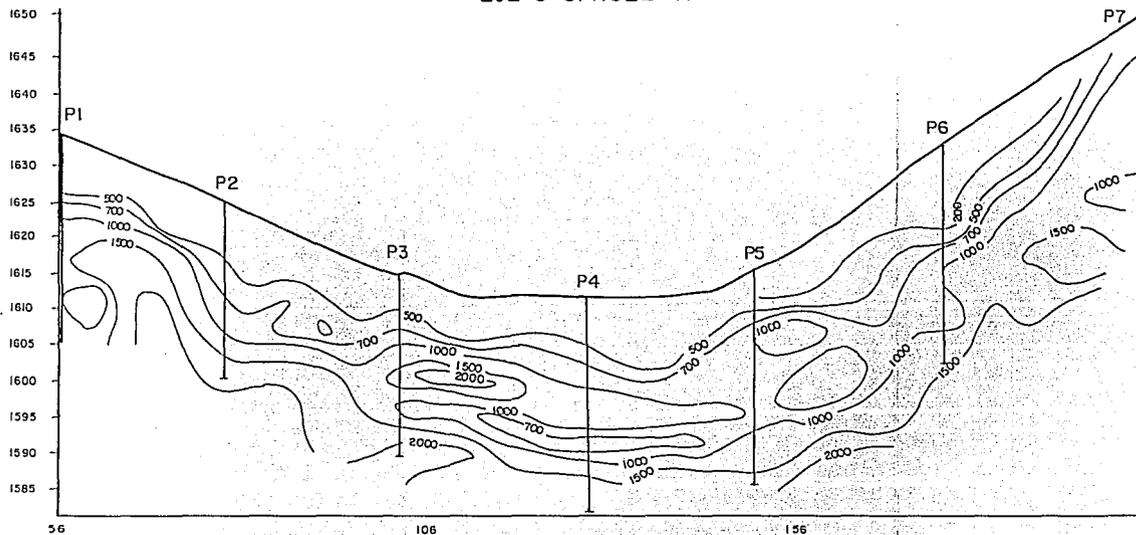


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 TESIS PROFESIONAL

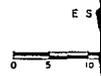
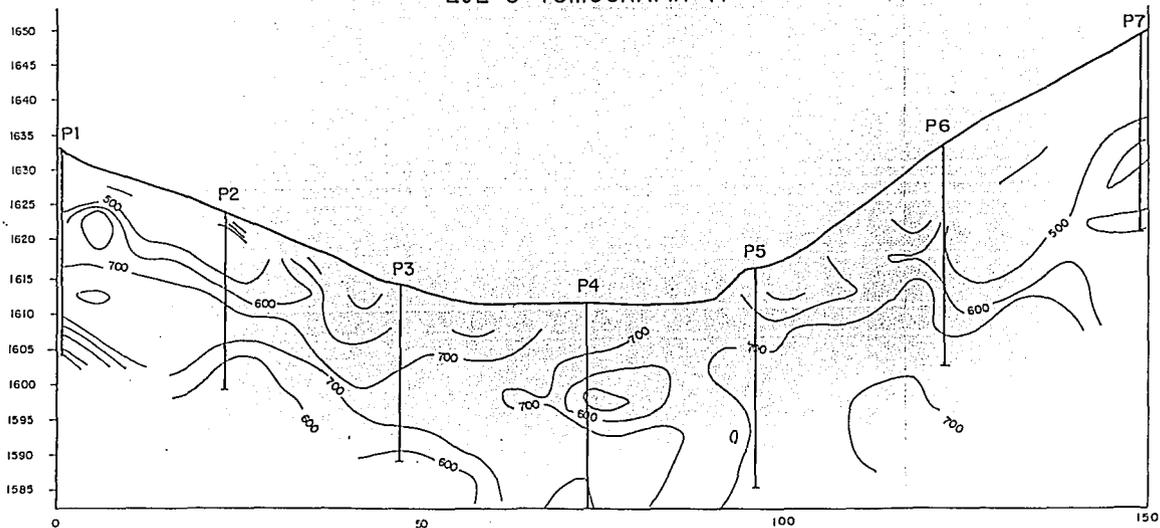
PERFILES GEOELECTRICOS  
 EJE 3

POR: SERGIO BENIGNO PAREDES  
 FECHA: ABRIL 1994 PLANO: 10

### EJE 3 UPHOLE VP

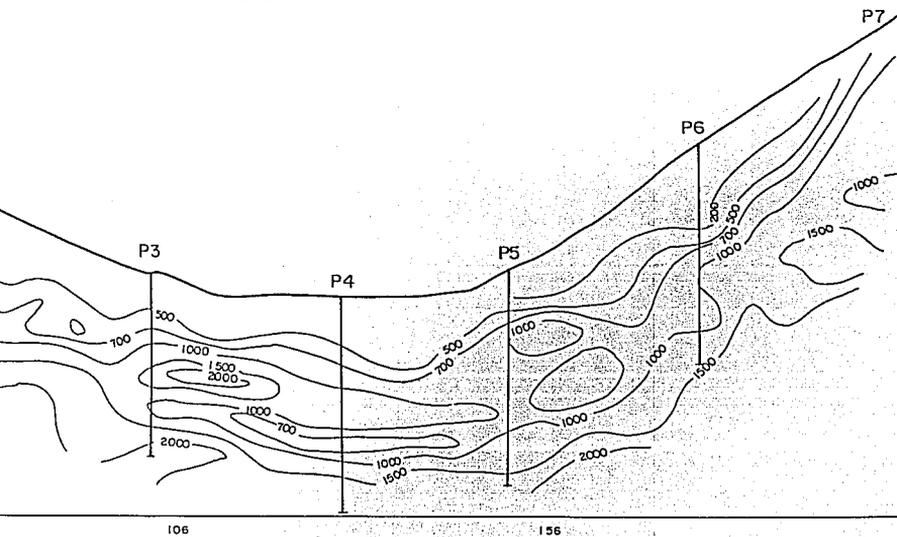


### EJE 3 TOMOGRAFIA VP



UNIVERS
EXPLORA
POR:
FECHA:

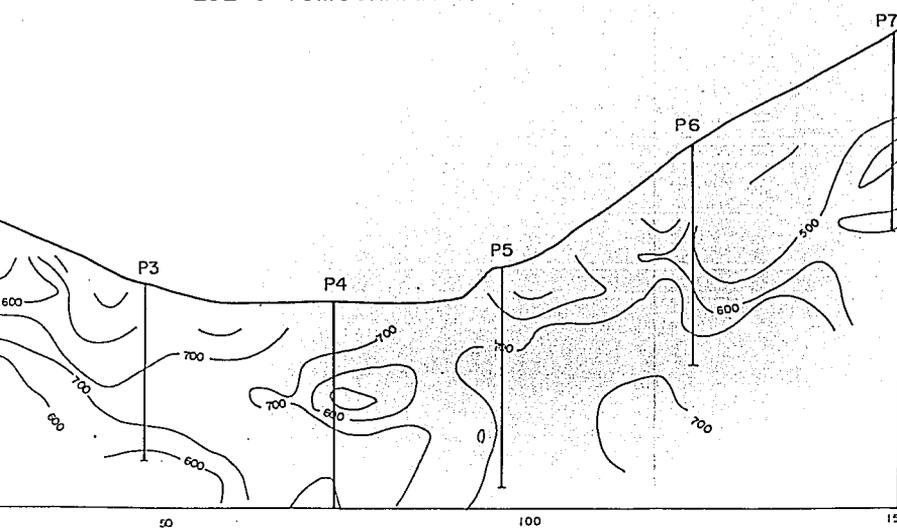
EJE 3 UPHOLE VP



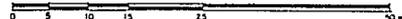
LEYENDA

VELOCIDAD (m/s)	TIPO DE MATERIAL
500	TOBA ALTERADA Y/O MATERIAL DE ACARREO
500 - 1000	TOBA ARENOARCILLOSA POCO COMPACTA
1000 - 2500	TOBA ARENOARCILLOSA COMPACTA

EJE 3 TOMOGRAFIA VP



ESCALA GRAFICA 1:500



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
EXPLORACION POR UP - HOLE Y CROSS - HOLE, EJE 3	
POR: SERGIO BENIGNO PAREDES	
FECHA: ABRIL 1994	PLANO: 11