

16
20

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

GEOLOGIA Y GEOTECNIA DEL TUNEL "BARRIENTOS"
DE LA VIA FERREA MEXICO - QUERETARO, TRAMO: CUAUTITLAN - HUEHUETOCA,
DEL KM. 17+620 AL KM. 18+000, ORIGEN: CUAUTITLAN, EDO. DE MEX.

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOLOGO
PRESENTA
RICARDO GERARDO LOPEZ GONZALEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVIENIMA

FACULTAD DE INGENIERIA

Dirección
60-I-178

Señor LOPEZ GONZALEZ RICARDO GERARDO.
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Prof. Ing. - Salvador Marín Córdova, para que lo desarrolle como tesis para - su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO GEOLOGO.

"GEOLOGIA Y GEOTECNIA DEL TUNEL "BARRIENTOS" DE LA VIA FERREA MEXICO QUERETARO, TRAMO: CUAUTITLAN-HUEHUETOCA DEL KM. 17+620 AL KM. 18+000 ORIGEN: CUAUTITLAN EDO. DE MEXICO"

- I INTRODUCCION.
 - II GENERALIDADES.
 - III GEOLOGIA REGIONAL.
 - IV GEOLOGIA LOCAL.
 - V GEOTECNIA.
 - VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.
- BIBLIOGRAFIA.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar - Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como - - requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así- como de la disposición de la Coordinación de la Administración- Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., Junio 20 de 1984.

EL DIRECTOR

Dr. Octavio A. Rascón Chávez

OARCH' MRV!gtg

INDICE GENERAL.

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1.- ANTECEDENTES Y METODO DE TRABAJO	3
1.1.- Antecedentes	3
1.2.- Método de Trabajo	3
1.2.1.- Investigación documental	5
1.2.2.- Levantamiento geológico superficial	5
1.2.3.- Estudio geoelectrico de resistividad	5
1.2.4.- Perforación rotatoria con recuperación continua de muestras	5
1.2.5.- Estudio geosísmico de refracción	6
1.2.6.- Interpretación de los datos geológicos y geofísicos	6
Referencias del Capítulo 1	7
CAPITULO 2.- GENERALIDADES	8
2.1.- Localización y Vías de Comunicación	8
2.2.- Población y Cultura	8
2.2.1.- Centros educativos	10
2.2.2.- Centros de recreación	10
2.2.3.- Economía	10
2.2.4.- Vivienda	11
2.3.- Clima	11
2.4.- Sismicidad	12
2.4.1.- Agitación microsísmica	12
2.4.2.- Sismos locales	14
2.4.3.- Relaciones de daños inesperados como - efecto de macrosismos distantes	15
Referencias del Capítulo 2	20
CAPITULO 3.- GEOLOGIA REGIONAL	22
3.1.- Fisiografía	22
3.1.1.- Posición geográfica	22
3.1.2.- Accidentes tectónicos	24

	Página
3.2.- Orografía	25
3.3.- Hidrografía	28
3.3.1.- Subdivisión de la cuenca en zonas hidrológicas	34
3.4.- Geomorfología	35
3.4.1.- Sistemas volcánicos antiguos	36
3.4.2.- Sierras volcánicas oriental y occidental	36
3.4.3.- Abanicos aluviales Plio-pleistocénicos	38
3.4.4.- Complejo volcánico del plioceno superior y -- cuaternario	39
3.4.5.- Depósitos lacustres	39
3.5.- Estratigrafía	39
3.5.1.- Sistema terciario	39
3.5.2.- Rocas volcánicas pliocénicas y cuaternarias	50
3.6.- Geología Estructural	52
3.7.- Tectónica	52
3.8.- Geología Histórica	53
3.9.- Geohidrología	58
Referencias del Capítulo 3	60
CAPITULO 4.- GEOLOGIA LOCAL	65
4.1.- Estratigrafía	65
4.2.- Litología	65
4.3.- Geología Estructural	67
CAPITULO 5.- GEOTECNIA	68
5.1.- Estudio Geoeléctrico de Resistividad	68
5.2.- Perforación	74
5.3.- Estudio Geosísmico de Refracción	75
5.4.- Pruebas de Compresión Uniaxial	83
5.5.- Levantamiento Geológico de Detalle	86
5.6.- Aplicación de la Clasificación Geomecánica de Barton ...	95
5.7.- Aplicación de la Clasificación Geomecánica de Bieniawski.	101
5.8.- Análisis de Estabilidad en la Clave del Túnel	106
5.8.1.- Falla por Gravedad	106
5.8.2.- Falla por Deslizamiento sobre un Plano de Fractura -- o a lo Largo de Líneas de Intersección	111

	Página
5.9.- Análisis de Estabilidad en las Paredes del Túnel	115
5.10.- Análisis de Estabilidad de los Taludes en los Cortes --- del Portal de Entrada y el Portal de Salida	119
Referencias del Capítulo 5	134
CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
6.1.- Conclusiones	137
6.2.- Recomendaciones	140
Referencias del Capítulo 6	143

INDICE DE TABLAS.

	Página
Tabla 2.1.- Macrosismos Cuyas Isosistas Muestran los Gra- dos de Intensidad Correspondientes a la Cuen- ca del Valle de México	18
Tabla 5.1.- Mediciones en los Sondeos Eléctricos (Perfil_ P1)	70
Tabla 5.2.- Mediciones en los Sondeos Eléctricos (Perfil_ P2)	72
Tabla 5.3.- Resultados del "Up-Hole" en el Barreno No. 3_ (Est. 17+900)	81
Tabla 5.4.- Valores del Módulo de Deformabilidad Dinámico del Macizo Rocoso	83
Tabla 5.5.- Resultados de los Ensayes de Compresión	85
Tabla 5.6.- Características del Fracturamiento	91
Tabla 5.7.- Términos Descriptivos del Tamaño de Bloques - de un Macizo Rocoso	95
Tabla A.1.- Clasificación de la Resistencia a la Compre-- sión de Deere y Miller	A3
Tabla A.2.- Clasificación de Deere para Espaciamento de_ Discontinuidades	A4
Tabla A.3.- Clasificación Geomecánica de Bieniawski para_ Macizos Rocosos Fracturados	A6
Tabla A.4.- Efecto de la Orientación de las Discontinuida_ des en el Tünelo	A8
Tabla A.5.- Guía para la Selección del Soporte Provisional en Túneles Poco Profundos, de 5 a 12 m de Diá- metro	A10
Tabla A.6.- Calificación de los Parámetros Individuales -- Utilizados en la Clasificación Geomecánica de_ Barton, Lien y Lunde	A15
Tabla A.7.- Dimensiones de Soporte para Macizos Rocosos	A22

INDICE DE FIGURAS.

	Página
Figura 2.1.- Ubicación del Proyecto del Túnel Barrientos.....	9
Figura 2.2.- Precipitaciones y Temperaturas Medias Mensuales.....	13
Figura 2.3.- Frecuencia Sísmica Anual en la Cuenca del Valle de México	16
Figura 2.4.- Epicentros de Sismos en la Cuenca del Valle de México	17
Figura 3.1.- Marco Fisiográfico de la República Mexicana	23
Figura 3.2.- Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico	26
Figura 3.3.- Tabla de Correlación Estratigráfica	40
Figura 3.4.- Unidades Estratigráficas del Pleistoceno y Holo ceno	41
Figura 3.5.- Tectónica de la Cuenca de México y Zonas Veci-- nas	54
Figura 3.6.- Secuencia de Grupos Volcánicos y Eventos Tectó-- nicos de la Cuenca del Valle de México	55
Estereograma 1.- Posiciones de los Planos de Fracturamiento	87
Estereograma 2.- Configuración Estadística de las Posicio-- nes del Fracturamiento	88
Estereograma 3.- Posiciones Preferentes Promedio de los Sis temas de Fracturamiento	90
Estereograma 4.- Relaciones Geométricas entre los Planos de Fracturamiento Preferentes	93
Estereograma 5.- Relación Geométrica de las Discontinuida-- des con el Eje del Túnel	104
Estereograma 6.- Análisis de Estabilidad en la Clave del Tú nel (Cuña Formada por F_1 , F_3 y F_4)	109
Figura 5.8.1	109
Estereograma 7.- Análisis de Estabilidad en la Clave del Tú nel (Cuña Formada por F_1 , F_2 y F_4)	110
Figura 5.8.2	110
Estereograma 8.- Análisis de Estabilidad en la Clave del Tú nel (Cuña Formada por F_2 , F_3 y F_4)	113

	Página
Figura 5.8.3	113
Figura 5.8.4	114
Estereograma 9.- Análisis de Estabilidad en las Paredes del Túnel (Cuña Formada por F_1 , F_3 y F_4)	117
Figura 5.9.1	117
Estereograma 10.- Análisis de Estabilidad en las Paredes del Túnel (Cuña Formada por F_1 , F_2 y F_4)	118
Figura 5.9.2	118
Figura 5.10.1.- Deslizamiento de un Bloque sobre un Plano Inclinado por Acción de su Peso Propio	122
Estereograma 11.- Análisis de Estabilidad del Talud Derecho (Est. 17+650)	126
Estereograma 12.- Análisis de Estabilidad del Talud Izquierdo (Est. 17+650)	127
Estereograma 13.- Análisis de Estabilidad del Talud Derecho (Est. 17+960)	128
Estereograma 14.- Análisis de Estabilidad del Talud Izquierdo (Est. 17+960)	129
Estereograma 15.- Determinación del Factor de Seguridad del Talud en Forma Gráfica (Intersección de las Familias de Fracturas F_3 y F_1)	130
Estereograma 16.- Determinación del Factor de Seguridad del Talud en Forma Gráfica (Intersección de las Familias de Fracturas F_2 y F_3)	131
Estereograma 17.- Determinación del Factor de Seguridad del Talud en Forma Gráfica (Intersección de las Familias de Fracturas F_3 y F_4)	132
Estereograma 18.- Determinación del Factor de Seguridad del Talud en Forma Gráfica (Intersección de las Familias de Fracturas F_1 y F_4)	133
Figura A.1.- Definición del Claro Activo según Lauffer	A9
Figura A.2.- Relación entre el Tiempo de Estabilidad sin Soporte y la Clasificación de Bieniawski	A9
Figura A.3.- Relación entre la Dimensión Equivalente (De) --	

	Página
Máxima de una Excavación sin Soporte y el Índice de Tuneleo "Q"	A21
Figura A.4.- Categorías de Soporte Propuestas por Barton	A21

La cosa más bella que podamos experimentar es lo misterioso. Es la fuente de toda verdad y ciencia. Aquél para quien ésa emoción es ajena, aquél que ya no puede maravillarse y extasiarse ante el miedo, vale tanto como un muerto; sus ojos están cerrados... Saber que lo impenetrable para nosotros existe realmente, manifestándose con la prudencia máxima y la belleza más radiante que nuestras torpes capacidades pueden comprender tan sólo en sus formas más primitivas... este conocimiento, este sentimiento, se encuentra en el centro de la verdadera religiosidad. En ése sentido, y sólo en ése sentido, pertenezco a las filas de los hombres religiosos devotos.

ALBERT EINSTEIN,
Lo que creo (1930)

INTRODUCCION

La Geología Aplicada a la Ingeniería Civil tiene un campo muy amplio de acción; pero, definitivamente, la obra de Ingeniería que más requiere de la participación de ella es el túnel.

El geólogo interviene fundamentalmente en cada una de las etapas -- que requiere la concepción de una obra de este tipo: el anteproyecto, el proyecto, la construcción y la operación; todas con la misma importancia.

Es aquí donde la Geología deja de ser una ciencia para convertirse en tecnología, buscando soluciones ingenieriles a los problemas que plantea la construcción de un túnel; donde se puede ejercer la Ingeniería como arte, ya que no existen fórmulas preestablecidas para dar respuesta a las interrogantes que surgirán durante el desarrollo de la obra, y donde la aplicación del criterio ingenieril adquiere una importancia relevante.

Además de todo lo anterior, también en un proyecto de este tipo se pone a prueba la capacidad de comunicación de los que intervienen en él, puesto que su complejidad requiere de equipos de trabajo interdisciplinarios.

En México, un país con una amplia experiencia tunelera, actualmente existe una gran brecha en lo que se refiere al proyecto y construcción de túneles para vías terrestres con respecto a otro tipo de túneles.

Sin embargo, considerando las condiciones topográficas de nuestro país, se puede afirmar que los túneles ferroviarios y carreteros deben tener mayor difusión si se quiere mejorar el proyecto geométrico actual de vías férreas y carreteras, tomando en cuenta que estas obras de infraestructura son la espina dorsal del desarrollo socioeconómico de un país.

Este trabajo representa un intento de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para establecer un criterio referente a la relación --

exploración - proyecto que se presenta en un túnel. Para esto se utilizan dos clasificaciones geomecánicas ampliamente utilizadas, mundialmente, para el tuncleo.

Esta aplicación de clasificaciones geomecánicas adquiere un interés especial debido a que en la Mecánica de Rocas se ha trabajado intensamente para establecer una clasificación para macizos rocosos, considerando algunos aspectos geológicos que intervienen en el comportamiento mecánico, que permita una comunicación eficaz entre las personas relacionadas con esta ciencia, como sucede en la Mecánica de Suelos.

El presente trabajo está dividido, básicamente, en tres partes:

- Un bosquejo geológico a nivel regional y local del área donde se construirá la obra (capítulos 3 y 4),
- la descripción de los métodos de exploración empleados y sus resultados (capítulo 5), y
- la interpretación de los resultados así como las conclusiones y recomendaciones a que condujo la primera (capítulos 5 y 6).

También se incluyen dos apéndices relacionados con la metodología empleada para la interpretación de los datos arrojados por la exploración y la utilización de las clasificaciones geomecánicas de N. Barton y Z. T. Bieniawski (apéndices A y B).

CAPITULO 1.- ANTECEDENTES Y METODO DE TRABAJO.

1.1.- ANTECEDENTES.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, dentro de su programa de modernización de vías férreas, a través de la Dirección General de Vías Férreas, contempla la construcción de una vía doble electrificada - del Ferrocarril México - Querétaro, ampliando la vía existente.

El proyecto incluye la construcción de un túnel, paralelo al existente, de sección circular de 11.00 m de diámetro, longitud de 380.00 m, pendiente máxima longitudinal de + 0.60 %, curvatura máxima de 2° 00' y cobertura máxima de 36.00 m en el tramo: Cuautitlán - Huehuetoca entre los cadenamientos 17+620 y 18+000 con origen en Cuautitlán, Estado de México.

La Dirección General de Vías Férreas encomendó al Departamento de Estudios Geotécnicos de la Dirección General de Servicios Técnicos los trabajos de exploración correspondientes. El trabajo que aquí se presenta incluye la descripción, resultados e interpretación de los estudios exploratorios así como un bosquejo geológico del área de interés.

1.2.- METODO DE TRABAJO.

El Túnel "Barrientos" de la Vía Férrea México - Querétaro se construirá en una zona urbana, paralelo al túnel existente en la vía actual. El túnel existente se encuentra separado 27.00 m del proyecto (eje a eje) y tiene una sección en forma de herradura de 7.00 m de ancho. El túnel proyectado también se encuentra cercano a líneas de gasoductos (20.00 m del eje de trazo).

Las condiciones anteriores determinaron que se estableciera un programa de exploración que tenía los siguientes objetivos fundamentales:

- Responder las interrogantes que se le presentan al constructor de túneles (7)* y que se enumeran a continuación:

* Los números entre paréntesis indican las referencias bibliográficas -- que se encuentran al final de cada capítulo.

- a) ¿Se excavará el túnel completamente en roca sana o se encontrarán zonas intemperizadas o alteradas por acción hidrotermal o -- bien canales o cauces sepultados rellenos con material permeable?
- b) ¿Se obtendrá durante la excavación una sección limpia o bien habrá sobre - excavación?.
- c) ¿Será la roca fácilmente excavada y perforada o por el contrario difícil?.
- d) ¿Existen razones que den lugar a pensar en la posibilidad de --- grandes o pequeños desprendimientos de roca del techo del túnel? (qué parte del túnel necesitará soportes y ademes y de qué tipo)
- e) ¿Si existen fallas qué posición guardan éstas con respecto al -- eje del túnel, en qué longitud lo afectan y cuál es la magnitud del afallamiento para que llegue a encontrarse roca triturada?.
- f) ¿En qué puntos y en qué cantidad se encontrará agua?.
- g) ¿Si existen materiales no consolidados en los portales de entrada o de salida del túnel o bien si la roca está muy intemperizada en estos lugares, en qué longitud se verá afectado el túnel y qué dificultades especiales se presentarán en las excavaciones - iniciales?.
- h) ¿Hay posibilidad de encontrar muchas dificultades en las partes profundas del túnel en zonas de roca que se está hinchando por - liberación de presiones, o bien por desprendimientos violentos - de roca?.
- i) ¿Se encontrarán en exceso altas temperaturas o gases tóxicos o - venenosos?.

- Otro objetivo era determinar el tipo de soporte provisional y el

procedimiento de construcción que requeriría el túnel.

- El último objetivo consistía en comparar las clasificaciones geomecánicas de Barton (índice Q) (1) y Bieniawski (índice RMR) (2) para tu neleo.

El programa de exploración consistió en lo siguiente:

1.2.1.- Investigación documental.

Se consultaron las cartas topográfica y geológica escala 1: 50 000 E 14 A "Cuautitlán" y la carta geológica escala 1:250 000 E 14 2 "Cd. de México", publicadas y distribuidas por la Secretaría de Programación y - Presupuesto (8), (9). También se consultaron los datos y especificaciones del proyecto, así como informes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes correspondientes a estudios anteriores del área. Así mismo, - se consultó bibliografía referente a los métodos existentes para determinar el soporte provisional en excavaciones subterráneas.

1.2.2.- Levantamiento geológico superficial.

Se efectuó un levantamiento de detalle enfocado a determinar las características que permitieran aplicar las clasificaciones geomecánicas - de Barton (1) y Bieniawski (2).

1.2.3.- Estudio geoelectrico de resistividad.

Por medio de un contrato otorgado a la compañía Investigaciones Técnicas del Subsuelo S.A. (S) se efectuaron 20 sondeos eléctricos resistivos en dos perfiles con longitud aproximada de 500 m; uno sobrepuesto al eje de trazo del túnel y el otro sensiblemente paralelo a una distancia que varía entre 20 y 40 m al noreste (derecha) con el propósito de modificar el proyecto en esa dirección, si fuera necesario.

1.2.4.- Perforación rotatoria con recuperación continua de muestras.

Con base en el levantamiento geológico superficial y el estudio geoeléctrico resistivo se decidió efectuar cuatro perforaciones en las estaciones 17+700, 17+780, 17+900 y 17+960 con profundidad de 32, 47, 35 y -

25 metros respectivamente (5.00 m bajo la rasante proyectada).

La perforación fué ejecutada con una máquina Long Year 34, manejando barril con broca de diamante diámetro NQ (3") y sistema wireline. Los sondeos fueron hechos por la compañía GEOSOL S.A. (5).

En cada una de las perforaciones se recuperaron muestras en toda la longitud de los sondeos. Se determinó el porcentaje de recuperación y el índice de calidad de roca (RQD) así como los índices Q y RMR establecidos por Barton (1) y Bieniawski (2), extrapolando algunas observaciones hechas durante el levantamiento geológico superficial que no eran observables en los núcleos extraídos de la perforación. También se describieron petrológicamente las muestras y se eligieron las muestras que serían enviadas al laboratorio para determinar su peso volumétrico y resistencia a la compresión uniaxial.

1.2.5.- Estudio geosísmico de refracción.

Para determinar las características dinámicas del macizo rocoso, se otorgó un contrato a la compañía EXYCO S.A. (4) para efectuar un estudio geosísmico de refracción. Se pretendía utilizar los pozos de la perforación para llevar a cabo el estudio; pero debido a que no se ademaron los barrenos, éstos se obturaron por lo que únicamente se pudo hacer un levantamiento por el método "up - hole" en la perforación no. 3 ubicada en la estación 17+900. Este levantamiento se complementó con un estudio microsísmico, utilizando un marro como excitador.

1.2.6.- Interpretación de los datos geológicos y geofísicos.

Los resultados del programa exploratorio se interpretaron en función de los objetivos mencionados anteriormente. En el caso de datos cuantitativos se observó una gran variación, por lo que fué necesaria la aplicación de métodos estadísticos con el fin de establecer criterios que fueran acordes con las condiciones geológicas predominantes. En el caso de algunos tratamientos estadísticos se utilizó un programa de computadora denominado "Biomedical" (3). Finalmente se obtuvieron las conclusiones y se hicieron las recomendaciones que se consideraron pertinentes.

REFERENCIAS DEL CAPITULO 1.

- 1.- BARTON N., LIEN R. Y LUNDE J.,-
1974.- Engineering Classification of Rock
Masses for the Design of Tunnel Su-
pport. Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4,
p. 189-236.
- 2.- BIENIAWSKI Z. T., 1976.- Rock Mass Classification in Rock --
Engineering. Proc. Symposium on Ex-
ploration for Rock Engineering, --
Johannesburg, Vol. 1, p. 97-106.
- 3.- BMDP STATISTICAL SOFTWARE, INC.
1984.- Programa BMDP 2D. Versión 4.1B. Los
Angeles CA, U.S.A. Copyright 1983 -
Regents of University of California.
- 4.- EXYCO, S.A., 1983.- Estudio Sísmico del Túnel Barrien--
tos, Vía Férrea: México-Querétaro. _
Informe para la Secretaría de Comu-
nicaciones y Transportes. Dirección
General de Servicios Técnicos.
- 5.- GEOSOL, S.A., 1983.- Exploración y Ensayes de Laboratorio
para el Túnel Barrientos, Edo. de -
Méx., de la Vía Férrea: México-Que-
rétaro, Tramo Cuautitlán-Huehuetoca.
Informe para la S.C.T., D.G.S.T.
- 7.- RICHEY, J. E., 1964.- Elements of Engineering Geology. --
Pitman & Sons Ltd. Londres.

CAPITULO 2.- GENERALIDADES

2.1.- LOCALIZACION Y VIAS DE COMUNICACION

El proyecto del túnel "Barrientos" se localiza en el centro de la República Mexicana, en el Estado de México entre los paralelos 19° 34' - 52" y 19° 35' 00" de latitud norte y los meridianos 99° 11' 33" y 99° -- 11' 42" de longitud oeste (Fig. 2.1).

El sitio del túnel se encuentra comunicado por numerosas vías, de las cuales las más importantes son: la autopista México - Querétaro, la carretera federal número 130 que va de Toluca, Méx. a Cuautitlán, Méx. y el actual ferrocarril México - Querétaro (3). Existen también líneas telefónicas y telegráficas así como servicios de correo.

Para la descripción de la geología regional se consideró un área de 9 600 Km² denominada Cuenca del Valle de México que se encuentra localizada entre los paralelos 19° 03' 53" y 20° 11' 09" de latitud norte y -- los meridianos 98° 11' 53" y 99° 30' 24" de longitud oeste. Tiene como -- límites: Al sur, las sierras de Cuautzín, Chichinautzin y del Ajusco; al oeste las sierras de Las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y Tepotzotlán; -- al norte, las serranías de Tezontlalpan y Pachuca; y al este, los lome-- ríos que se desprenden de la Sierra de Pachuca hasta llegar a la Sierra_ de Calpulalpan que después se une a las sierras de Río Frío y Nevada (7)

La Cuenca del Valle de México colinda al norte con el Valle de Tula y Tulancingo; al sur con los Valles de Cuernavaca y Cuautla; al este con los Valles de Puebla y Tlaxcala y al oeste con el Valle de Toluca.

2.2.- POBLACION Y CULTURA

La población total del Estado de México, según los datos obtenidos_ del Censo de 1980 (5) es de 7 564 335 habitantes, de los cuales 3 755 -- 869 son hombres y 3 808 466 son mujeres.

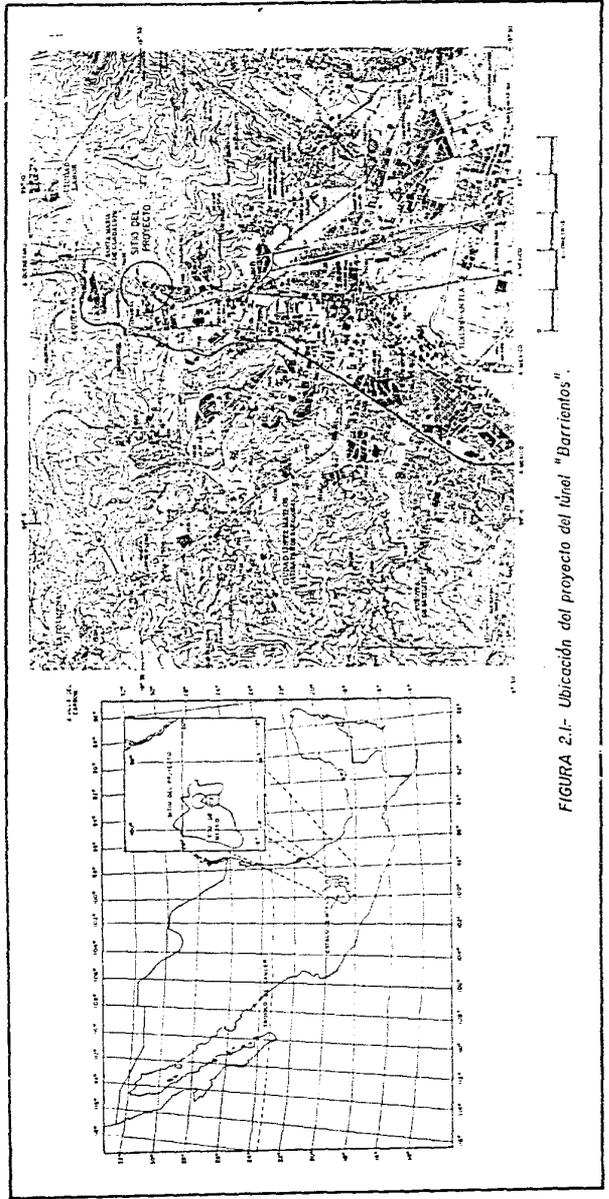


FIGURA 2.1.- Ubicación del proyecto del túnel "Barrientos".

La población total del Municipio de Tlalnepantla, al cual pertenece el poblado de Barrientos, que es el centro urbano más cercano al proyecto del túnel; es de 778 173 habitantes, de los cuales 383 906 son hombres y 394 267 son mujeres (5).

2.2.1.- Centros Educativos.

El Estado de México cuenta con varios centros educativos de acuerdo con la relación siguiente (6):

	Alumnos	Escuelas	Personal Docente (76-77)
EDUCACION PREESCOLAR	52 089	343	1 289
EDUCACION PRIMARIA	1 242 882	3 184	27 088
EDUCACION TERMINAL ELEMENTAL	8 070	54	626
EDUCACION MEDIA BASICA	171 200	667	9 439
EDUCACION TERMINAL MEDIA	1 106	1	92
EDUCACION MEDIA SUPERIOR	33 568	39	1 198
EDUCACION NORMAL	8 955	37	1 002
EDUCACION SUPERIOR	29 054	17	2 722

2.2.2.- Centros de Recreación.

El Estado de México cuenta también con varios centros para el esparcimiento y la recreación (6), de acuerdo con la siguiente clasificación- (1975):

Salas de exhibición de películas	63
Centros nocturnos, cabarets y salones de baile	2
Billares, boliches y salas de ajedrez	238
Gimnasios y pistas para patinar	17
Balnearios	15
Juegos mecánicos (parques)	3
Clubes deportivos profesionales	2
Centros sociales	12
Parques de descanso, clubes de caza y pesca	25

2.2.3.- Economía (5).

El total de la población económicamente activa en el Estado de México es de 2 410 236 y las tres principales ramas de actividad económica por orden de importancia son:

- Industrias manufactureras
- Agricultura, ganadería y caza
- Servicios comunales, sociales y personales

En el Municipio de Tlalnepantla el total de la población económicamente activa es de 254 251 en las ramas de actividad económica principales:

- Industrias manufactureras
- Servicios comunales, sociales y personales
- Comercio por mayor y por menor

2.2.4.- Vivienda (5)

El total de viviendas en el Estado de México es de 1 289 093 con un total de ocupantes de 7 564 335. En el Municipio de Tlalnepantla el total de viviendas es de 139 694 y el número total de ocupantes es de 778 173 distribuidos de acuerdo con la relación siguiente:

	Viviendas	Ocupantes
Viviendas particulares	1 281 270	7 511 360
Hotel, pensión, etc.	3 110	17 591
Hospital, clínica, etc.	183	2 379
Orfanatorio, hospicio, etc.	194	1 776
Internado escolar	61	1 556
Convento , seminario, etc.	100	915
Cárcel, prisión, etc.	222	1 313
Otra clase	3 953	27 445

2.3.- CLIMA (4)

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García, --

el proyecto del túnel se encuentra en una zona con clima templado con -- temperatura media anual entre 12° y 18°C, y la del mes más frío entre -- -3° y 18°C. Por su régimen de lluvias y grado de humedad el clima es - - subhúmedo con lluvias en verano, porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10.2% de la anual y precipitación del mes más seco menor a 40 mm.

Es el clima más seco de los templados subhúmedos con lluvias en verano, con un cociente Precipitación / Temperatura menor a 43.2.

La temperatura máxima es de 17.6°C en Junio y la mínima de 11.3°C -- en Enero. La precipitación máxima es de 140 mm en Septiembre y la mínima de 2 mm en Febrero y Marzo.

Existe poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales -- entre 5° y 7° C. En la Fig. 2.2 se muestra una gráfica de las temperaturas y las precipitaciones medias mensuales.

2.4.- SISMICIDAD (2)

Las principales características de la sismicidad en la Cuenca del -- Valle de México, que se consideran como consecuencia de las propiedades -- desfavorables del terreno, particularmente en las zonas bajas y de transición son las siguientes:

2.4.1.- Agitación microsísmica muy amplia.

2.4.2.- Sismos locales frecuentes.

2.4.3.- Relaciones de daños inesperados como efecto de macro-- sismos distantes dentro del territorio nacional.

2.4.1.- Agitación Microsísmica.

Las gráficas obtenidas en el sismógrafo Wiechert de registro mecánico, masa 17 000 kg, período 1.5 seg., amplificación máxima 2 000 veces, -- instalado en terreno firme en Tacubaya, muestran que la agitación microsísmica es continua y de notable amplitud en razón directa con el tránsito en la Ciudad de México, e influenciada por fenómenos meteorológicos.

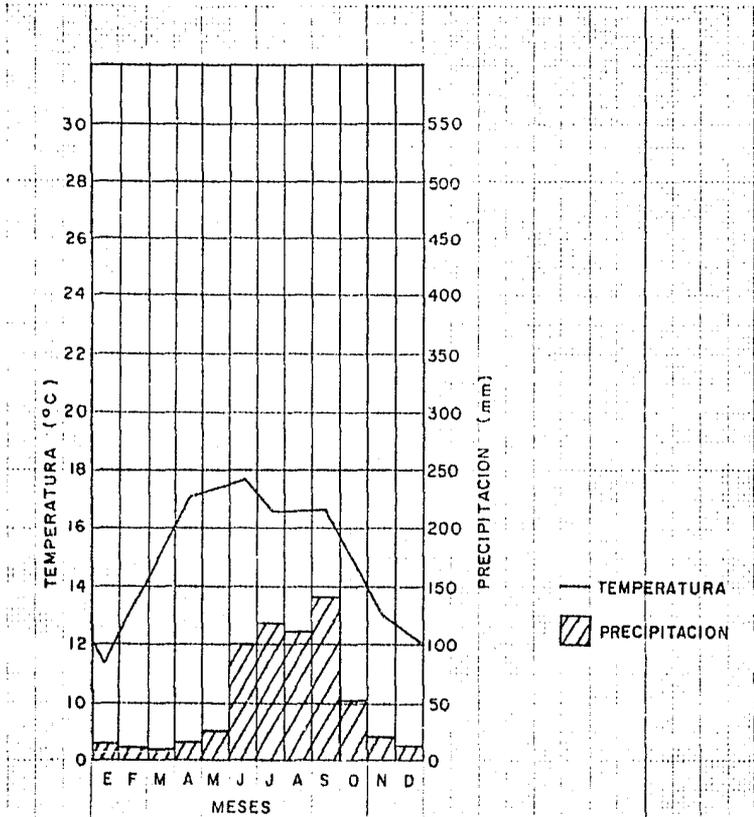


FIGURA 2.2.- Precipitaciones y temperaturas medias mensuales.

A continuación se reproducen los datos obtenidos en el año de 1960 - (1):

AGITACION MICROSISMICA NORMAL			
Estación	Componente	Amplitud media	Período
Tacubaya	Horizontal	0.38 mm	3.9 seg.
	Vertical	0.32 mm	3.7 seg.

AGITACION LOCAL QUE VARIA CON LA ACTIVIDAD URBANA

Horas	2h	6h	10h	14h	18h	22h
Amplitud en mm	0.41	0.74	0.90	1.7	0.84	0.67
Período en seg	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42

2.4.2.- Sismos locales

En la Cuenca, especialmente en determinadas zonas de la ciudad de México, debido a los acomodamientos del subsuelo se originan sismos locales que llegaron a ser 2 124 en el año de 1968 (Fig. 2.3). La energía liberada por estos sismos locales, de 1909 a 1968, se estima en un valor de $10^{17.5}$ ergs. Estos movimientos se caracterizan por un período corto, que por lo general no excede de 0.5 seg.

La fig. 2.4 muestra la localización de epicentros en la Cuenca de México; pero debe decirse que esta localización de epicentros es incierta ya que fueron obtenidos casi siempre en un aparato de una sola estación.

La frecuencia sísmica anual de temblores domésticos, con distancias epicentrales hasta de 100 km se muestra en la Fig. 2.3 donde se observa que el número total hasta el año de 1968 llegó a 21 705, siendo en su mayoría registros para distancias menores de 25 km de Tacubaya.

La actividad de 1959 a 1968, según la curva de la gráfica indicada

llegó a los valores siguientes:

AÑO	MOVIMIENTOS
1959	1 302
1960	1 445
1961	950
1962	870
1963	804
1964	1 410
1965	1 789
1966	2 043
1967	2 054
1968	2 124

**2.4.3.- Relaciones de daños insperados como efecto de macrosismos
distantes.**

En la Tabla 2.1 aparecen 37 de los 42 macrosismos a los que se les han trazado sus respectivas isosistas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

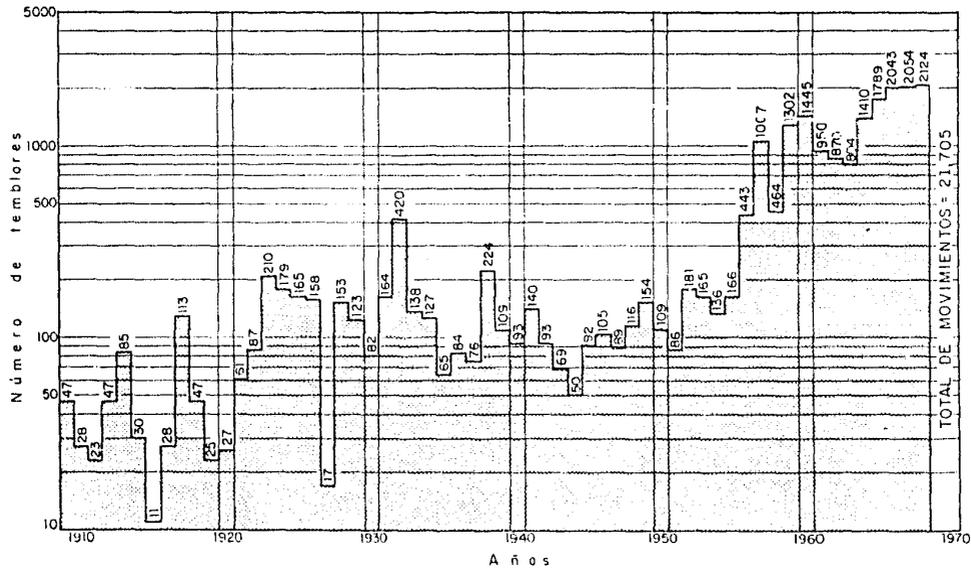


FIGURA 2.3.- Frecuencia sísmica anual en la Cuenca del Valle de México 1909 a 1968.

Tabla 2.1.- Macrosismos cuyas isosistas muestran los grados de intensidad correspondiente a la Cuenca del Valle de México.

Año	Mes	Día	Magnitud según la escala Richter.	Distancia, en km. Epicentro-Tacubaya	Grados según la escala de- Mercalli modificada, 1931.
1845	04	07	7.0	329	IX
1858	06	19	7.0	322	VIII
1864	10	03	7.0	188	VII
1870	05	11	7.0	438	VII
1882	07	19	7.5	160	VIII
1897	06	05	7.0	511	VI
1902	01	16	7.0	200	V
1902	09	23	7.8	764	IV
1908	03	26	7.5	297	VI
1909	07	30	7.7	294	VII
1909	07	31	7.0	300	VI
1909	09	05	6.6	320	V
1909	10	31	7.0	329	V
1910	05	31	6.5	297	V
1911	02	03	7.25	320	V
1911	06	07	8.0	474	VIII
1911	08	27	6.7	452	IV
1911	12	16	7.0	303	V
1912	11	19	7.8	117	V
1920	01	03	7.8	235	IV

Tabla 2.1.- (Continuación)

Año	Mes	Día	Magnitud según la escala Richter.	Distancia, en km. Epicentro-Tacubaya	Grados según la escala de- Mercalli modificada, 1931.
1928	02	09	7.7	230	VI
1928	03	21	7.5	504	VI
1928	04	16	7.7	287	V
1928	06	17	7.5	408	VI
1928	08	04	7.4	363	V
1941	04	15	7.0	452	VII
1956	11	09	6.3	560	IV
1957	07	28	7.5	336	VII
1959	05	24	6.8	287	VI
1959	08	26	6.5	526	IV
1962	05	11	6.7	300	VII
1962	05	19	6.5	231	VI
1962	11	30	5.5	231	IV
1964	07	06	6.5	224	VII
1965	08	23	7.0	395	VI
1965	12	09	6.8	328	V
1968	08	02	6.5	363	VI

REFERENCIAS DEL CAPITULO 2.

- 1.- FIGUEROA A. JESUS, 1960.- Some Considerations about the Effect of Mexican Earthquakes, Procs., II - World Conference on Earthquake Engineering, Tokio, pp. 1553-1561.
- 2.- FIGUEROA A. JESUS, 1971.- Sismicidad en la Cuenca del Valle -- de México, Publicación No. 289 del - Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 3.- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, 1980.- Atlas de Carreteras por Estados, -- Esc. 1:400 000.
- 4.- SECRETARIA DE PROGRAMACION Y PRESUPUESTO, 1970.- Carta de Climas México 14Q-V, Esc. - 1:500 000, Dirección de Estudios del Territorio Nacional.
- 5.- SECRETARIA DE PROGRAMACION Y PRESUPUESTO, 1984.- X Censo General de Población y Vi- - vienda, 1980. Estado de México, Vol. I, Tomo 15, 1984. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informá- tica.
- 6.- SECRETARIA DE PROGRAMACION Y PRESUPUESTO, 1979.- La Población de México, su Ocupa- -- ción y sus Niveles de Bienestar. Se- rie Manuales de Información Básica - de la Nación. Coordinación General - del Sistema Nacional de Información.

7.- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAU
LICOS , 1963.-

Hidrología de la Cuenca del Valle de
México, Tomo I. Comisión Hidrológica
de la Cuenca del Valle de México.

CAPITULO 3.- GEOLOGIA REGIONAL

3.1.- FISIOGRAFIA (11).

La zona estudiada pertenece a la provincia fisiográfica denominada "Eje Neovolcánico" (11).

Esta provincia es una de las más espectaculares, debido a su prominencia topográfica que se encuentra a lo largo de unos 950 Km desde la región del Volcán de Ceboruco, Nay. al poniente, hasta el volcán del Citlaltepeli al oriente. Su anchura varía de 50 a 150 Km; pero la que se considera y aparece en la Carta Geológica de México (1976) está limitada aproximadamente entre los paralelos 19° a 21° latitud Norte. Ha recibido numerosos nombres desde "Zona Eruptiva" por Ordoñez (1895) (16); la Sierra de los Volcanes por Garfias y Chapin, 1949 (9); Neovolcanic Plateau por E. Raisz, 1969; Faja Volcánica Transmexicana (Mocser y M. Maldonado K., 1967) (14). Eje Neovolcánico (López Ramos y otros, 1972-1974), y finalmente Eje Neovolcánico Transmexicano (1976) por A. Demant y otros (5)

El Eje Neovolcánico es una cadena montañosa compuesta totalmente de lavas y materiales piroclásticos y aluvión de origen lacustre, del Terciario y Cuaternario, que no han sufrido perturbaciones desde que se depositaron con excepción de la porción Oeste (Fosas de Tepic, Colima Chapala y parte de Michoacán).

3.1.1.- Posición Geográfica.

El Eje Neovolcánico colinda al Norte con la Mesa Central, la Llanura Costera del Pácifico, la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y la Llanura Costera del Golfo Norte. Sus contactos occidental, meridional y oriental son la franja en que los materiales volcánicos encuentran a los sedimentos de las provincias adyacentes: la Sierra Madre del Sur, y la Llanura Costera del Golfo Sur. (Fig. 3.1). Esta línea rodea el volcán de Colima y avanza hacia el Este en un curso sinuoso corriendo las cabeceras de los tributarios septentrionales del Río Balsas y



I PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA.
 II DESIERTO SONORENSE.
 III SIERRA MADRE OCCIDENTAL.
 IV SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE.
 V SIERRA MADRE ORIENTAL.
 VI GRAN LLANURA NORTEAMERICANA.
 VII LLANURA COSTERA DEL PACIFICO.
 VIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE.

IX MESA DEL CENTRO.

XII SIERRA MADRE DEL SUR.

XV CORDILLERA CENTROAMERICANA.

X EJE NEOVOLCANICO.

XIII LLANURA COSTERA DEL
 GOLFO SUR.

XI PENINSULA DE YUCATAN.

XIV SIERRAS DE CHIAPAS.

FIGURA 3.1.- MARCO FISIOGRAFICO DE LA REPUBLICA MEXICANA.

la parte oriental del Pico de Orizaba.

3.1.2.- Accidentes Tectónicos.

Como resultado de un estudio integrado por información preexistente se marcaron varios accidentes tectónicos geológicos que de Oeste a Este son los siguientes:

A) Graben Chapala - Tepic.

Este graben constituye la terminación occidental del Eje Neovolcánico (Fig. 3.2). Las manifestaciones volcánicas recientes se alinean con una orientación NW - SE, en una franja que se extiende desde Tepic, hasta Guadalajara. A la altura del Lago de Chapala cambian las direcciones tectónicas, llegando a ser Este-Oeste. Los límites del graben están constituidos por la secuencia volcánica Oligo-Miocénica, presente al nivel del Río Grande de Santiago, así como en ambos lados del Lago de Chapala.

B) Graben de Colima.

Esta zona se comunica al Norte con la depresión de Chapala, a la altura de la Laguna de San Marcos (Fig. 3.2). Con respecto a la disposición general del Eje Neovolcánico Transmexicano, el Graben de Colima se diferencia por su orientación Norte-Sur. Aquí la actividad volcánica fué mayor al nivel del conjunto Nevado de Colima-Volcán de Fuego; sin embargo de un lado y otro del graben se desarrollaron numerosos aparatos volcánicos más pequeños que cubrieron los terrenos volcánicos oligomiocénicos (Fig. 3.2).

C) Graben o Fosa de Chapala.

Este accidente probablemente es el más ampliamente desarrollado ya que cuando menos tiene unos 80 Km de longitud por 20 de ancho. Su orientación es E-W y en la porción baja del mismo se encuentra el Lago de Chapala entre Jalisco y Michoacán (Fig. 3.2).

D) Vulcanismo en el Estado de Michoacán.

En este sector del país, fué donde se concentró en mayor cantidad la actividad volcánica Plio-cuaternaria. Está muy bien delimitada por la cuenca del Río Balsas al Sur, al Norte por la depresión del Bajío, las -

fracturas Querétaro-San Miguel de Allende, Gto, el anticlinal de Tzitzio-Huetamo, Mich., al Este y por último la zona Oligo-miocénica y cretácica del sur del Lago de Chapala al Oeste (Fig. 3.2).

E) Los Valles de México, Toluca y Puebla.

En esta región, el vulcanismo se localiza principalmente al nivel - de grandes estrato-volcanes, que se levantan en medio de grandes llanuras lacustres Pliocénicas que forman los valles de México, Toluca y Puebla (Fig. 3.2).

La zona estudiada, objeto de este trabajo se encuentra localizada - en el Valle de México.

La actividad volcánica de esta región se concentró a lo largo de -- grandes fracturas con dirección NE-SW y NW-SE, lo que explica el aspecto bien definido de cadena volcánica. Se puede diferenciar:

- Un alineamiento, Nevado de Toluca-Tenango de Arista, Méx.
 - Hacia el Este de esta zona se localiza la Sierra de las Cruces (Fig. 3.2) que separa la cuenca de México de la de Toluca.
 - Entre el Valle de México y el de Puebla se interponen la Sierra Nevada, formada de Norte a Sur por el Cerro Tláloc, el Itzacihuatl y el Popocatepetl.
- El Valle de México también se denomina Cuenca de México.

3.2.- OROGRAFIA (23)

Por ser una cuenca originalmente cerrada, el Valle de México está - rodeado por montes y serranías que confinan el drenaje hacia el centro - del mismo. Estas serranías, aunque más o menos entrelazadas con cierta - continuidad, presentan entre sí diferencias que permiten hacer algunas - divisiones de éstas como se menciona a continuación:

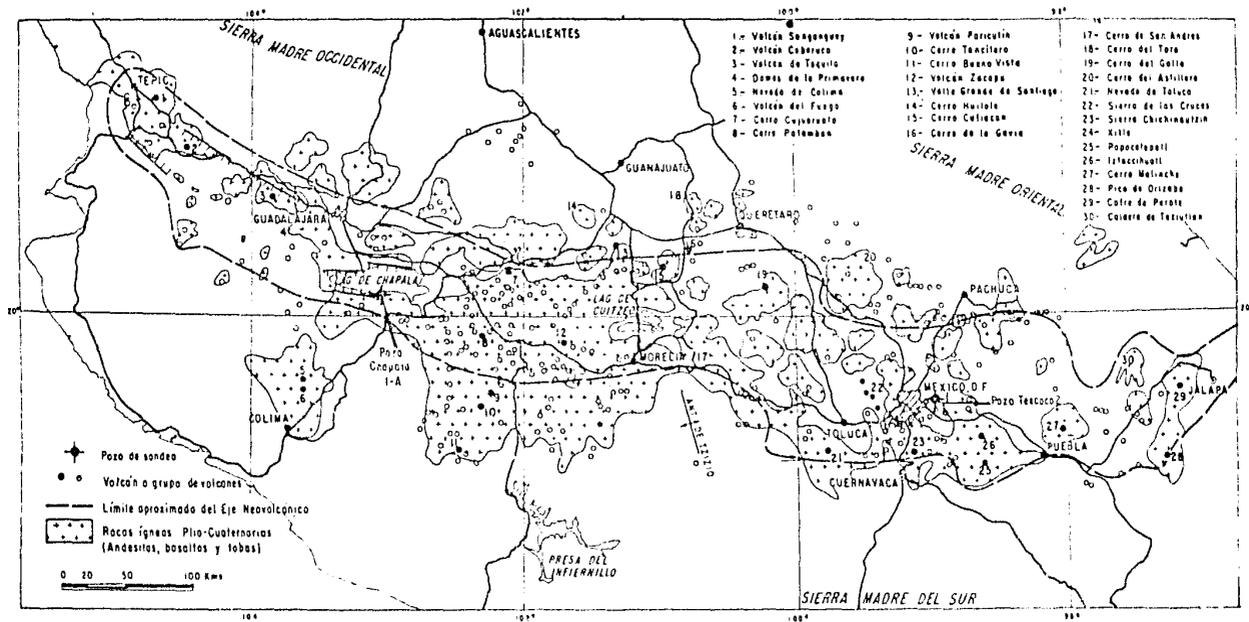


FIGURA 3.2.- Provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico.

a) Al sur, la sierra de Chichinautzin con dirección E-W, de características muy permeables, alturas considerables y vegetación abundante en las partes altas. A continuación se dan algunas alturas de esta sierra:

	msnm.		msnm.
Teutli	2 730	Chichinautzin	3 490
Olicán	3 070	Mezontepec	3 490
Xitle	3 150	Cuautzín	3 500
Tuxtepec	3 150	Cilcuayo	3 583
Tepeyahualco	3 200	Pelado	3 625
Oyameyo	3 365	Tlálloc	3 710
Malacatépetl	3 452		

b) Al suroeste, las sierras de Las Cruces y Monte Alto, con dirección SE-NW, cubiertas de abundante vegetación y con picos importantes. Se citan los siguientes:

	msnm.		msnm.
Ajusco	3 937	Sacamulpa	3 455
Muñeco	3 840	Malinche	3 449
Taravilla	3 815	Las Palmas	3 325
La Palma	3 789	Campiña	3 300
San Miguel	3 775	La Marquesa	3 288
Sehuiloya	3 740	San Francisco	3 008
Picacho	3 722		

c) Al noroeste y norte, las sierras de Monte Bajo, Tepotzotlán, -- Tezontlalpan y Pachuca, con cerros de poca vegetación en su mayor parte con excepción de Monte Bajo. Entre los picos más altos se encuentran los cerros de: Alcaparrosa, Picachos, Montecillo, Sincoque, y otros con elevaciones del orden de 2 500 msnm. y lomeríos como los de: Sotula, Barral, Grande, Niño, de los Cocos, Tezontle, Espíndola y Tilcuautla con elevaciones hasta de 2 900 m, los que entrelazándose entre sí, constituyen el límite hidrográfico de las corrientes que drenan hacia el sur al

Valle de México y hacia el norte a la cuenca del Pánuco.

d) Al noreste, la serie de pequeñas sierras y lomeríos que cierran la cuenca, al este de Tochac y Tecomulco, las que se continúan en la sierra de Calpulalpan.

e) Al oriente y sureste, las sierras de Río Frío y Nevada con sus grandes volcanes que destacan dentro de los más altos de América. Forman parte de estas serranías de norte a sur los siguientes volcanes:

	msnm
Tláloc	3 687
Telapón	3 996
Papayo	4 100
Iztaccíhuatl	5 286 (el pecho)
Popocatepetl	5 452 (fuera de la cuenca).

Además de las sierras citadas que circundan la cuenca se encuentran en el interior de la planicie otras sierras pequeñas que siguen la dirección E-W, como son las de Guadalupe y Santa Catarina. La primera está situada al norte de la Ciudad de México, y separa las zonas lacustres de Texcoco y Zumpango; la segunda está formada por una serie de colinas de mediana altura que separan las zonas lacustres de Xochimilco y Chalco de la de Texcoco.

También se tienen: la sierra de los Pitos que forma el parteaguas entre el río de las Avenidas de Pachuca y su afluente el río Papalote; la sierra de Chichucuatla, que divide las cuencas del Papalote y Tecomulco; la de Tepozán, que divide las cuencas de Tochac y Tecocomulco y la de Patlachique que divide la cuenca de Apan de la del río Papalotla.

3.3.- HIDROGRAFIA (23)

El gran número de corrientes que desciende de las montañas que rodean la Cuenca de México, no presenta uniformidad en lo que respecta a -

sus características hidrológicas debido a las variedades propias de las zonas en que se encuentran cada uno de los ríos y que definen sus peculiaridades. Todos tienen en común el régimen torrencial, favorecido por las dimensiones reducidas de las cuencas y las pendientes de sus cauces, que en general son escarpados, lo que determina que las avenidas sean bruscas y se produzcan fuertes acarrees de azolve. Forman un patrón de drenaje dendrítico.

Puede indicarse que la mayor parte de las corrientes son de escurrimiento intermitente, ya que solo tienen caudales importantes después de las fuertes precipitaciones y, en los días comprendidos entre éstas, dichos caudales disminuyen notablemente, llegando en muchas ocasiones a reducirse casi a cero. Solamente en aquéllas corrientes cuyas cuencas tienen mayor superficie y sus características geológicas son favorables para la formación de manantiales, se mantienen escurrimientos perennes -- que en muy pocos alcanzan cierta importancia.

De acuerdo con los factores que influyen en las corrientes: precipitación y permeabilidad del suelo; se distinguen, con respecto a la precipitación, regiones de lluvias abundantes ubicadas hacia el poniente, sur y sureste de la cuenca y regiones de lluvias escasas en la parte norte y noreste, existiendo en las zonas intermedias de la cuenca, características de precipitación también intermedia.

Con respecto a la permeabilidad del suelo, en las regiones cubiertas con formaciones basálticas fracturadas, la permeabilidad de las cuencas y de los cauces determina infiltraciones cuantiosas que disminuyen notablemente los caudales, definiendo regiones con características de mediano o bajo escurrimiento.

Tomando en cuenta las peculiaridades de las corrientes en las distintas regiones, se han formado los siguientes grupos hidrográficos,

Grupo del Sur. -- Aunque en las serranías de la región de Xochimilco,

Tláhuac y Chalco, las precipitaciones son de las más abundantes, el grupo de ríos que baja de las sierras Cuautzin y Chichinautzin, tiene como característica sobresaliente la escasez de sus escurrimientos superficiales, debido a las condiciones de gran permeabilidad de sus cuencas, constituidas por formaciones basálticas fracturadas y aglomeráticas, observándose la ausencia casi total de drenaje superficial. En cambio, por las mismas razones, el escurrimiento subterráneo es muy importante y existe gran cantidad de manantiales al pie de las sierras. Comprende desde el arroyo San Luis, afluente del río Ameca, hasta el río San Buenaventura, antiguo alimentador del lago de Xochimilco.

Grupo del Suroeste.- Este grupo se inicia al sur con el río Eslava y termina con el río San Javier, se encuentra situado en la vertiente oriental de las serranías de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, en una de las regiones más lluviosas del Valle y, debido a las características geológicas de sus cuencas, formadas por andesitas y abanicos aluviales, los escurrimientos son de importancia. Debido a que los cauces de estos ríos atraviesan la Ciudad de México, se han desviado a través de una cadena de presas, túneles y canales llamada "Sistema Hidráulico de Desviación Combinada", que bordea la ciudad por el poniente y el norte, para descargar sus aguas al Lago de Texcoco con el fin de proteger a la ciudad de las crecientes.

Todos los ríos en la vertiente poniente del Valle, siguen cursos con marcada dirección hacia el noreste, formando un drenaje bien desarrollado, constituido por numerosas corrientes que alcanzan hasta la planicie, donde antiguamente desaguaban directamente a los lagos de México y Texcoco.

Grupo del Noroeste.- Este grupo es continuación del anterior y al mismo corresponden las corrientes más importantes de la cuenca, por su rendimiento individual, como son los ríos Cuautitlán y Tepotzotlán, que contribuyeron en el pasado a las inundaciones de la Ciudad de México, lo que se debe a una precipitación alta y a las características del suelo de la cuenca donde prevalece la Formación Tarango.

Grupo del Noreste.- Este grupo lo forman el río de las Avenidas de Pachuca y las corrientes que alimentan a las que fueron cuencas cerradas de Apan, Tochac y Tecocomulco. La región es de menor precipitación y sus características geológicas le proporcionan una alta permeabilidad; esto aunado a que la evaporación es más enérgica en esa zona, debido a sus mayores temperaturas y vientos más fuertes, han determinado que las corrientes superficiales no sean caudalosas.

Grupo del Oriente.- Comprende los ríos que desaguan por ese lado directamente al Lago de Texcoco, e incluye desde el río San Juan Teotihuacán por el norte hasta el Coatepec por el sur.

Estas corrientes, de mediano rendimiento, constituyen un conjunto semejante al del poniente, aunque con escurrimientos menores. En la actualidad estos ríos son los que más eficazmente contribuyen a mantener las mermadas aguas en el Lago de Texcoco.

Grupo del Sureste.- Lo constituyen los ríos de la Compañía, San Francisco y Ameca, los cuales reciben en sus cuencas lluvias de gran importancia.

Actualmente, los ríos de la Compañía y San Francisco se unen al llegar a una planicie y ambos han sido encauzados artificialmente para llevar sus aguas al Lago de Texcoco por el llamado Canal de Ayotla. Antes descargaban directamente al lago de Chalco.

El río Ameca, sin incluir al arroyo San Luis, aunque recibe en su cuenca fuertes precipitaciones, tiene poco caudal debido a que es muy permeable una parte de su cuenca y cauce. Este río que descargaba antes al desaparecido lago de Chalco, también ha sido encauzado artificialmente hacia el lago de Tláhuac.

Zonas Lacustres.- La serie de lagos que antes poblaba el Valle de México, no estaban a un mismo nivel, eran más altos en la periferia y más bajos hacia el centro. En consecuencia, el Lago de Texcoco era el recipiente final de los desagües y excedentes de todos ellos, y por lo

mismo, el total de las corrientes existentes, con excepción de las confinadas en las cuencas cerradas de Apan, Tochac y Tecocomulco, eran tributarias de dicho lago.

Las obras artificiales que se han construído a través de los años, han modificado las condiciones originales de estos lagos. Ahora pueden distinguirse tres recipientes aislados, por lo menos superficialmente, con excepción de una comunicación artificial que existe entre Xochimilco y Texcoco, a través del Canal Nacional y Río Churubusco. Los recipientes citados son los lagos de Zumpango, Texcoco y Xochimilco - Tiáhuac - Mixquic y a ellos atributan todas las corrientes de lo que propiamente era el valle original.

Además de las anteriores se tienen en la región noroeste, las cuencas cerradas y lacustres de Apan, Tochac y Tecocomulco; pero a causa de las obras de drenaje construídas hacia el río Papalote, parte de las aguas de estas tres cuencas corren a esta corriente y al río de las Avenidas de Pachuca, descargando al lago de Zumpango.

En las cuencas anteriormente mencionadas, se tienen, además de las Lagunas de Apan, Tochac y Tecocomulco, algunas más pequeñas como son las de las Animas, el Puercu y otras, las cuales han ido reduciendo sus áreas con motivo de los aprovechamientos que se hacen de las corrientes alimentadoras y por las obras de drenaje ya señaladas.

Las aguas que alimentan los tres lagos antes indicadas son:

Al lago de Zumpango:

- Río Cuautitlán
- Río Tepotzotlán
- Excedentes artificiales de las cuencas de Apan, Tochac y Tecocomulco a través del río de las Avenidas de Pachuca.

Al lago de Texcoco:

Por el oriente:

- Río San Juan Teotihuacán
- Río Papalotla
- Río Xalapango
- Río Coxcazoaco
- Río Texcoco
- Río Chapingo
- Río San Bernardino
- Río Santa Mónica
- Río Coatepec
- Río San Francisco
- Río de la Compañía

Por el poniente:

- Río Eslava
- Río Magdalena
- Barranca Anzaldo o San Jerónimo
- Río San Angel o Texcalatlaco
- Barranca de Guadalupe
- Barranca del Muerto
- Río Mixcoac
- Río Becerra
- Río Tacubaya
- Río Tecanachalco
- Río San Joaquín
- Barranca El Tornillo
- Río Hondo
- Río Sordo
- Río Los Cuartos
- Río Totolica
- Río Chico de los Remedios
- Río Tlalnepantla

- Río San Javier
- Río Cuauhtepic

A la zona Jacustre de Xochimilco-Tláhuac-Mixquic:

- Río Amecameca
- Arroyo Zacualtitlac
- Arroyo Tenechcólux
- Arroyo Milpa Alta
- Arroyo San Gregorio
- Río San Lucas
- Río Santiago
- Río San Buenaventura

3.3.1.- Subdivisión de la Cuenca en Zonas Hidrológicas

El área total de la Cuenca del Valle de México es extensa y por ello es posible encontrar, dentro de ésta, condiciones hidrológicas muy diversas. Por lo tanto, y para facilitar el estudio de las diversas corrientes que forman el drenaje, se ha dividido el Valle en once Zonas Hidrológicas, buscando que en cada una hubiera la mayor uniformidad posible de condiciones de acuerdo con la Tabla 3.2.

Tabla 3.2.- ZONAS HIDROLOGICAS DEL VALLE DE MEXICO.

ZONA	NOMBRE	AREA (Km ²)
I	Xochimilco	522
II	Churubusco	234
III	Ciudad de México	725
IV	Cuautitlán	972
V	Pachuca	2 087
VI	Teotihuacán	930
VII	Texcoco	1 146
VIII	Chalco	1 124
IX	Apan	637
X	Tochac	690
XI	Tecocomulco	533
TOTAL		9 600

3.4.- GEOMORFOLOGIA (19)

Hacia el norte, la Cuenca de México se abre formando una llanura -- con una altura de aproximadamente 2 200 m.s.n.m., ocupada en parte por - el actual Lago de Texcoco (Plano 1). Hacia el sur, la topografía está ca racterizada por una gran extensión cubierta por derrames de lava sobre-- puestos, con numerosos aparatos volcánicos juveniles. Aquí se eleva el - Cerro Chichinautzin cuya altura llega a los 3 450 m.

Hacia el oriente, se encuentra el parteaguas de la Cuenca de México que es la Sierra Nevada, y su prolongación hacia el norte, o sea la Sierra de Río Frío. Los picos más elevados de la Sierra Nevada son el Popocatépetl (5 450 m) y la Iztaccíhuatl (5 286 m).

Hacia el poniente se encuentra el parteaguas occidental de la Cuenca de México formado por la Sierra de las Cruces (con alturas superiores a los 3 500 m).

Al sur se encuentran el Cerro del Ajusco (3 490 m) y la Sierra de - Zempoala.

Las principales unidades geomórficas en el Valle de México son:

- 1) Los remanentes de sistemas volcánicos antiguos que afloran en varias localidades aisladas del interior de la Cuenca de México,
- 2) Las altas sierras volcánicas terciarias oriental y occidental,
- 3) Los abanicos aluviales Plio-pleistocénicos que cubren la ba se de las mencionadas sierras, interestratificadas con de-- rramas de lodo y capas de ceniza,
- 4) El complejo volcánico del Plioceno Superior y Cuaternario - de la parte meridional y los aparatos volcánicos juveniles, conos cineríticos y escoriáceos, asociados con éste o espar cidos en el interior de la cuenca, y

- 5) Los depósitos lacustres cuaternarios que cubren grandes extensiones, principalmente la parte septentrional de la cuenca.

3.4.1.- Sistemas Volcánicos Antiguos

En varias partes de la Cuenca de México aparecen remanentes de aparatos volcánicos antiguos como las alturas de Xochitepec y de Los Remedios, respectivamente al SW y NW del Valle de México, los remanentes de antiguos macizos volcánicos en los pies de las sierras volcánicas oriental y occidental y algunos afloramientos aislados en la parte central, como los cerros de Chapultepec, Tlapacoyan, Zacaltepec y el Peñón de los Baños.

La erosión ha destruido generalmente los rasgos morfológicos distintos; pero en algunas localidades pueden reconocerse antiguos cuellos o remanentes de estratovolcanes.

Los macizos antiguos situados al oriente, como los cerros de Texaltepec en la Sierra de Río Frío, y las alturas cerca de Santo Tomás Atzingo en los pies de la Iztaccíhuatl, alcanzan alturas mayores y el relieve hace suponer que forman la subestructura de gran parte de estas sierras. Estos macizos se muestran intensamente recortados; a menudo su drenaje se encuentra desviado por la intervención de derrames lávicos posteriores que establecieron una nueva red hidrográfica.

3.4.2.- Sierras Volcánicas Oriental y Occidental

Sierra Volcánica Oriental.- Comprende principalmente la Sierra de Río Frío y la Sierra Nevada.

La Sierra de Río Frío está separada de la Sierra Nevada por una faja cubierta por derrames lávicos derivados de pequeños aparatos volcánicos recientes y muestra una morfología juvenil con una red hidrográfica poco desarrollada y condicionada por la dirección del escurrimiento de las lavas.

La parte principal de la Sierra de Río Frío está constituida por --

tres unidades que representan, cada una de ellas, diferentes épocas de vulcanismo, seguidos por períodos más o menos largos de erosión.

La más antigua constituye los cerros de Texaltepec. La segunda unidad ocupa la parte central del macizo, entre las cimas de los cerros Telapón y Tláloc. Su relieve es abrupto, habiéndose formado un drenaje bien desarrollado y profundas barrancas.

La tercera unidad cubre las partes más altas y forma las cimas de los cerros Telapón y Tláloc; está constituida por derrames sobrepuestos que le dan un aspecto escalonado. El drenaje está pobremente desarrollado.

La Sierra Nevada representa igualmente un macizo que ha alcanzado la altura y el desarrollo actual por la sobreposición de sistemas volcánicos sucesivos. Su unidad inferior está representada por unas alturas que se extienden en los pies de la Iztaccíhuatl, entre San Rafael y Santo Tomás Atzingo, las más antiguas de las cuales parecen ser las que forman los acantilados llamados: Pulpito del Diablo, enfrente de Santo Tomás. El relieve de esta pequeña sierra es moderado y su drenaje discordante con el de las unidades adyacentes.

Las laderas de la parte norte y central de la sierra están constituidas por potentes derrames que forman la unidad superior. El drenaje está bien desarrollado y se han formado profundas barrancas.

Las unidades volcánicas mencionadas desaparecen en su base debajo de pequeños abanicos aluviales asociados con depósitos piroclásticos.

En la parte alta de la Iztaccíhuatl, sobre un gran espesor de lavas dacíticas que forman una serie de escalones, se elevan las tres cimas más notables de esta montaña. De éstas, el "Pecho", así como otros pequeños conos y derrames juveniles, representan la última actividad de este volcán.

El macizo del Popocatepetl está constituido esencialmente por una serie de grandes derrames dacíticos y riódacíticos que forman su armazón. Su base está cubierta por abanicos aluviales que hacia el sur, muestran considerable espesor. En esta unidad el drenaje está bien desarrollado y se han formado profundas barrancas.

Sierra Volcánica Occidental.— Comprende, de norte a sur, las estribaciones de las serranías situadas al poniente del Valle de México (cerros del Organo, Malinche, Juan Angel y Campana); la Sierra de Las Cruces; el macizo aislado del Ajusco, y en el extremo sur, la Sierra de Zempoala.

La morfología de la Sierra de Las Cruces es madura y el drenaje bien desarrollado e integrado. El macizo está cortado por la profunda barranca del Río Magdalena que posiblemente representa la traza del plano de una falla.

En el borde suroriental de la Sierra de Las Cruces se eleva el Cerro del Ajusco formado por un pequeño macizo aislado.

En la Sierra de Zempoala pueden distinguirse dos macizos, litológicamente semejantes; pero de distinta morfología. El meridional, con un relieve más abrupto, se encuentra profundamente cortado por la erosión. Los ríos que drenan su vertiente meridional, y que pertenecen a la cuenca hidrológica Balsas Mexcala, han formado profundos valles. Su base oriental está cubierta por lavas recientes de la Formación Chichinautzin que embalsaron los ríos provenientes de la sierra y originaron una serie de pequeñas lagunas conocidas como Lagunas de Zempoala.

3.4.3.— Abanicos Aluviales Plio-pleistocénicos

En los pies de las sierras que delimitan la Cuenca de México hacia el oriente y hacia el poniente, se extienden depósitos de piamonte constituidos por abanicos aluviales con potentes intercalaciones de material piroclástico.

Estos abanicos bordean el margen de los antiguos lagos; las terrazas aluviales que se observan en los valles indican probablemente niveles lacustres más altos que el actual. Los arroyos procedentes de las sierras han cortado en estos abanicos valles amplios. Sin embargo, en algunos sitios de la parte occidental del Valle de México, los arroyos han formado profundos cañones que indican un rejuvenecimiento reciente de estas áreas.

3.4.4.- Complejo Volcánico del Plioceno Superior y Cuaternario

La morfología de esta unidad se caracteriza por abundantes conos cónicos y escoriáceos en varias etapas de erosión. Son también características en ella algunas grandes estructuras dómicas (Domo de Tetequilo y Domo de El Capulín).

3.4.5.- Depósitos Lacustres

Aproximadamente las dos terceras partes de la Cuenca de México están cubiertas por depósitos lacustres antiguos y recientes.

Debido a las fuertes fluctuaciones de las precipitaciones durante el año, la extensión de la zona inundada es muy variable.

La zona lacustre se encuentra a una altura promedio de 2 200 m.s.n. m.; forma una extensa planicie interrumpida solo por aparatos volcánicos aislados que contribuyeron a la formación de las distintas subcuencas.

3.5.- ESTRATIGRAFIA (19)

Las formaciones cenozoicas de la Cuenca de México junto con su correlación se muestra en la Fig. 3.5; la interrelación de las unidades del Cenozoico Superior aparece en la Fig. 3.6. Los afloramientos de las unidades estratigráficas mencionadas aquí se presentan en el Plano 1.

3.5.1.- Sistema Terciario

Formación Balsas.-- Las rocas más antiguas que se conocen en el subsuelo de la Cuenca de México consisten de sedimentos clásticos continen-

SISTEMA	SERIE	Unidades Geoclimáticas	Unidades Litológicas	Facies Marginal	Facies Lacustre
CUATERNARIO	HOLOCENO	Post - glacial frío.	Noche Buena Totoltzingo	Suelos oscuros, aluviones, ca-- pas eólicas, ma terial piroclás tico.	
		Post - glacial árido	Caliche Barrilaco	Caliche en las _ lomas.	
	PLEISTOCENO	Subestadial Wisconsin 3: Mankato y Cochrane	Formación Becerra	Aluviones, depó sitos eólicos, _ material piro-- clástico, hue-- sos de Homo, -- Elephas y Equus	Arcilla café cla ra, arena de pó-- mez y limos ca-- fés y grises.
		Interestadial Wisconsin 2/ Wisconsin 3.	Caliche Morales	Caliche en las _ lomas.	Arcilla bentoní tica verde olivo agrietada, con - abundante CaCO ₃ .
		Subestadial Wisconsin 2: Tazewell y Cary	Formación Tacubaya	Aluviones compac tos de color ca fé amarillento, _ con material pi roclástico.	Arcillas montmo rilloníticas con intercalaciones _ de ceniza y pó-- mez y frags. de dia tomas y ostrácodos.

FIG. 3.4.- Unidades estratigráficas del Pleistoceno - Holoceno en la Cuenca de México
(según los datos de Bryan, 1948 y Zeevaert, 1953).

tales que se atribuyen a la Formación Balsas (Fries, 1960; 1965) (7) (8) El pozo Texcoco No. 1, que llegó a una profundidad de 2 065 m, o sea una elevación de 135 m.s.n.m., encontró en su base un conglomerado heterogéneo con clásticos calizos con fósiles del Cretácico Superior. La fauna parece corresponder a la Formación Mexcala del Senoniano (Fries, 1960, - p. 72-91) (7). Sobre el conglomerado se encontraron limolitas arenosas - rojas con intercalaciones conglomeráticas, limolitas calcáreas rojas con anhidrita o bien interestratificadas con tobas.

En la parte superior de esta secuencia se tiene una serie de derrames de composición basáltica. En una muestra de estos últimos, se determinó una edad isotópica por el método K/Ar, analizando la roca total, y se obtuvo como resultado promedio 30 millones de años, lo que corresponde al Oligoceno medio (Dr. J. A. Adams, Rice University; comunicación escrita con Carmen J. Schlaepfer del 12-09-67).

El espesor de la secuencia que se atribuye a la Formación Balsas es de unos 700 m como mínimo; no se conoce su base y la toma de núcleos fué discontinua en el pozo antes mencionado; por lo que tampoco pudo definirse su límite superior.

La litología de esta secuencia es semejante, si no análoga, a la -- descrita por Fries (1960, p. 93-98) (7) para la Formación Balsas que --- aflora al sur del Valle de México en las cuencas de los ríos Amacuzac y Balsas, y que descansa discordantemente sobre rocas cretácicas. La forma ción contiene clásticos de las Formaciones Morelos, Cuautla y Mexcala, - así como tobas, limolitas, yeso, caliza de agua dulce y derrames de basalto y andesita. Esta unidad se correlacionó con el Conglomerado El Morro (Simons y Mapes, 1956, p. 13) (26), llamado posteriormente "Grupo" - El Morro por Segerstrom (1956, p. 15; 1961, p. 154) (24) (25) quien comprendió, bajo este nombre, rocas semejantes de los estados de Hidalgo y Querétaro. En la Cuenca de México, el sepultamiento profundo del yeso -- fué causa suficiente para su transformación en anhidrita.

En la Cuenca de México puede considerarse que la Formación Balsas -

es posterior al Senoniano, plegado y erosionado, y que su edad se extiende por lo menos hasta el Oligoceno medio.

Rocas Volcánicas del Terciario Medio.- Las rocas volcánicas más antiguas que afloran en la Cuenca de México, principalmente en los pies de las sierras de Las Cruces, de Río Frío y Nevada, y que están cubiertas por potentes secuencias volcánicas terciarias más recientes y cuaternarias, han sido señaladas bajo esta denominación. Esta unidad comprende también algunos afloramientos aislados, probablemente correlacionables en el interior de la Cuenca.

Schlaepfer (1968) (19) ha optado por restringir el nombre de la formación Xochitepec a las rocas que forman la Sierra de Xochitepec e incluir los demás afloramientos bajo el nombre de "Rocas Volcánicas del Terciario Medio". En efecto, no hay evidencia de que estas rocas provengan de un mismo centro eruptivo, sino al contrario, por su localización parece ser más probable que se hayan originado de centros distintos. Sin embargo, se cree que estas antiguas unidades volcánicas representan un sistema muy complejo con varios centros eruptivos y distintos períodos de vulcanismo activo seguidos por erosión, que abarcan seguramente un tiempo largo. Se tiene así, en este conjunto, unidades sobrepuestas y otras interdigitadas de diversas edades.

En la columna estratigráfica del pozo Texcoco No. 1, se determinaron algunas edades isotópicas por el método de K/Ar. Dos muestras correspondientes a las profundidades de 950 m y 837 m respectivamente, y las que se consideran dentro del conjunto de "Rocas Volcánicas del Terciario Medio", fueron analizadas por el mencionado método y los resultados obtenidos acusan una edad promedio miocénica temprana (22.5 y 25.7 m.a.) para la primera y miocénica tardía o pliocénica temprana (13.4 y 18.1 m.a.) para la segunda. En el intervalo delimitado por las dos muestras antes mencionadas se encuentra una secuencia de lavas de composición traquiandesítica y andesítica, asociadas con brechas volcánicas y tobas, con algunas intercalaciones de conglomerados.

No ha podido determinarse el espesor de la antigua secuencia en el

Valle de México. Sin embargo, partiendo de los datos del subsuelo y de la elevación de los afloramientos en la Sierra Nevada, se cree que alcance un espesor de 2 000 m como máximo en las partes más altas de esta sierra.

Se cree que el período de vulcanismo, durante el cual se acumularon estas rocas, fué de larga duración, ya que se inició después del depósito de la Formación Balsas y de la actividad volcánica asociada con la parte superior de esta última, con fecha del Oligoceno medio como ya se mencionó. En consecuencia, el intenso vulcanismo del Terciario medio en la parte centromeridional de la Cuenca de México se inició probablemente en el Oligoceno tardío.

Formación Tepotztlán.— La Formación Tepotztlán (Fries, 1960, p. 108-113) (7) aflora en el límite meridional del Valle de México; más al norte desaparece bajo los derrames de la Formación Chichinautzin; Fries (op. cit.) describe la Formación Tepotztlán como compuesta por rocas volcánicas epiclásticas andesíticas depositadas en capas de 0.5 m hasta 10 m de espesor por corrientes de agua y, en parte, por corrientes de lodo. Estas rocas, modeladas por la erosión, han originado una topografía accidentada con acantilados abruptos escalonados. Según Fries, el área-fuente de la formación Tepotztlán se localiza al norte de los afloramientos actuales y las rocas que originaron estos clásticos son las antiguas unidades volcánicas que afloran en la Cuenca de México.

Se considera que la Formación Tepotztlán es equivalente, por lo menos en parte, a las unidades comprendidas bajo el nombre de "Rocas Volcánicas del Terciario Medio" y se le atribuye una edad del Oligoceno tardío-Mioceno temprano o medio, algo más reciente que la edad del Mioceno temprano mencionada por Fries (1965) (8).

Formación Zempoala.— Esta formación fué descrita por Fries (1960, p. 117-119) (7) que la nombró como Andesita Zempoala. Se propone aquí un nombre más general, ya que esta unidad comprende rocas de composición andesítica, dacítica y riódacítica. Este autor describió la unidad como --

compuesta por brechas volcánicas, derrames lávicos y capas tobáceas interestratificadas con algunos horizontes de lahares, y le atribuyó un espesor mínimo de 800 m.

La Formación Zempoala descansa sobre la Formación Tepotztlán en la región cartografiada por Fries. A su vez, está cubierta por lavas de la Formación Chichinautzin.

Por descansar la Formación Zempoala en discordancia poco pronunciada sobre la Formación Tepotztlán (Fries, 1960, p.118) (7) y por considerar el intervalo de tiempo entre ambas formaciones no muy grande; Schlaepfer (1968) (19) concluye que la Formación Zempoala representa parte del Mioceno, así como la mayor parte del Plioceno.

Formación Ajusco.- El nombre de "Andesita Ajusco" fué propuesto por Mooser (1962, p. 12) (12) para las lavas superiores del Cerro del Ajusco y de la Sierra de Las Cruces que descansan discordantemente sobre rocas volcánicas más antiguas, probablemente del Plioceno temprano, y están -- cubiertas por los depósitos de la Formación Tarango. El mismo autor menciona que las rocas son andesitas de piroxenas.

Siguiendo el criterio de restringir el nombre de las formaciones a las unidades volcánicas de un mismo centro eruptivo, se ha preferido in- cluir en la Formación Ajusco únicamente la secuencia volcánica de potentes derrames poco inclinados que constituyen el complejo formado por el Cerro del Ajusco y las alturas adyacentes que cubren discordantemente -- rocas dacíticas más antiguas como puede verse unos 3 Km al occidente del poblado de Ajusco. Sin embargo, se estima que esta unidad puede correlacionarse con la Formación Las Cruces por su posición estratigráfica simi- lar.

Formación Las Cruces.- Se designa como Formación Las Cruces al con- junto de rocas volcánicas que forman las sierras de Las Cruces y de Monte Alto en la parte occidental del Valle de México, y que provienen de - centros eruptivos interrelacionados y alineados SSE-NNW. La formación es

tá constituida en su parte inferior por una secuencia potente de brechas volcánicas epiclásticas de composición principalmente andesítica con intercalaciones de derrames lávicos andesíticos.

La parte superior de la Formación Las Cruces consiste en una serie de derrames sobrepuestos de rocas mesocráticas, porfídicas, de composición riodacítica, con inclinación generalmente suave, que varía con la topografía sepultada. Puede indicarse como localidad tipo la parte inferior de la barranca del Río Magdalena al poniente de Contreras, donde se ve la parte inferior de la formación, compuesta por brechas, cubierta discordantemente por los potentes derrames de lava de la parte superior.

La Formación Las Cruces descansa sobre rocas volcánicas antiguas -- que se incluyen en "Rocas Volcánicas del Terciario Medio". Esta formación puede representar el lapso de tiempo comprendido desde el Mioceno medio o tardío hasta el Plioceno tardío y, posiblemente, hasta el Pleistoceno temprano.

Formación Iztaccíhuatl. -- Esta formación corresponde a la unidad llamada Andesita Iztaccíhuatl por Mooser (1962, p. 12) (12). La Formación Iztaccíhuatl comprende, en esta montaña, una serie de derrames lávicos sobrepuestos; estas lavas son principalmente rocas mesocráticas y porfídicas de color gris más o menos oscuro y composición que varía de dacítica a riodacítica; los derrames superiores de la Iztaccíhuatl consisten aparentemente en una andesita rosada de hornblenda, aunque su composición química sea posiblemente más ácida. El espesor y la disposición estructural de los derrames son variables según la topografía que sepultaron.

La Formación Iztaccíhuatl está cubierta por lavas más recientes, como las que forman el llamado "pecho" del Volcán Iztaccíhuatl y el cono actual del volcán Popocatepetl, junto con los derrames que escurrieron de este último hacia el sureste constituyendo la Riodacita Popocatepetl de Fries (1965) (8), bajo cuyo nombre se comprenden aquí todos los productos del vulcanismo tardío en el macizo de la Sierra Nevada.

Se consideró que esta formación que comprende varias unidades volcánicas originadas en distintas épocas, se correlaciona con los grupos Buenavista, Itlixco y "No Diferenciado" de Fries (1960, p. 115-117 y 1965) (7) (8), con la parte superior del Grupo Pachuca de Geys y colegas (1963) (10), y que puede representar el Mioceno tardío y todo el Plioceno.

Formación Tláloc.- Se denomina Formación Tláloc a un conjunto de derrames riódacíticos que forman la parte principal de la Sierra de Río Frío y están constituidos por rocas porfídicas mesocráticas de color gris. Esta unidad que puede observarse al norte y noreste del poblado de Río Frío, comprende varias unidades morfológicas de origen volcánico, derivadas de uno o más centros eruptivos interrelacionados. La Formación Tláloc descansa sobre rocas volcánicas más antiguas que afloran en la margen occidental de la sierra mencionada; su parte superior compuesta por derrames sobrepuestos, proporciona a la sierra un aspecto escalonado

Se considera que la Formación Tláloc es correlacionable en parte con la Formación Iztaccíhuatl, de la cual está separada por derrames lávicos más recientes. Por otra parte, en la base de la Sierra de Río Frío las lavas de la formación Tláloc están interdigitadas con aluviones y tobos de la Formación Tarango. Se supone así que la Sierra de Río Frío se haya formado durante un extenso período de tiempo y que la Formación Tláloc abarca desde el Mioceno tardío hasta el final del Plioceno y posiblemente, hasta principios del Pleistoceno.

Formación Tarango.- La formación Tarango fué definida por Bryan (1948, p. 11-12) (2) quien llamó con este nombre una secuencia de 200 a 300 m de "tobas, aglomerados, grava volcánica de origen fluvial y capas delgadas de pómez depositada en la base de las montañas que limitan la Cuenca de México hacia el occidente".

Esta formación se correlaciona, por su posición estratigráfica, con la Formación Cuernavaca de Fries (1960, p. 119-125) (7), que aflora en la región inmediatamente al sur del Valle de México, e inició su depósi-

to antes del Pleistoceno o sea durante el Plioceno tardío.

Segerstrom encontró en las cuencas de los ríos Amajac y Metztlán, estado de Hidalgo, sedimentos semejantes a los que constituyen la Formación Tarango, con una posición estratigráfica análoga, y las incluyó en la Formación Atotonilco el Grande (Fries, 1960, p. 125) (7); en la parte superior de ésta última, en el valle del Río Amajac, se encontraron fósiles probablemente del Plioceno tardío.

La Formación Tarango se encuentra cubierta por lavas recientes de la Formación Chichinautzin. En consecuencia, se estima que su edad abarca desde el Plioceno tardío hasta parte del Pleistoceno.

En su parte inicial (a partir de 180 m), el pozo Texcoco No.1 atraviesa una potente secuencia de arenas y gravas, con horizontes de ceniza y pómez y derrames basálticos interestratificados. También se encuentra una serie de margas y calizas lacustres a una profundidad de 450 m y posiblemente estos horizontes indiquen el cierre inicial de la Cuenca de México. Por ser una unidad de un mismo origen y depositada en una misma cuenca, se ha atribuido aquí esta secuencia a la Formación Tarango.

En la margen occidental de la Cuenca de México, la parte superior de la Formación Tarango ha sido bien estudiada por Zeevaert (1953, p. 5-7, Fig. 2) (28), quien describió las secciones litológicas de numerosos pozos poco profundos perforados en la Ciudad de México y alrededores. Zeevaert distinguió a los 30 m una parte superior cementada generalmente con carbonato de calcio y llamada por él "Arena I Tarango", que sirve como base para los pilotes de las construcciones importantes de la ciudad y, debajo de capas de arcillas lacustres, los depósitos aluviales de la "Arena II Tarango", que a su vez sobreyacen a una alternancia de aluviones y arcillas lacustres. El autor menciona la presencia de material fluvial muy grueso a una profundidad aproximada de 150 m, de antiguos suelos de la cuenca a 170 m y, debajo de éstos, más aluviones. Las capas de gravas y arenas de la Formación Tarango constituyen los acuíferos principales de la Ciudad de México.

Formación Chichinautzin.- Esta unidad fué definida por Fries (1960, p. 125-131) (7) como "Grupo Chichinautzin" para comprender todas las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados, depositados por agua, de composición andesítica o basáltica, que descansan encima de la Formación Cuernavaca o de unidades más antiguas. Esta unidad fué originalmente atribuída por Fries al Cuaternario; sin embargo, él mismo mencionó posteriormente, que se encuentra interdigitada con las Formaciones Tarango y Atotonilco el Grande, por lo cual estimó que sus primeras erupciones tuvieron lugar en el Plioceno tardío, (Fries 1965) (8).

Se ha acostumbrado llamar indiscriminadamente "Chichinautzin" a todas las unidades volcánicas más recientes de la Cuenca de México; sin embargo, se ha preferido restringir aquí el término Chichinautzin a la unidad volcánica compleja que se originó de los centros eruptivos situados sobre el parteaguas meridional de la Cuenca de México y que representa un período largo de vulcanismo que perduró desde el final del Plioceno hasta los tiempos históricos. La última erupción fué la del volcán Xitle, hace unos 2 400 años (Arellano, 1953, p. 176) (1).

Riodacita Popocatépetl.- Esta unidad fué definida por Fries (1965) (8) quien incluyó bajo este nombre los derrames lávicos emitidos por el centro eruptivo del Popocatépetl.

Se ha preferido restringir aquí el nombre de Riodacita Popocatépetl a los productos volcánicos más recientes que forman el cráter actual de este gran volcán y a los derrames lávicos que cubren principalmente su lado meridional; con ellos se correlacionan las últimas lavas del volcán Iztaccíhuatl, interdigitadas con depósitos glaciales (White, 1962, p.46) (27). La Riodacita Popocatépetl descansa sobre el antiguo "Volcán Nexpayantla" de White (1962, p. 59) (27), cuyas rocas están incluídas en la Formación Iztaccíhuatl.

Se cree que, por lo menos, parte de los derrames lávicos que constituyen la Riodacita Popocatépetl fueron extruídos al final del Plioceno.

3.5.2.- Rocas Volcánicas Pliocénicas y Cuaternarias

Se comprenden bajo este nombre los aparatos volcánicos y rocas asociadas a los eventos Chichinautzin y a la Riodacita Popocatepetl; pero derivadas de centros eruptivos probablemente independientes (Mooser, 1963 p. 244) (13). Están representadas por conos escoriáceos casi inalterados distribuidos en la parte central y septentrional del Valle de México. Se incluyen igualmente en este grupo algunas unidades volcánicas recientes que aparecen en la vertiente occidental de la Sierra Nevada.

La composición de estas lavas es muy variada; mientras que los derrames más recientes de la Sierra Nevada son riodacíticos, en la cuenca se han encontrado dacitas, andesitas y basaltos.

Bryan (1948, p. 14-19) (2) se basó en criterios edafológicos para determinar la edad de algunos volcanes de la Cuenca de México y atribuyó así una edad Pre-Tacubaya al Peñón del Marqués y al Cerro de la Estrella localizados en la parte central y una edad Pre-Becerra a la Sierra de Santa Catarina y al Xico.

Aluviones, Suelos y Capas Lacustres Cuaternarios.- Se incluyen en estas unidades los depósitos más recientes de la Cuenca de México, que cubren con discordancia las formaciones Tarango y Chichinautzin.

Los aluviones de las márgenes de la Cuenca de México fueron descritos por Bryan (1948, p. 11-14, Fig. 1) (2) quien estableció su secuencia estratigráfica y su interrelación con los períodos glaciales, basándose en trabajos propios, de Arellano (1946) y de De Terra (1948) (4). Los resultados de este autor se resumen brevemente en la Fig. 3.6.

La secuencia de Bryan corresponde, en parte, a ciclos de erosión y depósito y, en parte, a procesos climáticos que afectaron la formación de los suelos.

Se comprende bajo el nombre de "Capas Lacustres Cuaternarias" los sedimentos lacustres que ocupan el fondo de la Cuenca de México y que se

depositaron después de los movimientos que afectaron las márgenes de esta última, posteriormente al depósito de la Formación Tarango (Bryan, -- 1948, p. 12) (2). Se comprenden en esta unidad las facies lacustres de las formaciones pleistocénicas Tacubaya y Becerra y de las demás unidades de Bryan, tal como fueron definidas por Zeevaert (1953, p. 7) (28). Los resultados de este autor se resumen igualmente en la Fig. 3.6.

Zeevaert (op. cit.) menciona en particular la compresibilidad muy alta de las arcillas lacustres Tacubaya, tal que un pequeño incremento de carga produce asentamientos notables.

La extensión de los depósitos lacustres en la Cuenca es muy grande. De Terra (1946, p. 78) encontró la evidencia de antiguos niveles lacustres superiores al actual, indicando que posiblemente al final del Pleistoceno, el lago tenía una superficie mucho mayor que la actual.

3.6.- GEOLOGIA ESTRUCTURAL (21)

Las rocas extrusivas forman parte del Eje Neovolcánico y están dispuestas como derrames, algunos acordonados y otros en bloques; como estratovolcanes y como conos cineríticos; en algunos sitios (área de Acambay) las rocas aparecen dislocadas por fallas normales de orientación este-oeste (Plano 1). Así mismo, son notables las alineaciones norte-sur y este-oeste de los aparatos volcánicos; el primero relacionado con los estratovolcanes (Demant, 1978) (6) y el segundo con el vulcanismo cuaternario de la Sierra de Chichinautzin (Mooser, 1975) (15).

Con base en la disposición y en las características de las unidades expuestas, se pueden identificar dos fases tectónicas de deformación. La primera, de carácter compresivo, estuvo relacionada con el plegamiento y metamorfismo de las rocas cretácicas que afloran al sureste de la Cuenca del Valle de México. La segunda fase fué distensiva, modeló la región -- conforme a pilares y cuencas, de forma tal, que propició la acumulación de conglomerados continentales y el depósito de evaporitas (unidades no aflorantes, mencionadas por Oviedo, 1970, a partir de las muestras obtenidas en el pozo Texcoco No. 1) (17). En este marco tectónico, se acumularon las rocas volcánicas de la provincia calcoalcalina del Eje Neovolcánico.

3.7.- TECTONICA (23)

El Valle de México se encuentra en un sitio donde la corteza terrestre ha sufrido desde el inicio del Terciario, es decir, desde el fin de la orogenia Laramide, el efecto de esfuerzos tectónicos extraordinarios que rompieron y fracturaron sus formaciones a fondo. Dichos esfuerzos -- han sido principalmente de carácter tensional.

El estudio de los sistemas de fracturas y fallas de la Cuenca del Valle de México, revela que las manifestaciones volcánicas, desde el Terciario inferior hasta el Terciario medio, obedecieron a impulsos del levantamiento del continente. A partir de entonces, los movimientos ejecu-

tados por dos grandes líneas de debilidad cortical dominaron la tectónica (Fig. 3.7).

Primero se formó la línea de fracturamiento Chapala-Acambay, que -- atraviesa la cuenca de oeste a este en su parte central y norte y es, -- muy probablemente, un ramal de la falla de San Andrés. Puede considerarse que actualmente ocupa una anchura aproximada de 65 Km. Esta zona de -- fracturamiento se produjo probablemente en el Terciario medio y ha continuado sus movimientos hasta la actualidad.

Después se formó la línea de fracturamiento Clarión, que rige el -- vulcanismo en el sur de la cuenca. Esta línea se extiende, desde las islas Revillagigedo en el Océano Pacífico hasta el Pico de Orizaba. Su actividad data probablemente del Terciario superior. Atraviesa a México -- aproximadamente sobre el paralelo 19° y representa una franja angosta de hundimientos escalonados.

Ambas fajas tectónicas representan líneas de extrema debilidad en -- la corteza terrestre y es precisamente en un sitio en el que las dos seu acercan hasta estar separadas por solo unos 50 Km, donde se sitúa la -- Cuenca del Valle de México.

La tectónica de la Cuenca del Valle de México está muy relacionada -- con los eventos de vulcanismo como se muestra en la Fig. 3.8.

3.3.- GEOLOGIA HISTORICA (19)

Hacia el final del Cretácico Tardío, la región tanto al norte como -- al sur del Valle de México emergió el mar y fué afectada, como todo el -- borde oriental del continente, por la Orogenia Hidalgoana (De Cserna, -- 1960, p. 602) (3), durante principios y mediados del Eoceno. El levantamiento posterior de toda la franja plegada originó esfuerzos tensionales y, consecuentemente, fracturamiento en bloques (Fries, 1960, p. 161-162) (7).

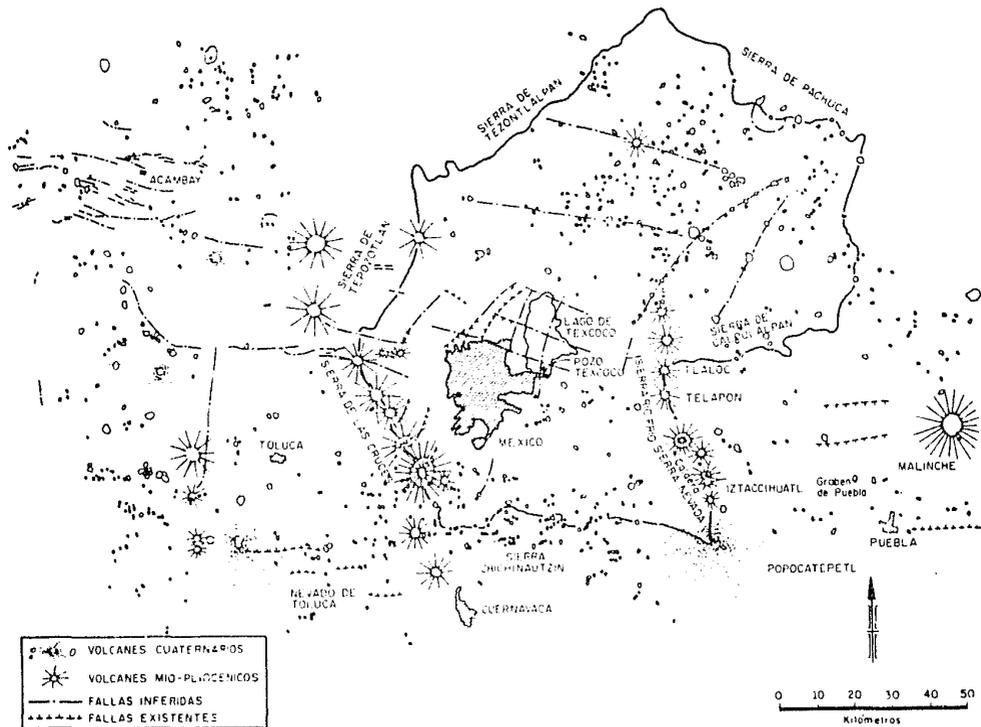


FIGURA 3.5.- Tectónica de la Cuenca de México y zonas vecinas (según Mooser, 1968)

				TECTONISMO	EDADES	
RELLENO MODERNO	Sd. NEVADA	GRUPO CHICHINAUTZIN.	VULCANITAS DEL NORTE DE LA CUENCA	FRAGMENTACIONES AL NE	FRAGMENTACIONES AL E Y ENE	CUATERNARIO
GRUPO DE LAS SIERRAS MAYORES						TERCIARIO SUPERIOR
GRUPO SIERRAS MENORES						TERCIARIO MEDIO
GRUPO DEL TERCIARIO MEDIO						TERCIARIO INFERIOR
GRUPO BALSAS						

FIGURA 3. 6.- SECUENCIA DE GRUPOS VOLCANICOS Y EVENTOS TECTONICOS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO.

En estas fosas tectónicas y en las cuencas producidas por la disolución de las calizas (Fries, 1960, p. 163) (7), se depositaron los primeros sedimentos continentales del Terciario, representados por la Formación Balsas y constituidos predominantemente, en su base, por clásticos gruesos derivados de la erosión de las sierras cretácicas y de los productos de un vulcanismo contemporáneo, de intermedio a básico. Se desconoce el área fuente de este material volcánico; pero se supone que las extrusiones se produjeron a lo largo de las mismas fracturas que dieron lugar a la formación de las fosas.

Con la disminución de la intensidad de la erosión, predominaron en las cuencas los aluviones finos y los sedimentos lacustres que se encuentran asociados con depósitos de yeso. En la parte superior de esta secuencia continental aumentó la abundancia de los productos volcánicos -- hasta que éstos predominaron en el Oligoceno medio.

Una intensa actividad volcánica andesítica prevaleció en el centro de la Cuenca de México durante el Oligoceno medio. Más al norte, en las cercanías de Pachuca, el vulcanismo fué del tipo ácido (Geyne et. al., 1963, p. 33) (10) y lo mismo acaeció al sur de Cuernavaca (Fries, 1960, p. 106) (7). En la Cuenca de México, este período de vulcanismo dió lugar a la formación de aparatos volcánicos constructivos como: estratovolcanes, domos y a veces se desarrollaron calderas. De estos centros vino una gran producción de lavas, principalmente riódacíticas, en toda la Cuenca de México. Los abundantes clásticos derivados de su erosión fueron los principales constituyentes de la Formación Tepotztlán (Fries, 1960, p. 111) (7). Esos materiales quedaron acumulados en parte en las laderas de las sierras.

En el centro de la Cuenca de México esta fase de vulcanismo perduró durante todo el Mioceno y parece haberse acabado al inicio del Plioceno. Sin embargo, continuó en los bordes de la misma, lo que hace suponer que los centros eruptivos eran independientes.

Sobre la subestructura constituida por las rocas volcánicas del Ter

ciario medio se formaron, por asociación sucesiva de unidades extrusivas los complejos de las grandes sierras que delimitan la Cuenca de México.- Este proceso se efectuó durante gran parte del Plioceno y continuó durante todo el Cuaternario. En su curso se distingue, por lo menos, un período importante de erosión, en el cual fueron recortadas profundamente las antiguas sierras dando origen a grandes cantidades de detritos que se -- acumularon en sus bases; el material más fino fué arrastrado hacia el -- fondo de la Cuenca.

Hacia el final del Plioceno empezó la actividad de la zona volcánica meridional cuyos productos se acumularon embalsando el Valle hacia el sur. Se cerró así la Cuenca de México en la cual se acumularon rápidamente potentes aluviones y sedimentos lacustres, interestratificados con horizontes piroclásticos que atestiguan la continua actividad explosiva de los centros volcánicos durante su depósito. Se cree que el gran espesor de estos sedimentos no se hubiera logrado al cerrarse la cuenca únicamente en el Cuaternario, sino que su embalse se inició desde el Plioceno. Sin embargo, el vulcanismo de la zona meridional continuó hasta épocas muy recientes, paralelamente con el vulcanismo de las partes altas de -- las sierras, aunque de un tipo más básico y aparentemente independiente.

White (1956, 1962) (27) estudió las secuencias glaciales del Pleistoceno en la Iztaccíhuatl y distinguió por lo menos cuatro avances glaciales que dejaron como testigo sus morrenas terminales. Estas corresponden con cuatro subetapas de la última glaciación (Wisconsin); la primera fué la más importante y bajó hasta 2 750 m; las otras fueron sucesivamente -- menos extensas (White, 1962, p. 35-53) (27). Durante toda la época glacial y después de ésta, continuó la actividad volcánica en la Sierra Nevada y parece haber alcanzado su apogeo en la Iztaccíhuatl antes de la -- última subetapa glacial, extinguiéndose probablemente al final del Pleistoceno.

Basándose en el estudio de los suelos fósiles, Bryan (1948, p. 11--12) (2), describió en el siguiente orden los últimos eventos geológicos de la Cuenca de México, posteriores al depósito de la Formación Tarango:

- 1) Depósito de sedimentos eólicos, polvo y arena volcánica que dieron origen a la Formación Tacubaya,
- 2) Levantamiento de las zonas marginales y erosión de los depósitos preexistentes,
- 3) Depósito de los aluviones de la Formación Becerra.

Esta última formación contiene abundantes huesos de elefantes, caballos y camellos, Arellano (1953, p. 11-12) (1) considera que su cima, -- donde aparece por última vez esta antigua fauna, coincide con el final -- del Pleistoceno.

El vulcanismo del interior de la Cuenca de México fué contemporáneo al depósito de estos sedimentos; en parte como continuación de la actividad iniciada a fines del Plioceno en la faja volcánica meridional, en -- parte derivado de centros eruptivos aislados. Como se mencionó, su última erupción fué la del volcán Xitle, fechada en 500 años A.C. (Arellano, 1953, p. 176) (1).

3.9.- GEOHIDROLOGIA (20)

La Cuenca del Valle de México abarca el Distrito Federal en su totalidad y parte de los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla con -- los siguientes porcentajes del área total de la cuenca:

Estado de México	50%
Hidalgo	26.46%
Distrito Federal	13.75%
Tlaxcala	8.75%
Puebla	1.04%

La explotación de aguas subterráneas en el área se efectúa sobre ma teriales aluviales, lacustres y basaltos de edad cuaternaria y en sedim entos y materiales volcánicos terciarios. La producción de acuíferos es muy favorable, sin embargo, la explotación intensiva ha ocasionado la -- compactación de arcillas, lo que ha provocado el hundimiento de la Ciu-- dad de México.

A través de los estudios realizados, es posible conocer el funcionamiento de los acuíferos existentes en el Valle de México; en la zona de Apan, Hgo. el flujo dominante es de sureste a noroeste; en la de Tizayuca-Pachuca es de noroeste a suroeste; en la de Cuautitlán, Méx. se inicia de oeste a este y se ramifica hacia el norte, este y sureste; en la planicie de Texcoco-Ciudad de México el flujo se dirige a dichas ciudades; en la planicie de Xochimilco el flujo se dirige hacia la Ciudad de México y en la planicie de Chalco se forma un cono de abatimiento local.

La extracción total del agua proveniente de pozos en el valle, es aproximadamente de 50 m^3 por segundo y se estima que la recarga total de los acuíferos es de 20 a 25 m^3 por segundo.

REFERENCIAS DEL CAPITULO 3.

- 1.- ARELLANO, A. R. V., 1953.- Estratigrafía de la Cuenca de México Mem. Cong. Cient. Mexicano, Vol. 3, p. 172-186.
- 2.- BRYAN, KIRK, 1948.- Los Suelos Complejos y Fósiles de la Altiplanicie de México en Relación a los Cambios Climáticos: Bol. Soc. Geol. Mexicana, Vol. 13, p. 1-20.
- 3.- CSERNA, ZOLTAN DE, 1960.- Orogenesis in Time and Space in Mexico: Geol. Rundschau, Vol. 50, p. 595-605.
- 4.- DE TERRA, HELLMUTH, 1948.- Historia del Valle de México en las Postimerías del Cuaternario en Relación con el Hombre Prehistórico: Bol. Soc. Geol. Mexicana, Vol. 13, p. 77-79.
- 5.- DEMANT A., MOUVOIS R., SILVA L., 1976.- El Eje Volcánico Transmexicano: III Cong. Latinoamericano de Geología, - Exc. No. 4.
- 6.- DEMANT A., 1978.- Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. Rev. Inst. Geol. UNAM, Vol. 2, No. 2.
- 7.- FRIES, CARL JR., 1960.- Geología del Estado de Morelos y de Partes Adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de Mé-

- xico: UNAM, Instituto de Geología, -
Bol. 60.
- 8.- FRIES, CARL JR., 1965.- Resumen de la Geología de la Hoja --
Cuernavaca, Estado de Morelos, UNAM,
Inst. Geología, Carta Geológica de -
México, Serie Esc. 1: 100 000.
- 9.- GARFIAS, V. Y CHAPIN, T.,--
1949.- Geología de México, Ed. Jus.
- 10.- GEYNE, A. R., FRIES, CARL-
JR., SEGERSTROM KENNETH, -
BLACK, R. F. Y WILSON, I. _
F., 1963.- Geología y Yacimientos Minerales del
Distrito de Pachuca-Real del Monte, _
Hgo.: Cons. Rec. Nat. no Renovables,
Publ. 5-E.
- 11.- LOPEZ RAMOS, E., 1979.- Geología de México, 2^{da} Ed., Tomo III
- 12.- MOOSER, FEDERICO, 1962.- Bosquejo Geológico del Extremo Sur -
de la Cuenca de México: 20 Cong. --
Geol. Internal., México, Libreto ---
guía, Exc. C-9, p. 9-16.
- 13.- MOOSER, FEDERICO, 1963.- Historia Tectónica de la Cuenca de -
México: Bol. Asoc. Mexicana Geol. --
Petrol., Vol. 15, p. 239-246.
- 14.- MOOSER, F. Y MALDONADO, M.,
1967.- Mexican National Report on Vulcanolo-
gy, XIVth General Assembly of Inter-
national Union of Geodesy and Geophy-
sics. Sobretiro del Inst. de Geofisi

- ca, UNAM (Anales), Vol. 12, p. 99---
106.
- 15.- MOOSER, F., 1975.- Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, Tomo I: DDF.
- 16.- ORDOÑEZ, EZEQUIEL, 1895.- Las Rocas Eruptivas del Suroeste de la Cuenca de México: Inst. Geol. de México, Bol. 2.
- 17.- OVIEDO DE LEON, A., 1970.- El Conglomerado Texcoco y el Posible Origen de la Cuenca de México. Rev. Inst. Mex. del Petróleo.
- 18.- RAISZ, ERWIN, 1959.- Landforms of Mexico: Cambridge Mass. mapa con texto, escala aprox. 1: 3 000 000.
- 19.- SCHLAEFFER, CARMEN J., 1968.- Resumen de la Geología de la Hoja -- México, Distrito Federal y Edos. de México y Morelos. Hoja México 14Q-h (5). Carta Geológica de México. Serie 1: 100 000, Inst. de Geol. UNAM.
- 20.- SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS, 1978.- Atlas Geohidrológico: Banco Nacional de Información Geohidrológica. Subdirección General de Geohidrología y de Zonas Aridas.
- 21.- SECRETARIA DE PROGRAMACION Y PRESUPUESTO.- Carta Geológica E-14-2 Cd. de México Esc. 1: 250 000. Dirección General de Geografía.

- 22.- SECRETARIA DE PROGRAMACION Y
PRESUPUESTO, 1982.-
Geología de la República Mexicana: -
Coordinación Gral. de los Servicios
Nacionales de Estadística, Geografía
e Informática.
- 23.- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAU
LICOS, 1963-1964.-
Hidrología de la Cuenca del Valle de
México: Comisión Hidrológica de la -
Cuenca del Valle de México, Tomo I.
- 24.- SEGERSTROM, KENNETH, 1956.-
Estratigrafía y Tectónica del Ceno--
zoico entre México, D.F. y Zimapan,-
Hgo.: 20 Cong. Geol. Internat., Méxi
co, Libreto-guía, Exc. A-3 y C-1 p.
11-22; Libreto-guía Exc. A-14 y C-6,
p. 311-323.
- 25.- SEGERSTROM, KENNETH, 1961.-
Geología del Sureste de Hidalgo y --
Noreste del Estado de México: Bol. -
Asoc. Mexicana de Geol. Petrol., Vol
13, p. 147-168.
- 26.- SIMONS, F.S. Y MAPES-VAS-
QUEZ, EDUARDO, 1956.-
Geology and Ore Deposits of the Zima
pan Mining District, State of Hidal-
go, México: U.S. Geological Survey,
Prof. Paper 284.
- 27.- WHITE, S.E., 1962.-
El Iztaccíhuatl: Inst. Nal. de Antro
pol. e Hist. (México), Investigacio
nes 6.
- 28.- ZEEVAERT, LEONARDO, 1953.-
Outline on the Stratigraphical and -
Mechanical Characteristics of the --

Unconsolidated Sedimentary Deposits_
in the Basin of the Valley of Mexico
4° Cong. INQUA, Roma-Pisa, Actas, --
Vol. 2, p. 3-12.

CAPITULO 4.- GEOLOGIA LOCAL.

4.1.- ESTRATIGRAFIA

En la zona donde se encuentra el proyecto del túnel afloran las rocas volcánicas del Terciario Medio (Mv), rocas volcánicas pliocénicas -- (Pv), que sobreyacen discordantemente a las rocas volcánicas del Terciario Medio. Sobreyaciendo a estas rocas se encuentran afloramientos de la Formación Tarango (PQt) en discordancia erosional y que corresponden al Plioceno Superior. La secuencia anterior se encuentra cubierta discordantemente por aluvión con interestratificación de cenizas volcánicas (Qal) y depósitos lacustres (Qcl); el aluvión y los depósitos lacustres corresponden al Pleistoceno y Holoceno.

El túnel "Barrientos" será excavado en una toba andesítica que pertenece a las rocas volcánicas pliocénicas (Pv) que forman la Sierra de -- Guadalupe.

4.2.- LITOLOGIA

En la zona donde se construirá el túnel, afloran diferentes unidades, entre las cuales se encuentran:

Andesitas y Basaltos (A),(B)..- Esta unidad representa las diferentes andesitas y basaltos del Terciario Superior que afloran en el área, las hay de lamprobolita y de piroxenas. La unidad incluye algunos vitrificados andesíticos y, en los estratovolcanes, brechas andesíticas. Las andesitas son por lo general de textura microcristalina porfídica con fenocristales de plagioclasas y ferromagnesianos. Las plagioclasas se encuentran zonadas.

La unidad generalmente es persistente y, en superficie fresca tiene color gris con tonos claros, oscuros y rosas; en superficie intemperizada, presenta tonos de ocre. Las andesitas se presentan generalmente como

como coladas en bloques, algunas son vesiculares y en ocasiones se encuentran fracturadas formando bloques y lajas.

Esta unidad está distribuida ampliamente en el área (Ver Plano 2), - cubierta discordantemente por las unidades piroclásticas, aluviales y lacustres.

Brecha volcánica intermedia, (Bv).- Las brechas volcánicas representadas por esta unidad son andesíticas y están constituidas por piroclásticos que varían desde lapilli hasta bloques inmersos en una matriz tobácea. Frecuentemente, las brechas están medianamente consolidadas. Entre los piroclastos los hay densos y escoriáceos, estos últimos son los que conforman los conos cineríticos. Los piroclastos presentan por lo general textura microcristalina y en algunas ocasiones, la unidad se presenta caolinizada parcialmente.

La unidad tiene una expresión morfológica de lomeríos poco disectados, aflora en la parte oeste - centro del área (Ver Plano 2) y se encuentra cubierta por la unidad vulcanosedimentaria del Terciario Superior.

Vulcanoclástico, (T), (Ta).- Esta unidad representa a un depósito continental muy heterogéneo que comprende, principalmente rocas híbridas; además de tobas intermedias, algunas brechoideas, lentes arenosas y conglomeráticos, horizontes de pómez y brechas sedimentarias. La unidad es de color crema, intemperiza en tonos de ocre y está dispuesta en pseudoestratos que varían en espesor desde delgados hasta masivos. Los clásticos de la unidad tienen un rango granulométrico amplio y, por lo general son de composición intermedia y textura microcristalina y se presentan medianamente consolidados en una matriz arenosa.

El túnel proyectado será excavado totalmente en una toba andesítica, litificada de color gris claro y rosa con textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, poco intemperizada y muy fracturada formando bloques o lajas. Los clásticos son de composición intermedia con granulometría variable entre los tamaños de arena y grava.

La toba se encuentra cubierta por un suelo residual, que de acuerdo con la clasificación SUCS corresponde a un limo de baja compresibilidad (ML).

4.3.- GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Localmente la zona se encuentra afectada por fallas normales de longitud variable con rumbo general NE-SW, evidenciadas principalmente por sus expresiones morfológicas (Ver Plano 2). Estas fallas normales corresponden por su dirección con el sistema de fallas transcurrentes que afectan a toda la Cuenca del Valle de México.

CAPITULO 5.- GEOTECNIA

5.1.- ESTUDIO GEOELECTRICO DE RESISTIVIDAD.

Con el propósito de programar la exploración con perforaciones, se efectuó un estudio geofísico preliminar por el método geoelectrico. Este estudio fué realizado por la compañía: Investigaciones Técnicas del Subsuelo S.A. (12).

El estudio consistió en la realización de 20 sondeos eléctricos resistivos, repartidos en dos perfiles, con longitud aproximada de 500 m, uno superpuesto al eje de trazo del túnel y el otro sensiblemente paralelo al eje de trazo, a una distancia que varía entre 20 y 40 m a la derecha (noreste) con el objeto de poder recomendar, si era conveniente modificar el proyecto hacia ese lado.

En este estudio, el reconocimiento geofísico por procedimientos eléctricos se realizó por el método Wenner. Este método consiste en la equidistancia entre los electrodos, en este caso, la medida de resistividad entre N y M, que son los electrodos de medida de diferencia de potencial; fué obtenida por:

$$\rho_a = 2 \pi a \frac{V}{I}$$

Donde:

ρ_a .- resistividad aparente

V.- diferencia de potencial medida

I.- intensidad de corriente medida, pasando por el subsuelo.

El aparato de medida empleado es un medidor de cero, que no produce deformaciones del campo eléctrico obtenido por la corriente enviada al subsuelo en el momento de las mediciones, y está constituido por dos circuitos distintos: el primero corresponde al circuito de envío de corriente, y el segundo al circuito de medida de diferencia de potencial que consta a su vez de un doble circuito. El primero, a través del galvanómetro

tro, anula la corriente que originan las corrientes naturales o tensiones naturales existentes en el subsuelo (polarización) y el segundo, a través del milivoltímetro y del galvanómetro mide por oposición la tensión que existe en el terreno entre los electrodos M y N.

El cálculo, base de la interpretación, se llevó a cabo por el método de resistividades e isoresistividades aparentes, así como las resistividades reales.

La separación entre sondeo y sondeo fué aproximadamente de 60 m y la profundidad teórica de investigación fué del orden de 160 m.

El perfil P1 se realizó en el eje de trazo del proyecto, de la estación 17+580 a la 18+040 y consta de 10 sondeos eléctricos con rumbo NE - 23° SW.

El perfil P2 se encuentra casi paralelo al perfil P1 y consta de 10 sondeos eléctricos con rumbo general NE 25° SW.

En las tablas 5.1 y 5.2 se muestran las mediciones en cada uno de los 20 sondeos eléctricos realizados y en el Plano 3 se muestran la ubicación de las mediciones y los resultados a lo largo de los perfiles P1 y P2.

Resultados del Estudio Geoelectrico.- Se distinguieron tres tipos de materiales de acuerdo con su resistividad: El material A tiene resistividades de 5 a 16 ohms-metro, el material B tiene valores de resistividad inferiores a 25 ohms-metro y el material C con resistividad superior a 35 ohms-metro.

En el portal de entrada y corte de acceso se encontró material B en los ocho metros inferiores y material A en los seis metros superiores.

El portal de salida en la estación 18+000, se ubicará casi en su totalidad en un material C. Entre los portales de entrada y salida, ubica-

TABLA 5.1.- MEDICIONES EN LOS SONDEOS ELECTRICOS

PERFIL P1.

E	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
	RESISTIVIDADES APARENTES (ohms-metro).									
1	13.7	15.0	32.0	21.0	285.0	62.0	49.7	49.6	22.5	70.2
2	14.0	8.3	32.9	20.7	39.2	38.2	32.1	41.2	17.7	58.5
3	11.9	9.0	30.0	20.0	28.7	32.3	38.4	38.9	15.9	56.3
4	10.8	10.0	24.9	19.3	26.9	29.9	39.0	40.6	15.4	51.0
6	11.4	12.5	16.0	21.9	31.5	31.0	39.3	43.7	16.1	39.8
8	12.4	14.0	14.8	23.6	36.3	32.3	42.0	53.0	17.5	29.1
10	13.9	14.9	14.9	24.9	39.4	37.0	41.8	49.8	19.6	24.5
12	15.4	15.9	14.7	22.3	37.1	37.6	38.7	46.5	21.2	23.6
16	17.0	18.3	17.1	20.7	31.5	37.9	36.8	41.7	24.3	18.7
20	18.0	19.7	17.9	19.6	34.4	37.9	35.7	39.1	29.0	19.9
24	18.5	19.4	18.2	18.6	35.7	38.0	32.5	38.5	29.7	21.0
32	19.7	18.4	20.8	16.6	33.4	37.0	32.3	34.9	29.5	22.0
40	20.4	17.6	19.6	15.9	30.1	35.0	28.4	32.9	27.5	22.0
48	18.7	15.6	18.3	17.4	26.6	33.0	25.0	30.9	24.2	22.9
56	17.8	15.2	18.3	18.3	25.9	29.6	22.2	28.7	22.8	22.1
64	15.6	14.6	17.2	18.6	27.1	27.5	20.5	26.4	22.3	20.5
72	15.3	14.1	16.7	20.5	25.9	23.8	19.1	24.7	21.7	18.9
80	15.0	13.4	15.9	21.6	18.5	20.7	18.1	24.4	21.3	18.4
100	14.0	13.0	17.7	23.0	11.3	17.0	14.5	26.3	20.0	17.2

PROFUNDIDAD TEORICA EN METROS

TABLA 5.1 (Continuación).

E	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
120	13.6	13.0	20.8	25.8	9.0	14.6	11.7	28.4	19.0	15.4
140	13.3	14.8	19.9	28.2	-	12.4	11.5	31.0	17.0	15.3
160	12.7	15.2	19.0	31.0	-	12.0	13.0	31.6	16.6	17.1

PROFUNDIDAD TEORICA EN METROS

TABLA 5.2.- MEDICIONES EN LOS SONDEOS ELECTRICOS

PERFIL P2.

E	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
	RESISTIVIDADES APARENTES (ohms-metro)									
1	9.8	10.4	17.2	33.3	28.8	23.4	34.2	30.4	31.8	25.1
2	9.9	11.2	13.1	30.1	21.0	24.8	23.1	31.6	24.7	21.7
3	9.6	9.9	10.3	20.1	18.3	21.4	23.1	30.4	22.1	21.7
4	9.8	8.2	9.8	17.8	19.3	21.0	22.2	26.8	21.7	19.7
6	9.8	8.2	8.7	21.0	19.7	21.0	20.5	23.0	21.2	16.9
8	10.2	9.4	8.0	21.5	20.6	23.2	20.1	22.0	20.2	17.1
10	10.5	9.8	8.1	23.6	22.1	24.7	21.5	21.9	20.0	16.2
12	10.6	10.6	8.7	27.5	23.2	25.6	23.2	22.0	20.3	16.1
16	11.2	9.3	10.5	31.0	24.0	26.3	25.1	21.0	20.9	17.0
20	11.8	8.4	11.6	30.2	26.1	27.0	23.2	20.7	20.8	16.6
24	11.9	8.3	13.4	28.9	26.7	28.1	25.1	20.5	19.1	17.3
32	12.5	8.8	15.0	23.0	28.5	31.7	26.6	20.8	20.0	16.8
40	13.1	9.2	14.0	20.8	30.7	31.4	26.3	20.6	21.6	18.3
48	13.7	10.0	13.5	18.8	28.2	30.6	25.3	20.3	21.4	19.5
56	13.6	10.6	13.7	16.0	25.1	32.1	26.2	20.7	21.2	20.6
64	12.5	10.9	14.3	13.1	21.0	32.6	27.9	21.3	22.3	22.2
72	10.5	12.0	15.0	10.3	17.5	31.8	26.4	21.1	24.1	24.3
80	8.4	12.7	15.9	25.6	17.1	29.6	25.5	20.9	24.3	26.0
100	8.2	12.7	17.5	21.2	18.0	22.2	21.2	16.5	22.6	26.6

PROFUNDIDAD TEORICA EN METROS

TABLA 5.2 (Continuación).

E	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
120	9.4	11.2	21.2	18.8	18.0	18.9	17.6	15.1	20.0	24.8
140	11.7	12.3	19.6	17.1	15.1	15.0	15.1	14.2	18.4	22.1
160	12.6	13.9	18.8	15.8	14.1	13.5	12.7	13.0	17.3	19.8

PROFUNDIDAD TEORICA EN METROS

dos respectivamente en las estaciones 17+620 y 18+000, la obra proyectada se excavará en un material variable, se pueden definir tres tramos de calidad distinta.

El primer tramo, limitado entre el portal de entrada con cadenamiento 17+620 y la estación 17+695, se abrirá en un material B de calidad homogénea.

Entre la estación 17+695 y la 17+835, el túnel se encuentra en un material A de resistividad baja, generalmente del orden de 10 ohms-metro

Desde la estación 17+835 hasta el portal de salida en la estación - 18+000, la obra se encuentra en un material C, de resistividad compendida entre 50 y 70 ohms-metro, salvo en el tramo comprendido entre las estaciones 17+880 y 17+930, en donde la resistividad baja a 30 ohms-metro (material B).

5.2.- PERFORACION

Una vez que se obtuvieron los resultados del estudio geoelectrico - de resistividad se procedió a efectuar cuatro perforaciones con extracción de muestras en los cadenamientos donde se consideró que aportarían mayor información. Así, los sondeos quedaron ubicados en las estaciones: 17+700, 17+780, 17+900 y 17+960. Todos los sondeos llegaron hasta una -- profundidad aproximadamente 5.00 m bajo la rasante proyectada.

Los sondeos fueron ejecutados con una máquina Long Year 34, manejando barril con broca de diamante, diámetro NQ y sistema wireline. Los trabajos de perforación fueron efectuados por la compañía GEOSOL S.A. (8).

Durante el desarrollo de los sondeos se tuvieron en ocasiones pérdidas importantes de agua por filtraciones entre las fracturas. Así mismo, en el sondeo 3 (estación 17+900) se tuvieron caídos importantes de 0.00a 14.00 m de profundidad, por lo que se tuvo que cementar y reperforar - para poder avanzar.

Las muestras obtenidas se identificaron macroscópicamente y se deter-minaron el porcentaje de recuperación, el índice de calidad de roca (RQD) , el índice Q y el índice RMR aplicando los procedimientos de Barton, --- Lien y Lunde (1974) (2) y Bieniawski (1974) (4), respectivamente (Ver --- apéndice A). También se eligieron muestras dentro de la zona de excava---ción del túnel para someterlas a ensayos de compresión uniaxial.

A continuación se anexan los registros de perforación de cada uno de los sondeos.

Los resultados se representan gráficamente en el Plano 4.

5.3.- ESTUDIO GEOSISMICO DE REFRACCION.

El estudio geosísmico de refracción tuvo como finalidad determinar - las características dinámicas de los materiales que se van a excavar. Este estudio se llevó a cabo después de haber efectuado el estudio geoele---ctrico y la perforación con recuperación de núcleos y lo realizó la compa---ñía EXYCO S.A. (7).

El estudio geosísmico consistió en un estudio de microsísmica de re---fracción utilizando un marro como excitador y un levantamiento por el mé---todo "UP-HOLE" en la perforación No. 3, ubicada en el cadenamiento 17 + _ 900.

Para realizar el estudio se hicieron tres tendidos sísmicos de re---fracción, entre los cadenamientos 17+645 a 17+700, 17+780 a 17+870 y ---- 17+900 a 17+970. En cada uno la separación entre geófonos fué de 5 m y se realizaron en dirección paralela al eje del túnel.

Por otra parte se realizó un levantamiento de tipo "UP-HOLE" en la - perforación No. 3, con la finalidad de complementar la información geosís---mica. El geófono se colocó en este caso a 2 m de distancia de la boca ---

CAMINO: F.C. MEXICO-QUERETARO
 TRAMO: BUENA VISTA-LECHERIA
 Km. 17+780 ORIGEN: MEXICO D.F.
 TIPO DE OBRA : _____
 CLARO APROX.: _____
 W = _____ Kg. H = _____ W = _____

SONDEO No.: 2 ELEV. 2308 m.
 LOCALIZACION: 17+780
 PROCEDIMIENTO: ROTACION CON BARRIL NO
 BARRA PERF.: _____ N. A. F. _____ m.
 cm. σ EXT. _____ σ INT. _____

REGISTRO DE PERFORACION

FECHA DE INICIACION: 25-XI-83
 FECHA DE TERMINACION: 3-XII-83

PROF. EN m.	DESCRIPCION	MUESTRA No.	DE	A	No. DE GOLPES EN 30cm. DE PENE-TRACION	LONG. RECUPE- RADA EN cm.	OBSERVACIONES
0.20	SUELO		0.0	0.20			
	TOBA ANDESITICA MUY FRACTURADA	1	0.20	1.40		38	SE RECUPERO EL 100% DE AGUA
		2	1.40	2.80		38	
		3	2.80	3.55		60	
		4	3.55	6.33		175	
		5	6.33	7.55		90	
		6	7.55	9.38		136	
		7	9.38	10.18		60	
		8	10.18	12.43		190	
		9	12.43	13.63		95	
		10	13.63	16.00		227	
		11	16.00	18.20		195	
18.20	TOBA ANDESITICA, POCO FRACTURADA.	12	18.20	20.20		200	
		13	20.20	22.20		185	
		14	22.20	24.45		225	
		15	24.45	27.60		300	
		16	27.60	30.35		265	
		17	30.35	31.85		135	
31.85	TOBA ANDESITICA, MUY FRACTURADA	18	31.85	33.75		122	
		19	33.75	36.45		223	
		20	36.45	38.60		187	
		21	38.60	40.60		107	
		22	40.60	42.75		68	
		23	42.75	44.50		63	
47.0	FIN DEL SONDEO.	24	44.50	47.00		65	

CAMINO: F.C. MEXICO-QUERETARO
 TRAMO: BUENAVISTA-LECHERIA
 Km. 17+780 ORIGEN: MEXICO D.F.
 TIPO DE OBRA: TUNEL BARRIENTOS
 CLARO APROX.: _____
 W = _____ Kg. H = _____ W = _____

SONDEO No.: 3 ELEV. 2296 m.
 LOCALIZACION: 17+900
 PROCEDIMIENTO: ROTACION CON BARRIL NO
 BARRA PERF.: _____ N. A. F. _____ m.
 cm. or EXT. _____ or INT. _____

REGISTRO DE PERFORACION

FECHA DE INICIACION: 14-XI-83
 FECHA DE TERMINACION: 22-XI-83

PROF. EN m.	DESCRIPCION	MUESTRA No.	DE	A	No. DE GOLPES EN 30cm DE PENE-TRACION	LONG. RECUPE- RADA EN cm.	OBSERVACIONES
0.00		1	0.00	0.60	12		
	LIMO ARENOSO CAFE	2	1.00	1.60	11		SE ADEND CON CEMENTO Y SE RE- PERFORO HASTA UNA PROFUNDIDAD DE 14 m.
2.00		3	2.00	3.60	ROT	100	
	TOBA ANDESITICA MUY FRACTURADA	4	3.60	5.60	"	130	
		5	5.60	7.10	"	70	SE GASTARON 5 m3 DE AGUA
		6	7.10	8.10	"	67	
		7	8.10	9.90	"	140	
		8	9.90	10.90	"	25	
		9	10.90	12.40	"	90	
		10	12.40	13.27	"	55	
		11	13.27	14.47	"	55	
		12	14.47	16.68	"	100	
		13	16.68	18.63	"	160	
		14	18.63	22.28	"	105	
		15	22.28	24.28	"	120	
		16	24.28	25.28	"	67	
		17	25.28	26.48	"	120	
		18	26.48	27.73	"	115	
		19	27.73	29.43	"	100	
		20	29.43	31.43	"	190	
		21	31.43	34.00	"	250	
35.00	PIN DEL SONDEO 3.	22	34.00	35.00	"	100	

PERFORO: C. LÓPEZ E.

SUPERVISO:

R. LÓPEZ G. (SCT)

CAMINO: F.C MEXICO - QUERETARO
 TRAMO: BUENAVISTA-LECHERIA
 Km. 17+780 ORIGEN: Mexico D.F.
 TIPO DE OBRA: TUNEL BARRIENTOS
 CLARO APROX.: _____
 W: _____ Kg. H: _____ =

SONDEO No.: 4 ELEV. 2287 m.
 LOCALIZACION: 17+260
 PROCEDIMIENTO: ROTACION CON BARRIL NO
 BARRA PERF.: _____ N. A. F. _____ m.
 cm. or EXT. _____ or INT. _____

REGISTRO DE PERFORACION

FECHA DE INICIACION: 9-XI-83
 FECHA DE TERMINACION: 11-XI-83

PROF. EN m.	DESCRIPCION	MUESTRA No.	DE	A	No. DE GOLPES EN 30cm. DE PENE- TRACION	LONG. RECUPE- RADA EN cm.	OBSERVACIONES
0.00		1	0.00	0.60	16	40	
	ARENA LIMOSA CAJE	2	0.80	1.25	50/10	20	
0.80		3	2.00	2.25	50/10	20	
	TOBA ANDESITICA FRACTURADA						SE EMPLEARON 2.4 m ³ DE AGUA EN LA PERFORACION
		4	3.00	4.00	ROT	77	
		5	4.00	7.00	"	300	
		6	7.00	10.00	"	300	
		7	10.00	13.00	"	300	
13.00		8	13.00	16.00	"	230	
	TOBA ANDESITICA MUY FRACTURADA	9	16.00	19.00	"	280	
		10	19.00	22.00	"	300	
		11	22.00	25.00	"	280	
		12	25.00	27.00	"	110	
27.00							
	FIN DEL SONDEO.						

del pozo.

Se utilizó un sismógrafo marca GEOMETRIX de un canal con apilador, control de ganancia y filtro de frecuencias no deseadas, como ruidos ambientales causados por movimiento de personas y vehículos, en este caso, también por el paso del ferrocarril.

Además se empleó un geófono con sus cables y, para el caso de los tendidos, un marro como elemento excitador; mientras que para el "UP-HOLE" se utilizaron estopines eléctricos.

La interpretación se realizó con una serie de programas de computadora que calculan rectas por el método de mínimos cuadrados y determinan los parámetros de las superficies refractoras de acuerdo con los principios de Huygens y Fermat.

Los programas utilizados fueron: "AJUST 2", "AJUST 3", "REFR 2" y -- "REFR 3", que realizaron los cálculos a partir de un modelo de capas planas inclinadas y el programa "MIGRA" que obtiene la profundidad del refractor bajo cada geófono (superficie refractora irregular) a partir de los tiempos de retardo.

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados del "UP-HOLE" localizado en el barrenado No. 3 (estación 17+900) y en el Plano 5 se muestran las -- ubicaciones de los geófonos, puntos de excitación y el perfil de micro--sísmica obtenido después de la interpretación.

Resultados del Estudio Geosísmico..- Se definieron cuatro unidades -- con características dinámicas similares; a continuación se describen cada una de ellas:

Unidad 1.- Corresponde a un paquete de materiales de baja velocidad (317 a 500 m/s) que se ha asociado a suelos y tobas limo-arenosas; fué -- detectada únicamente en los tendidos 1 y 3 con un espesor medio de 4 m; -- sin embargo, tiende a aumentar hacia los flancos del cerro, cubriendo --

las demás unidades.

TABLA 5.3.- RESULTADOS DEL "UP-HOLE" EN EL BARRENO NO. 3
(EST. 17+900) CON GEOFONO A 2 m DE DISTANCIA.

Profundidad (m)	Tiempo (ms)
4	13.4
6	21.3
8	26.1
10	31.9
12	43.7
14	45.6
16	49.7
18	53.9
20	59.5
21	13.8
22	12.0
24	12.6
26	13.3
28	14.2
29	14.7
30	15.4
31	15.2

Unidad 2.- Corresponde a una toba andesítica sumamente fracturada - poco intemperizada, con velocidades del orden de 540 m/s; fué detectada por el "UP-HOLE" y por el tendido dos.

Este material tiende a aflorar hacia el pozo 2 en la zona de la carretera, y según los resultados geofísicos, se profundiza hacia el pozo 3.

Unidad 3.- Este material corresponde a una toba andesítica muy fracturada e intemperizada con un rango de velocidades entre 1 032 m/s y -- 1 047 m/s, tiene sus espesores mayores en las zonas donde se ubican los

portales de entrada y salida, así como entre el pozo 2 y 3 en la zona -- del túnel.

Unidad 4.- Este material se ha asociado con una toba andesítica --- fracturada, poco intemperizada con velocidades entre 2 040 m/s y 3 736 - m/s; y se ha detectado en la zona de los pozos 1 y 3.

Las unidades anteriormente descritas se muestran gráficamente en el Plano 5.

Con el fin de determinar la deformabilidad del macizo rocoso se pro- cedió a calcular el módulo de Young dinámico para cada unidad que sería _ atravesada por la excavación del túnel.

En el estudio de microsísmica únicamente se determinó la velocidad _ de propagación de la onda P (compresional) por lo que fué necesario supo- ner un valor de la relación de Poisson (ν) para poder calcular el módu- lo de deformabilidad dinámico de la roca (módulo de Young).

El valor supuesto para ν fué de 0.40 ya que la velocidad de propa- gación de las ondas P era menor a 3 000 m/s (1).

De acuerdo con la teoría elástica, la ecuación que relaciona la ve- locidad de propagación de la onda P, la relación de Poisson, el módulo - de Young y la densidad de la roca es:

$$E_D = V_p^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

Donde:

E_D .- módulo dinámico de deformabilidad o de Young.

V_p .- velocidad de propagación de la onda P.

ρ .- densidad de la roca.

ν .- relación de Poisson.

Para obtener los valores de la densidad de la roca se partió de los valores de peso volumétrico obtenidos en laboratorio para las muestras -

recuperadas en la perforación (ver subcapítulo 5.2).

En la tabla 5.4 se resumen los valores de densidad, velocidad de -- propagación de la onda P y módulo de deformabilidad dinámico del macizo_ rocoso.

TABLA 5.4.- VALORES DEL MODULO DE DEFORMABILIDAD DINAMICO DEL MACIZO ROCOSO.

V_p (m/s)	$\rho = \frac{f}{g}$ prom. (Kg.s ² /m ⁴)	E_D (Kg/m ²)
542	233.214	31 971 276
948	233.214	97 808 832
1 032	225.352	112 002 467
1 470	217.057	218 884 620
1 524	234.081	253 713 092
2 040	217.057	421 542 058
2 500	233.214	680 207 499
2 589	234.081	732 212 343
3 736	230.330	1 500 275 521

5.4.- PRUEBAS DE COMPRESION UNIAIXIAL.

Como se mencionó anteriormente en el subcapítulo relativo a la perforación (5.2), de los núcleos obtenidos se tomaron muestras que se encontraban dentro de la zona de excavación del túnel para someterlas a ensayos de compresión uniaxial sin confinamiento con el fin de conocer su resistencia a la compresión.

Estas pruebas de compresión se efectuaron de acuerdo con los métodos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) (11) para determinar la resistencia a la compresión uniaxial y la deformabilidad de los materiales rocosos.

A continuación se describen los aspectos más importantes de los métodos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas:

Tolerancia de perpendicularidad de las caras de la muestra con respecto al eje de carga	0.001 radianes, 3.5 minutos ó - 0.05 mm en 50 - mm.
Tolerancia del paralelaje de las caras de la muestra	0.02 mm.
Relación de esbeltez de la muestra	2.5-3.0
Velocidad de aplicación de la carga	0.5-1.0 MPa/s *

Se ensayaron en total 15 muestras, y los resultados se presentan en la tabla 5.5.

Del análisis estadístico de estos datos (ver apéndice B) se observa que existe una gran dispersión entre ellos. El valor mínimo es de 16.8 Kg/cm^2 y el máximo de 476 Kg/cm^2 , la media tiene un valor de 256.08 Kg/cm^2 , la desviación standard es de 141.70 Kg/cm^2 y el intervalo de confianza de 95% está entre 177.61 Kg/cm^2 y 334.55 Kg/cm^2 .

Esta gran dispersión de los resultados se debe principalmente a la diferencia de orientación de las superficies de debilidad con respecto al eje de carga, las diferencias en el tamaño de grano de los piroclastos que forman la roca y a un proceso de intemperismo que ha afectado irregularmente al macizo rocoso.

De acuerdo con la clasificación para roca intacta establecida por Deere y Miller (6), que se reproduce en la tabla 5.6, los resultados de los ensayos a compresión clasifican a las muestras ensayadas en las cla-

* MPa = megapascal = 10.197 Kg/cm^2

ses D (resistencia baja) y E (resistencia muy baja).

TABLA 5.5.- RESULTADOS DE LOS ENSAYES DE COMPRESION.

CADENAMIENTO	SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	RESISTENCIA A LA COMPRESION	
			(Kg/cm ²)	(MPa)
17+700	1	16.20-19.20	16.8	1.648
		19.20-22.20	112.9	11.072
		22.20-23.60	154.5	15.152
17+780	2	30.35-31.85	180.0	17.652
		31.85-33.75	280.0	27.459
		33.75-36.45	284.0	27.851
		36.45-38.60	369.0	36.187
		38.60-40.60	302.0	29.617
		44.50-47.00	322.0	31.578
17+900	3	18.63-22.28	436.0	42.758
		24.28-25.28	335.0	32.853
		25.28-26.48	378.0	37.070
		27.73-29.43	476.0	46.680
		29.43-31.43	102.0	10.003
		31.43-34.00	73.0	7.159

TABLA 5.6.- CLASIFICACION DE LA ROCA INTACTA BASADA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION (DEERE Y MILLER).

CLASE	DESCRIPCION	RESISTENCIA A LA COMPRESION
		SIMPLE (Kg/cm ²)
A	Resistencia muy alta	> 2 250
B	Resistencia alta	1 120-2 250
C	Resistencia media	560-1 120
D	Resistencia baja	280- 560
E	Resistencia muy baja	< 280

5.5.- LEVANTAMIENTO GEOLOGICO DE DETALLE.

Además de los estudios geofísicos y de la perforación, se efectuó un levantamiento geológico superficial detallado.

Todo el túnel será excavado en el mismo tipo de roca (toba andesítica) y solo los portales de entrada y salida serán excavados en un suelo residual, que de acuerdo con la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se define como un limo de baja compresibilidad (ML).

El levantamiento, en los afloramientos de roca estuvo enfocado principalmente a determinar las características geológicas que permitieran aplicar las clasificaciones geomecánicas de Barton (2) y Bieniawski (4) (ver apéndice A y subcapítulos 5.6 y 5.7).

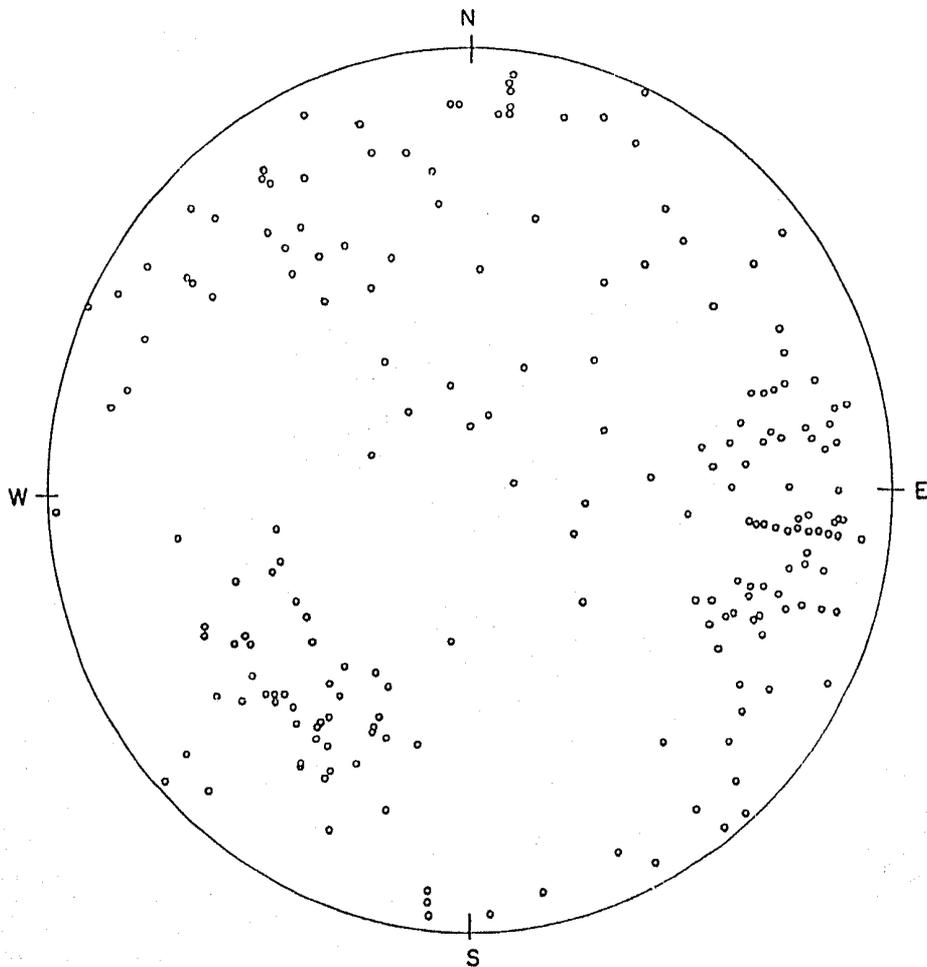
Aprovechando los cortes del portal de salida y de entrada del túnel existente; así como el corte efectuado para la avenida que cruza por -- arriba del túnel, se hizo un levantamiento de las discontinuidades existentes.

Las discontinuidades están representadas por planos de fracturamiento por tensión, y en muy pocos casos se encuentran algunas zonas de compresión, como es el caso de los taludes del corte en el portal de salida del túnel existente a la altura del cadenamiento 17+960 del túnel en proyecto.

En total se levantaron 192 datos de las posiciones de los planos de fracturamiento y se representaron gráficamente en una red estereográfica de Schmidt o de igual área, para efectuar un conteo estadístico y determinar las posiciones preferentes del fracturamiento (ver estereograma 1).

El conteo se efectuó de acuerdo con el método de Schmidt o método de la malla (13) (15) y se obtuvo la configuración que se muestra en el estereograma 2.

ESTEREOGRAMA 1
POSICIONES DE LOS PLANOS DE FRACTURAMIENTO.



Total de datos medidos: 192

En este último se observa que existen cuatro posiciones preferentes de fracturamiento con las siguientes posiciones promedio (ver estereograma 3):

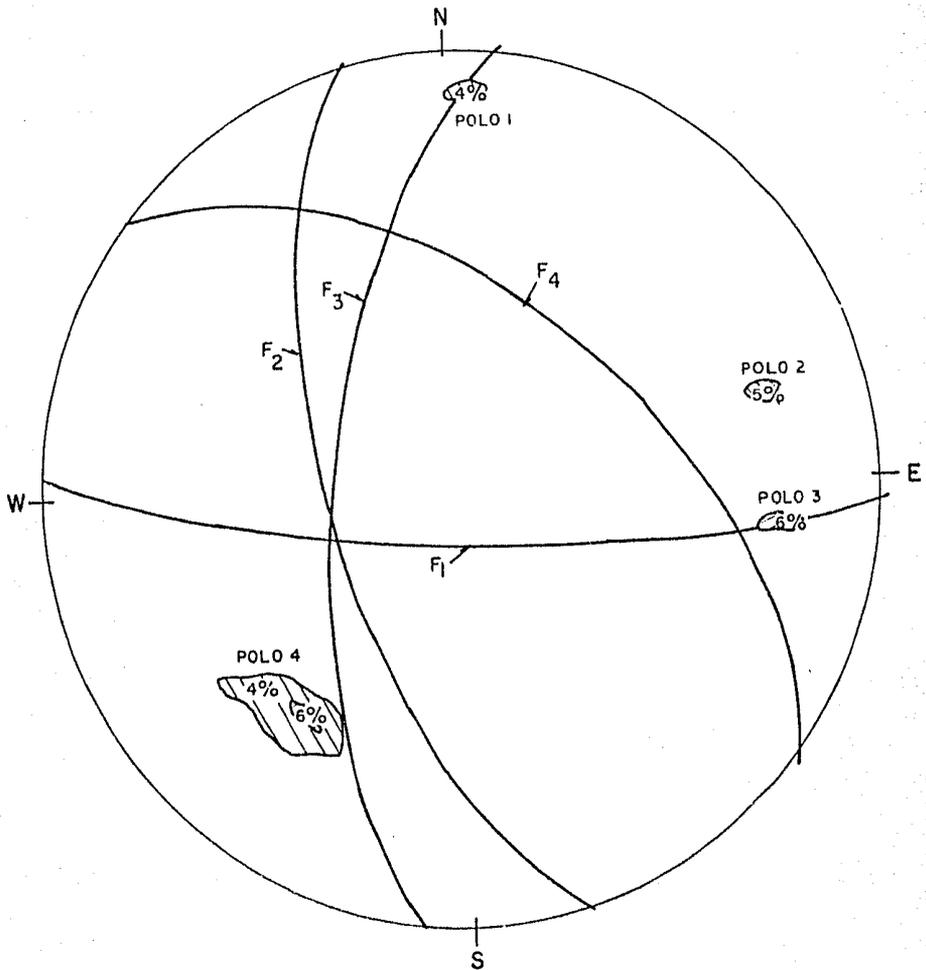
FAMILIA	POSICION PROMEDIO	SITIO DONDE FUERON MEDIDAS
1	N86°W-80°SW	Talud derecho del corte en el portal de salida del -- túnel existente, corte de la avenida.
2	N15°W-64°SW	Corte de la avenida, talud derecho del portal de salida del túnel existente.
3	N 8°E-65°NW	Talud derecho del corte -- del portal de entrada del túnel existente, talud izquierdo del portal de entrada del túnel existente.
4	N50°W-54°NE	Talud izquierdo del corte del portal de entrada del túnel existente.

De cada una de las cuatro familias anteriores se midió el espaciamiento entre fracturas y la abertura de ellas. Los resultados obtenidos del análisis estadístico de estos datos (ver apéndice B) se resumen en la tabla 5.6.

En el estereograma 4 se muestran los ángulos que forman entre sí -- los planos de fracturamiento preferencial y la dirección y buzamiento de las líneas de intersección de estos planos. Este estereograma se elaboró utilizando la red estereográfica de Wulff o de igual ángulo.

Con las mediciones del espaciamiento entre fracturas para cada una de las familias fué posible obtener el "Índice de Tamaños de Bloques" --

ESTEREOGRAMA 3
 POSICIONES PREFERENTES PROMEDIO DE LOS
 SISTEMAS DE FRACTURAMIENTO.



F₁: N85°W - 80°SW

F₂: N15°W - 64°SW

F₃: N 8°E - 65°NW

F₄: N50°W - 54°NE

TABLA 5.6.- CARACTERISTICAS DEL FRACTURAMIENTO.

FAMILIA	POSICION		CONTINUIDAD (A)	ESPACIAMIENTO (B)	ABERTURA (C)	FORMA Y RUGOSIDAD	RELLENO
	RUMBO	ECHADO					
1	N86°W	80°SW	Continuas	Próximas	Extremadamente angosta	Plana Lisa	Arcilla
2	N15°W	64°SW	Continuas	Muy próxi- mas	Extremadamente angosta	Plana Lisa	Arcilla
3	N 8°E	65°NW	Continuas	Próximas	Extremadamente angosta	Plana Lisa	Arcilla
4	N50°W	54°NE	Continuas	Próximas	Extremadamente angosta	Plana Lisa	Arcilla

TERMINOS DESCRIPTIVOS (10)

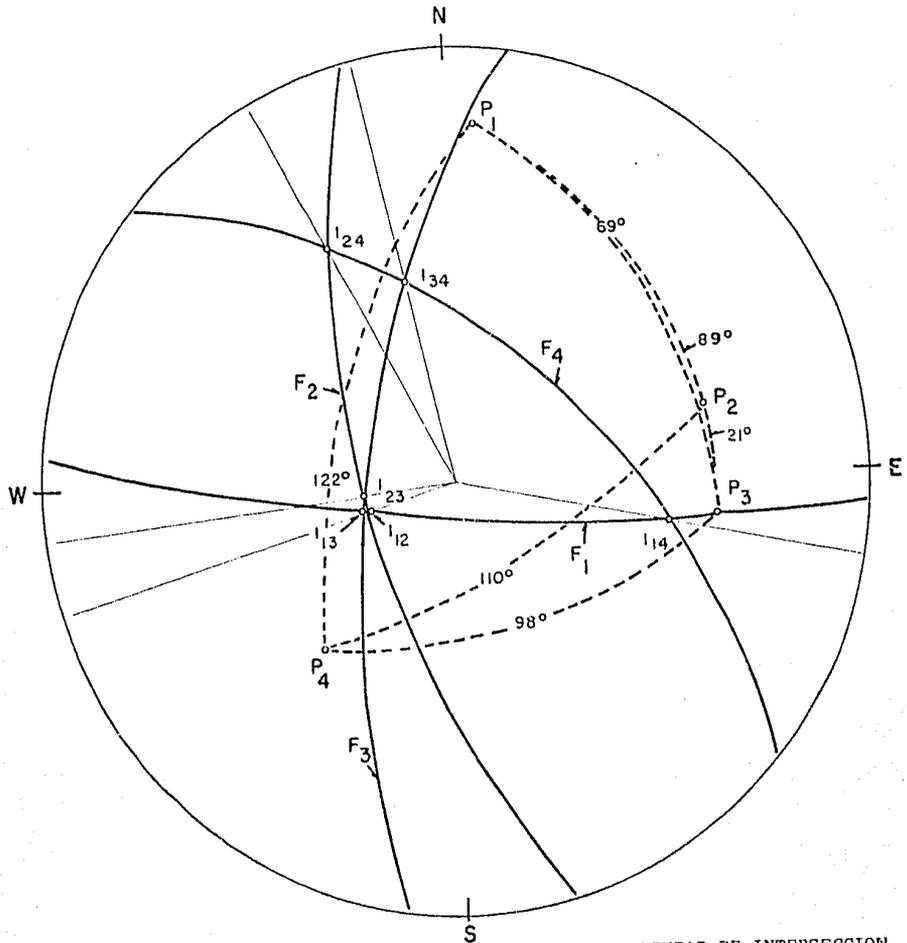
(A) CONTINUIDAD		(B) ESPACIAMIENTO		(C) ABERTURA	
RANGO	DESCRIPCION	RANGO	DESCRIPCION	RANGO	DESCRIPCION
> 20m	Muy continuas	> 200 cm	Muy espaciadas	> 200 mm	Ancha
6-20m	Continuas	60-200 cm	Espaciadas	60-200 mm	Moderadamente an- cha.
2-6 m	Medianamente continuas	20-60 cm	Medianamente - espaciadas	20-60 mm	Medianamente an- gosta.

TABLA 5.6 (Continuación).

TERMINOS DESCRIPTIVOS

(A) CONTINUIDAD		(B) ESPACIAMIENTO		(C) ABERTURA	
RANGO	DESCRIPCION	RANGO	DESCRIPCION	RANGO	DESCRIPCION
< 6 m	Poco continuas	6-20 cm	Próximas	6-20 mm	Muy angosta
		< 6 cm	Muy próximas	< 6 mm	Extremadamen- te angosta.

ESTEREOGRAMA 4
 RELACIONES GEOMETRICAS ENTRE LOS PLANOS
 DE FRACTURAMIENTO PREFERENTES.



SIMBOLOGIA	ANGULOS DIEDROS	LINEAS DE INTERSECCION
F_2	$\sphericalangle = 69^\circ$	I_{12} - 65° - $S71^\circ W$
$\circ P_3$	$\sphericalangle_{1,2} = 89^\circ$	I_{13} - 63° - $S73^\circ W$
$\circ I_{12}$	$\sphericalangle_{1,3} = 122^\circ$	I_{14} - 35° - $S79^\circ E$
	$\sphericalangle_{1,4} = 21^\circ$	I_{23} - 64° - $S80^\circ W$
	$\sphericalangle_{2,3} = 110^\circ$	I_{24} - 26° - $N29^\circ W$
	$\sphericalangle_{2,4} = 98^\circ$	I_{34} - 39° - $N13^\circ W$
23°	$\sphericalangle_{3,4} = 98^\circ$	

(I_b), que corresponde a las dimensiones promedio de los bloques típicos y se define como:

$$I_b = \frac{\sum_{j=1}^n S_j}{N}$$

Donde:

S.- Intervalo de clase, de la moda (valor más frecuente) del espaciamiento de las diferentes discontinuidades (ver apéndice B).

N.- Número de familias de discontinuidades.

Así, para el túnel Barrientos, el índice de tamaño de bloques es:

$$I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}{4} ; \quad \begin{array}{l} S_1 = 16 \\ S_2 = 4 \\ S_3 = 10 \\ S_4 = 10 \end{array}$$

$$I_b = 10 \text{ cm}$$

Durante el levantamiento geológico de detalle también se determinó la densidad o número de fracturas por metro, que corresponde a lo que se conoce como número de fracturas volumétricas (J_v). La medición de fracturas por metro se efectuó en forma aleatoria sin considerar a que familia de fracturas correspondían.

El tratamiento estadístico de los datos obtenidos (ver apéndice B), muestra que los valores más frecuentes (moda) corresponden a la marca de clase 7; por lo tanto, para el caso del Túnel Barrientos: $J_v = 7$ fracturas/m³ que, según la tabla 5.7 corresponde a un tamaño de bloques medianos.

El valor de J_v se relaciona empíricamente con el índice de calidad de roca (RQD) por la ecuación:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

Para el caso del túnel estudiado:

$$RQD = 115 - 3.3(7)$$

$$RQD = 91.9\%$$

que corresponde a una roca de excelente calidad aunque se encuentra cerca na a la frontera de una roca de buena calidad.

En el caso del Túnel Barrientos esta relación entre J_v y RQD no se confirma, ya que el valor promedio de RQD obtenido de las cuatro perforaciones de exploración es de 42% (ver apéndice B) que corresponde a una roca de mala calidad y el intervalo de confianza del 95% se encuentra entre los valores de RQD de 34.60% y 49.47%.

TABLA 5.7.- TERMINOS DESCRIPTIVOS DEL TAMAÑO DE BLOQUES
DE UN MACIZO ROCOSO (10).

DESCRIPCION	J_v (fracturas/m ³)
Bloques muy grandes	< 1.0
Bloques grandes	1 - 3
Bloques medianos	3 - 10
Bloques pequeños	10 - 30
Bloques muy pequeños	> 30
Roca triturada	> 60

Las condiciones del flujo de agua observadas tanto en el túnel existente como en los cortes de los taludes en la época de lluvias indicaron únicamente ligeras filtraciones en la bóveda del túnel existente.

Con los datos obtenidos del levantamiento geológico de detalle, los estudios geofísicos, la perforación y las pruebas de resistencia a la com presión uniaxial se procedió a aplicar las clasificaciones geomecánicas - de Barton (2) y Bieniawski (4) para determinar el tipo de revestimiento - provisional que requeriría el túnel como se describe en los subcapítulos - 5.6 y 5.7 a continuación.

5.6.- APLICACION DE LA CLASIFICACION GEOMECANICA DE BARTON.

Para determinar el tipo de soporte provisional que requeriría el Tú-

nel Barrientos, se recurrió a la clasificación geomecánica de Barton (2) o índice Q (ver apéndice A).

Se determinó un índice Q en general para todo el macizo rocoso en el que sería excavado el túnel. Posteriormente se hizo una zonificación por tramos, de acuerdo con el índice Q obtenido para cada una de las perforaciones efectuadas; extrapolando algunas de las observaciones efectuadas para el macizo rocoso en general, ya que algunos parámetros geológicos involucrados en el cálculo del índice Q no eran observables en los núcleos de perforación.

Así, para el macizo rocoso en general, se obtuvieron las siguientes calificaciones para los aspectos geológicos que se consideran en el índice Q:

Índice de calidad de roca (RQD).

De acuerdo con los valores de RQD obtenidos para las cuatro perforaciones efectuadas se observa que estos valores tienen una gran dispersión (ver apéndice B) y la distribución estadística de ellos muestra que los valores más frecuentes corresponden a varios intervalos de clase (distribución multimodal); por lo tanto, se eligió el valor promedio que es de 42%.

Número de familias de fracturas (J_n).

Con los datos obtenidos del levantamiento de discontinuidades (ver subcapítulo 5.5) se observó que existen cuatro familias de fracturas mas una distribución aleatoria, por lo que a J_n se le asignó un valor de 15 (ver tabla A.6 del apéndice A).

Número de rugosidad (J_r).

Del levantamiento de discontinuidades (subcapítulo 5.5) se observó que todas las fracturas eran lisas y planas, así a J_r se le asignó un valor de 1.0 (tabla A.6 del apéndice A).

Número de alteración y relleno de fracturas (J_a).

Del levantamiento de discontinuidades (subcapítulo 5.5) se observó - que las fracturas están rellenas de arcilla y tienen una abertura menor - a 6 mm. Por lo tanto, para este caso, J_a tiene un valor de 4.0 (tabla -- A.6 del apéndice A).

Factor de reducción por la presencia de agua (J_w).

En el macizo rocoso únicamente se observaron pequeñas filtraciones - en la bóveda del túnel existente. Así a J_w se le asignó un valor de 1.0 - (tabla A.6 del apéndice A).

Factor de reducción debido al estado de esfuerzos (SRF).

Únicamente se observaron zonas aisladas de compresión que constitu--ían zonas de debilidad; por lo tanto, SRF tiene un valor de 5.0.

Cálculo del índice Q.

Utilizando la expresión: $Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right)$ se tiene que para el macizo rocoso en el que será excavado el Túnel Barrientos $Q = \left(\frac{42}{15}\right) \times \left(\frac{1.0}{4.0}\right) \times \left(\frac{1.0}{5.0}\right)$; $Q = 0.14$

Este valor corresponde a roca de calidad muy mala de acuerdo con la clasificación geomecánica de Barton (ver apéndice A).

Sin embargo, este valor de 0.14 correspondiente al macizo rocoso en general, no podía ser utilizado para determinar el soporte provisional -- del túnel proyectado ya que las condiciones geológicas varían a lo largo -- del eje de trazo, y por lo tanto, el tipo de soporte provisional también -- debe variar de acuerdo con las condiciones geológicas esperadas.

Por el motivo anterior, se determinaron diferentes valores del índice Q para los núcleos de roca obtenidos en las cuatro perforaciones que -- se efectuaron con fines exploratorios (ver subcapítulo 5.2). Ya que no -- era posible determinar todos los parámetros que intervienen en el cálculo del índice Q en los núcleos de perforación, se extrapolaron las observa--ciones efectuadas para todo el macizo rocoso en el caso de los parámetros J_w y SRF.

Al analizar estadísticamente los valores del índice Q obtenidos para cada una de las cuatro perforaciones (ver apéndice B), se observó que éstos tienen una distribución multimodal y una gran dispersión, por lo que no era fácil elegir un valor que fuera representativo. Además, la diferencia entre los valores mínimos y máximos era muy grande, lo que provocaba que al utilizar los valores promedio se incurriera en errores de interpretación de la calidad de la roca, y por lo tanto, también se determinaría un tipo de soporte que probablemente no fuera el más adecuado.

Para solucionar este problema se recurrió a utilizar una "media ponderada", es decir, a dar un cierto peso o valor de influencia a los valores medios del índice Q determinados para cada perforación (ver apéndice B). Aunque los pesos asignados fueron elegidos en forma arbitraria, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los valores medios con mayor peso serían aquéllos que fueron obtenidos dentro de la zona de influencia del macizo rocoso sobre el soporte provisional.
- Los valores medios que se encontraban dentro de la zona de excavación del túnel no tendrían mucho peso, puesto que esa roca sería removida y no actuaría sobre el soporte provisional.
- Los valores que se encontraban fuera de la zona de influencia del macizo rocoso sobre el soporte, serían considerados con poco peso.
- Para determinar los valores que tenían mayor influencia sobre el soporte provisional se utilizó, en forma preliminar, la estimación de la carga de roca sobre el soporte según el criterio de Terzaghi (14) para túneles con soporte a base de marcos de acero. Para una roca muy fracturada, de acuerdo con el criterio mencionado anteriormente: $H_p = (0.35 \text{ a } 1.10)(B+Ht)$ cuando no existe presión lateral.

Donde:

Hp.- carga estimada de la roca sobre la bóveda (en m)

Ht.- altura del túnel (en m)

B.- ancho del túnel (en m).

Para el caso del Túnel Barrientos:

$$H_p = 0.35(11.00+11.00)$$

$$H_p = \underline{7.70 \text{ m}}$$

Así, los pesos elegidos para los valores medios de Q fueron:

- 60% para los valores que se encontraban dentro de los 7.70 m sobre la clave proyectada del túnel,
- 20% para los valores que se encontraban dentro de la zona de excavación del túnel y
- 20% para el resto de los valores (ver apéndice B).

Con los valores obtenidos del índice Q por medio de este procedimiento, se procedió a determinar el tipo de revestimiento preliminar para cada uno de los sondeos (ver figura A.4 del apéndice A). la dimensión equivalente para el Túnel Barrientos es:

$$D_e = \frac{\text{claro, diámetro o altura de la excavación (m)}}{\text{ESR}} \quad (\text{ver apéndice - A})$$

$$D_e = \frac{11.00}{1.0}$$

$$D_e = \underline{11.00}$$

Para el sondeo 1, la categoría de soporte correspondiente se define con los valores siguientes: Q = 0.473 equivalente a roca muy mala, De = 11.00; categoría de soporte correspondiente a los valores anteriores: 27 = B (utg) 1m + s (mr) 5-7.5 cm.- Anclaje sistemático a cada metro sin tensión, con inyección + concreto lanzado de 5 a 7.5 cm de espesor con malla reforzada.

Para el sondeo 2, la categoría de soporte se define con los valores

$Q = 0.919$ equivalente a roca muy mala, $De = 11$; categoría de soporte: 27_ B (utg) 1m + s (mr) 5-7.5 cm.- Anclaje sistemático a cada metro sin tensión, con inyección + concreto lanzado de 5 a 7.5 cm de espesor con malla reforzada.

Para el sondeo 3, los valores que definen el tipo de soporte son: -- $Q = 0.517$ equivalente a roca muy mala, $De = 11$; categoría de soporte: 27_ = B (utg) 1m + s(mr) 5-7.5 cm.- Anclaje sistemático a cada metro sin tensión, con inyección + concreto lanzado de 5 a 7.5 cm de espesor con malla reforzada.

Para el sondeo 4, el revestimiento se define con los valores: $Q = 1.024$ equivalente a roca mala, $De = 11$; categoría de soporte: 23 = B (utg) 1.0-1.5m + s (mr) 5-10 cm.- Anclaje sistemático a cada metro o metro y medio + concreto lanzado de 5 a 10 cm de espesor con malla reforzada.

Barton (3) ha establecido una relación entre el índice Q y el claro máximo sin revestimiento con base en la observación de 30 casos de excavaciones permanentemente abiertas sin soporte en una gran variedad de macizos rocosos. Esta relación está definida por la ecuación:

$$\text{Claro máximo (m)} = 2ESR Q^{0.4}$$

Para los valores del índice Q determinados en cada uno de los barrenos se tienen los siguientes claros máximos:

SONDEO 1:

$$\text{Claro máx.} = 2(1)(0.473)^{0.4} = \underline{1.48 \text{ m}}$$

SONDEO 2:

$$\text{Claro máx.} = 2(1)(0.919)^{0.4} = \underline{1.93 \text{ m}}$$

SONDEO 3:

$$\text{Claro máx.} = 2(1)(0.517)^{0.4} = \underline{1.54 \text{ m}}$$

SONDEO 4:

$$\text{Claro máx.} = 2(1)(1.024)^{0.4} = \underline{2.00 \text{ m}}$$

5.7.- APLICACION DE LA CLASIFICACION GEOMECANICA DE BIENIAWSKI.

Otro criterio que se utilizó para determinar el tipo de revestimiento primario que se colocaría en el túnel fué el establecido por Bieniawski (4) que también es conocido como índice RMR (Rock Mass Rating) (ver -- apéndice A).

Se siguió el mismo procedimiento que se utilizó para determinar el revestimiento primario con el índice Q, es decir, se asignó un valor de RMR para todo el macizo rocoso y también se estableció una serie de valores para cada una de las cuatro perforaciones exploratorias.

En el caso de las perforaciones, algunos de los parámetros utilizados para el cálculo del índice RMR se extrapolaron de las observaciones hechas para todo el macizo rocoso en general; como es el caso del espaciamiento, la continuidad y la abertura de las discontinuidades, la presencia de agua y la orientación de las discontinuidades, ya que estos parámetros no podían ser observados en las muestras extraídas de la perforación.

La resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, que es uno de los parámetros que intervienen en la determinación del índice RMR, no fué obtenida en el laboratorio para todas las muestras, ya que sólo se hicieron ensayos en las muestras que se encontraban en la zona de excavación del túnel.

En los casos en los que se carecía de datos de la resistencia a la compresión uniaxial, se calculó el índice RMR a partir del índice Q, utilizando la relación empírica propuesta por Bieniawski (5): $RMR = 9 \log_e Q + 44$.

Para todo el macizo rocoso se obtuvieron las siguientes calificaciones:

Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

El análisis estadístico de los datos obtenidos en las pruebas de compresión uniaxial (ver apéndice B) muestra que existe una gran dispersión y una distribución multimodal; por lo tanto se optó por el valor promedio de 256.08 Kg/cm^2 (25.113 MPa) por lo que, de acuerdo con la tabla A.3 del apéndice A, se le asignó una calificación de 4.

Índice de calidad de roca RQD.

En el análisis estadístico de los datos de RQD para las cuatro perforaciones (ver apéndice B) también se encontró una gran dispersión y una distribución multimodal; por lo tanto, se eligió el valor promedio de 42% al cual le corresponde una calificación de 8 según la tabla A.3 del apéndice A.

Espaciamiento de discontinuidades.

De acuerdo con el análisis estadístico (apéndice B) del espaciamiento de discontinuidades que se resume en la tabla 5.6 se observó que tres de las cuatro familias de fracturas tienen espaciamientos entre 6 y 20 cm y una familia tiene un espaciamiento menor que 6 cm; por lo tanto, de acuerdo con la tabla A.3 del apéndice A se asignó una calificación de 10.

Condiciones de las discontinuidades.

De acuerdo con la tabla 5.6 y el análisis estadístico de los datos de abertura (apéndice B), se observa que todas las familias de fracturas son planas y lisas, continuas, con abertura menor que 6 mm y con rellenos de arcilla. Por lo tanto, tienen una calificación de 6 de acuerdo con la tabla A.3 del apéndice A.

Flujo de agua.

Únicamente se observaron pequeñas filtraciones en el túnel existente en época de lluvias, por lo tanto, se califica con 7 este parámetro de acuerdo con la tabla A.3.

Orientación de discontinuidades.

En el estereograma 5 se muestran las relaciones geométricas entre --

las familias de fracturas y el eje del túnel. Para fines de la clasificación de Bieniawski se considera que el eje del túnel es sensiblemente perpendicular al rumbo de las discontinuidades. Ya que la excavación se iniciará en el portal de salida, y en el peor de los casos, la excavación irá en contra del echado de la familia de fracturas número cuatro.

Según la tabla A.3 y A.4 del apéndice A, estas condiciones se consideraran como regulares para el tuncleo y se les asigna un factor de ajuste por orientación de discontinuidades de -5.

De acuerdo con lo anterior, el índice RMR para todo el macizo rocoso es:

Resistencia a la compresión de la roca intacta	4
Índice de calidad de roca (RQD)	8
Espaciamiento de discontinuidades	10
Condiciones de las discontinuidades	6
Flujo de agua	7
Factor de corrección por orientación de discontinuidades	-5

$$\text{RMR} = \text{total} = 30$$

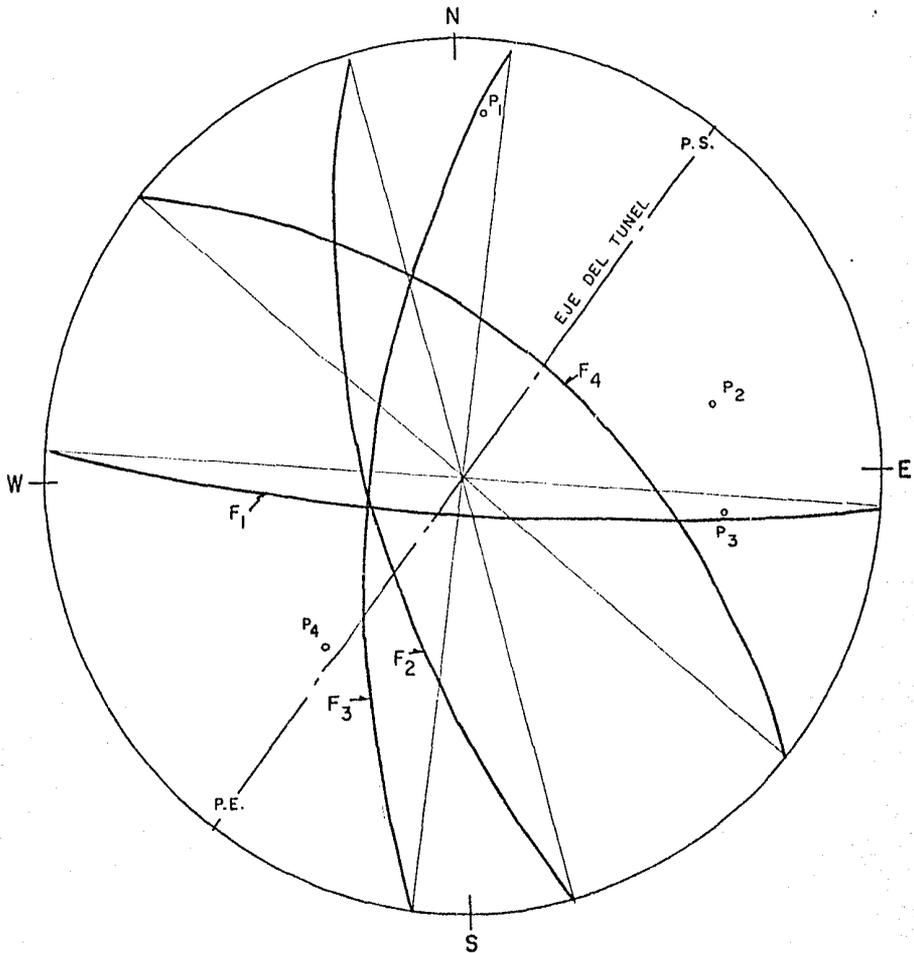
Este valor de RMR obtenido para todo el macizo rocoso corresponde a roca de mala calidad o clase IV de acuerdo con la clasificación geomecánica de Bieniawski (ver apéndice A).

De la misma forma en que se procedió con el índice Q de Barton, además de determinar el valor de RMR para todo el macizo rocoso, se estableció una serie de valores de RMR para las cuatro perforaciones, con el fin de poder establecer el revestimiento primario más adecuado por tramos de acuerdo con la calidad de la roca.

Se utilizó el mismo procedimiento estadístico de la "media ponderada" que se mencionó en el subcapítulo anterior por las mismas razones y con los mismos criterios para la asignación de las ponderaciones correspondientes a cada grupo de valores (ver apéndice B).

ESTEREOGRAMA 5

RELACION GEOMETRICA DE LAS DISCONTINUIDADES CON EL EJE DEL TUNEL.



FAMILIAS DE FRACTURAMIENTO

F₁ : N86°W - 80°SWF₂ : N15°W - 64°SWF₃ : N 8°E - 65°NWF₄ : N50°W - 54°NE

RUMBO DEL EJE DEL TUNEL

NE 38° SW

Así, para el sondeo 1 el valor de RMR es 33.14 que equivale a roca - de mala calidad, clase IV.

Para este tipo de roca se recomienda usar como revestimiento primario marcos metálicos medianos separados entre 0.7 y 1.5 m con concreto -- lanzado de 50 mm de espesor en la clave. El procedimiento de excavación - que se recomienda consiste en excavar media sección y "banquear", con un avance de 1.0-1.5 m en la media sección y colocar el revestimiento conforme avance la excavación (tabla A.5, apéndice A).

Se considera que el tiempo promedio de estabilidad sin soporte es de 5 horas para un claro activo de 1.5 m.

Para el sondeo 2 el valor de RMR obtenido después de obtener la media ponderada es de 40.7 que equivale a roca de mala calidad, clase IV de acuerdo con la clasificación de Bieniawski. Para este tipo de roca, el revestimiento primario debe elegirse de acuerdo con las mismas consideraciones que se tomaron para el sondeo 1.

El valor obtenido de RMR para el sondeo 3 fué de 36.83 que equivale a roca de mala calidad, clase IV y con la cual se deben hacer las mismas consideraciones que se mencionaron en el sondeo 1 para la elección del revestimiento primario.

El valor del índice RMR para el sondeo 4 fué de 43.47 que equivale a roca de calidad regular, clase III. Para este tipo de roca el revestimiento primario debe tener las siguientes características: marcos ligeros con separación de 1.00 a 2.00 m.

Se excavará a media sección y después se "banqueará". La media sección tendrá un avance de 1.5 a 3.0 m y se colocará el revestimiento después de la voladura, el revestimiento se mantendrá a 10.00 m del frente - de excavación (tabla A.5, apéndice A).

El tiempo promedio de estabilidad sin soporte es de 1 semana para un

claro activo de 3.00 m.

Finalmente, utilizando los criterios para la selección del revestimiento primario obtenidos a partir de los índices Q y RMR y correlacionando las distintas calidades de roca obtenidas en los sondeos con los estudios geofísicos se elaboró el plano 6, donde se indican las características del revestimiento primario recomendado para el Túnel Barrientos.

5.8.- ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LA CLAVE DEL TUNEL.

Los problemas de estabilidad en una roca fracturada en la que se forman bloques por la intersección de discontinuidades generalmente están asociados con fallas por gravedad de los bloques en la clave y en las paredes del túnel. Los esfuerzos que se presentan en la roca a poca profundidad generalmente son suficientemente bajos para no tener un efecto significativo en este proceso de falla que está controlado por la geometría tridimensional de la excavación y las discontinuidades que afectan al macizo rocoso.

La falla controlada estructuralmente puede ser analizada por medio de proyecciones estereográficas; en este subcapítulo y en el siguiente se analizarán los problemas de estabilidad que pudieran presentarse en el túnel utilizando los métodos descritos por Hoek y Brown (9), utilizando las proyecciones estereográficas.

5.8.1.- Falla por gravedad.

Para que una cuña o bloque, formada por la intersección de cuando menos tres discontinuidades, caiga de la bóveda se debe satisfacer la condición de que una línea vertical que pase por el vértice de la cuña debe caer dentro de la base de la cuña.

En una proyección estereográfica, la línea vertical que pasa por el vértice de la cuña está representada por el centro de la red estereográfica, y las condiciones de falla mencionadas en el párrafo anterior se satisfacen si las proyecciones de las discontinuidades forman una figura ce

rrada que encierre al centro de la red.

De acuerdo con lo anterior, en el Túnel Barrientos se presentan condiciones de falla por gravedad en la bóveda como puede observarse en los estereogramas 6 y 7.

También se efectuó una evaluación más detallada de la forma y el volumen de las cuñas potencialmente inestables como se ilustra en las figuras 5.8.1 y 5.8.2 en la parte inferior de los estereogramas 6 y 7 respectivamente.

De acuerdo con las proyecciones estereográficas de los planos de --- fracturamiento que corresponden a las orientaciones preferentes, se identificaron dos cuñas o bloques potencialmente inestables por gravedad; una de estas cuñas se forma por la intersección de los planos: F_1 (N86°W-80°--SW), F_3 (N8°E-65°NW) y F_4 (N50°W-54°NE) y la otra se forma por la intersección de los planos: F_1 (N86°W-80°SW), F_2 (N15°W-64°SW) y F_4 (N50°W-54°NE).

Para conocer la geometría, volumen y peso de las cuñas potencialmente inestables de mayor tamaño que se podrían desprender de la clave, se procedió a hacer un dibujo a escala del túnel, suponiéndolo como un prisma rectangular. Trazando las líneas de los rumbos de los planos de fracturamiento dentro del espacio que será excavado, se encuentra la combinación que formará las cuñas de mayor tamaño susceptibles de fallar por gravedad.

En planta, el vértice de la cuña se define encontrando el punto de --- intersección de las líneas de intersección de cada par de planos, proyectados a partir de las esquinas de la base triangular de la cuña como se --- ilustra en las figuras 5.8.1 y 5.8.2.

La altura h del vértice de la cuña sobre el techo horizontal del túnel se encuentra haciendo una sección transversal que pase por el vértice de la cuña y que sea normal al eje del túnel. Esta sección XX intersecta_

las trazas de los rumbos de los planos en dos puntos que definen la base del triángulo como se observa en la proyección XX de las figuras 5.8.1 y 5.8.2. Los echados aparentes de los planos que intersecta la sección transversal están dados por los ángulos α y β que se pueden medir en la red estereográfica a lo largo de la línea XX que pasa por el centro de la red.

El volumen de las cuñas se determina con la fórmula: $V = 1/3 h(\text{área de la base en planta})$, y el peso de ellas multiplicando este volumen por el peso volumétrico promedio obtenido a partir de los núcleos de perforación ensayados en el laboratorio.

Así, para la cuña formada por los planos: F_1 , F_2 y F_4 el volumen es:

$$V_{134} = 1/3 (5.00) \left(\frac{11.00 \times 5.60}{2} \right)$$

$$V_{134} = \underline{51.333 \text{ m}^3}$$

Y el peso de la cuña es:

$$W_{134} = 51.333 \text{ m}^3 \left(2.259 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} \right)$$

$$W_{134} = \underline{115.962 \text{ Ton}}$$

Para la cuña formada por los planos: F_1 , F_2 y F_4

$$V_{124} = 1/3 (5.00) \left(\frac{11.00 \times 5.50}{2} \right)$$

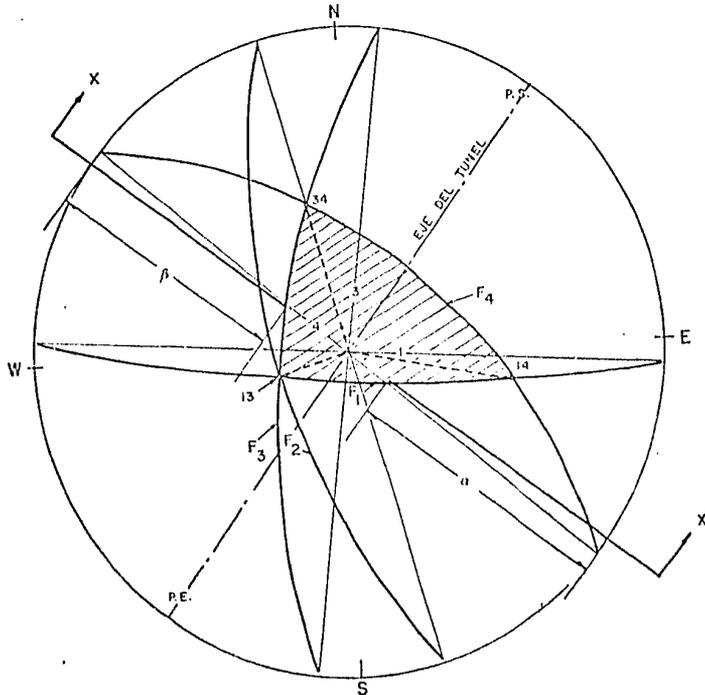
$$V_{124} = \underline{50.417 \text{ m}^3}$$

Y el peso de la cuña es:

$$W_{124} = 50.417 \text{ m}^3 \left(2.259 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} \right)$$

$$W_{124} = \underline{113.892 \text{ Ton}}$$

ESTEREOGRAMA G
 ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LA CLAVE DEL TUNEL
 (CUÑA FORMADA POR F₁, F₃ Y F₄).



PLANOS PREFERENCIALES DE FRACTURAMIENTO

- F₁ : N86°W - 80°SW
- F₂ : N15°W - 64°SW
- F₃ : N8°E - 65°NW
- F₄ : N50°W - 54°NE
- Eje del túnel: NE38°SW

Bloque inestable en la bóveda.
 Dirección de la línea de intersección entre planos.
 $\alpha = 72^\circ$
 $\beta = 62^\circ$

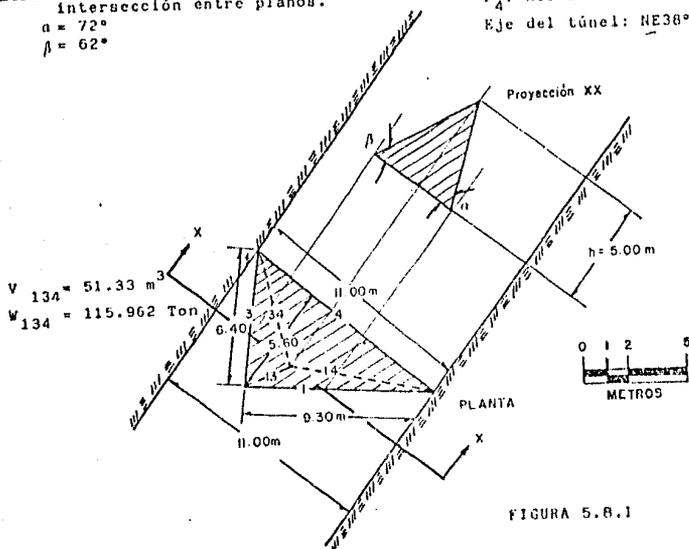
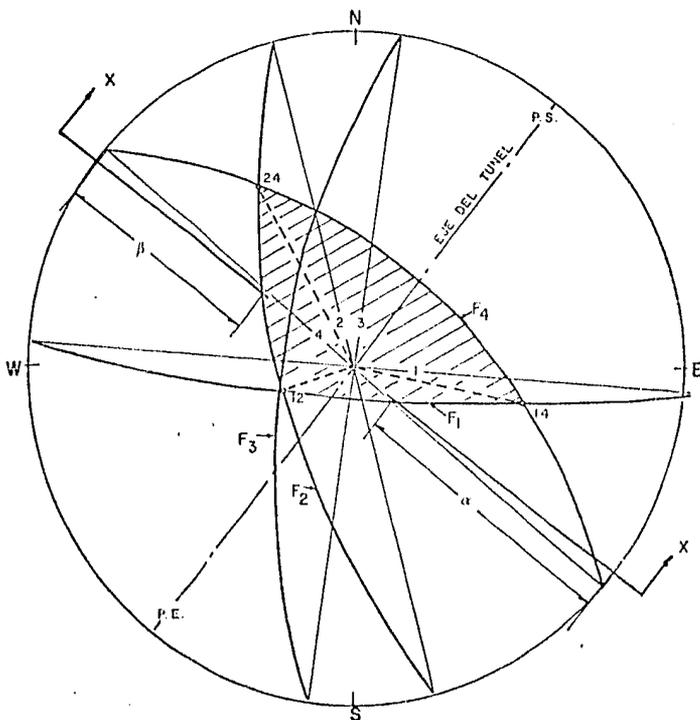


FIGURA 5.8.1

ESTEREOGRAMA 7
 ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LA CLAVE DEL TUNEL
 (CUÑA FORMADA POR F₁, F₂ Y F₄).



PLANOS PREFERENTES DE FRACTURAMIENTO

$\alpha = 62^\circ$
 $\beta = 51^\circ$

▨ Cuña inestable en la clave.
 --- Dirección de la línea de intersección entre planos.

F₁: N86°W - 80°SW
 F₂: N15°W - 64°SW
 F₃: N8°E - 65°NW
 F₄: N50°W - 54°NE
 Eje del túnel: NE38°SW

$V_{124} = 50.417 \text{ m}^3$
 $W_{124} = 113.892 \text{ Ton}$

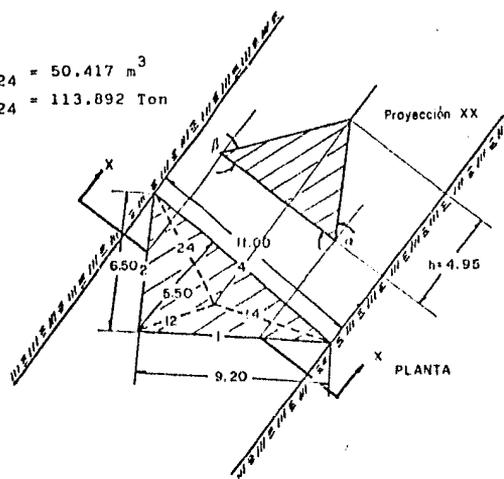


FIGURA 5.8.2

Debe tenerse en cuenta que estas dimensiones corresponden a las cuñas de mayor tamaño que podrían desprenderse de la clave de acuerdo con la posición de los planos de fracturamiento y con la geometría de la excavación.

Sin embargo, de acuerdo con el levantamiento geológico superficial, es poco probable que se tengan cuñas de estas dimensiones ya que el espaciamiento entre fracturas reduce el tamaño de las cuñas. El espaciamiento mayor entre fracturas (medido perpendicularmente a los planos) fué de 107 cm para la familia F_1 , 45 cm para la familia F_2 , 55 cm para la familia F_3 y 27 cm para la familia F_4 (ver apéndice B), de donde se deduce que los bloques o cuñas que pudieran caer de la clave son mucho menores que los obtenidos por proyecciones estereográficas (durante la construcción se observó que las cuñas mayores tenían un volumen de 0.546 m^3 , es decir, 1% del tamaño determinado con el método anteriormente descrito).

5.8.2.- Falla por deslizamiento sobre un plano de fractura o a lo largo de líneas de intersección.

Si se intersectan tres discontinuidades formando una cuña en la clave del túnel; pero la línea vertical que pasa por el vértice de la cuña no cae dentro de la base de ésta, únicamente puede producirse una falla por deslizamiento sobre un plano o a lo largo de alguna línea de intersección.

Esta condición se representa estereográficamente si la figura de la intersección de los planos formada por los meridianos queda localizada a un lado del centro de la red. Además debe satisfacerse la condición mecánica de que la línea de intersección a lo largo de la cual ocurrirá el deslizamiento debe tener una inclinación mayor que el ángulo de fricción interno ϕ de la roca. El ángulo de fricción se dibuja hacia el centro de la red, partiendo de la circunferencia externa de ésta formando aproximadamente un círculo.

El valor del ángulo de fricción supuesto para el caso del Túnel Berrientos es de 30° .

De acuerdo con lo anterior, se identificó una cuña que satisface las condiciones de falla por deslizamiento, formada por los planos de fracturamiento preferente: F_2 (N15°W-64°SW), F_3 (N8°E-65°NW) y F_4 (N50°W-54°NE). Esta cuña podría deslizarse hacia la excavación del túnel a lo largo de la línea de intersección que forman los planos F_2 y F_3 , con una dirección --64°-S79°W.

La cuña formada por F_2 , F_3 y F_4 también podría deslizarse hacia la excavación a lo largo de la línea de intersección que forman los planos F_3 y F_4 , con una dirección 39°-N14°W.

En el estereograma 8 se ilustran las condiciones geométricas y mecánicas de la cuña inestable y en las figuras 5.8.3 y 5.8.4 las dimensiones máximas de ésta cuando se analiza el deslizamiento a lo largo de las líneas de intersección 23 y 34 respectivamente.

Para dibujar la planta real de las cuñas, las dimensiones en la dirección del rumbo de las trazas de los planos 4 y 2 en las figuras 5.8.3 y 5.8.4 respectivamente, se determinaron a partir de las máximas dimensiones encontradas al hacer el análisis de estabilidad por gravedad.

Así, la cuña formada por F_2 , F_3 y F_4 que pudiera deslizarse a lo largo de la línea de intersección 23, tendría un volumen de:

$$V_{234/23} = 1/3 (12.00) \left(\frac{23.00 \times 6.00}{2} \right)$$

$$V_{234/23} = \underline{276 \text{ m}^3}$$

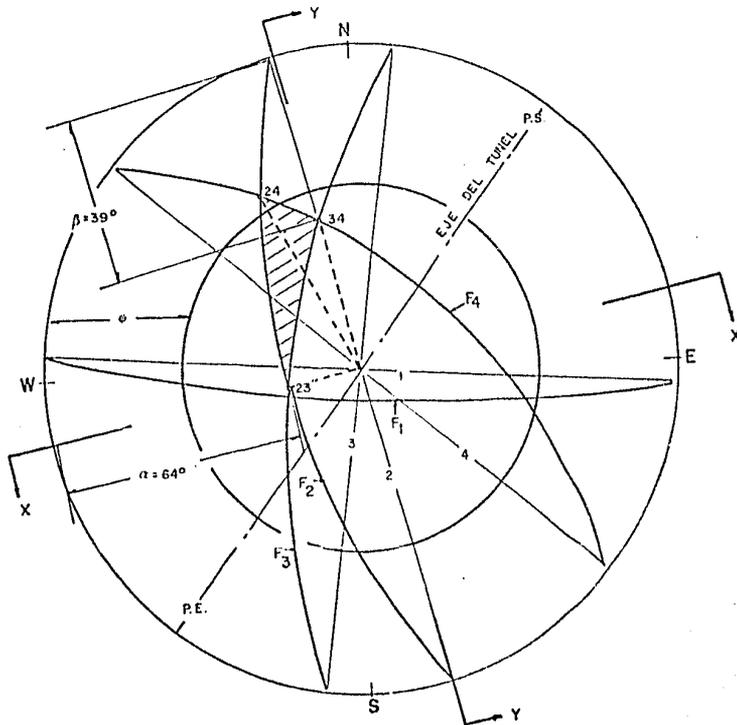
y considerando un peso volumétrico de 2.259 Ton/m³, tendría un peso de:

$$W_{234/23} = 276(2.259)$$

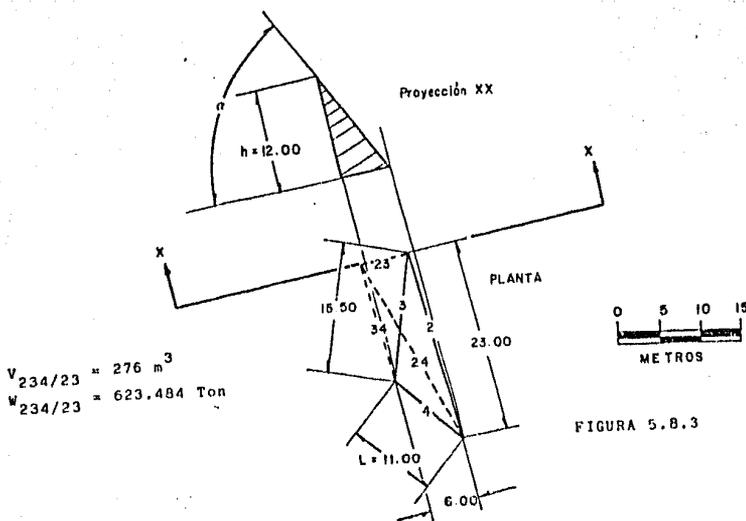
$$W_{234/23} = \underline{623.484 \text{ Ton}}$$

La cuña formada por F_2 , F_3 y F_4 que pudiera deslizarse a lo largo de -

ESTEREOGRAMA B
 ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LA CLAVE DEL TUNEL
 (CUÑA FORMADA POR F₂, F₃ Y F₄)



DIRECCION DE LAS LINEAS DE INTERSECCION
 23: $64^\circ - S79^\circ W$
 34: $39^\circ - N14^\circ W$



$V_{234/23} = 276 \text{ m}^3$
 $W_{234/23} = 623.484 \text{ Ton}$

FIGURA 5.8.3

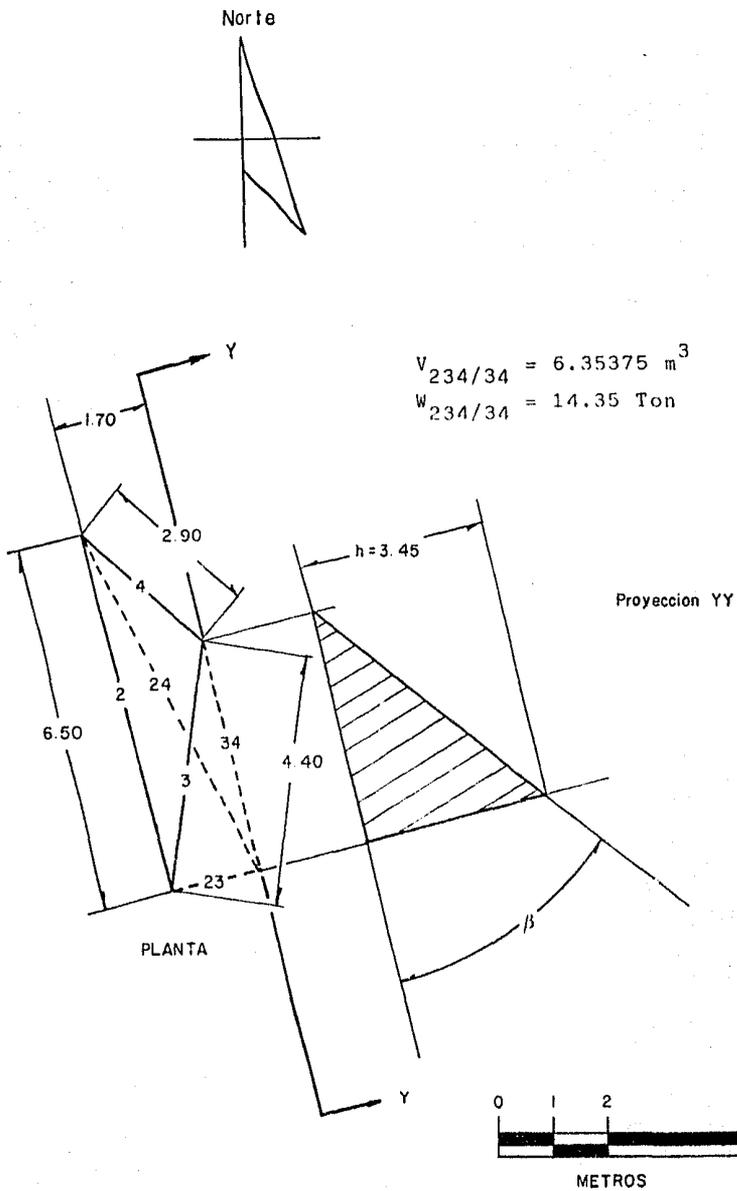


FIGURA 5.8.4

la línea de intersección 34 tendría un volumen de:

$$V_{234/34} = 1/3 (3.45) \left(\frac{6.50 \times 1.70}{2} \right)$$

$$V_{234/34} = \underline{6.35375 \text{ m}^3}$$

y el peso sería:

$$W_{234/34} = \underline{14.35 \text{ Ton}}$$

Como se mencionó anteriormente, estas serían las dimensiones máximas de las cuñas que podrían formarse; pero en las condiciones reales, estas cuñas serían menores debido al espaciamiento entre los planos de fractura.

5.9.- ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LAS PAREDES DEL TUNEL.

En las paredes de una excavación en roca fracturada, la falla de las cuñas puede presentarse como ocurre en la clave; pero las fallas únicamente se pueden producir por deslizamiento sobre un plano o una línea de intersección entre dos planos.

Para el Túnel Barrientos, objeto de este trabajo, también se efectuó un análisis de las cuñas potencialmente inestables que forman los diferentes planos de fracturamiento preferente en las paredes del túnel, utilizando las proyecciones estereográficas según el método descrito por Hoek y Brown (9).

Hasta ahora, se han manejado los estereogramas como una representación gráfica de las trazas de los diferentes planos de fracturamiento preferente en un plano horizontal que pasa a través del centro de la esfera de referencia.

Para conocer la forma de las cuñas en la pared del túnel es necesario determinar la forma de la figura de intersección de los planos proyectados en un plano vertical.

Esta figura de intersección se obtiene por la rotación a 90° de las líneas de intersección de los meridianos mayores alrededor del eje del túnel. La rotación debe efectuarse en el mismo sentido para que todas las líneas de intersección sean proyectadas en el mismo hemisferio.

De acuerdo con lo anterior, la línea 14 sale de la red en los puntos a y b y vuelve a entrar en los puntos a' y b' en los estereogramas 9 y 10 respectivamente.

En los estereogramas 9 y 10 se representan las trazas de los planos de fracturamiento preferente y sus líneas de intersección en un plano vertical paralelo a las paredes del túnel considerando a éste como un prisma rectangular y en las figuras 5.9.1 y 5.9.2 la construcción de la proyección real de las cuñas formadas por F_1 , F_3 , F_4 y representan las dimensiones máximas posibles de acuerdo con la geometría de la excavación y las posiciones de los planos de fractura.

Debe notarse que las figuras 5.9.1 y 5.9.2 representan las trazas de los planos de fracturamiento vistos en la pared NW desde adentro del túnel o vistos en la pared SE desde fuera del túnel, viendo en una dirección $N52^\circ W$. Una imagen de "espejo" de estas figuras representaría las trazas de los planos vistos en la pared SE del túnel desde adentro del túnel o en la pared NW vista desde fuera, viendo en una dirección $S52^\circ E$.

Finalmente, de acuerdo con las dimensiones máximas de las cuñas se calculó el volumen y el peso de éstas:

Cuña formada por F_1 , F_3 y F_4 :

$$V_{134} = 1/3 (3.00) \left(\frac{12.00 \times 2.60}{2} \right)$$

$$V_{134} = \underline{15.6 \text{ m}^3}$$

Considerando un peso volumétrico de 2.259 Ton/m^3 :

$$W_{134} = 15.6(2.259)$$

ESTEREOGRAMA 9
 PROYECCION DE LAS TRAZAS DE LOS PLANOS DE FRACTURAMIENTO EN LA PARED NW
 VISTA DENTRO DEL TUNEL EN UNA DIRECCION N52°W.
 (CUÑA FORMADA POR F₁, F₃ Y F₄).

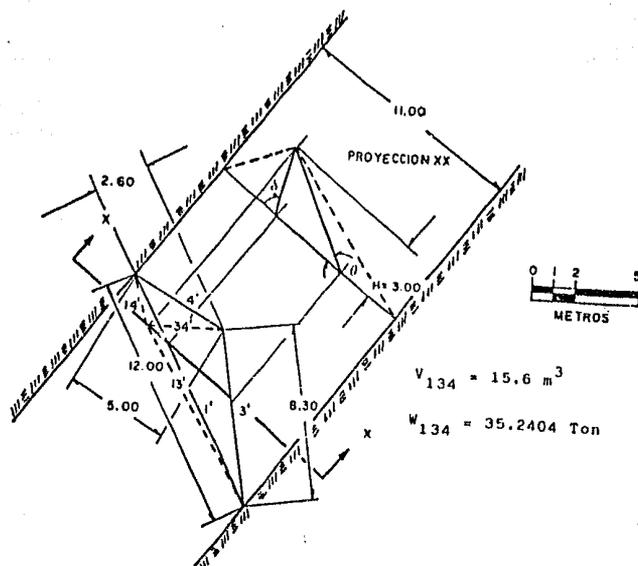
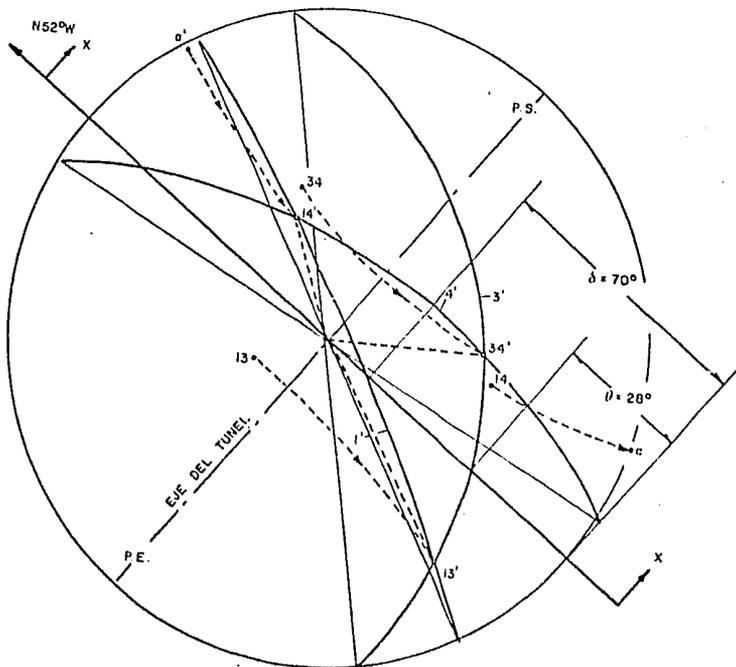
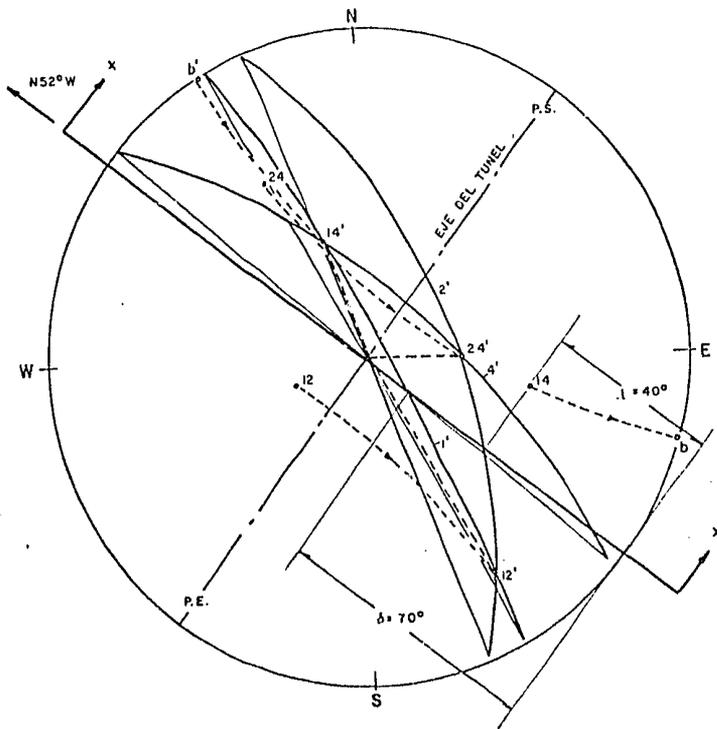


FIGURA 5.9.1

ESTEREOGRAMA 10

PROYECCION DE LAS TRAZAS DE LOS PLANOS DE FRACTURAMIENTO EN LA PARED NW
 VISTA DESDE DENTRO DEL TUNEL EN UNA DIRECCION N52°W.

(CUÑA FORMADA POR F_1 , F_2 Y F_4).



$V_{124} = 6.96 \text{ m}^3$
 $W_{124} = 15.72264 \text{ Ton}$

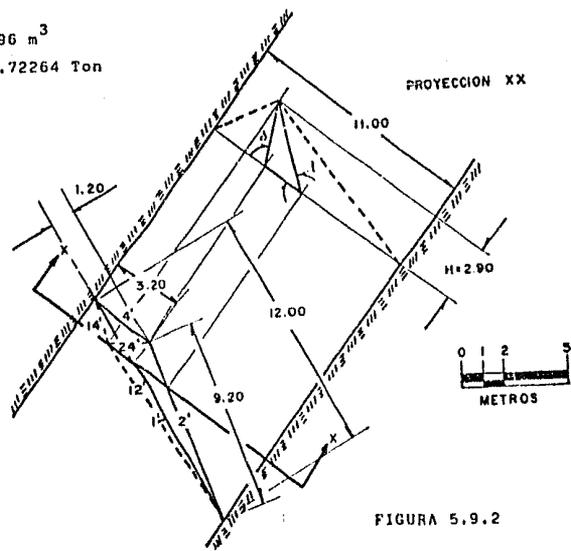


FIGURA 5.9.2

$$W_{134} = \underline{35.2404 \text{ Ton}}$$

Cuña formada por F_1 , F_2 y F_4 :

$$V_{124} = 1/3 (2.90) \left(\frac{12.00 \times 1.20}{2} \right)$$

$$V_{124} = \underline{6.96 \text{ m}^3}$$

Considerando un peso volumétrico de 2.259 Ton/m^3 :

$$W_{124} = 6.96 (2.259)$$

$$W_{124} = \underline{15.72264 \text{ Ton}}$$

Debe tomarse en cuenta que estas serían las máximas dimensiones posibles. En realidad estas dimensiones son menores debido al espaciamiento entre fracturas.

5.10.- ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN LOS CORTES DEL PORTAL DE ENTRADA Y EL PORTAL DE SALIDA.

Con base en los resultados obtenidos en los estudios geoelectrico de resistividad y geosismico, se recomendó iniciar los cortes para el portal de entrada y el portal de salida en los cadenamientos 17+650 y 17+960 respectivamente, con el propósito de hacer estos cortes en roca, evitando el suelo residual y la roca muy intemperizada.

Sin embargo, ésta recomendación presentaba algunos problemas: el incremento en el volumen por excavar, el costo por unidad de volumen se incrementaría al tratarse de una roca y, probablemente, se podrían producir problemas de inestabilidad de los taludes del corte como consecuencia de la posición de las discontinuidades que afectan al macizo rocoso.

Para evaluar este último problema y poder tomar una decisión, se efectuó un análisis de la estabilidad de los taludes de los cortes con los métodos descritos por Hoek y Bray (16). A continuación se presenta -

una breve relación de los conceptos teóricos que se manejan.

El factor de seguridad de un talud (F) es una relación entre las -- fuerzas que tienden a favorecer el deslizamiento de una cuña o bloque -- por un plano o línea de intersección entre planos, denominadas fuerzas - actuantes, y las fuerzas que tienden a resistir el deslizamiento.

$$F = \frac{\text{Suma de fuerzas resistentes}}{\text{Suma de fuerzas actuantes}}$$

Este factor de seguridad adquiere distintos valores. Cuando $F = 1.0$ se establece el estado de equilibrio límite, es decir, cuando las fuer-- zas actuantes están exactamente balanceadas con las fuerzas resistentes. Los valores de F que comúnmente se manejan en el análisis de estabilidad de taludes y que se consideran representativos de condiciones estables - son: $F = 1.3$ para excavaciones temporales y $F = 1.5$ para excavaciones -- permanentes.

Se supone que el deslizamiento ocurre cuando el echado de la línea_ de intersección de los planos que forman la cuña es mayor que el ángulo_ de fricción interno de la roca y la línea de intersección "aflora" en la cara del talud, es decir, el deslizamiento ocurre cuando: $\psi_f > \psi_i > \varphi$ --

Donde:

ψ_f .- Intensidad del echado de la cara del talud.

ψ_i .- Inclinación o echado de la línea de intersección.

φ .- Angulo de fricción interno de la roca.

Etereográficamente ésta condición se presenta cuando la línea de - intersección se encuentra en una zona limitada por el plano que represen_ ta la cara del talud y el ángulo de fricción de la roca.

Para el caso del túnel "Barrientos" se efectuó un análisis prelimi-- nar de la estabilidad de los taludes en los cortes propuestos, suponiendo un ángulo de fricción de 30° . Este análisis se presenta en los este-- reogramas 11, 12, 13 y 14. En los estereogramas 11 y 13 se observa que - las condiciones de deslizamiento se cumplen para las líneas de intersec-

ción 34, 32 y 31. En los estereogramas 12 y 14 las condiciones de deslizamiento se cumplen para la línea de intersección 14.

Sin embargo, para calcular el factor de seguridad de los taludes -- fué necesario efectuar un análisis más detallado de éstas condiciones. -- Se aplicó el método gráfico del "cono de fricción" descrito por Hoek y -- Bray (16). A continuación se mencionan los fundamentos teóricos en que -- se basa el método anteriormente mencionado.

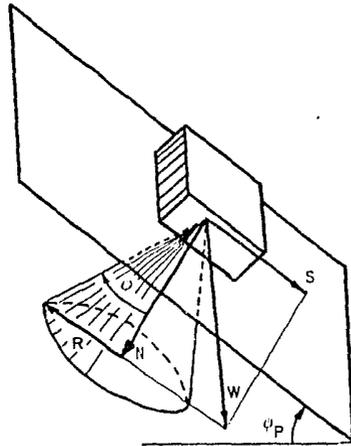
Si consideramos un bloque o cuña de peso W que se encuentra sobre -- un plano que está inclinado con un ángulo ϕ_p con respecto a la horizontal, la fuerza actuante S que actúa hacia abajo del plano inclinado está dada por: $S = W \sin \phi_p$ y la fuerza normal N que actúa a través del plano inclinado es: $N = W \cos \phi_p$.

Si la resistencia al cortante de la superficie entre la cuña y el -- plano inclinado es solamente friccional, es decir, la resistencia por cohesión es cero; entonces la fuerza R_f que resiste el deslizamiento está -- dada por: $R_f = N \tan \psi = W \cos \phi_p \cdot \tan \psi$, donde ψ es el ángulo de -- fricción interno de las superficies.

El deslizamiento de la cuña ocurrirá si la fuerza actuante S es mayor que la fuerza resistente R_f ó si: $W \sin \phi_p > W \cos \phi_p \cdot \tan \psi$. Esta desigualdad se simplifica a: $\phi_p > \psi$ como condición para el desliza-- miento.

Ya que la fuerza resistente R_f actúa uniformemente en la superficie entre la cuña y el plano inclinado (suponiendo que la resistencia por -- fricción de las superficies es la misma en todas las direcciones en el -- plano), podemos imaginar un "cono de fricción" que rodea a la fuerza normal N como se ilustra en la figura 5.10.1. Este cono tiene una base circular de radio R_f , una altura N y un ángulo semi-apical ψ .

En la mayor parte de los análisis prácticos de estabilidad de taludes, se supone que la cohesión es cero, ya que esta cantidad es muy difi



Deslizamiento de un bloque sobre un plano inclinado por acción de su peso propio.

El deslizamiento ocurre cuando $\psi_p > \phi$, o cuando el vector W sale del cono de fricción.

FIGURA 5.10.1

cil de evaluar y el hecho de despreciarla nos coloca del lado de la seguridad.

Cuando los planos A y B se intersectan, una cuña de roca que descansa en los dos planos puede deslizarse a lo largo de la línea de intersección de los planos si permanece en contacto con ambos planos durante el deslizamiento y por lo tanto, para analizar su estabilidad, es necesario determinar el ángulo de fricción aparente ϕ_i que actúa en un plano vertical paralelo a la línea de intersección de los planos.

La fuerza resistente en el plano A puede representarse por el vector Q_a , que es la resultante de la fuerza normal N_a y la fuerza resistente R_a y actúa en un plano vertical paralelo a la línea de intersección de los dos planos. Similarmente, la fuerza resistente en el plano B puede representarse por Q_b .

Si se suman los vectores Q_a y Q_b para encontrar su resultante en un plano paralelo a la línea de intersección, esta resultante Q_i debe permanecer en el mismo lugar de Q_a y Q_b . El plano O_{aib} que contiene a Q_a , Q_i y Q_b está definido estereográficamente por un plano que pase por los puntos a y b en los estereogramas 15, 16, 17 y 18.

En los estereogramas, para encontrar el punto a, se encuentra un plano que contenga a la normal al plano A (N_a) y a la línea de intersección de los planos A y B (I_{AB}). El punto a estará definido por la intersección de este plano con la proyección del cono de fricción que rodea a la normal N_a . El punto b se encuentra de la misma forma incluyendo la normal al plano B (N_b).

La intersección del plano que contiene a los puntos a y b (plano O_{aib}) con la dirección de la línea de intersección de los planos A y B (I_{AB}) define el punto i. Un plano que contenga a N_a y N_b define la posición de N_i sobre la línea de intersección. N_i es la resultante de las fuerzas normales N_a y N_b en un plano vertical paralelo a la línea de intersección.

Una vez definida la posición de N_1 se puede obtener directamente el ángulo aparente de fricción ϕ_i , resultante de la resistencia combinada de los planos A y B; midiéndolo en la proyección estereográfica. También se puede obtener en la proyección estereográfica el ángulo η_i entre la fuerza normal resultante N_1 y el vector peso W (representado por el centro de la red estereográfica).

El factor de seguridad para el caso de resistencia combinada de dos planos se establece como:

$$F = \frac{\text{TAN } \phi_i}{\text{TAN } \eta_i}$$

Para el caso del túnel "Barrientos" se aplicó este procedimiento para el cálculo del factor de seguridad de los taludes de los cortes recomendados durante los estudios geofísicos.

De acuerdo con el análisis preliminar (estereogramas 11,12,13 y 14) se observó que podrían presentarse problemas de inestabilidad por diferentes posiciones de las líneas de intersección entre familias de fracturas.

En los estereogramas 15, 16, 17 y 18 se analiza el factor de seguridad de los taludes afectados por la intersección de las familias de fracturas 1 y 3, 2 y 3, 3 y 4; y 4 y 1 respectivamente. Los valores del factor de seguridad obtenidos son los siguientes:

INTERSECCION	FACTOR DE SEGURIDAD DEL TALUD
1 y 3	0.372
2 y 3	0.305
3 y 4	1.072
4 y 1	1.777

Finalmente, de acuerdo con los valores anteriores se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El talud derecho del corte en el cadenamamiento 17+650 está afectado por las intersecciones 1 y 3, 3 y 2; y 3 y 4, de las cuales --

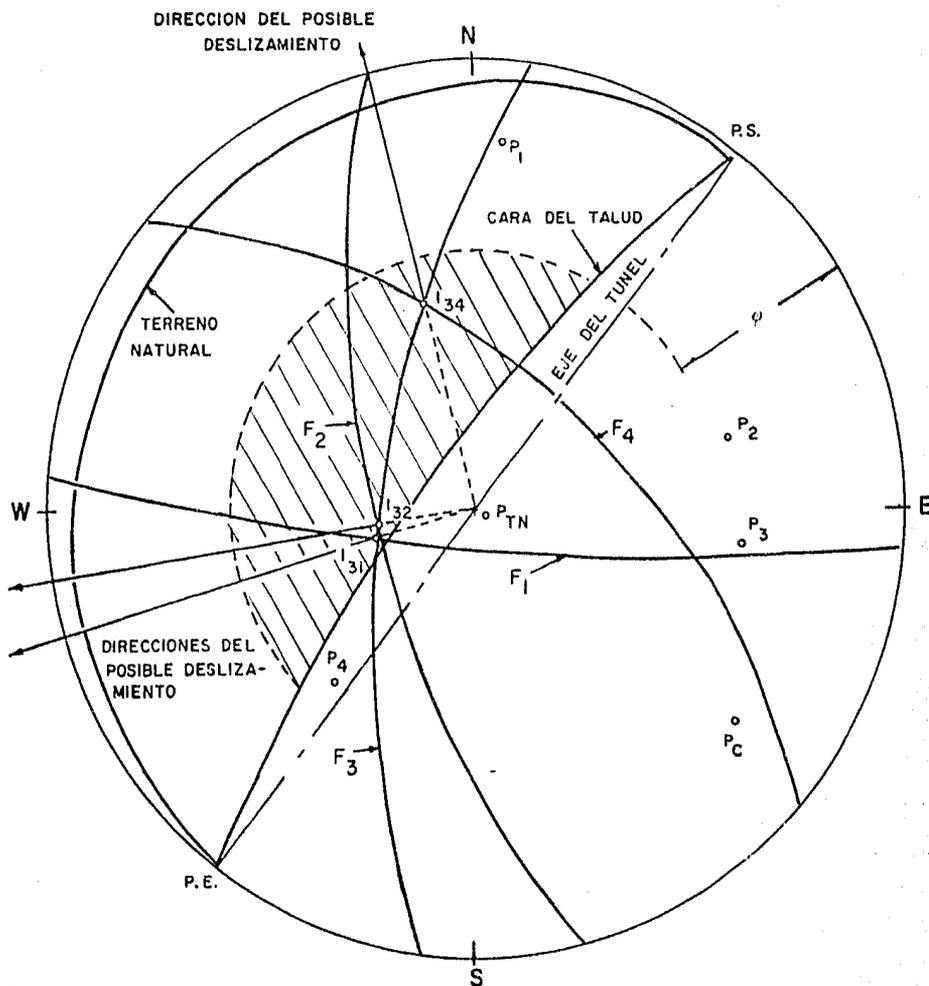
las dos primeras presentan condiciones francas de inestabilidad y la última presenta condiciones de equilibrio límite. Además de -- acuerdo con la posición que tiene el vector peso con respecto a -- la envolvente de los conos de fricción, el deslizamiento se produciría hacia abajo de la línea de intersección.

- El talud izquierdo del corte en el cadenamiento 17+650 está afectado por la intersección 1 y 4 que es estable.

- El talud derecho del corte en el cadenamiento 17+960 está afectado por las intersecciones 1 y 3, 2 y 3; y 3 y 4, de las cuales -- las dos primeras presentan condiciones de inestabilidad y la última condiciones de equilibrio límite. El deslizamiento se produciría hacia abajo de la línea de intersección.

- El talud izquierdo del corte en el cadenamiento 17+960 está afectado por la intersección 1 y 4 que es estable.

ESTEREOGRAMA 11
 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD DERECHO
 CORTE EN ROCA (EST. 17+650).



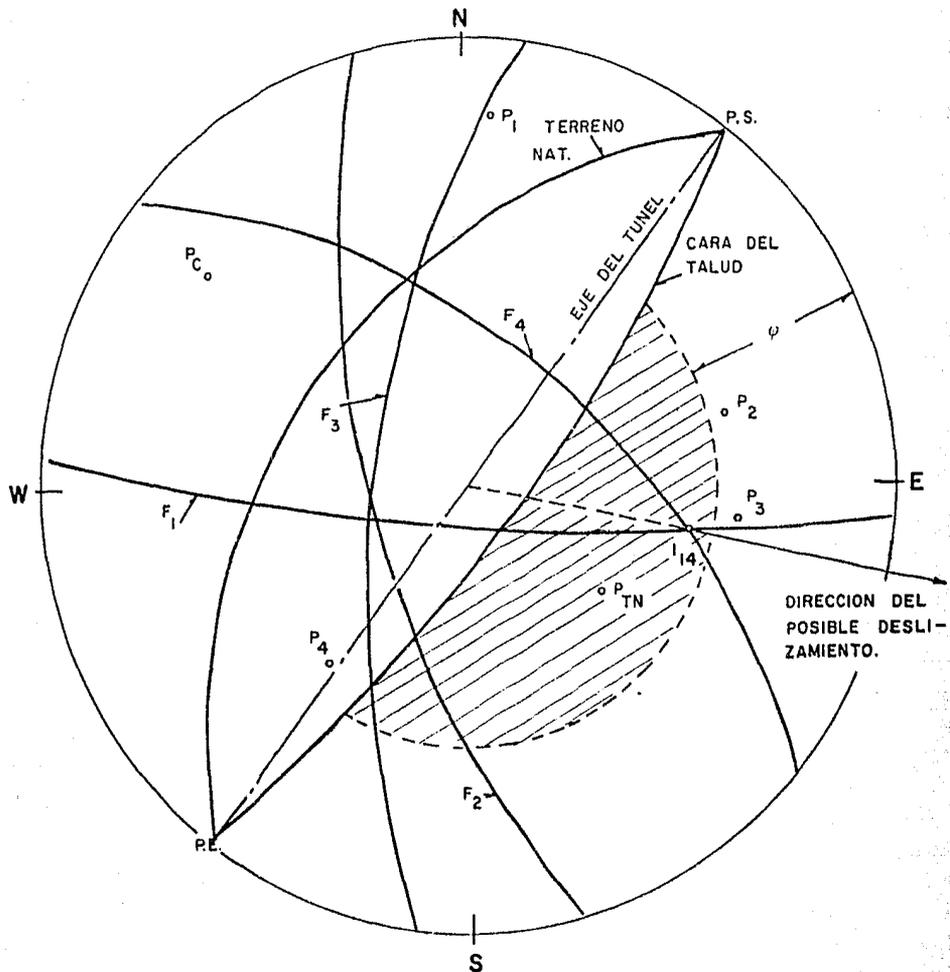
 Condiciones de inestabilidad.

I_{34} .- 39° - $N13^\circ W$

I_{32} .- 64° - $S80^\circ W$

I_{31} .- 63° - $S73^\circ W$

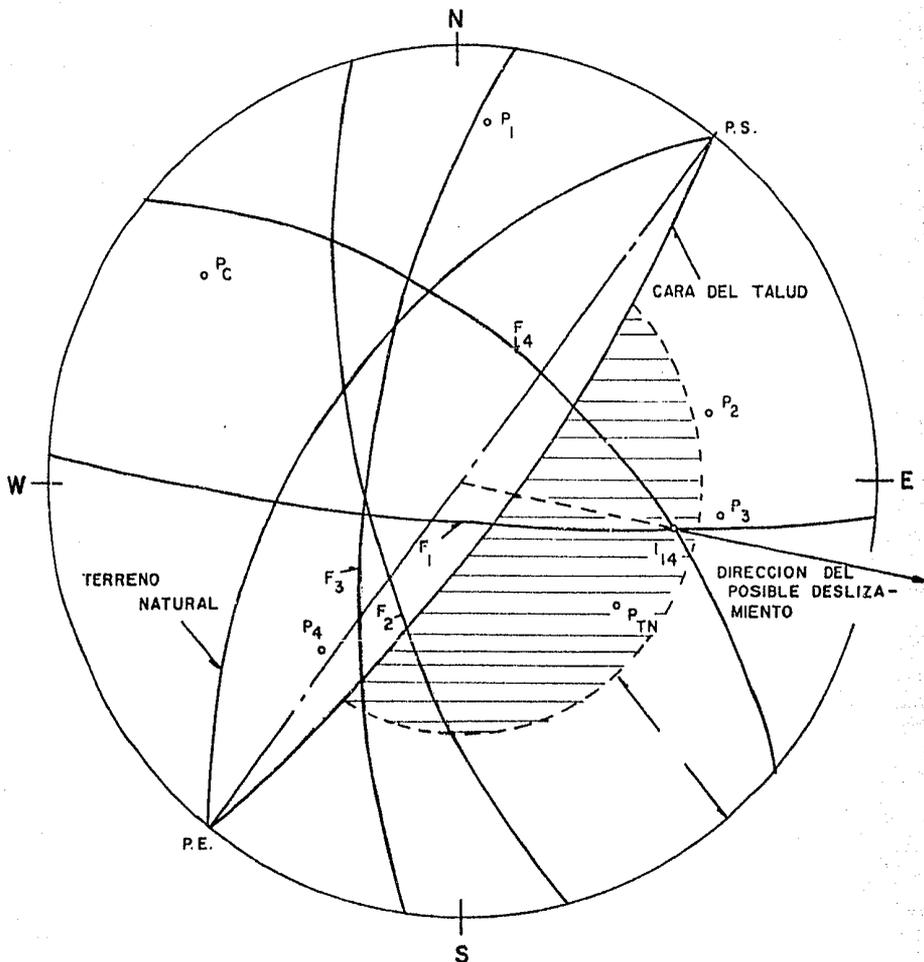
ESTEREOGRAMA 12
 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD IZQUIERDO
 CORTE EN ROCA (EST. 17+650).



 Condiciones de inestabilidad.

$I_{14} \dots 35^\circ - S79^\circ E$

ESTEREOGRAMA 14
 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD IZQUIERDO
 CORTE EN ROCA (EST. 17+960).

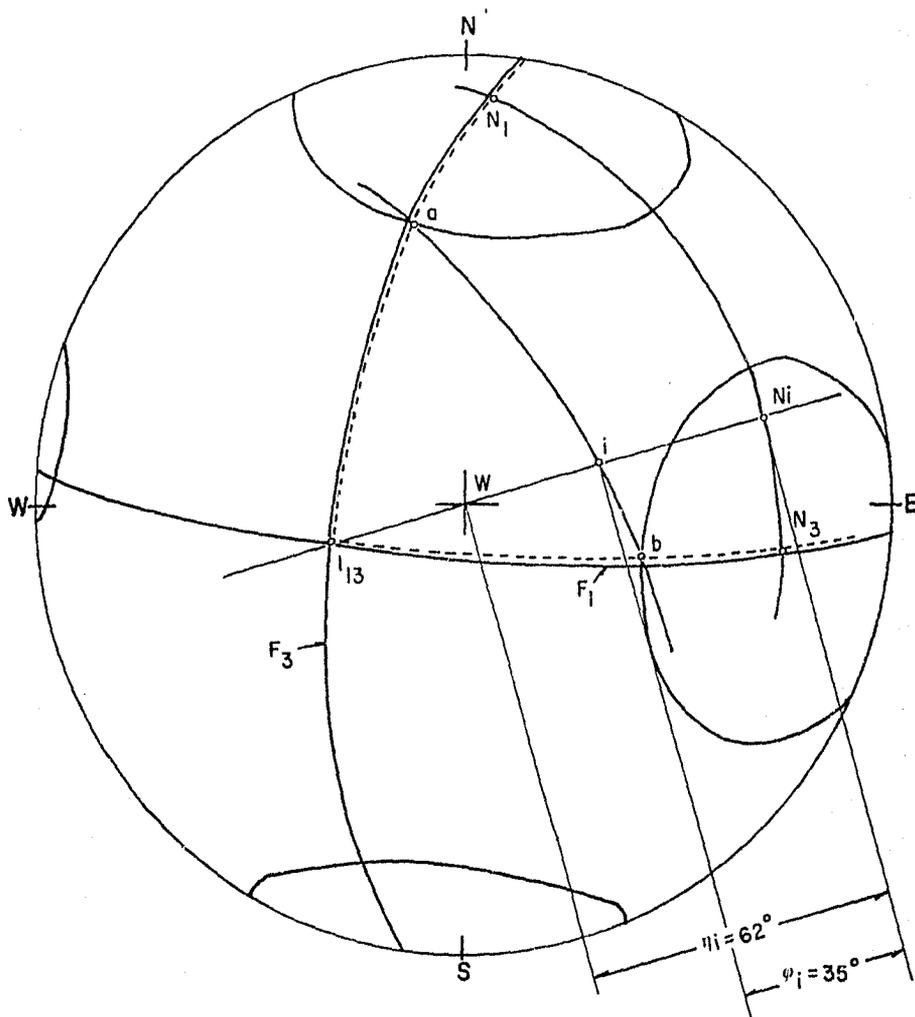


Condiciones de inestabilidad

$I_{14} = 35^\circ - S79^\circ E$

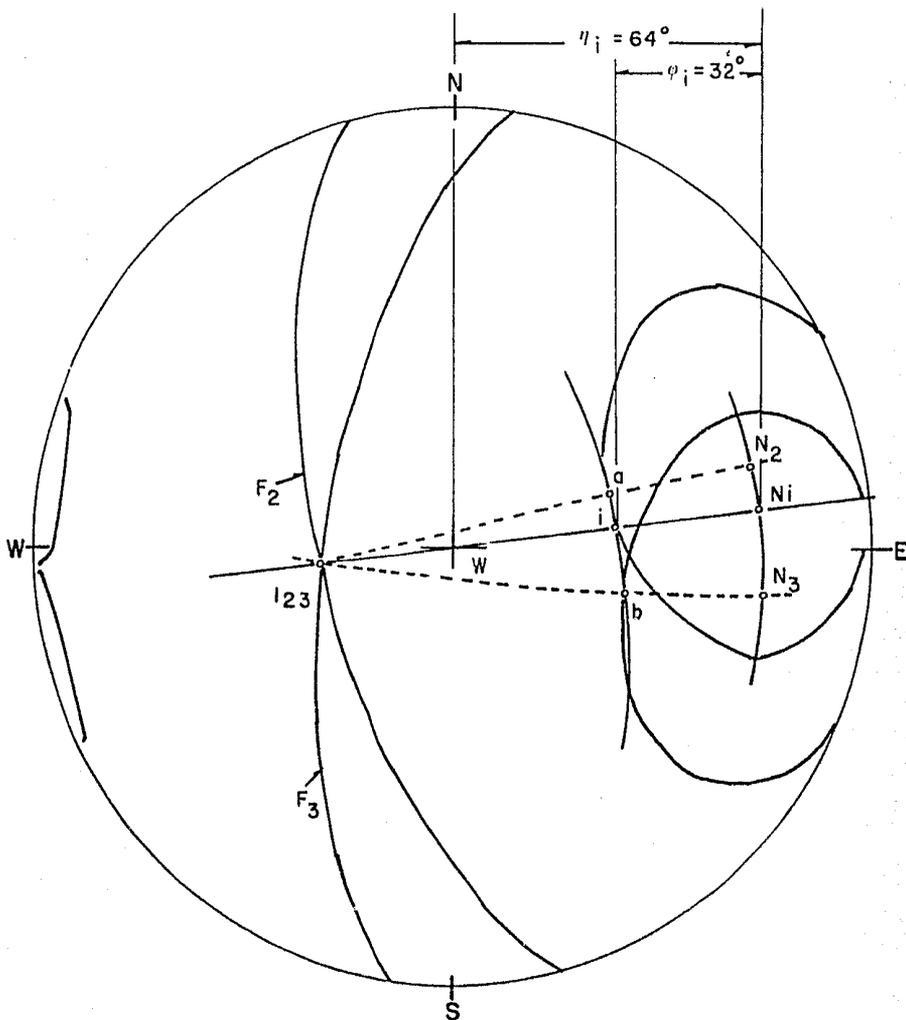
ESTEREOGRAMA 15

DETERMINACION DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL TALUD EN FORMA GRAFICA
(INTERSECCION DE LAS FAMILIAS DE FRACTURAS F_3 Y F_1).



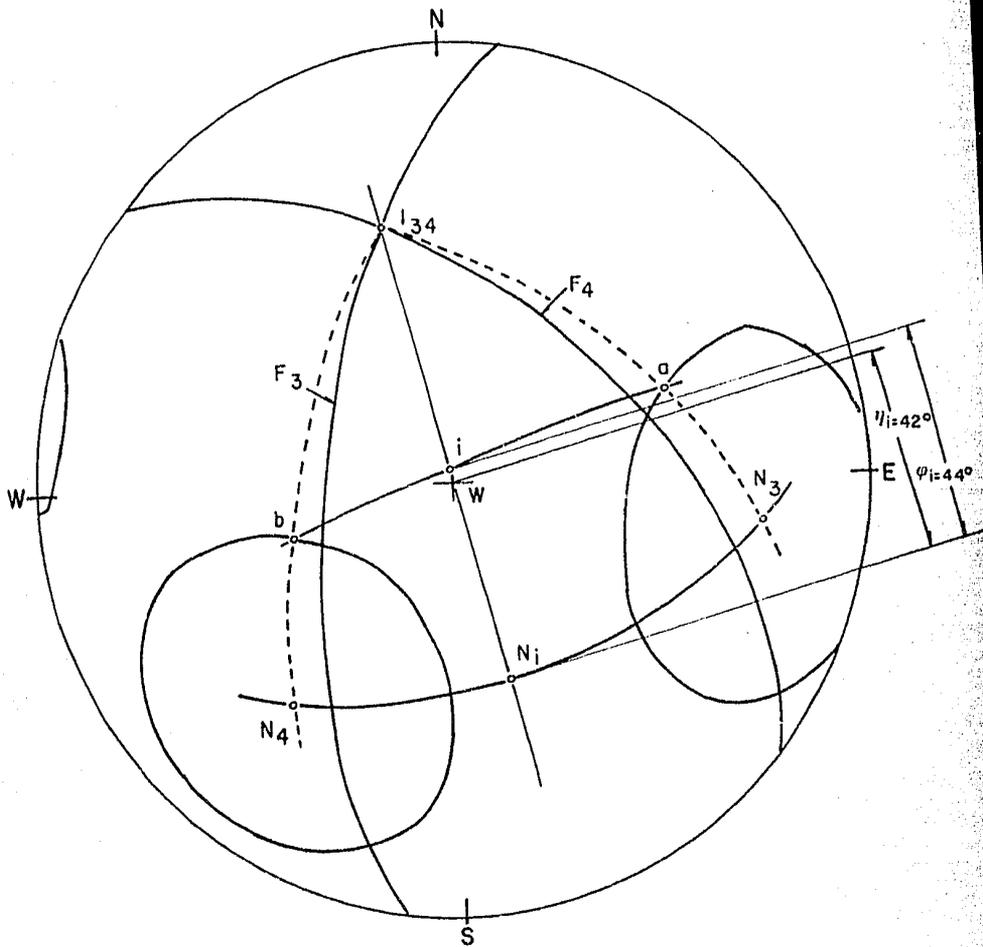
$$F = \frac{\text{TAN } \varphi_i}{\text{TAN } \eta_i} = \frac{\text{TAN } 35^\circ}{\text{TAN } 62^\circ} = \frac{0.7002}{1.88073} = 0.372$$

ESTEREOGRAMA 16
 DETERMINACION DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL TALUD EN FORMA GRAFICA.
 (INTERSECCION DE LAS FAMILIAS DE FRACTURAS F_2 Y F_3).



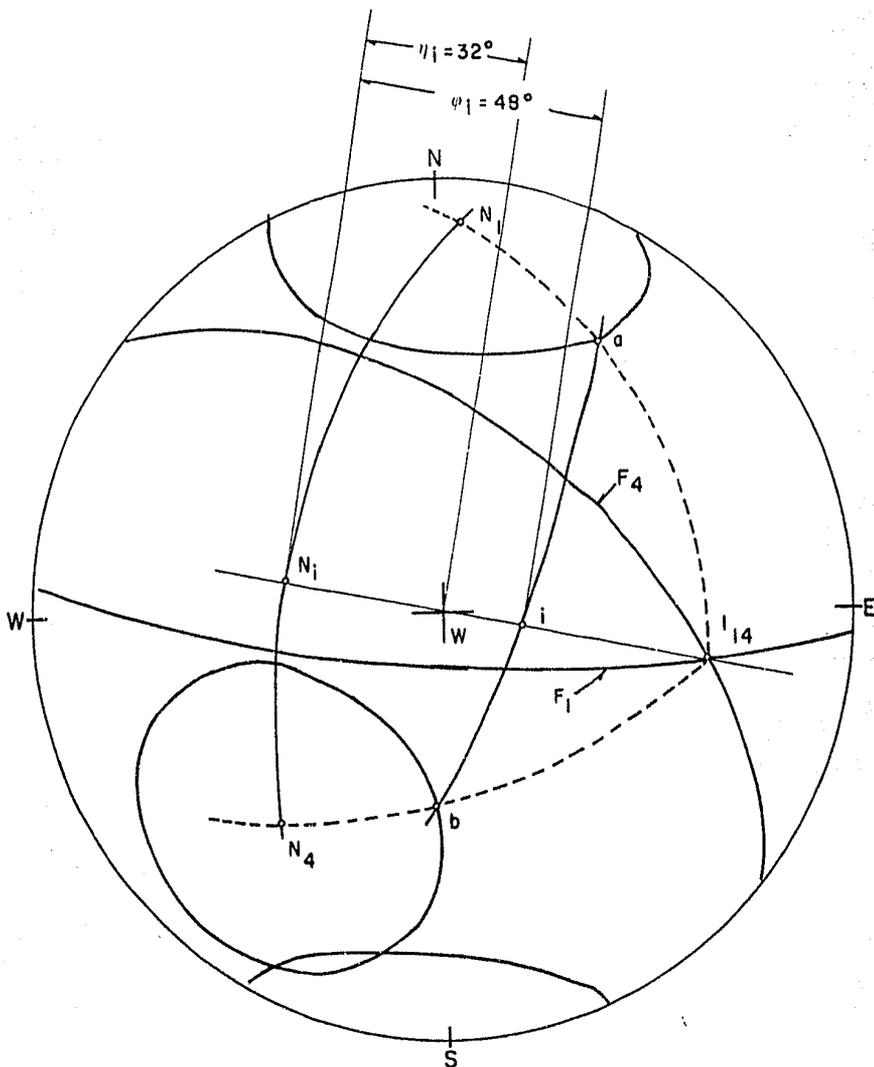
$$F = \frac{\text{TAN } \phi_1}{\text{TAN } \eta_1} = \frac{\text{TAN } 32^\circ}{\text{TAN } 64^\circ} = \frac{0.62487}{2.05030} = 0.3047$$

ESTEREOGRAMA 17
 DETERMINACION DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL TALUD EN FORMA GRAFICA.
 (INTERSECCION DE LAS FAMILIAS DE FRACTURAS F_3 Y F_4).



$$F = \frac{\text{TAN } \varphi_i}{\text{TAN } \eta_i} = \frac{\text{TAN } 44^\circ}{\text{TAN } 42^\circ} = \frac{0.9657}{0.9004} = 1.072$$

ESTEREOGRAMA 18
 DETERMINACION DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL TALUD EN FORMA GRAFICA.
 (INTERSECCION DE LAS FAMILIAS DE FRACTURAS F_1 Y F_4).



$$F = \frac{\text{TAN } \varphi_1}{\text{TAN } \eta_1} = \frac{\text{TAN } 48^\circ}{\text{TAN } 32^\circ} = \frac{1.1106125}{0.6248693} = 1.777$$

REFERENCIAS DEL CAPITULO 5.

- 1.- AMBRASEYS, N.N Y HENDRON, A.
J. JR., 1968.-
Comportamiento Dinámico de los Maci-
zos Rocosos.- Mecánica de Rocas en -
la Ingeniería Práctica, Stagg y Zien-
kiewicz Edits., Editorial Blume, Bar-
celona, España.
- 2.- BARTON N., LIEN R Y LUNDE J.,
1974.-
Engineering Classification of Rock -
Masses for the Design of Tunnel Su-
pport. Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4,
p. 189-236.
- 3.- BARTON N., 1976.-
Recent Experiences with the Q-System
of Tunnel Support Design. Proc. Sym-
posium on Exploration for Rock Engi-
neering, Johannesburg, Vol. 1, p. --
107-117.
- 4.- BIENIAWSKI Z.T.,1974.-
Geomechanics Classification of Rock_
Masses and its Application in Tunne-
ling. Proc. Third International Con-
gress on Rock Mechanics, ISRM, Den-
ver, Vol. 11A, p.27-32.
- 5.- BIENIAWSKI Z. T., 1976.-
Rock Mass Classification in Rock ---
Engineering. Proc. Symposium on Ex-
ploration for Rock Engineering, Jo-
hannesburg, Vol. 1, p. 97-106.
- 6.- DEERE D. U. Y MILLER R. P., -
1966.-
Engineering Classification and Index

- Properties for Intact Rock. Tech. --
Rept. No. AFWL-TR-65-116, U.S. Air -
Force Weapons Lab., New Mexico.
- 7.- EXYCO, S.A., 1983.-
Estudio Sísmico del Túnel Barrientos,
Vía Férrea: México-Querétaro.- Infor
me interno de la Secretaría de Comu-
nicaciones y Transportes. Dirección
Gral. de Servicios Técnicos. Dir. de
Estudios, Subdirección de Geotecnia.
Depto. de Estudios Geotécnicos.
- 8.- GEOSOL, S.A., 1983.-
Exploración y Ensayes de Laboratorio
para el Túnel Barrientos, del F. C.
México-Querétaro. Informe para la --
S.C.T., D.G.S.T.
- 9.- HOEK E. Y BROWN E. T., 1980.-
Underground Excavations in Rock. The
Institution of Mining and Metallurgy.
Imperial College, Londres.
- 10.- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK
MECHANICS, COMISSION ON STANDAR-
RIZATION OF LABORATORY AND FIELD
TESTS, 1978.-
Suggested Methods for the Quantitati
ve Description of Discontinuities in
Rock Masses. Int. Journal Rock Mech.
Min. Sci. and Geomech. Abst., Vol. -
15, p. 319-368. Pergamon Press Ltd.
- 11.- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK
MECHANICS, 1978.-
Suggested Methods for Determining --
the Uniaxial Compressive Strength --
and Deformability of Rock Materials.
Comission on Standarization of Labo-

ratory and Field Tests.

- 12.- INVESTIGACIONES TECNICAS DEL -
SUBSUELO S. A., 1983.- Estudio Geofísico en el Proyecto del
Túnel Barrientos, Edo. de Méx., de -
la Vía Férrea: México-Querétaro, Tra
mo Cuautitlán-Huehuetoca. Informe pa
ra la S.C.T., D.G.S.T.
- 13.- RAGAN DONAL M., 1968.- Structural Geology. John Wiley & Sons
New York.
- 14.- TERZAGHI, K., 1946.- Rock Defects and Loads on Tunnel Su-
pports. Rock Tunnelling with Steel -
Supports. R. V. Proctor & T. White -
Edits. p. 15-99.
- 15.- TURNER F. J. Y WEISS L. E., -
1963.- Structural Analysis of Metamorphic -
Tectonites.
- 16.- HOEK E. Y BRAY J., 1974.- Rock Slope Engineering. The Institu-
tion of Mining and Metallurgy. Impe-
rial College of Science and Technolo
gy, Londres.

CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.- CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden obtener de este trabajo son las siguientes:

- 1) Durante la investigación documental, se observó que existe una gran variedad de criterios en lo referente a la geología de la Cuenca del Valle de México. Esta disparidad de criterios entre los autores que han estudiado esta región se debe principalmente a una exploración incompleta de la Cuenca.
- 2) El estudio geofísico que presentó mayor correlación con la perforación y obtención de muestras fué el de resistividad eléctrica. El estudio geosísmico presentó algunas diferencias debidas a que no fué posible utilizar todas las perforaciones para hacer el estudio.
- 3) Los valores de resistencia a la compresión presentan una gran diferencia entre ellos, aún tratándose de la misma roca. Esto se debe a la diferencia de orientación de las superficies de debilidad con respecto al eje de carga, la diferencia de granulometría de los piroclastos y a un proceso de intemperismo que ha afectado irregularmente al macizo rocoso.
- 4) La configuración estadística de las posiciones de los planos de fracturamiento medidas en la superficie determinó la existencia de cuatro familias de fracturamiento preferente. Estas cuatro familias se verificaron posteriormente durante la construcción del túnel y, efectivamente, resultaron ser las más frecuentes.
- 5) Las características del fracturamiento en cuanto a continui-

dad, espaciamiento, abertura, forma, rugosidad y relleno se conservaron a profundidad en la excavación del túnel.

- 6) El tamaño de bloques que más se correlaciona con las condiciones observadas durante la excavación es el determinado con el número de fracturas volumétricas (J_v), que dió como resultado un tamaño de bloques medianos. El índice tamaño de bloques -- (I_b) que corresponde a las dimensiones promedio de los bloques típicos es de 10 cm, valor que se encuentra alejado de lo observado en la excavación.
- 7) La relación empírica entre el número de fracturas volumétricas (J_v) y el índice de calidad de roca (RQD) dada por:
 $RQD = 115 - 3.3 J_v$ no se cumple para los valores de RQD obtenidos en los núcleos de perforación debido a que el J_v se determina midiendo el espaciamiento perpendicularmente a los planos de fractura y los sondeos mecánicos están orientados en una dirección vertical que no corresponde con la normal de los planos de fracturamiento.
- 8) La aplicación de las clasificaciones geomecánicas de N. Barton y Z. T. Bieniawski condujo a las siguientes conclusiones:
- a) La estimación del revestimiento primario del túnel hecha con base en las clasificaciones geomecánicas resultó adecuada para las condiciones que se presentaron en la excavación. Se puede considerar que el revestimiento resultó "sobrado" o conservador para la práctica que generalmente se establece en América. Sin embargo, según los criterios de proyecto europeos que resultan más conservadores, la estimación del revestimiento primario sería adecuada.
 - b) Los métodos de excavación sugeridos por las clasificaciones geomecánicas fueron modificados durante la construcción, es decir, en lugar de excavar a media sección y --

banquear se optó por utilizar el método belga de excavación para dosificar los explosivos y tener más seguridad en el avance de la excavación.

- c) El tiempo de estabilidad sin soporte, así como la longitud sin revestimiento obtenidos a partir de las clasificaciones geomecánicas resultaron ser menores a los tiempos y longitudes que se manejaron durante la construcción.
- d) En el caso del túnel "Barrientos" las dos clasificaciones geomecánicas empleadas resultaron ser equivalentes; esto se debe a que en algunos tramos a profundidad se utilizó la relación empírica entre el índice Q y el índice RMR dada por: $RMR = 9 \log_e Q + 44$, en donde no se disponía de los resultados de los ensayos a compresión uniaxial. Otro factor que influyó para la equivalencia entre las clasificaciones geomecánicas utilizadas fué la uniformidad de litología, grado de fracturamiento y condiciones hidráulicas en el macizo rocoso. Cabe mencionar que en otras condiciones en las que se han utilizado simultáneamente las clasificaciones geomecánicas de Barton y Bieniawski se han encontrado diferencias considerables en la evaluación de la calidad del macizo rocoso y en la estimación del revestimiento primario (2).
- e) En general, las clasificaciones geomecánicas resultaron ser de gran ayuda para estimar el revestimiento primario y reducir las incertidumbres en el proyecto. Sin embargo, las predicciones hechas por estas clasificaciones requieren "afinarse" con el seguimiento del túnel en construcción para modificar el proyecto de acuerdo con las condiciones geológicas que se presenten en la excavación.
- 9) Los análisis de estabilidad en la bóveda y en las paredes del túnel por medio de las proyecciones estereográficas resulta--

ron de utilidad para el proyecto del revestimiento. Los bloques que se obtuvieron en la excavación fueron aproximadamente el 1% del volumen y peso estimado con las proyecciones estereográficas; sin embargo, estos bloques únicamente representan una pequeña parte de la cuña susceptible de fallar por gravedad o deslizamiento que se tiene que considerar en el proyecto.

- 10) El análisis de estabilidad de los taludes de los cortes en los portales del túnel efectuado con métodos gráficos utilizando el método del "cono de fricción" resultó ser aproximado y equivalente a resultados obtenidos con otros métodos gráficos y analíticos.

6.2.- RECOMENDACIONES

- 1) Es evidente el desconocimiento geológico que se tiene de la Cuenca del Valle de México y que tuvo consecuencias desastrosas en el sismo del 19 de septiembre de 1985.
Es conveniente que las instituciones responsables se dediquen a efectuar una exploración completa y detallada encaminada a delimitar zonas de riesgo potencial y a establecer criterios para modificar los reglamentos de construcción y las áreas de asentamientos humanos.
- 2) La aplicación simultánea de dos o más clasificaciones geomecánicas no conduce a una mejor comprensión del comportamiento de un macizo rocoso. Es más apropiado aplicar una sola clasificación y evaluar separadamente aquéllos factores que se consideren importantes y que no se incluyan en la clasificación utilizada (por ejemplo: orientación de las discontinuidades para complementar el índice Q).
- 3) El cálculo del módulo de deformabilidad de la roca o módulo de Young dinámico (Ed) se utilizó en el caso del túnel "Ba---

rrientos " como un dato de entrada al aplicar un programa de computadora, que por medio del método de elementos finitos -- analiza la interacción roca - revestimiento para después elegir un modelo de cálculo más simple de acuerdo con el comportamiento observado en computadora.

Para el proyecto del revestimiento del túnel no es posible -- utilizar el módulo de deformabilidad dinámico; debe emplearse el módulo estático determinado preferentemente en ensayos triaxiales de la roca intacta. Sin embargo existen algunas correlaciones entre el módulo dinámico y estático teniendo en cuenta una valoración numérica de la calidad de la roca con base en el RQD o la velocidad de propagación relativa de ondas sísmicas en campo y laboratorio (1).

- 4) En el cálculo del módulo de deformabilidad dinámico (E_d) se supuso un valor de la relación de Poisson con base en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas P. Para evaluar la relación de Poisson con más exactitud se deben utilizar geófonos que puedan registrar las ondas sísmicas P y S.
- 5) Es necesario retroalimentar las hipótesis que se establecieron durante la exploración y el proyecto del túnel "Barrientos" con las observaciones que se vayan haciendo durante la construcción. No hay que olvidar que: "El proyecto de un túnel termina cuando termina la construcción".
- 6) Es frecuente, en la construcción actual de túneles ferroviarios en México, hacer grandes cortes en los portales. Generalmente estos cortes producen problemas de inestabilidad de los taludes que son inadmisibles en una vía férrea. Convendría reducir estos cortes y tratar de resolver los problemas de inestabilidad de la excavación causados por materiales muy fracturados e intemperizados desde dentro del túnel. Cada caso tendrá que estudiarse en cuanto a sus ventajas e inconvenientes.

Para el caso del túnel "Barrientos se conservó la idea original de excavar un túnel más largo que el actual afrontando -- los problemas que se pudieran presentar por los materiales in temperizados y de mala calidad sin que se presentaran problemas de inestabilidad o sobreexcavación.

REFERENCIAS DEL CAPITULO 6.

- 1.- AMBRASEYS, N.N Y HENDRON, A.J.
JR., 1968.- Comportamiento Dinámico de los Maci-
zos Rocosos.- Mecánica de Rocas en -
la Ingeniería Práctica, Stagg y Zien-
kiewicz Edits., Editorial Blume, Bar-
celona, España.

- 2.- KAISER P. K. Y GALE A., 1985.- Evaluation of Two Rockmass Classifi-
cation Systems. Preprints, Interna-
tional Symposium on the Role of Rock
Mechanics in Excavations for Mining_
and Civil Works. ISRM, Sept. 2-4, --
Zacatecas, México. pp. 339-345.

APENDICE A

A.1.- CLASIFICACION GEOMECANICA DE BIENIAWSKI PARA MACIZOS ROCOSOS.

Para cualquier persona que tenga que resolver un problema relacionado con excavaciones subterráneas, resulta evidente que un índice que únicamente evalúa una propiedad mecánica de una roca no es adecuado como un indicador del comportamiento complejo de la masa rocosa que rodea una excavación subterránea.

Consecuentemente, parece ser necesario incluir alguna combinación de factores tales como el índice de calidad de roca (RQD), la influencia del intemperismo y el relleno de arcilla en las discontinuidades, etc.

Un sistema de clasificación de este tipo ha sido propuesto por Bieniawski (3,4) del South African Council for Scientific and Industrial Research (CSIR). Esta clasificación es conocida como índice RMR (rock mass rating) o clasificación CSIR.

Bieniawski (4) sugirió que una clasificación para macizos rocosos -- fracturados, debería:

- 1) Dividir el macizo rocoso en grupos de comportamiento similar;
- 2) proporcionar una buena base para la comprensión de las características del macizo rocoso;
- 3) facilitar la planeación y el proyecto de las estructuras en la roca obteniendo datos cuantitativos que se requieren para la solución de problemas de ingeniería reales; y
- 4) proporcionar una base común para una comunicación efectiva entre todas las personas involucradas en un problema geomecánico.

Estos objetivos deben lograrse asegurando que la clasificación adoptada tiene las siguientes características:

- 1) es simple y con términos significativos; y
- 2) está basada en parámetros medibles que pueden determinarse en el campo rápida y económicamente.

Para satisfacer estos requisitos, Bieniawski originalmente propuso - que su "Clasificación Geomecánica" debería incorporar los siguientes parámetros:

- 1) Índice de calidad de roca RQD,
- 2) estado de intemperismo,
- 3) resistencia a la compresión simple de la roca intacta,
- 4) espaciamiento de fracturas y planos de estratificación,
- 5) rumbos y echados de las discontinuidades,
- 6) abertura de discontinuidades,
- 7) continuidad de discontinuidades, y
- 8) flujo de agua subterránea.

Después de que se adquirió alguna experiencia en la aplicación práctica de la Clasificación Geomecánica CSIR original, Bieniawski (4) modificó su sistema de clasificación eliminando el estado de intemperismo como un parámetro separado ya que su efecto está relacionado con la resistencia a la compresión simple e incluyendo la abertura y continuidad de las discontinuidades en un parámetro nuevo: la condición de las discontinuidades. Además, el rumbo y el echado de las discontinuidades se eliminaron de la lista de los parámetros de clasificación básicos y sus efectos se consideran como una corrección o ajuste después de que los parámetros básicos han sido considerados.

Los cinco parámetros de clasificación básicos que actualmente se consideran son:

1.- Resistencia a la compresión de la roca intacta.

Bieniawski utiliza la clasificación de la resistencia a la compresión uniaxial para roca intacta propuesta por Deere y Miller (6) que se reproduce en la tabla A.1. Alternativamente puede usarse el índice de car

ga puntual, excepto en rocas de resistencia muy baja, como una medida de la resistencia de la roca intacta.

2.- Indice de calidad de la roca.

Se utiliza el RQD de Deere como una medida de la calidad de los núcleos extraídos en la perforación.

3.- Espaciamiento de fracturas.

En este contexto, el término fractura se utiliza para indicar todas las discontinuidades que pueden ser: fracturas, fallas, estratificación u otras superficies de debilidad. Una vez más, Bieniawski utiliza una clasificación propuesta por Deere (5) y se reproduce en la tabla A.2.

TABLA A.1.- CLASIFICACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE DEERE Y MILLER.

DESCRIPCION	RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAIXIAL		
	lb/in ²	Kgf/cm ²	MPa
Resistencia muy baja	150 - 3 500	10 - 250	1 - 25
Resistencia baja	3 500 - 7 500	250 - 500	25 - 50
Resistencia media	7 500 - 15 000	500 - 1 000	50 - 100
Resistencia alta	15 000 - 30 000	1 000 - 2 000	100 - 200
Resistencia muy alta	> 30 000	> 2 000	> 200

4.- Condición de las discontinuidades.

Este parámetro considera la abertura o separación de las discontinuidades, su continuidad, la rugosidad superficial, la condición de las paredes (dura o suave), y la presencia de materiales de relleno en las fracturas.

5.- Condiciones del agua subterránea.

Se hace un intento para tomar en cuenta la influencia del flujo de agua subterránea en la estabilidad de excavaciones subterráneas en términos del flujo observado dentro de la excavación, la relación de la pre---

sión hidrostática en las fracturas con respecto al esfuerzo principal mayor o por medio de alguna observación cualitativa de las condiciones del agua subterránea.

TABLA A.2.- CLASIFICACION DE DEERE PARA
ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES.

DESCRIPCION	ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES
Muy espaciadas	> 3.00 m
Espaciadas	1.00 m a 3.00 m
Moderadamente cercanas	0.30 m a 1.00 m
Cercanas	50.0 mm a 300 mm
Muy cercanas	< 50.0 mm

La manera en la que se incorporan estos parámetros en la Clasificación Geomecánica CSIR para macizos rocosos fracturados se indica en la parte I de la tabla A.3.

Bieniawski reconoció que cada parámetro no necesariamente contribuye igualmente al comportamiento del macizo rocoso, por lo tanto, aplicó una serie de calificaciones por importancia a sus parámetros siguiendo el concepto utilizado por Wickham, Tiedemann y Skinner (9).

Se establece un número de puntos o calificación para cada uno de los parámetros dentro de un rango determinado y se llega a una calificación total para el macizo rocoso, sumando las calificaciones para cada uno de los parámetros. Esta calificación total debe ajustarse de acuerdo con la orientación de las discontinuidades aplicando las correcciones dadas en la parte II de la tabla A.3. En la tabla A.4 se proporciona una explicación de los términos descriptivos utilizados para este propósito.

La parte III de la tabla A.3 muestra la clase y la descripción que se da a los macizos rocosos de acuerdo a la calificación total.

La interpretación de estas calificaciones en términos de tiempo sin soporte para excavaciones subterráneas y de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante se muestran en la parte IV de la tabla A.3.

APLICACIONES DE LA CLASIFICACION GEOMECANICA DE BIENIAWSKI.

Bieniawski ha relacionado su clasificación geomecánica con el tiempo sin soporte de un claro activo sin soporte como fué originalmente propuesto por Lauffer (8) (Fig. A.1). La relación propuesta se muestra en la figura A.2. Esta carta está basada en un grupo de casos que resumen la práctica sudafricana, que es menos conservadora que la experiencia austriaca.

En la tabla A.5 se presenta otra aplicación. En esta tabla, Bieniawski (4) presenta la relación entre la clase del macizo rocoso y la relación con el revestimiento temporal para túneles de 5 a 12 m de ancho excavados con explosivos.

También se ha demostrado, basándose en casos prácticos, que el RMR - puede ser relacionado con el módulo de deformabilidad o módulo de Young - in situ de la roca (E). La relación está determinada por la expresión:

$E = 2(\text{RMR}) - 100$ para valores de RMR superiores a 55. Esta relación se ha obtenido involucrando diversos tipos de roca como son: calizas, areniscas, diabasas, pizarras y otras (7).

TABLA A.3.- CLASIFICACION GEOMECANICA DE BIENIAWSKI PARA MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS.

I.- PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS CALIFICACIONES.

PARAMETRO		RANGOS DE VALORES						
Resistencia a la compresión de la roca intacta.	Indice de resistencia a la carga puntual.	> 8 MPa	4 - 8 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para este rango bajo, se prefiere la prueba de compresión uniaxial.		
	Resistencia a la compresión uniaxial.	> 200 MPa	100 - 200 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	10 - 25 MPa	3 - 10 MPa	1 - 3 MPa
CALIFICACION		15	12	7	4	2	1	0

Indice de calidad de roca (RQD).	90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %
CALIFICACION	20	17	13	8	3

Espaciamento de discontinuidades.	> 3.00 m	1.00 - 3.00 m	0.30 - 1.00 m	50 - 300 mm	< 50 mm
CALIFICACION	30	25	20	10	5

Condiciones de las discontinuidades.	Superficies muy rugosas.	Superficies ligeramente rugosas.	Superficies ligeramente rugosas.	Superficies cizalladas o milonita con espesor menor a 5 mm o discontinuidades con abertura de 1 a 5 mm.	Milonita suave con espesor mayor de 5 mm o discontinuidades con abertura mayor a 5 mm.
	No continuas. Sin separación, contactos con roca dura	Separación menor a 1 mm, contactos con roca dura.	Separación menor a 1 mm, contactos con roca suave.	Discontinuidades persistentes, superficie lisa.	Discontinuidades persistentes.
CALIFICACION	25	20	12	6	0

Agua subterránea.	Gasto por cada 10 m de longitud de túnel.	Ninguno	< 25 lbs/min	25 - 125 lbs/min	> 125 lbs/min
	Presión de agua - Belación: en las disconti- Esfuerzo principal - pal mayor.	0	0.0 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
	Condiciones generales.	Completamente seco	Únicamente húmedo (agua intersticial)	Agua a presión moderada	Problemas severos de agua
CALIFICACION		10	7	4	0

TABLA A.3 (CONTINUACION).

II.- CALIFICACION DE AJUSTE PARA LA ORIENTACION DE DISCONTINUIDADES.

Rumbo y echado de las discontinuidades.		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Calificaciones.	Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Cimentaciones	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60

III.- CLASES DE MACIZOS ROCOSOS DETERMINADAS CON LAS CALIFICACIONES TOTALES.

CALIFICACION	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
No. de clase	I	II	III	IV	V
Descripción	Roca muy buena	Roca buena	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala

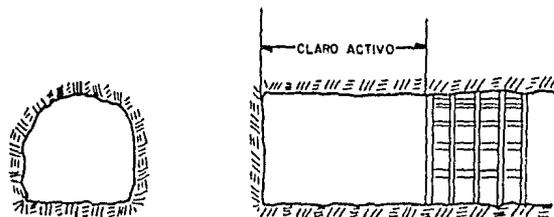
TABLA A.3 (CONTINUACION)

IV.- SIGNIFICADO DE LAS CLASES DE MACIZOS ROCOSOS.

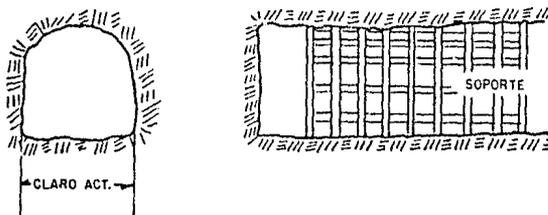
Clase No.	I	II	III	IV	V
Tiempo promedio de estabilidad sin soporte.	10 años para un claro activo de 5 m.	6 meses para un claro activo de 4 m.	1 semana para un claro activo de 3 m.	5 horas para un claro activo de 1.5 m	10 minutos para un claro activo de 0.50 m.
Cohesión del macizo rocoso.	> 300 KPa	200 - 300 KPa	150 - 200 KPa	100 - 150 KPa	< 100 KPa
Angulo de fricción del macizo rocoso.	> 45°	40° - 45°	35° - 40°	30° - 35°	< 30°

TABLA A.4.- EFECTO DE LA ORIENTACION DE LAS DISCONTINUIDADES EN EL TUNELEO.

Rumbo perpendicular al eje del túnel				Rumbo paralelo al eje del túnel		Echado de 0° a 20° independiente del rumbo
Excavación a favor del echado		Excavación en contra del echado				
Echado 45° - 90°	Echado 20° - 45°	Echado 45° - 90°	Echado 20° - 45°	Echado 45° - 90°	Echado 20° - 45°	Desfavorable
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	



A: Revestimiento olejado del frente de excavación.



B: Revestimiento cercano al frente de excavación.

FIGURA A.1.- Definición del claro activo según Lauffer (8).

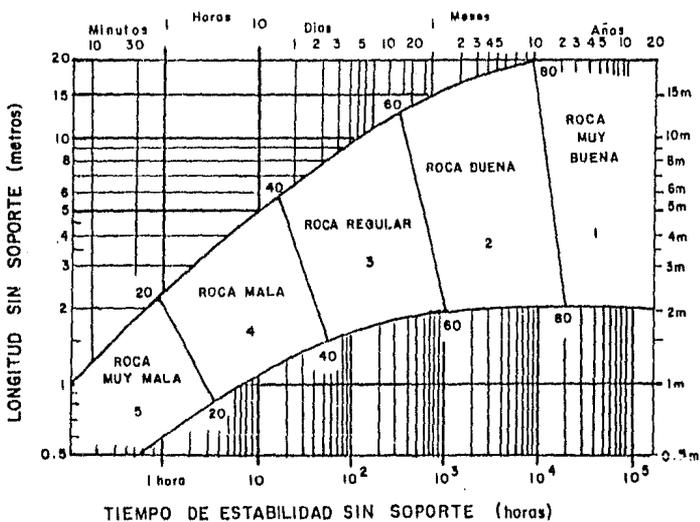


FIGURA A.2.- Relación entre el tiempo de estabilidad sin soporte y la clasificación de Bieniawski.

TABLA A.5.- GUIA PARA LA SELECCION DEL SOPORTE PROVISIONAL EN TUNELES
POCO PROFUNDOS, DE 5 A 12 m DE DIAMETRO.

Clase de macizo rocoso	Diferentes sistemas de soporte para excavaciones por perforación y voladura. Esfuerzo vertical menor a 25 MPa.			Excavación
	Principalmente anclas*.	Principalmente concreto lanza do.	Principalmente marcos de acero.	
I Roca muy buena RMR: 81 - 100	En general no requiere soporte, en algunas oca siones anclaje en algunos puntos.			A sección com pleta con 3 m de avance.
II Roca buena RMR: 61 - 80	Espacio entre anclas de 1.5 a 2.0 m, oca sionalmente ma lla metálica.	Concreto lanza do 50 mm en la clave.	No económico	Sección com pleta. Avance 1.0 - 1.5 m.- Revestimiento completo a 20 m del frente.
III Roca regular RMR: 41 - 60	Espacio entre anclas de 1.0 a 1.5 m además malla metálica y 30 mm de con creto lanzado en la clave -- donde se neces ite.	Concreto lanza do 100 mm en la clave y 50 mm en las paredes, ocasionalmente malla metálica y anclas donde sea necesario.	Marcos lige ros con separación de 1.5 a 2.0 m.	Excavar media sección y ban quear. Avance de 1.5 - 3.0m en la media sección. Com menzar reves timiento des pués de la vo ladura. Reves timiento com pleteo a 20 m del frente.
IV Roca mala RMR: 21 - 40	Espacio entre anclas 0.5 a 1.0 m, malla metálica y de 30 a 50 mm de concreto lanza do en clave y paredes.	Concreto lanza do 150 mm en la clave y 100 mm en las paredes, con malla metálica y anclas espaciadas entre 1.5 y 3.0 m	Marcos media nos separados entre 0.7 y 1.5 m, con 50 mm de concre to lanzado en la clave.	Excavar media sección y ban quear. Avance de 1.0 - 1.5m en la media sección. Colo car revesti miento confor me avance la excavación.
V Roca muy mala RMR: < 20	No recomendable	Concreto lanza do 200 mm en la clave y 150 mm en las paredes, con malla de alambre, anclas y marcos lige	Marcos pasados separados 0.7 m, concreto lanzado 75 mm lo más pronto posible.	Túneles pilo to múltiples. Avance de 1.0 a 1.5 m en la media sección. Colocar reves timiento con forme avance

TABLA A.5.- (CONTINUACION).

Clase de macizo rocoso	Principalmente anclas*.	Principalmente concreto lanzado.	Principalmente marcos de acero.	Excavación
<p style="text-align: center;">V</p> <p style="text-align: center;">Roca muy mala.</p> <p style="text-align: center;">RMR:< 20</p>		ros.	-	<p>la excavación.</p> <p>Concreto lanzado lo más pronto posible después de la voladura.</p>

* Anclas de 20 mm de diámetro, cubiertas con resina, largo igual a $\frac{1}{4}$ del ancho del Túnel.

A.2.- CLASIFICACION GEOMECANICA DE BARTON, LIEN Y LUNDE (1).

Con base en una evaluación de un gran número de casos de estabilidad en excavaciones subterráneas, Barton, Lien y Lunde (1) del Norwegian Geotechnical Institute (NGI) propusieron un índice para la determinación de la calidad para fines de tuneleo de un macizo rocoso.

El valor numérico de este índice Q está definido por:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right); \text{ Donde:}$$

RQD.- es el índice de calidad de roca establecido por Deere.

J_n.- es el número de familias de fracturas.

J_r.- es el número de rugosidad de las fracturas.

J_a.- es el número de alteración de las fracturas.

J_w.- es el factor de reducción por la presencia de agua.

SRF.- es un factor reductor debido al estado de esfuerzos en el macizo rocoso.

Los valores numéricos de cada uno de los factores se determinan de acuerdo con la tabla A.6.

Barton, Lien y Lunde, explicando como llegaron a la ecuación utilizada para determinar el índice Q, hacen los siguientes comentarios:

El primer cociente (RQD/J_n), representa la estructura del macizo rocoso, es una medida del tamaño de bloques o partículas, con los dos valores extremos (100/0.5) y (10/20) que difieren por un factor de 400. Si se interpreta el cociente en unidades de centímetros, los valores extremos - de 200 a 0.5 cm se ven burdos; pero son aproximaciones más o menos realistas. Probablemente, los bloques más grandes pueden ser varias veces mayores y los fragmentos más chicos sean menores que la mitad del extremo inferior.

El segundo cociente (J_r/J_a) representa la rugosidad y las caracterís

ticas friccionantes de las paredes de las discontinuidades o de los materiales de relleno. Este cociente aumenta a favor de discontinuidades rugosas e inalteradas en contacto directo. Es de esperarse que estas superficies estarán cercanas a la resistencia máxima al cortante, ya que tienden a dilatarse fuertemente cuando son cizalladas, y por lo tanto, son especialmente favorables para la estabilidad del túnel.

El tercer cociente (J_w/SRF) consiste en dos parámetros de esfuerzo. SRF (stress reduction factor) es una medida de: 1) liberación de la carga en el caso de una excavación a través de zonas de cizallamiento y de rocas que contienen arcilla, 2) esfuerzos propios de la roca en rocas competentes, y 3) cargas por deformación en rocas incompetentes o plásticas. - Puede considerarse como un parámetro de esfuerzo total.

El parámetro J_w es una medida de la presión hidrostática, que tiene un efecto adverso en la resistencia al corte de las discontinuidades debido a la reducción del esfuerzo normal efectivo. Además el agua causa el ablandamiento y el posible lavado en el caso de discontinuidades rellenas con arcilla. El cociente (J_w/SRF) es un factor empírico complicado que describe los "esfuerzos activos".

El índice de calidad de tuneleo de la roca (Q) puede considerarse como una función de tres parámetros:

1. tamaño de bloques (RQD/J_n)
2. resistencia al cortante entre bloques (J_r/J_a)
3. esfuerzo activo (J_w/SRF).

Barton, Lien y Lunde definieron una cantidad adicional que llamaron "dimensión equivalente" (D_e) para relacionar el índice Q con el comportamiento y las necesidades de soporte de una excavación subterránea. Esta dimensión se obtiene dividiendo el claro, diámetro o altura de la excavación (la que sea mayor) entre una cantidad llamada ESR (excavation support ratio). Esta cantidad está relacionada con la utilización que se pretende dar a la obra y con el grado de inestabilidad admisible para cada -

tipo de obra.

$$\text{Así: De} = \frac{\text{Claro, diámetro o altura de la excavación (m)}}{\text{ESR}}$$

Barton (2) proporciona los siguientes valores sugeridos de ESR:

CATEGORIA DE LA EXCAVACION	ESR
A. Excavaciones mineras temporales	3-5
B. Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para plantas hidroeléctricas (excluyendo túneles de alta presión), túneles piloto o de exploración para grandes excavaciones	1.6
C. Excavaciones para almacenamiento, plantas de tratamiento de agua, túneles carreteros y ferroviarios pequeños, túneles de acceso	1.3
D. Excavaciones para estaciones eléctricas, túneles carreteros y ferroviarios grandes, excavaciones para defensa civil, portales, intersecciones	1.0
E. Estaciones eléctricas nucleares subterráneas, estaciones ferroviarias, instalaciones públicas y deportivas, fábricas	0.8

En la figura A.3 se ilustra la relación del índice Q y la dimensión equivalente (De) de una excavación que permanecerá sin revestimiento.

Para estimar el tipo de soporte que requerirá una excavación subterránea; Barton, Lien y Lunde (1) establecieron 38 categorías de soporte - que dependen del valor del índice Q y del valor de la dimensión equivalente como se ilustra en la figura A.4. Las 38 categorías de soporte se detallan en la tabla A.7.

TABLA A.6.- CALIFICACION DE LOS PARAMETROS INDIVIDUALES UTILIZADOS EN LA CLASIFICACION GEOMECANICA DE BARTON, LIEN Y LUNDE.

1.- DESCRIPCION DE CALIDAD.

Calidad de la roca	RQD (%)
A. Muy mala	0 - 25
B. Mala	25 - 50
C. Regular	50 - 75
D. Buena	75 - 90
E. Excelente	90 - 100

Nota: Cuando RQD ≥ 10 , incluyendo el valor 0, se emplea valor 10 en el cálculo de Q.

2.- NUMERO DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES.

	(Jn)
A. Masiva, ninguna o pocas discontinuidades	0.5 a 1.0
B. Una familia	2
C. Una familia mas distribución aleatoria	3
D. Dos familias	4
E. Dos familias mas distribución aleatoria	6
F. Tres familias	9
G. Tres familias mas distribucion aleatoria	12
H. Cuatro o más familias, distribución aleatoria, intensamente fracturada, fragmentos pequeños, etc.	15
I. Roca triturada, granular tipo suelo	20

Nota: En las intersecciones de excavaciones subterráneas úsese $3 \times J_n$ y en portales $2 \times J_n$.

3.- NUMERO DE RUGOSIDAD.

(Jr)

- a) Cuando existe contacto roca con roca en las fracturas, y
 b) Cuando existe contacto con menos de 10 cm de desplazamiento por -
 cortante.

A. Juntas discontinuas	4
B. Asperas y onduladas	3
C. Tersas y onduladas	2
D. Lustrosas y onduladas	1.5
E. Asperas y planas	1.5
F. Tersas y planas	1.0
G. Lustrosas y planas	0.5

- c) Cuando no hay contactos roca con roca al existir desplazamiento -
 por cortante.

H. Rellenas de arcilla, limos, arenas o gravas con espesores tales -
 que impiden el contacto de roca con roca 1.0.

Nota: Sumar 1.0 al Jr si el espaciamiento medio de las discontinuidades importantes es mayor de 3 m.

4.- NUMERO DE ALTERACION Y RELLENO DE FRACTURAS.

- a) Cuando existe contacto entre roca y roca en las discontinuidades,

A. Juntas limpias con rellenos resistentes e impermeables como cuarzo y epidota.	(Ja) 0.75	Ør*(aprox) -
B. Juntas ligeramente oxidadas superficialmente	1.0	(25°-35°)
C. Paredes ligeramente alteradas. Relleno de materiales que no pierden resistencia al deformarse como: roca desintegrada y partículas de arena sin arcilla.	2.0	(25°-30°)
D. Paredes recubiertas o con rellenos arcillo-arenosos que no pierden resistencia con la deformación.	3.0	(20°-25°)

* Ør.- ángulo de fricción residual de la roca.

- E. Rellenos de minerales de arcilla que -- pierden resistencia al deformarse como: caolinita, mica y también talco, yeso - grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los rellenos de esta clase son discontinuos y de 1 a 2 mm de espesor. 4.0 (8°-16°)
- b) Cuando existe contacto entre roca y roca en las juntas con desplazamientos por cortante menores a 10 cm.
- F. Relleno de partículas arenosas o roca - desintegrada sin arcilla. 4.0 (25°-30°)
- G. Rellenos continuos de menos de 5 mm de espesor de arcilla muy consolidada que no pierde resistencia al deformarse. 6.0 (16°-24°)
- H. Rellenos continuos de menos de 5 mm de espesor de arcilla con preconsolidación media o baja, que pierde resistencia al deformarse. 8.0 (12°-16°)
- I. Rellenos continuos de menos de 5 mm de espesor de arcilla de alta plasticidad. El valor de J_a depende del porcentaje - de partículas de arcilla expansiva, de la posibilidad de entrar en contacto -- con el agua, etc. 8.0 a 12.0 (6°-12°)
- c) Cuando no hay contacto con la roca al existir desplazamiento por cortante.
- K.L.M. Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcilla. 6.0, 8.0 6
8.0 a 12 (6°-24°)
- N. Zonas o bandas de limo o arena arcillosa con pequeña cantidad de arcilla (no

pierde resistencia al deformarse).	5.0	-
O.P.Q. Zonas o bandas de arcilla continuas y de espesor considerable (veáse la descripción de la arcilla de G,H,I_ respectivamente).	10.0 a 13.0 ó 13.0 a 20	(6°-24°)

5.- FACTOR DE REDUCCION DADAS LAS CONDICIONES DEL FLUJO DE AGUA.

	(Jw)	Presión hi drostática aproximada (Kg/cm ²).
A. Ambiente seco o flujo reducido por ejemplo, 5 lts/min, localmente.	1.0	1.0
B. Flujo a presión media, lavado ocasional del relleno de las juntas.	0.66	1.0 a 2.5
C. Flujo o presión grandes en roca competente, con juntas limpias.	0.5	2.5 a 10.0
D. Flujo o presión grandes, lavado considerable del relleno de las juntas.	0.33	2.5 a 10.0
E. Flujo excepcionalmente grande o agua a presión durante las voladuras que decae con el tiempo.	0.2 a 0.1	10.0
F. Flujo excepcionalmente grande o agua a presión constante sin reducirse en forma perceptible.	0.1 a 0.5	10.0

Nota 1: Los factores C a F están burdamente estimados. El valor de Jw deberá aumentarse si hay necesidad de instalaciones de drenaje.

Nota 2: Los problemas especiales que causa el hielo al formarse en el interior de las discontinuidades no han sido considerados.

6.- FACTOR DE REDUCCION DEBIDO AL ESTADO DE ESFUERZOS.

a) Existencia de zonas de debilidad que intersectan la excavación y pueden ocasionar que se formen zonas de material suelto al excavar el túnel.

A. Numerosas zonas de debilidad conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente o roca muy suelta a cualquier profundidad.	(SRF)	10.0
B. Zonas de debilidad aisladas conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente a una profundidad de 50 m o menor.		5.0
C. Igual a B a una profundidad de más de 50 metros.		2.5
D. Numerosas zonas cizalladas en roca competente sin arcilla o roca suelta a cualquier profundidad.		7.5
E. Zonas cizalladas aisladas, en roca competente sin arcilla a una profundidad de 50 m o menor.		5.0
F. Igual a E a una profundidad mayor de 50 metros.		2.5
G. Roca suelta con discontinuidades abiertas, roca intensamente fracturada.		5.0

b) Roca competente con altos esfuerzos.

H. Esfuerzos reducidos cerca de la superficie del terreno.	R_c/σ_1	R_t/σ_1	SRF
	200	13	2.5
I. Esfuerzos medianos.	200 a 10	13 a 0.66	1.0
J. Esfuerzos grandes, estructura bien interconectada.	10 a 5	0.66 a 0.33	0.5 a 2
K. Ocurrencia leve de estallidos en roca masiva (rock bursts).	5 a 2.5	0.33 a 0.16	1 a 10
L. Ocurrencia importante de estallidos en roca masiva.	2.5	0.16	10 a 20

c) Extrusión de la roca incompetente bajo la acción de grandes esfuerzos.

	SRF
M. Extrusión leve	5 a 10
N. Extrusión importante	10 a 20

d) Roca expansiva debido a la presencia de agua.

O. Expansión leve.	5 a 10
P. Expansión importante.	10 a 15

Nota 1: Reducir el valor de SRF del 25% al 50% si las zonas cizalladas importantes influyen; pero no intersectan la excavación.

Nota 2: Para esfuerzos altamente anisotrópicos (medidos), cuando $5 \leq \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \leq 10$, debe reducirse Rc y Rt a 0.8 Rc y 0.8 Rt. σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales mayor y menor. Rc y Rt son la resistencia a compresión y tensión de la roca, respectivamente.

Nota 3: En H se sugiere aumentar el valor de SRF de 2.5 a 5 cuando la profundidad del túnel sea menor que su claro.

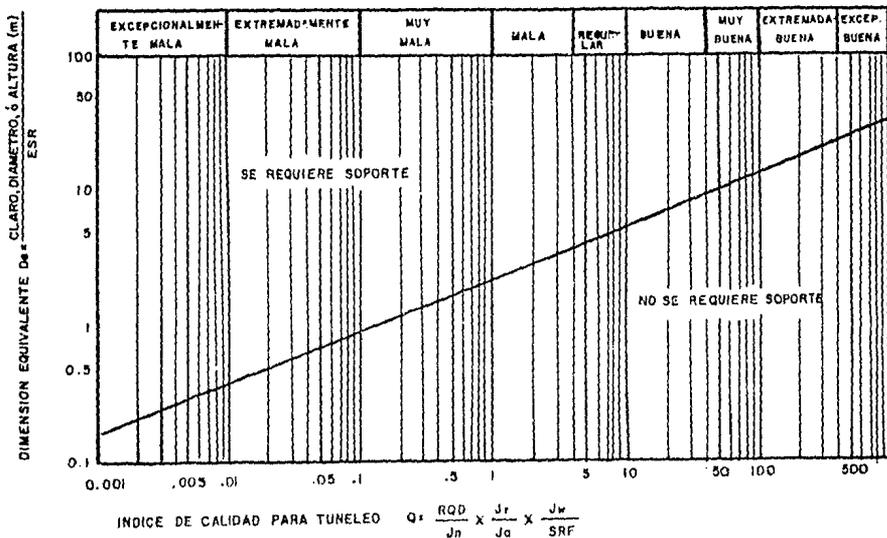


FIGURA A.3.- Relación entre la dimensión equivalente (De) máxima de una excavación sin soporte y el índice de tuneles "Q".

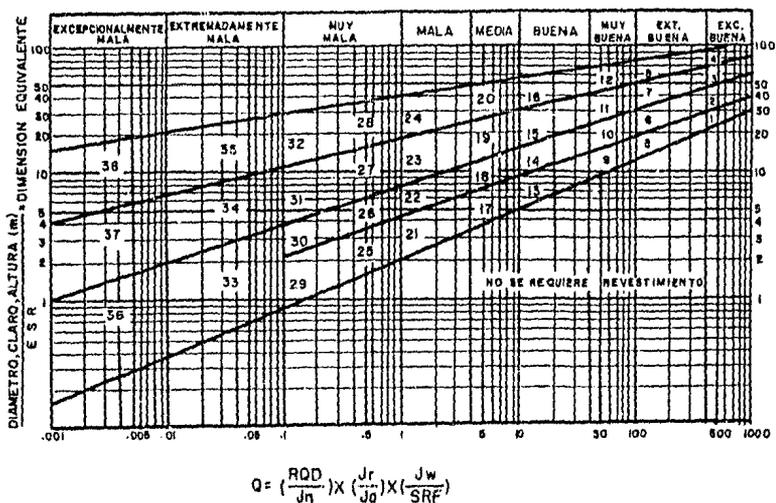


FIGURA A.4.- Categorías de soporte propuestas por Barton (1).

Categoría de soporte	Q	Factores Condicionales			P		Tipo de soporte
		RQD	Jr	Claro	Kg/cm ²	Claro	
		Jn	Ja	ESR	(aprox)	ESR	
		-	-	15			B(utg)1.5-2 m + clm
15	40 - 10	10	-	-	0.5	15-40	B(tg)1.5-2 m + clm
		10	-	-			B(tg)1.5-2 m +S(mr)5-10 cm
16*	40 - 10	15	-	-	0.5	30-65	B(tg)1.5-2 m + clm
		15	-	-			B(tg)1.5-2 m +S(nr)10-15 cm

* Estimación del soporte hecha por el autor. Los casos disponibles -- son insuficientes para una estimación real del soporte requerido.

El tipo de soporte que ha de usarse para las categorías de la 1 a la 8, dependerá de la técnica de voladura. Mediante voladuras cuidadosas se puede hacer innecesario el empleo de soporte, en cambio, voladuras sin -- cuidado pueden obligar a la aplicación de concreto lanzado, especialmente donde la altura de la excavación es mayor de 25 m.

CLAVES DE LAS TABLAS.

sb.- anclaje en zonas.

B.- anclaje sistemático.

(utg).- anclaje sin tensión, con inyección.

(tg).- con tensión (expansor del tipo de concha en rocas competentes, inyección después del tensado en rocas de mala calidad).

S.- concreto lanzado.

(mr).- malla reforzada.

clm.- malla de cadena.

CCA.- concreto colado.

(sr).- acero de refuerzo.

TABLA A.7 (CONT.).- DIMENSIONES DE SOPORTE PARA MACIZOS ROCOSOS
DE CALIDAD REGULAR Y MALA (VALORES DE "Q" DE 10 A 1).

Categoría de soporte	Q	Factores Condicionales P					Tipo de soporte
		<u>RQD</u>	<u>Jr</u>	<u>Claro</u>	<u>Kg/cm²</u>	<u>Claro</u>	
		Jn	Ja	ESR	(aprox)	ESR	
17	10 - 4	30	-	-	1.0	3.5-9	sb(utg)
		10 30	-	-			B(utg)1-1.5 m
		10	-	6 m			B(utg)1-1.5 m + S 2-3 cm
		10	-	6 m			S 2-3 cm
18	10-4	5	-	10 m	1.0	7-15	B(tg)1-1.5 cm + c1m
		5	-	10 m			B(utg)1-1.5 m + c1m
		5	-	10 m			B(tg)1-1.5 m + S 2-3 cm
		5	-	10 m			B(utg)1-1.5cm + S 2-3 cm
19	10 - 4	-	-	20 m	1.0	12-29	B(tg)1-2 m +S(mr)10-15cm
		-	-	20 m			B(tg)1-1.5 m +S(mr)5-10 cm
20*	10 - 4	-	-	35 m	1.0	24-52	B(tg)1-2 m +S(mr)20-25cm
		-	-	35 m			B(tg)1-2 m +S(mr)10-20cm
21	4 - 1	12.5	0.75	-	1.5	2.1-6.5	B(utg)1 m +S 2-3 cm
		12.5	0.75	-			S 2.5-5 cm
		-	0.75	-			B(utg) 1 m
22	4 - 1	10 30	1.0	-	1.5	4.5-11.5	B(utg)1 m+c1m
		10	1.0	-			S 2.5-7.5 cm
		30	1.0	-			B(utg) 1 m +S(mr)2.5-5cm

Categoría de soporte	Q	Factores Condicionales			P Kg/cm ² (aprox)	Claro ESR	Tipo de soporte
		RQD	Jr	Claro			
		<u>Jn</u>	<u>Ja</u>	<u>ESR</u>			
23	4 - 1	30	-	-	1.5	8-24	B(utg) 1 m
		-	-	15 m			B(tg)1-1.5 m
		-	-	15 m			+S(mr)10-15cm
24*	4 - 1	-	-	30 m	1.5	18-46	B(utg)1-1.5 m
		-	-	30 m			+S(mr)15-30cm
		-	-	30 m			B(tg)1-1.5 m
							+S(mr)10-15cm

* Estimación del soporte hecha por el autor. Los casos disponibles - son insuficientes para una estimación real del soporte requerido.

El espaciamiento entre anclas está en metros. El espesor de concreto lanzado o colado se da en centímetros.

TABLA A.7 (CONT.).- DIMENSIONES DE SOPORTES PARA MACIZOS ROCOSOS DE CALIDAD MUY POBRE (VALORES DE "Q" DE 1.0 A 0.1).

Categoría de soporte	Q	Factores Condicionales			P		Tipo de soporte
		RQD Jn	Jr Ja	Claro ESR	Kg/cm ² (aprox)	Claro ESR	
25	1.0 - 0.4	10	0.5	-	2.25	1.5-4.2	B(utg)1m+mr ó clm
		10	0.5	-			B(utg)1m+S(mr) 5 cm
		-	0.5	-			B(tg)1m+S(mr) 5 cm
26	1.0 - 0.4	-	-	-	2.25	3.2-7.5	B(tg)1 m +S(mr)5-7.5cm
		-	-	-			B(utg)1m +S 2.5-5 cm
27	1.0 - 0.4	-	-	12 m	2.25	6-18	B(tg) 1m +S(mr)7.5-10cm
		-	-	12 m			B(utg)1 m +S(mr)5-7.5cm
		-	-	12 m			CCA 20-40cm + B(tg) 1m
		-	-	12 m			S(mr)10-20cm +B(tg).1m
		-	-	12 m			B(tg) 1m +S(mr)30-40cm
28*	1.0 - 0.4	-	-	30 m	2.25	15-38	B(tg) 1m +S(mr)20-30cm
		-	-	20 30			B(tg) 1m +S(mr)20-30cm
		-	-	20 m			B(tg) 1m +S(mr)15-20cm
		-	-	-			CCA(sr)30-100 cm+B(tg) 1m
		-	-	-			B(tg) 1m +S(mr)15-20cm
29*	0.4 - 0.1	5	0.25	-	3.0	1.0-3.1	B(utg)1m+S2-3 cm

Categoría de soporte	Q	Factores Condicionales			P Kg/cm ² (aprox)	Claro ESR	Tipo de soporte
		RQD Jn	Jr Ja	Claro ESR			
29*	0.4 - 0.1	5	0.25	-			B(utg)1m+S(mr) 5 cm
		-	0.25	-			B(tg)1m+S(mr) 5 cm
30	0.4 - 0.1	5	-	-	3.0	2.2-6	B(tg)1m+S2.5- 5 cm
		5	-	-			S(mr)5-7.5cm
		-	-	-			B(tg) 1m +S(mr)5-7.5cm
31	0.4 - 0.1	4	-	-	3.0	4-14.5	B(tg) 1m +S(mr)5-12.5cm
		4	1.5	-	-		S(mr)7.5-25cm
		1.5	-	-			OCA 20-40cm +B(tg) 1m
		-	-	-			OCA(sr)30-50cm +B(tg) 1m
32	0.4 - 0.1	-	-	20 m	3.0	11-34	B(tg) 1m +S(mr)40-60cm
		-	-	20			B(tg) 1m +S(mr)20-40cm
		-	-	-			OCA(sr)40-120cm +B(tg) 1m

* Estimación del soporte hecha por el autor. Los casos disponibles -
son insuficientes para una predicción confiable del soporte requerido.

TABLA A.7 (CONT.).- DIMENSIONES DE SOPORTES PARA MACIZOS ROCOSOS DE CALIDAD EXTREMADAMENTE MALA Y EXCEPCIONALMENTE MALA (VALORES DE "Q" DE 0.1 A 0.001).

Categoría de soporte	Q	Factores Condicionales			P Kg/cm ² (aprox)	Claro ESR	Tipo de soporte
		RQD Jn	Jr Ja	Claro ESR			
33*	0.1 - 0.01	2	-	-	6	1.0-3.9	B(tg) 1m +S(nr)2.5-5cm S(nr)5-10cm S(nr)7.5-15cm
		2	-	-			
		-	-	-			
34	0.1 - 0.01	2	0.25	-	6	2.0-11	B(tg) 1m +S(nr)5-7.5cm S(nr)7.5-15cm S(nr)15-25cm CCA(sr)20-60cm +B(tg) 1m
		2	0.25	-			
		-	0.25	-			
		-	-	-			
35	0.1 - 0.01	-	-	15 m	6	6.5-28	B(tg) 1m +S(nr)30-100cm CCA(sr)60-100cm +B(tg) 1m B(tg) 1m +S(nr)20-75cm CCA(sr)40-150cm +B(tg) 1m
		-	-	15 m			
		-	-	15 m			
		-	-	15 m			
		-	-	15 m			
36*	0.01 - 0.001	-	-	-	12	1.0-2.0	S(nr)10-20cm S(nr)10-20cm +B(tg)0.5-1.0m
		-	-	-			
37	0.01 - 0.001	-	-	-	12	1.0-6.5	S(nr)20-60cm S(nr)20-60cm +B(tg)0.5-1m
		-	-	-			
38	0.01 - 0.001	-	-	10 m	12	4.0-2.0	CCA(sr)100-300 cm CCA(sr)100-300 cm+B(tg) 1m
		-	-	10 m			

Categoría de soporte	Q	Factores Condicionales			P	Claro ESR	Tipo de soporte
		RQD Jn	Jr Ja	Claro ESR	Kg/cm ² (aprox)		
38	0.01 - 0.001	-	-	10 m		S(mr)20-200cm	
		-	-	10 m		S(mr)20-200cm +B(tg) 1m	

* Estimación del soporte hecha por el autor. Los casos recabados son insuficientes para hacer una predicción confiable del soporte requerido.

REFERENCIAS DEL APENDICE A.

- 1.- BARTON N., LIEN R., Y LUNDE J.,
1974.-
Engineering Classification of Rock
Masses for the Design of Tunnel Su-
pport. Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4,
p. 189-236.
- 2.- BARTON N., 1976.-
Recent Experiences with the Q-Sys-
tem of Tunnel Support Design. Proc.
Symposium on Exploration for Rock -
Engineering, Johannesburg, Vol. 1, p.
107-117.
- 3.- BIENIAWSKI Z. T., 1974.-
Geomechanics Classification of Rock
Masses and its Application in Tun-
nelling. Proc. Third International
Congress on Rock Mechanics, ISRM, -
Denver, Vol. 11A, p. 27-32.
- 4.- BIENIAWSKI Z. T., 1976.-
Rock Mass Classification in Rock En-
gineering. Proc. Symposium on Explo-
ration for Rock Engineering, Johann-
esburg, Vol. 1, p. 97-106.
- 5.- DEERE D. U., 1968.-
Geological Considerations. Rock Me-
chanics in Engineering Practice. --
Editores K. G. Stagg y O. C. Zien-
kiewicz, publicado por John Wiley &
Sons, Londres p. 1-20.
- 6.- DEERE D. U. Y MILLER R. P., --
1966.-
Engineering Classification and In-
dex Properties for Intact Rock. ---

Technical Report No. AFNL-TR-65-116,
U. S. Air Force Weapons Laboratory,
New Mexico.

7.- HERRERA CASTAÑEDA, SERGIO R.,
1983.-

Clasificación Geomecánica de Maci--
zos Rocosos. Apuntes del curso: Geo
logía en la Mecánica de Rocas. SMMR,
CICM, CAP.

8.- LAUFFER H., 1958.-

Gebirgsklassifizierung für den Sto--
llenbau. Geologie und Bauwesen, Vol.
24, No. 1, p. 46-51.

9.- WICKHAM G. E., TIEDEMANN H. R.,
Y SKINNER E. H., 1972.-

Support Determination Based on Geo-
logical Predictions. Proc. First --
North American Rapid Excavation and
Tunnelling Conference, AIME, New --
York, p. 43-64.

APENDICE B

B.1.- ANALISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL LEVANTAMIENTO GEOLOGICO DE DETALLE Y EN LOS ENSAYES DE COMPRESION UNIAXIAL.

Dada la heterogeneidad en los datos cuantitativos de los parámetros obtenidos con el propósito de establecer los índices Q y RMR que caracterizaran al macizo rocoso que se va a excavar, se decidió hacer un análisis del comportamiento estadístico de estos datos para tener un criterio en la elección de un valor que se considerara representativo de las condiciones geológicas predominantes.

Se utilizó un programa para computadora denominado "Biomedical" (1) que obtiene un histograma de frecuencias, calcula la varianza, desviación standard, rango semi-intercuartílico, el promedio, la mediana, el sesgo, la kurtosis y el error standard de la distribución estadística e indica el rango para el 95% de confianza. También indica gráficamente -- donde se encuentran ubicados estos valores y obtiene frecuencias acumuladas.

Este programa se utilizó para los datos obtenidos de RQD, resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta y densidad de fracturas, así como para los datos de espaciamiento y abertura de cada una de las cuatro familias de fracturamiento preferente. En las páginas siguientes se muestran los resultados obtenidos.

B.2.- ANALISIS ESTADISTICO DE LOS VALORES OBTENIDOS PARA LOS INDICES Q Y RMR.

Con el programa "Biomedical" (1) se analizaron estadísticamente los datos obtenidos para los índices Q y RMR con el objeto de establecer un valor representativo. Dada la gran dispersión de estos datos se decidió calcular la media ponderada de los valores. En las páginas siguientes se muestran los resultados obtenidos con el programa.

NUMBER OF INTEGER WORDS OF STORAGE USED IN PRECEDING PROBLEM 752
 ELAPSED TIME: 0.17 MINUTES.

BNDP2D PAGE 3
 BARRIENTOS ESPACIAMIENTO FAMILIA 1

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE ESPACIAMIENTO PARA LA FAMILIA 1.

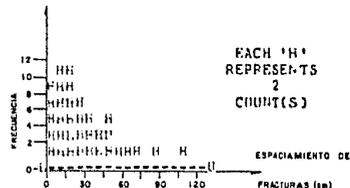
 * ESPACIAM *

VARIABLE NUMBER 1
 NUMBER OF DISTINCT VALUES . 42
 NUMBER OF VALUES COUNTED . . 60
 NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0

MAXIMUM 137.0000000
 MINIMUM 2.0000000
 RANGE 135.0000000
 VARIANCE 489.6730347
 ST.DEV. 22.1265572
 (S3-Q1)/2 13.5600000
 MX.ST.SC. 3.61
 MH.ST.SC. -1.13

95% CONFIDENCE
 LOWER 21.3085842 UPPER 32.7414131

MEAN ESTIMATE 27.0249996 ST.ERROR 2.8567843
 MEDIAN 20.0000000 3.1754282
 MODE NOT UNIQUE



EACH 'H' ABOVE = 7.5000
 L= 0.0000
 N= 127.5000

CASE NO. OF MIN. VAL. = 54
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 36

VALUE VALUE/S.F. G1= 10.5000000
 1.38 4.35 G3= 37.5000000
 SKEWNESS 1.88 2.98 S= 4.8964424
 KURTOSIS 1.88 2.98 S+= 49.1535568

EACH 'H' BELOW = 1.0000

S O S
 M - 1 M M M 3 +
 I D . E A
 N D D A
 E I N X

PERCENTS				PERCENTS				PERCENTS			
VALUE	COUNT	CELL	CUM	VALUE	COUNT	CELL	CUM	VALUE	COUNT	CELL	CUM
2.000	1	1.7	1.7	11.000	1	1.7	26.7	27.000	1	1.7	61.7
3.000	1	1.7	3.3	12.000	2	3.3	30.0	29.000	2	3.3	65.0
3.500	1	1.7	5.0	15.000	4	6.7	36.7	30.000	1	1.7	66.7
4.000	2	3.3	6.3	16.000	4	6.7	43.3	31.000	1	1.7	68.3
4.500	2	3.3	11.7	16.500	1	1.7	45.0	32.000	1	1.7	70.0
6.000	1	1.7	13.3	17.500	1	1.7	46.7	34.000	1	1.7	71.7
6.500	1	1.7	15.0	19.000	1	1.7	48.3	35.000	1	1.7	73.3
7.000	1	1.7	16.7	20.000	2	3.3	51.7	36.000	1	1.7	75.0
8.000	1	1.7	18.3	22.000	2	3.3	55.0	39.000	1	1.7	76.7
8.500	1	1.7	20.0	25.000	1	1.7	56.7	40.000	1	1.7	78.3
10.000	3	5.0	25.0	26.000	2	3.3	60.0	43.000	1	1.7	80.0
								46.000	2	3.3	83.3
								50.000	3	5.0	88.3
								53.000	1	1.7	90.0
								54.000	1	1.7	91.7
								66.000	1	1.7	93.3
								70.000	1	1.7	95.0
								72.000	1	1.7	96.7
								88.000	1	1.7	98.3
								107.000	1	1.7	100.0

BN P2D PAGE 3
 BARRIENTOS ESPACIAMIENTO FAMILIA 2

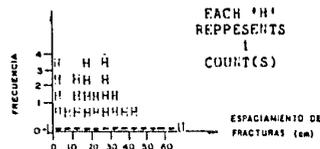
DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE ESPACIAMIENTO PARA LA FAMILIA 2.

```

*****
* ESPACIAM *
*****
VARIABLE NUMBER . . . . . 1
NUMBER OF DISTINCT VALUES . 17
NUMBER OF VALUES COUNTED . 22
NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0

          MAXIMUM 45.300000
          MINIMUM 4.000000
          RANGE 41.000000
          VARIANCE 177.9710143
          ST.DEV. 13.325601
          (Q3-Q1)/2 7.3000000
          MX.ST.SC. 2.17
          MN.ST.SC. -1.45

          95% CONFIDENCE
MEAN ESTIMATE 20.4545460 ST.ERROR 2.4118459 LOWER 15.4388428 UPPER 25.4702492
MEDIAN 20.0000000 3.1754282
MODE 4.0000000
    
```



EACH 'H' REPRESENTS 1 COUNT(S)

EACH 'A' ABOVE = 5.0000
 L= 0.0000
 U= 65.0000

CASE NO. OF MIN. VAL. = 12
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 2

Q1= 14.0000000
 Q3= 28.0000000
 S= 9.1419859
 S+= 31.7671070

VALUE VALUE/S.F. SKEWNESS KURTOSIS
 0.21 0.39
 -0.76 -0.73

EACH 'A' BELOW = 0.5000

M S Q H Q S P
 I A
 N X

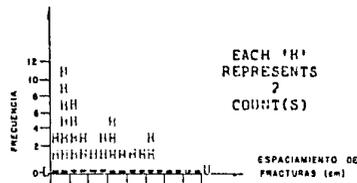
VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM									
4.	3	13.6 13.6	18.	1	4.5 45.9	26.	2	9.1 72.7	38.	1	4.5 95.5
5.	1	4.5 18.2	19.	1	4.5 45.5	28.	1	4.5 77.3	45.	1	4.5 100.0
10.	1	4.5 22.7	20.	2	9.1 51.5	30.	1	4.5 81.8			
14.	1	4.5 27.3	21.	1	4.5 55.1	32.	1	4.5 86.4			
15.	2	9.1 36.4	23.	1	4.5 63.6	33.	1	4.5 90.9			

BMP2D PAGE 3
BARRIENTOS ESPACIAMIENTO FAMILIA 3

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE ESPACIAMIENTO PARA LA FAMILIA 3.

```

*****
* ESPACIAM *
*****
VARIABLE NUMBER . . . . . 1
NUMBER OF DISTINCT VALUES . . . 32
NUMBER OF VALUES COUNTED . . . 45
NUMBER OF VALUES NOT COUNTED . . 0
MAXIMUM 55.0000000
MINIMUM 4.0000000
RANGE 51.0000000
VARIANCE 215.0540771
ST.DEV. 14.6647224
((3-61)/2 11.5600000
MX.ST.SD. 2.24
MN.ST.SC. -1.23
95% CONFIDENCE
LOWER UPPER
MEAN 22.0955563 17.6897850 26.5013275
ESTIMATE ST.EPROR
MEDIAN 18.0000000 3.7527785
MODE 10.0000000
    
```



EACH 'H' REPRESENTS 7 COUNT(S)

EACH 'U' ABOVE = 5.0000
 L= 0.0000
 U= 80.0000

CASE NO. OF MIN. VAL. = 37
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 36

Q1= 10.0000000
 VALUE VALUE/S.E. Q3= 33.0000000
 0.63 1.73 S= 7.4308338
 -0.82 -1.12 S= 36.7602806

EACH 'U' BELOW = 0.5000

Q 3 S +

.....

N I N

PERCENTS															
VALUE	COUNT	CELL	CUM												
4.000	1	2.2	2.2	11.000	1	2.2	33.3	23.000	1	2.2	57.8	37.000	1	2.2	84.4
5.000	2	4.4	6.7	12.500	1	2.2	35.6	24.000	1	2.2	60.0	46.000	1	2.2	86.7
6.000	3	6.7	13.3	13.000	2	4.4	40.6	26.000	3	6.7	66.7	43.000	1	2.2	88.9
7.000	1	2.2	15.6	14.000	1	2.2	42.2	30.000	1	2.2	68.9	45.000	1	2.2	91.1
7.500	1	2.2	17.8	15.000	2	4.4	46.7	32.000	2	4.4	73.3	47.000	1	2.2	93.3
9.000	1	2.2	20.0	16.000	1	2.2	48.9	33.000	2	4.4	77.8	51.000	1	2.2	95.6
9.300	1	2.2	22.2	18.000	1	2.2	51.1	34.000	1	2.2	80.0	52.000	1	2.2	97.8
10.000	4	8.9	31.1	19.000	2	4.4	55.6	35.000	1	2.2	82.2	55.000	1	2.2	100.0

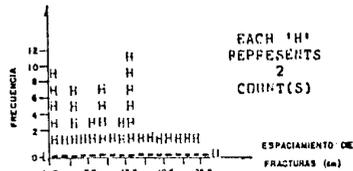
B4DP2D PAGE 3
 BARRIENTOS ESPACIAMIENTO FAMILIA 4

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS DATOS DE ESPACIAMIENTO PARA LA FAMILIA 4.

 * ESPACIAM *

VARIABLE NUMBER 1
 NUMBER OF DISTINCT VALUES . . . 22
 NUMBER OF VALUES COUNTED . . . 57
 NUMBER OF VALUES NOT COUNTED . . 0

MAXIMUM 25.000000
 MINIMUM 2.000000
 RANGE 23.000000
 VARIANCE 38.9910736
 ST.DEV. 6.2442832
 (Q3-Q1)/2 4.5000000
 MX.ST.SC. 2.32
 MH.ST.SC. -1.36



95% CONFIDENCE
 LOWER UPPER
 MEAN 10.500000 0.8270755 8.6431683 12.1568317
 MEDIAN 10.000000 1.4433764
 MODE 10.000000

EACH 1/4 ABOVE = 1.5000
 1/2 = 1.5000
 3/4 = 27.0000
 CASE NO. OF MIN. VAL. = 5
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 52

VALUE VALUE/S.F. Q1= 5.0000000
 0.43 1.34 Q3= 14.0000000
 KURTOSIS -0.61 -0.94 S= 4.2557168
 S= 16.7442837

EACH 1/4 BELOW = 0.2000

M S 0 3 S
 - 1 3 +
 I A
 N X

PERCENTS															
VALUE	COUNT	CELL	CUM												
2.000	5	8.8	8.8	7.000	1	1.8	35.1	13.000	3	5.3	64.9	20.000	1	1.8	93.0
2.500	1	1.8	10.5	8.000	3	5.3	42.4	14.000	6	10.5	75.4	27.500	1	1.8	94.7
3.000	4	7.0	17.5	9.000	1	1.8	42.1	15.000	5	8.8	84.2	24.000	2	3.5	98.2
4.000	2	3.5	21.1	10.000	7	12.3	54.4	16.000	1	1.8	86.0	25.000	1	1.8	100.0
5.000	5	8.8	29.8	10.500	1	1.8	56.1	18.000	2	3.5	89.5				
6.000	2	3.5	33.3	12.000	2	3.5	59.6	19.000	1	1.8	91.2				

BS

BNDP2D PAGE 3
 BARRIENTOS ABERTURA FAMILIA 1

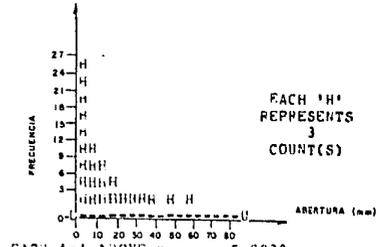
DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE ABERTURA PARA LA FAMILIA 1.

```

*****
* ABERTURA *
*****
VARIABLE NUMBER . . . . . 1
NUMBER OF DISTINCT VALUES . 15
NUMBER OF VALUES COUNTED . 60
NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0

          ESTIMATE   ST. ERROR
MEAN      12.4499998  1.0569669
MEDIAN    10.0000000  2.5980775
MODE       0.0000000

          95% CONFIDENCE
          LOWER      UPPER
MEAN      8.5301266  16.3698730
    
```



EACH 'H' ABOVE = 5.0000
 I = 0.0000
 U = 85.0000

CASE NO. OF MIN. VAL. = 1
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 21

VALUE VALUE/S.E. G1= 0.0000000
 1.53 4.85 G3= 20.0000000
 1.96 3.10 S= -2.7240467
 S+ = 27.6240463

SKEWNESS
 KURTOSIS

EACH 'I' BELOW = 0.5000

```

S      Q      3      S
-      M      4      4      3      +
-----E-----E-----A
N      0      A
      I      h
    
```

VALUE	COUNT	PERCENTS CELL	CUM CUM												
0.	23	38.3	38.3	6.	1	1.7	45.0	20.	6	10.0	83.3	40.	1	1.7	93.3
3.	1	1.7	40.0	10.	9	15.0	60.0	25.	3	5.0	88.3	50.	2	3.3	96.7
5.	1	1.7	41.7	12.	2	3.3	63.3	30.	1	1.7	90.0	60.	2	3.3	100.0
7.	1	1.7	43.3	15.	6	10.0	73.3	35.	1	1.7	91.7				

B40P20 PAGE 3
 BARRIENTOS ABERTURA FAMILIA 2

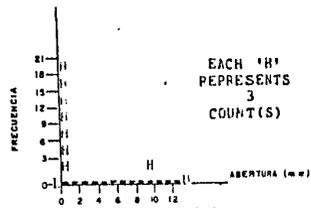
DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE ABERTURA PARA LA FAMILIA 2.

```

*****
* ABERTURA *
*****
VARIABLE NUMBER . . . . . 1
NUMBER OF DISTINCT VALUES . . . . . 2
NUMBER OF VALUES COUNTED . . . . . 22
NUMBER OF VALUES NOT COUNTED . . . . . 0
    
```

			MAXIMUM	10.0000000
			MINIMUM	0.0000000
			RANGE	10.0000000
			VARIANCE	4.5454555
			ST.DEV.	2.1320074
			(S3-01)/2	0.0000000
			MX.ST.SC.	4.46
			MM.ST.SC.	-0.21

			95% CONFIDENCE	
			LOWER	UPPER
MEAN	ESTIMATE	ST.ERROR	-0.4907327	1.3998237
MEDIAN	0.0000000	0.0000000		
MODE	0.0000000			



EACH 'A' ABOVE = 1.0000
 L= 0.0000
 U= 13.0000

CASE NO. OF MIN. VAL. = 1
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 10

G1= 0.0000000
 G3= 0.0000000
 S= -1.6774620
 S+= 2.5865529

VALUE VALUE/S.E.
 4.07 7.79
 15.27 14.62

EACH 'L' BELOW = 0.1000

S O S
 M H M
 I E
 H A N

VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM	VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM
0.	21	95.5	10.	1	4.5 100.0

94DP20 PAGE 3
 BARRIENTOS ABERTURA FAMILIA 3

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE ABERTURA PARA LA FAMILIA 3.

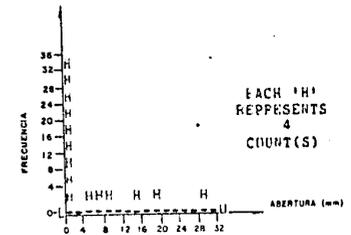
 * ABERTURA *

VARIABLE NUMBER 1
 NUMBER OF DISTINCT VALUES 7
 NUMBER OF VALUES COUNTED 45
 NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0

MAXIMUM 30.000000
 MINIMUM 0.000000
 RANGE 30.000000
 VARIANCE 54.0242896
 ST.DEV. 7.3563938
 (03-01)/2 0.000000
 MK-ST.SC. 3.63
 MM-ST.SC. -0.45

MEAN ESTIMATE 3.2088889 ST.ERROR 1.0957320
 MEDIAN 0.0000000 0.0000000
 MODE 0.0000000

95% CONFIDENCE
 LGUPP UPPER 1.6805864 5.4971914



EACH " " ABOVE = 2.0000
 L= 0.0000
 U= 32.0000
 CASE NO. OF MIN. VAL. = 1
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 21

SKEWNESS 2.47
 KURTOSIS 5.57

Q1= 0.0000000
 Q3= 0.0000000
 S- = -4.0615048
 S+ = 10.6392832

EACH " " BELOW = 0.3000



VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM									
0.	34	75.6 75.6	6.	1	2.2 84.4	15.	1	2.2 93.3	30.	2	4.4 100.0
5.	3	6.7 82.2	10.	3	6.7 91.1	20.	1	2.2 95.6			

BMDP2D PAGE 3
 BARRIENTOS ABERTURA FAMILIA 4

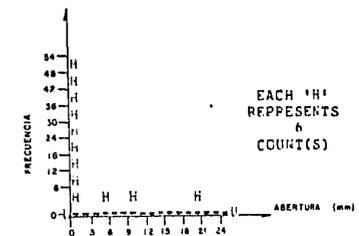
DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE ABERTURA PARA LA FAMILIA 4.

 * ABERTURA *

VARIABLE NUMBER 1
 NUMBER OF DISTINCT VALUES . . . 4
 NUMBER OF VALUES COUNTED . . . 57
 NUMBER OF VALUES NOT COUNTED . . 0

MAXIMUM 20.5000000
 MINIMUM 0.3000000
 RANGE 20.0000000
 VARIANCE 13.4085217
 ST.DEV. 3.6617649
 (S3-Q1)/2 0.5000000
 MX.ST.SC. 5.15
 MN.ST.SC. -0.31

95% CONFIDENCE
 LOWER UPPER
 MEAN ESTIMATE ST.ERROR 0.1687535 2.1119483
 MEDIAN 0.0000000 0.0000000
 MODE 0.0000000



EACH 'H' REPRESENTS A COURT(S)
 EACH 'U' ABOVE = 1.5000
 L = 0.0000
 U = 25.5000
 CASE NO. OF MIN. VAL. = 7
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 1
 S1 = 0.0000000
 VALUE VALUE/S.E. G3 = 0.0000000
 3.38 10.43 S- = -2.5214140
 SKEWNESS 11.78 18.15 S+ = 4.8021159
 KURTOSIS

EACH 'U' BELOW = 0.2000

S O N S H
 = M N + A
 I E
 N A X
 N

VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM	VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM	VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM
0.	51	89.5 69.5	5.	1	1.8 91.2	10.	4	7.0 96.2
						20.	1	1.8 100.0

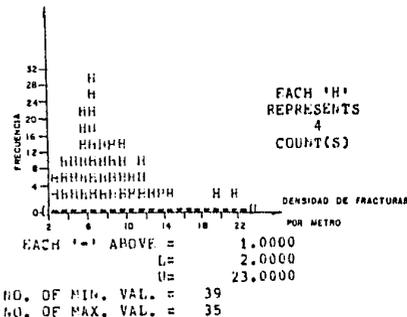
3MDP2D PAGE 3
 BARRIENTOS DENSIDAD

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE DENSIDAD DE FRACTURAS POR METRO.

 * FRACTURA *

VARIABLE NUMBER	1	MAXIMUM	22.000000
NUMBER OF DISTINCT VALUES .	16	SIGMA	2.000000
NUMBER OF VALUES COUNTED . .	152	RANGE	20.000000
NUMBER OF VALUES NOT COUNTED	0	VARIANCE	9.7151890
		ST. DEV.	3.1169198
		(Q3-Q1)/2	2.0000000
		MAX. ST. SC.	1.19
		MIN. ST. SC.	-1.93

	ESTIMATE	ST. ERROR	LOWER	UPPER
MEAN	8.0065794	0.2528156	7.5070662	8.5060930
MEDIAN	7.0000000	0.2886753		
MODE	7.0000000			



	VALUE	VALUE/S.F.	C1=	6.0000000
SKEWNESS	1.16	5.84	C3=	10.0000000
KURTOSIS	2.81	7.06	S=	4.8896599
			S+=	11.1234989

EACH '1' BELOW = 0.2000

S 0 S
 - 1 3 1

M H M H P
 I . E . A
 N D A N X

PERCENTS				PERCENTS				PERCENTS			
VALUE	COUNT	CELL	CUM	VALUE	COUNT	CELL	CUM	VALUE	COUNT	CELL	CUM
2.	2	1.3	1.3	6.	22	14.5	32.2	10.	16	10.5	67.9
3.	3	2.0	3.3	7.	31	20.4	52.6	11.	7	4.6	87.5
4.	10	6.6	9.9	8.	15	9.9	62.5	12.	9	5.9	93.4
5.	12	7.9	17.8	9.	15	9.9	72.4	13.	3	2.0	95.4
								14.	1	0.7	96.1
								15.	4	2.6	98.7
								20.	1	0.7	99.3
								22.	1	0.7	100.0

B10

340P20 PAGE 3
 BARRIENTOS RQD

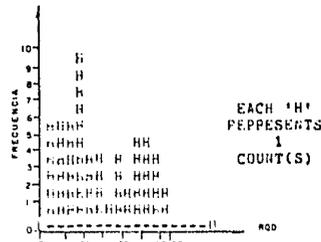
 * RQD *

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE RQD.

VARIABLE NUMBER 1
 NUMBER OF DISTINCT VALUES . 55
 NUMBER OF VALUES COUNTED . . 59
 NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0

*MAXIMUM 97.5000000
 *MINIMUM 1.0000000
 RANGE 96.5000000
 VARIANCE 213.7336963
 ST.DEV. 20.5259600
 (G3-G1)/2 27.0499996
 MX.ST.SC. 1.24
 MN.ST.SC. -1.33

95% CONFIDENCE
 LOWER UPPER
 MEAN 42.0389624 3.7137649 34.6050720 49.4728926
 MEDIAN 35.5000000 7.1860136
 MODE NOT UNIQUE



EACH '1' ABOVE = 7.5000
 1 = 0.0000
 U = 127.5000
 CASE NO. OF MIN. VAL. = 7
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 39

SKEWNESS 0.38
 KURTOSIS -1.26
 VALLE VALUE/S.E. 1.20
 -1.98
 Q1 = 16.8999996
 Q3 = 72.1999969
 S = 13.5130138
 S+ = 70.5649490

EACH '1' BELOW = 0.7500

H 4 S 0
 I 0 - 1
 H 4 M S U H
 I 0 - 1 D E 4 3 A
 H D I H X

VALUE	COUNT	PERCENTS									
		CELL CUM									
4.000	1	1.7 1.7	19.800	1	1.7 25.8	40.000	1	1.7 55.9	73.300	1	1.7 79.7
4.700	1	1.7 3.4	21.500	1	1.7 32.5	42.000	1	1.7 57.6	74.300	1	1.7 81.4
6.000	1	1.7 5.1	24.100	1	1.7 32.2	43.000	1	1.7 59.3	75.800	1	1.7 83.1
6.100	1	1.7 6.8	25.000	2	3.4 35.5	43.500	1	1.7 61.0	77.000	1	1.7 84.7
6.800	1	1.7 8.5	25.500	1	1.7 37.3	51.100	1	1.7 62.7	77.500	1	1.7 86.4
7.300	1	1.7 10.2	26.200	2	3.4 40.7	51.300	1	1.7 64.4	81.000	1	1.7 88.1
9.300	1	1.7 11.9	27.800	1	1.7 42.4	54.200	1	1.7 66.1	82.500	1	1.7 89.8
8.600	2	3.4 15.3	28.000	1	1.7 44.1	55.500	1	1.7 67.8	83.500	1	1.7 91.5
12.500	1	1.7 16.9	28.700	1	1.7 45.8	56.300	1	1.7 69.5	87.600	1	1.7 93.2
13.900	1	1.7 18.6	30.000	1	1.7 47.5	62.200	1	1.7 71.2	88.100	1	1.7 94.9
14.500	1	1.7 20.3	34.300	1	1.7 49.2	65.200	1	1.7 72.9	89.700	1	1.7 96.6
15.300	2	3.4 23.7	35.500	1	1.7 50.9	71.100	3	1.7 74.6	95.300	1	1.7 98.3
16.900	1	1.7 25.4	39.000	1	1.7 52.5	72.200	1	1.7 76.3	97.500	1	1.7 100.0
17.300	1	1.7 27.1	39.800	1	1.7 54.2	72.700	1	1.7 78.0			

BMDP2D PAGE 3
 BARRIENTOS RESISTENCIA

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DE RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAXIAL.

```

*****
* RESIS *
*****
VARIABLE NUMBER . . . . . 1
NUMBER OF DISTINCT VALUES . 15
NUMBER OF VALUES COUNTED . 15
NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0
    
```

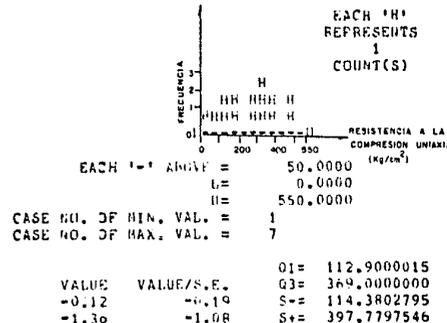
```

MAXIMUM 476.0000000
MINIMUM 15.7999992
RANGE 460.2000122
VARIANCE 20078.8164062
STDEV. 141.9973375
((S-01)/2 124.0500031
%ST.SC. 1.55
%ST.SC. -1.69
    
```

```

          ESTIMATE   ST.ERROR   LOWER   UPPER
MEAN      256.0800171  36.5867157 177.6097107 334.5503235
MEDIAN    264.0000000
MODE      NOT UNIQUE
    
```

95% CONFIDENCE



SKENNESS
 KUPTOSIS

VALUE VALUE/S.E.
 -0.12 -0.19
 -1.30 -1.08

M S O S M M
 I A E E
 N A N D
 3 + X

VALUE	COUNT	PERCENTS									
		CELL CUM									
16.80	1	6.7 6.7	154.50	1	6.7 33.3	302.00	1	6.7 60.0	378.00	1	6.7 86.7
73.00	1	6.7 13.3	180.00	1	6.7 40.0	322.00	1	6.7 66.7	456.00	1	6.7 93.3
102.00	1	6.7 20.0	289.00	1	6.7 56.7	335.00	1	6.7 73.3	476.00	1	6.7 100.0
112.90	1	6.7 26.7	244.00	1	6.7 33.3	369.00	1	6.7 60.0			

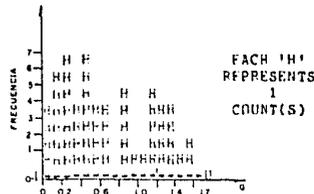
SMDP2D PAGE 3
 BARRIENTOS 0

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DEL INDICE "Q" DE BARTON.

 * Q *

VARIABLE NUMBER 1
 NUMBER OF DISTINCT VALUES . 52
 NUMBER OF VALUES COUNTED . . 59
 NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0

MAXIMUM 1.5549999
 MINIMUM 0.2000000
 RANGE 1.5000000
 VARIANCE 0.2076740
 ST.DEV. 0.4557120
 (33-01)/2 0.4400000
 9X.ST.SC. 1.95
 9N.ST.SC. -1.34



95% CONFIDENCE
 LOWER UPPER
 MEAN ESTIMATE ST.ERROR 0.6713560 0.0593287 0.5525966 0.7901154
 MEDIAN 0.5700000 0.1154701
 MODE NOT UNIQUE

EACH 1.1 ABOVE = 0.1600
 L = 0.0000
 U = 1.7000

CASE NO. OF MIN. VAL. = 7
 CASE NO. OF MAX. VAL. = 39

SKWNESS KURTOSIS
 VALUE VALUE/S.E.
 0.3R 1.1R
 -1.20 -1.9R

Q1 = 0.2700000
 Q3 = 1.1500000
 S- = 0.2156433
 S+ = 1.1270686

EACH 1.1 BELOW = 0.0150

S O SN
 - 1 +3
 M H M H M
 E . E . E . E .
 N D N D N D N D N D
 E . E . E . E . X

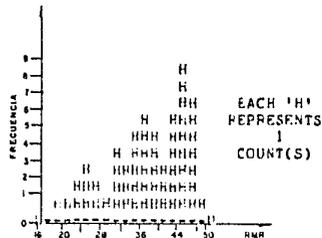
VALUE	COUNT	PERCENTS CELL CUM									
0.06000	1	1.7 1.7	0.30000	1	1.7 25.8	0.64000	1	1.7 55.9	1.10000	1	1.7 78.0
0.07000	1	1.7 3.4	0.34000	1	1.7 30.5	0.70000	1	1.7 57.6	1.17000	1	1.7 79.7
0.09000	2	3.4 6.8	0.39000	1	1.7 32.2	0.89000	1	1.7 59.3	1.19000	1	1.7 81.4
0.11000	1	1.7 8.5	0.46000	2	3.4 35.6	0.90000	1	1.7 61.0	1.21000	1	1.7 83.1
0.12000	1	1.7 10.2	0.41000	1	1.7 37.3	0.82000	1	1.7 62.7	1.23000	1	1.7 84.7
0.13000	1	1.7 11.9	0.42000	2	3.4 40.7	0.85000	1	1.7 64.4	1.24000	1	1.7 86.4
0.14000	2	3.4 15.3	0.44000	1	1.7 42.4	0.87000	1	1.7 66.1	1.30000	1	1.7 88.1
0.20000	1	1.7 16.9	0.45000	1	1.7 44.1	0.88000	1	1.7 67.8	1.32000	1	1.7 89.8
0.22000	1	1.7 18.6	0.46000	1	1.7 45.8	0.90000	1	1.7 69.5	1.33000	1	1.7 91.5
0.23000	1	1.7 20.3	0.48000	1	1.7 47.5	1.09000	1	1.7 71.2	1.40000	2	3.4 94.9
0.24000	2	3.4 23.7	0.54000	1	1.7 49.2	1.04000	1	1.7 72.9	1.43000	1	1.7 96.6
0.27000	1	1.7 25.4	0.57000	2	3.4 52.6	1.14000	1	1.7 74.6	1.57000	1	1.7 98.3
0.28000	1	1.7 27.1	0.59000	1	1.7 54.2	1.15000	1	1.7 76.3	1.56000	1	1.7 100.0

DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS VALORES DEL INDICE "RMR" DE BIENIAWSKI.

* RMR *

VARIABLE NUMBER 1
NUMBER OF DISTINCT VALUES . 52
NUMBER OF VALUES COUNTED . 59
NUMBER OF VALUES NOT COUNTED 0

MAXIMUM 43.5013969
MINIMUM 12.5730069
RANGE 29.3283899
VARIANCE 51.8195300
ST.DEV. 7.2067109
(Q3-Q1)/2 6.5209999
MX.ST.SC. 1.30
MN.ST.SC. -7.37



95% CONFIDENCE
MEAN ESTIMATE 37.6092072 ST.ERROR 1.0400416 LOWER UPPER 35.5273361 39.5910782
MEDIAN 38.9410019 ST.ERROR 1.7384024
MODE NOT UNIQUE

EACH 'H' ABOVE = 2.0000
L= 16.0000
U= 50.0000

CASE NO. OF MIN. VAL. = 7
CASE NO. OF MAX. VAL. = 19

SKENNESS VALUE VALUE/S.E. O1= 32.2159996
KURTOSIS -0.61 -1.93 O3= 45.2579994
-0.66 -1.03 S+= 29.6204967
S+= 45.5979195

EACH 'I' BELOW = 0.2500

M H S O H H D S M
I O E E A D A
N D I H I

VALUE	COUNT	CELL	CUM												
18.68	1	1.7	1.7	33.16	1	1.7	25.4	39.98	1	1.7	55.9	45.34	1	1.7	78.0
20.07	1	1.7	3.4	34.29	1	1.7	37.5	40.40	1	1.7	57.6	45.41	1	1.7	79.7
22.33	7	3.4	6.6	35.53	1	1.7	39.2	40.86	1	1.7	59.3	45.49	1	1.7	81.4
24.14	1	1.7	8.5	35.75	2	3.4	42.5	40.79	1	1.7	61.0	45.77	1	1.7	83.1
24.92	1	1.7	10.2	35.98	1	1.7	44.3	42.21	1	1.7	62.7	45.86	1	1.7	84.7
25.64	1	1.7	11.9	36.18	2	3.4	47.7	42.54	1	1.7	64.4	45.94	1	1.7	86.4
26.31	2	3.4	15.3	36.41	1	1.7	49.4	42.75	1	1.7	66.1	46.36	1	1.7	88.1
29.51	1	1.7	16.9	36.41	1	1.7	51.1	42.85	1	1.7	67.8	46.50	1	1.7	89.8
30.37	1	1.7	18.0	37.01	1	1.7	52.8	43.05	1	1.7	69.5	46.57	1	1.7	91.5
30.77	1	1.7	20.3	37.19	1	1.7	54.5	43.06	1	1.7	71.2	47.03	2	3.4	94.9
31.16	2	3.4	23.7	38.45	1	1.7	56.2	43.45	1	1.7	72.9	47.22	1	1.7	96.6
32.22	1	1.7	25.4	38.94	2	3.4	59.5	43.18	1	1.7	74.6	47.77	1	1.7	98.3
32.54	1	1.7	27.1	39.75	1	1.7	61.2	43.26	1	1.7	76.3	48.00	1	1.7	100.0

B.3.- CALCULO DE LA MEDIA PONDERADA DE LOS VALORES DE LOS INDICES Q Y RMR.

Como se mencionó anteriormente en los subcapítulos 5.6 y 5.7, dada la gran dispersión de los valores de los índices Q y RMR, se recurrió a determinar la media ponderada de estos valores para obtener un valor estadísticamente representativo.

Estadísticamente, cuando se desea indicar o determinar el valor que tiende a ser el más representativo de un conjunto de números, se utilizan las medidas de tendencia central. Las tres medidas de mayor relevancia son: la media, la mediana y la moda.

De estas tres medidas, la media es la más importante y utilizada. La media se define como el cociente de la suma de los valores de un conjunto entre el número de valores del conjunto. Esto es, la media de un conjunto de n números $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ se representa por \bar{X} y se define como:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

La fórmula para determinar la media por lo general se emplea cuando cada observación es de igual importancia. Cuando no sucede esto, se aplica la media ponderada, esto es:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Donde:

w_i .- es el peso o ponderación que se le da a cada observación del conjunto.

Ahora bien, cuando se desea dar una ponderación diferente a subgrupos de observaciones dentro del conjunto, como es el caso de los valores de Q y RMR obtenidos para el Túnel Barrientos en donde se quiere dar un

peso diferente a estos valores, dependiendo de la profundidad en la que fueron determinados de acuerdo con los criterios mencionados en los subcapítulos 5.6 y 5.7, se debe considerar la media ponderada por clases, - esto es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^r \left[w_i \left(\sum_{j=1}^{n_i} x_j \right) \right]}{\sum_{i=1}^r w_i n_i}$$

Donde:

r .- es el número de clases o subgrupos considerados.

w_i .- es el peso o ponderación que se le da a cada subgrupo o clase de observaciones.

n_i .- es el número de observaciones en cada clase o subgrupo.

Así, para los valores obtenidos en el Túnel Barrientos para Q y RMR, el cálculo de la media ponderada por clases es el siguiente para cada una de las cuatro perforaciones efectuadas:

SONDEO 1 KM. 17+700

PROFUNDIDAD	VALORES DEL INDICE Q	PONDERACIONES	OBSERVACIONES
2.50 - 5.30	0.09	0.20	Valores que no tienen influencia sobre el soporte.
5.30 - 8.30	0.12		
8.30-10.10	0.22	0.60	Valores localizados dentro de los 7.7 m sobre la clave proyectada.
10.10-13.10	0.42		
13.10-16.20	1.30		
16.20-19.20	0.40	0.20	Valores localizados en la zona de excavación del túnel.
19.20-22.20	0.06		
22.20-23.60	0.14		

Cálculo de la media ponderada por clases:

$$\bar{x} = \frac{(0.09+0.12)(0.20)+(0.22+0.42+1.30)(0.60)+(0.40+0.06+0.14)(0.20)}{(0.20)(2)+(0.60)(3)+(0.20)(3)}$$

$$\bar{X} = 0.47357$$

SONDEO 2 KM. 17+780

PROFUNDIDAD	VALORES DEL INDICE Q	PONDERACIONES	OBSERVACIONES
1.40-2.80	0.14		
2.80-3.55	0.28		
3.55-6.33	0.41		
6.33-7.55	0.69		
7.55-9.38	0.42		
9.38-10.18	1.4	Ver nota A	Valores que no tienen influencia sobre el so porte.
10.18-12.43	1.15		
12.43-13.63	0.13		
13.63-16.00	0.87		
16.00-18.20	0.88		
18.20-20.20	1.56		
20.20-22.20	1.33		
22.20-24.45	1.14	0.60	Valores localizados en los 7.7 m sobre la bó veda proyectada del tú nel.
24.45-27.60	1.40		
27.60-30.35	1.52		
30.35-31.85	1.16		
31.85-33.75	0.24	0.20	Valores localizados en la zona de excavación del túnel.
33.75-36.45	1.00		
36.45-38.60	0.90		
38.60-40.60	0.34		
40.60-42.75	0.07		
44.50-47.00	0.11	Ver nota A	Valor sin influencia - sobre el soporte.

A.- Estos dos grupos de valores se consideran como uno y se les asigna una ponderación de 0.20

Cálculo de la media ponderada por clases:

$$\bar{X} = \frac{(0.14+0.28+0.41+0.69+0.42+1.4+1.15+0.13+0.87+0.88+1.56+1.33+0.11)(0.20) + (1.14+1.40+1.52+1.16)(0.60) + (0.24+1.00+0.90+0.34+0.07)(0.20)}{(0.20)(13) + (0.60)(4) + (0.20)(5)}$$

$$\bar{X} = 0.91933$$

SONDEO 3 KM. 17+900

PROFUNDIDAD	VALORES DEL INDICE Q	PONDERACION	OBSERVACIONES
2.00-3.60	0.30		
3.60-5.60	0.67		
5.60-7.10	0.24	Ver nota A	Valores que no tienen influencia sobre el so- porte.
7.10-8.10	0.48		
8.10-9.90	0.82		
9.90-10.90	0.2		
10.90-12.40	0.46		
12.40-13.27	0.57		
13.27-14.47	0.4	0.60	Valores localizados en los 7.7 m sobre la bó- veda proyectada del tú- nel.
14.47-16.68	0.44		
16.68-18.63	0.27		
18.63-22.28	0.09		
22.28-24.28	0.57		
24.28-25.28	0.54	0.20	Valores localizados en la zona de excavación.
25.28-26.48	1.21		
26.48-27.73	0.59		
27.73-29.43	0.39		
29.43-31.43	1.32		
31.43-34.00	1.24	Ver nota A	Valores sin influencia sobre el soporte.
34.00-35.00	0.45		

A.- Estos dos grupos de valores se consideran como uno y se le asigna -- una ponderación de 0.20

Cálculo de la media ponderada por clases:

$$\bar{x} = \frac{(0.30+0.67+0.24+0.48+0.82+0.2+1.32+1.24+0.45)(0.20)+(0.46+0.57+0.4+0.44+0.27)(0.60)+(0.09+0.57+0.54+1.21+0.59+0.39)(0.20)}{(0.20)(9)+(0.60)(5)+(0.20)(6)}$$

$$\bar{x} = 0.5177$$

SONDEO 4 KM. 17+960

PROFUNDIDAD	VALORES DEL INDICE Q	PONDERACION	OBSERVACIONES
3.00-4.00	1.23		Valores localizados en los 7.7 m sobre la bóveda proyectada.
4.00-7.00	1.18	0.60	
7.00-10.00	1.04		
10.00-13.00	1.43		Valores localizados en la zona de excavación del túnel.
13.00-16.00	0.70	0.20	
16.00-19.00	0.85		
19.00-22.00	1.17		
22.00-25.00	0.64		Valores sin influencia sobre el soporte.
25.00-27.00	0.23	0.20	

Cálculo de la media ponderada:

$$\bar{X} = \frac{(1.23+1.18+1.04)(0.60) + (1.43+0.70+0.85+1.17)(0.20) + (0.64+0.23)(0.20)}{(0.60)(3) + (0.20)(4) + (0.20)(2)}$$

$$\bar{X} = 1.0247$$

MEDIA PONDERADA DE LOS VALORES DE RMR.

SONDEO 1 KM. 17+700

Profundidad (m)	Valores del índice RMR	Ponderaciones	Observaciones
2.50-5.30	22	0.20	Valores sin influencia sobre el soporte.
5.30-8.30	25		
8.30-10.10	30	0.60	Valores localizados en los 7.7 m sobre la bó- veda proyectada.
10.10-13.10	36		
13.10-16.20	46		
16.20-19.20	36	0.20	Valores localizados en la zona de excavación del túnel.
19.20-22.20	19		
22.20-23.60	26		

Cálculo de la media ponderada por clases:

$$\bar{x} = \frac{(22+25)(0.20) + (30+36+46)(0.60) + (36+19+26)(0.20)}{(0.20)(2) + (0.60)(3) + (0.20)(3)}$$

$$\bar{x} = 33.14$$

SONDEO 2 KM. 17+780

PROFUNDIDAD (m)	VALORES DEL INDICE RMR	PONDERACIONES	OBSERVACIONES
1.40-2.80	26		
2.80-3.55	32		
3.55-6.33	36		
6.33-7.55	41		
7.55-9.38	36		
9.38-10.18	47	Ver nota A	Valores sin influencia sobre el soporte.
10.18-12.43	45		
12.43-13.63	26		
13.63-16.00	43		
16.00-18.20	43		
18.20-20.20	48		
20.20-22.20	47		
22.20-24.45	45		
24.45-27.60	47	0.60	Valores localizados en los 7.7 m sobre la bó- veda proyectada.
27.60-30.35	48		
30.35-31.85	45		
31.85-33.75	31		
33.75-36.45	44		
36.45-38.60	43	0.20	Valores sin influencia sobre el soporte.
38.60-40.60	34		
40.60-42.75	20		
44.50-47.00	24	Ver nota A	Valores sin influencia

A.- Estos dos grupos de valores se consideran como uno y se le asigna -- una ponderación de 0.20

Cálculo de la media ponderada por clases:

$$\bar{X} = \frac{(26+32+36+41+36+47+45+26+43+43+48+47+24)(0.20) + (45+47+48+45)(0.60) + (31+44+43+34+20)(0.20)}{(0.20)(13) + (0.60)(4) + (0.20)(5)}$$

$$\bar{X} = 40.7$$

SONDEO 3 KM. 17+900

PROFUNDIDAD (m)	VALORES DEL INDICE RMR	PONDERACION	OBSERVACIONES
2.00-3.60	33		
3.60-5.60	40		
5.60-7.10	31	Ver nota A	Valores sin influencia sobre el soporte.
7.10-8.10	37		
8.10-9.90	42		
9.90-10.90	30		
10.90-12.40	37		
12.40-13.27	39		Valores localizados en los 7.7 m sobre la bóveda proyectada.
13.27-14.47	36	0.60	
14.47-16.68	37		
16.68-18.63	32		
18.63-22.28	22		
22.28-24.28	39		Valores localizados en la zona de excavación del túnel.
24.28-25.28	38	0.20	
25.28-26.48	46		
26.48-27.73	39		
27.73-29.43	36		
29.43-31.43	46		
31.43-34.00	46	Ver nota A	Valores sin influencia sobre el revestimiento.
34.00-35.00	37		

A.- Estos grupos de valores se consideran como uno y se le asigna una -- ponderación de 0.20

Cálculo de la media ponderada por clases:

$$\bar{X} = \frac{(33+40+31+37+42+30+46+46+37)(0.20) + (37+39+36+37+32)(0.60) + (22+39+38+46+39+36)(0.20)}{(0.20)(9) + (0.60)(5) + (0.20)(6)}$$

$$\bar{X} = 36.83$$

SONDEO 4 KM. 17+960

PROFUNDIDAD (m)	VALORES DEL INDICE RMR	PONDERACION	OBSERVACIONES
3.00-4.00	46		Valores localizados en los 7,7 m sobre la bóveda proyectada.
4.00-7.00	45	0.60	
7.00-10.00	44		
10.00-13.00	47		Valores localizados en la zona de excavación del túnel.
13.00-16.00	41	0.20	
16.00-19.00	43		
19.00-22.00	45		
22.00-25.00	40	0.20	Valores sin influencia sobre el revestimiento
25.00-27.00	31		

Cálculo de la media ponderada por clases:

$$\bar{x} = \frac{(46+45+44)(0.60) + (47+41+43+45)(0.20) + (40+31)(0.20)}{(0.60)(3) + (0.20)(4) + (0.20)(2)}$$

$$\bar{x} = 43.47$$

REFERENCIAS DEL APENDICE B.

1.- BMDP STATISTICAL SOFTWARE, INC.

1984.-

Programa BMDP2D - Versión 4.1B. Los Angeles CA, U.S.A. Copyright 1983 --
Regents of University of California.

CONTINUA



99°20'

99°10'



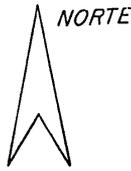
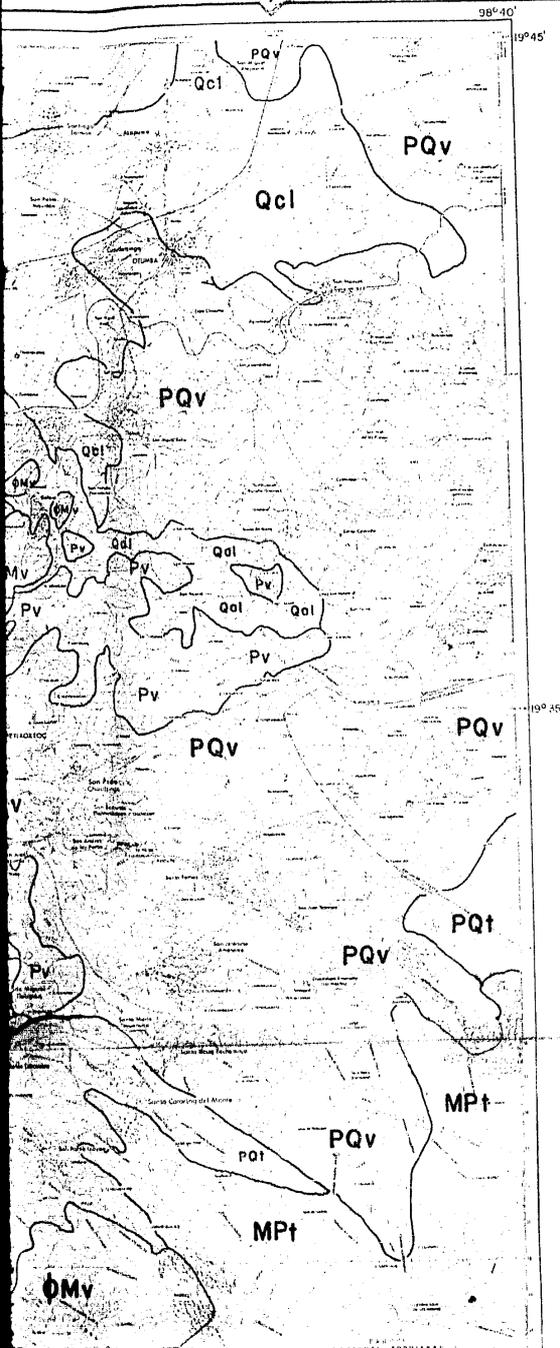
CONTINUA



99°20'

99°10'





LEYENDA

Qc1	Qc1	PQc	PQp	PQ1	PQv	Pv
-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

Qc1 Sedimentos lacustres depositados durante el Cuaternario en el área ocupada por el Lago de Texcoco (incluyendo las cuencas de Chalco, Xochimilco y Mixquic); principalmente arcillas bentónicas con contenidos variables de sales e intercalaciones de horizontes piroclásticos así como depósitos actuales. En las márgenes de la cuenca se encuentra interdigitada con Qal.

ALUVION

Qal Con interstratificación de cenizas volcánicas; quedan comprendidos en los márgenes de la cuenca y en las faldas de los cerros; localmente está interdigitada con PQc.

FORMACION CHICHINAUTZIN

PQc Derrames de lava basáltico con material piroclástico asociado; localmente interdigitada con PQp.

RIODACITA POPOCATEPETL

PQp Derrames lávicos juveniles que cubren la parte superior y la ladera suroccidental del volcán Popocatepetl, de composición dacítica a riodacítica; interdigitada localmente con Qal.

ROCAS VOLCANICAS PLIOCENICAS Y CUATERNARIAS

PQv de composición que varía desde riodacítica hasta basáltica, provenientes de distintos centros eruptivos; localmente interdigitadas con PQ1 y Qal.

FORMACION TARANGO

PQ1 En la parte inferior, depósitos de aluviones derivados de las sierras volcánicas tal y occidental, asociados con piroclastos; en la parte superior, separado por discordancia erosional, principalmente horizontes de ceniza y pómez; localmente interdigitada con MP1.

ROCAS VOLCANICAS PLIOCENICAS

Pv Andesitas de la sierra de Tepotzotlán; dacitas de la sierra de Guadalupe.

MP1	MP1	MP2	MPa	MPc
-----	-----	-----	-----	-----

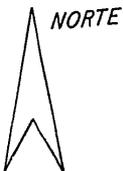
FORMACION TLALOC

MP1 Lavas que forman las distintas unidades de la sierra de Río Frio, de composición principalmente riodacítica; localmente interdigitada con PQ1.

FORMACION IZTACCHUATL

MP1 Lavas generalmente dacíticas que forman la masa principal de los volcanes Popocatepetl e Iztacchuatl, exceptuando el "pecho" del segundo, el cono reciente del primero y los lavas lávicos que cubren su ladera suroccidental.

FORMACION ZEMPOALA



LEYENDA

Qcl	Qal	PQc	PQp	PQI	PQv	Py
-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

Qcl. Sedimentos lacustres depositados durante el Cuaternario en el área ocupada por el Lago de Texcoco (incluyendo las cuencas de Chalco, Xochimilco y Mixquit); principalmente arcillas bentónicas con contenidos variables de sales e intercalaciones de horizontes piroclásticos así como depósitos actuales. En los márgenes de la cuenca se encuentra interdigitada con - Qal.

ALUVION

Qal. Con interstratificación de cenizas volcánicas; quedan comprendidos en los márgenes de la cuenca y en las faldas de los cerros; localmente está interdigitada con PQc.

FORMACION CHICHINAUTZIN

PQc. Derrames de lava basáltica con material piroclástico asociado, localmente interdigitada con PQp.

RIODACITA POPOCATEPETL

PQp. Derrames lávicos juveniles que cubren la parte superior y la ladera suroccidental del volcán Popocatepetl; de composición dacítica a riodalítica; interdigitada localmente con PQc y Qal.

ROCAS VOLCANICAS PLIOCENICAS Y CUATERNARIAS

PQv. de composición que varía desde riodalítica hasta basáltica, provenientes de distintos centros eruptivos; localmente interdigitados con PQI y Qal.

FORMACION TARANGO

PQI. En la parte inferior, depósitos de aluviones derivados de las sierras volcánicas oriental y occidental, asociados con piroclastos; en la parte superior, separada por discordancia erosional, principalmente horizontes de ceniza y pómez; localmente interdigitada con MPI y MPC.

ROCAS VOLCANICAS PLIOCENICAS

Py. Andesitas de la sierra de Tepetzotlán; dacitas de la sierra de Guadalupe.

Pleistoceno y Holoceno

Plioceno

19°35'

M1*	MPI	MP2	MP3	MPC
-----	-----	-----	-----	-----

FORMACION TLALOC

MPI. Lavas que forman las distintas unidades de la sierra de Río Frio, de composición principalmente riodalítica; localmente interdigitada con PQI.

FORMACION IZTACCHUATL

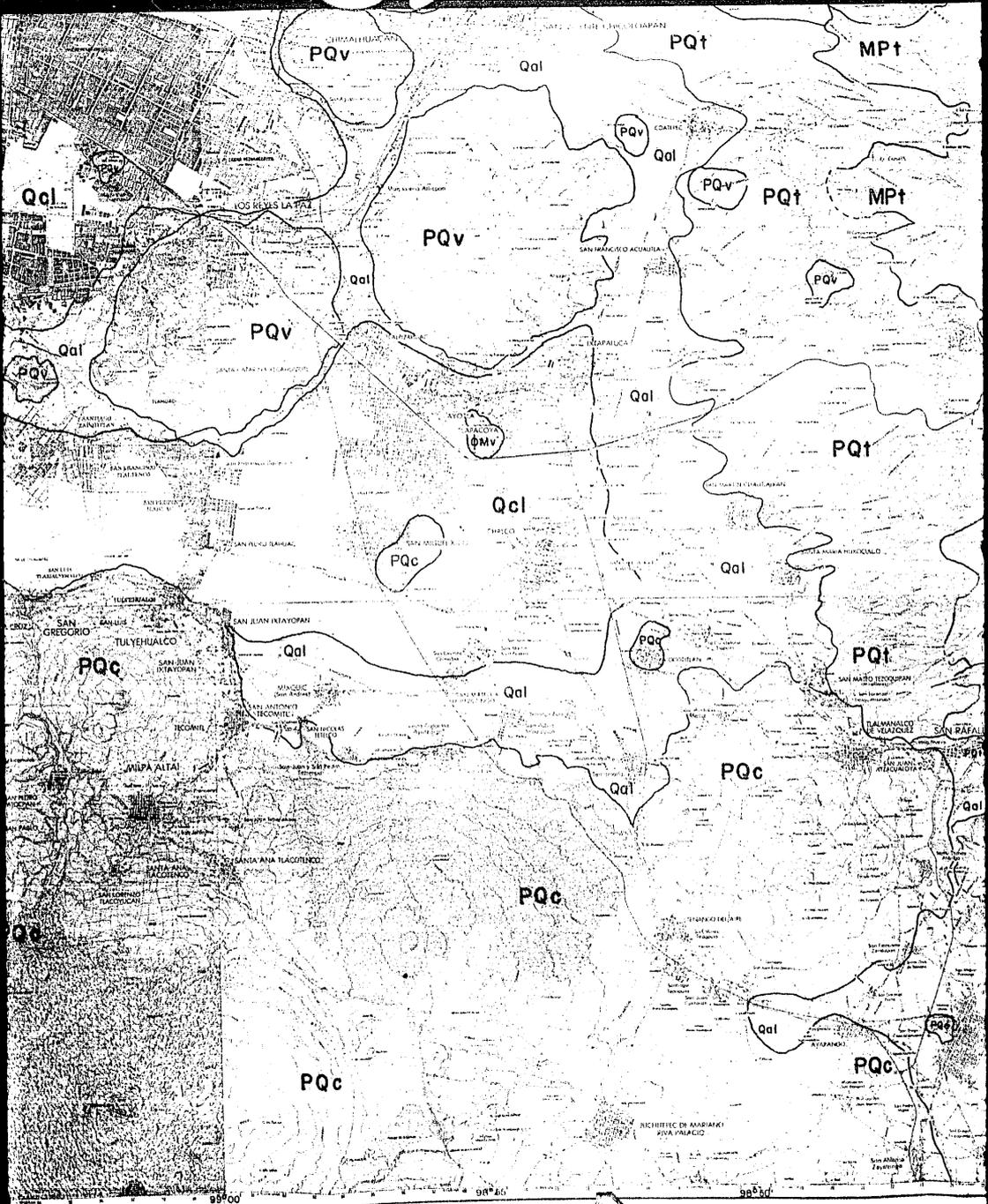
MPI. Lavas generalmente dacíticas que forman la masa principal de los volcanes Popocatepetl e Iztacchuatl, exceptuando el "pecho" del segundo, el cono reciente del primero y los derrames lávicos que cubren su ladera suroccidental.

FORMACION ZEMECALA



99°20' 99°10' 99°05'





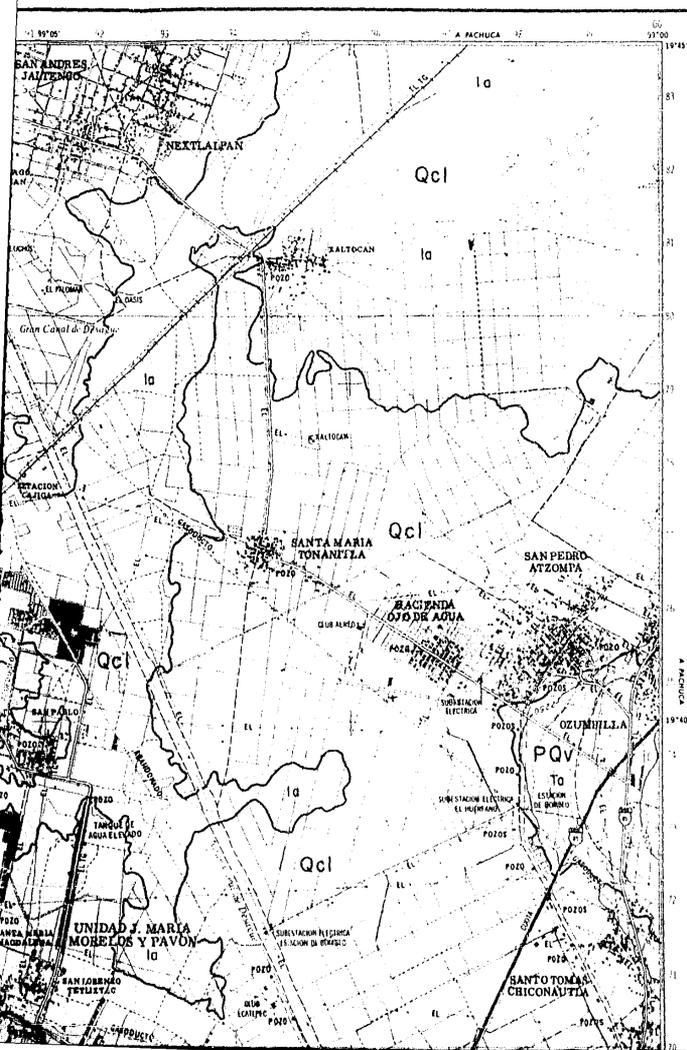
98°00'

98°40'

98°00'

CONTINUA

CUAUTITLAN E-14-A-29



LEYENDA

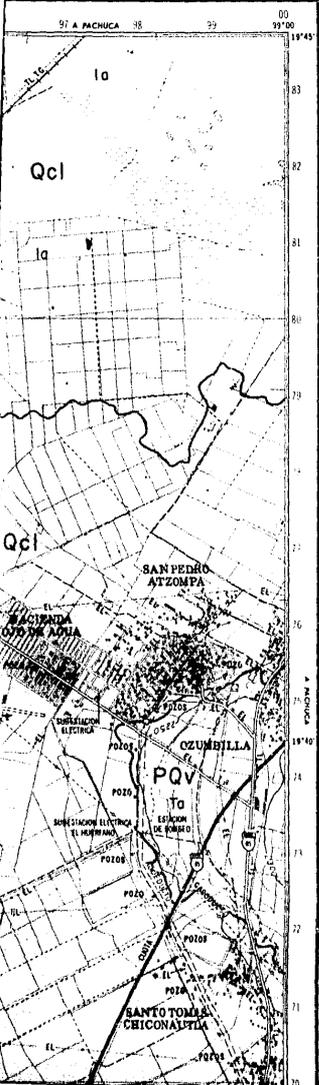
- Qcl.- Sedimentos lacustres.
- Qal.- Aluvión con interstratificación
- PQI.- Formación Tarango.
- Pv.- Rocas volcánicas pliocénicas.
- ΦMv.- Rocas volcánicas del Terciario

NORTE



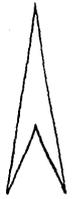
- re Suelos residuales
- la Depósitos lacustres
- al Aluvión.
- Ta Toba arenosa
- T Toba.
- Bv Brecha volcánica
- A Andesita.
- B Basalto.

LEYENDA

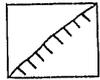
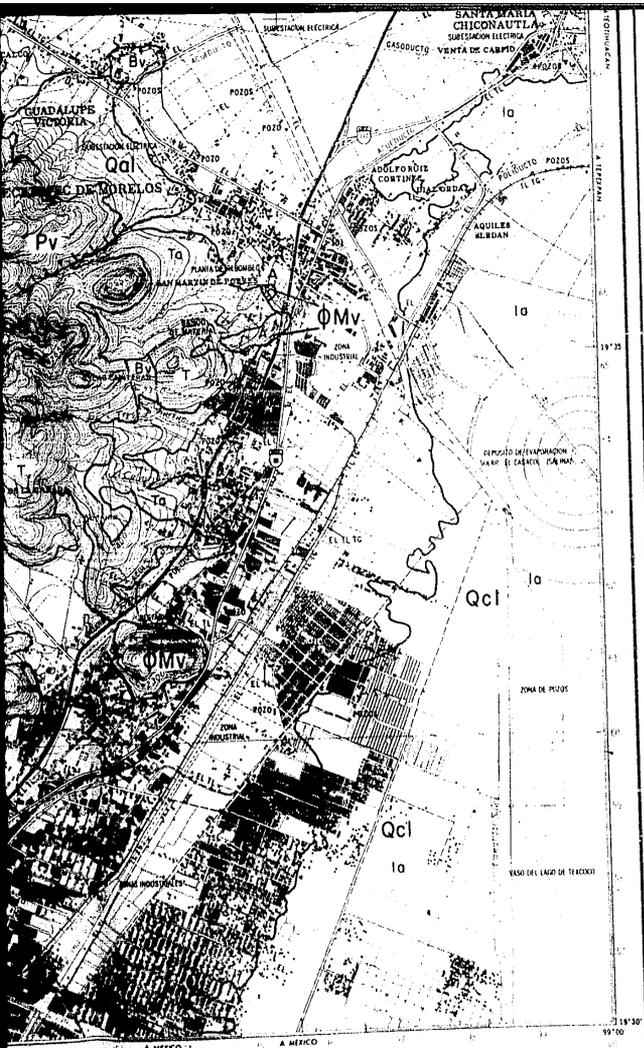


- Qcl.- Sedimentos lacustres.
- Qal.- Aluvión con interstratificación de cenizas volcánicas.
- PQt.- Formación Tarango.
- Pv.- Rocas volcánicas pliocénicas.
- ΦMv.- Rocas volcánicas del Terciario medio.

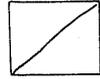
NORTE



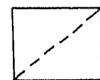
- re Suelos residuales.
- la Depósitos lacustres.
- al Aluvión.
- Ta Toba arenosa.
- T Toba.
- Bv Brecha volcánica.
- A Andesita.
- B Basalto.



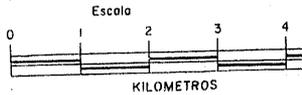
Falla normal.



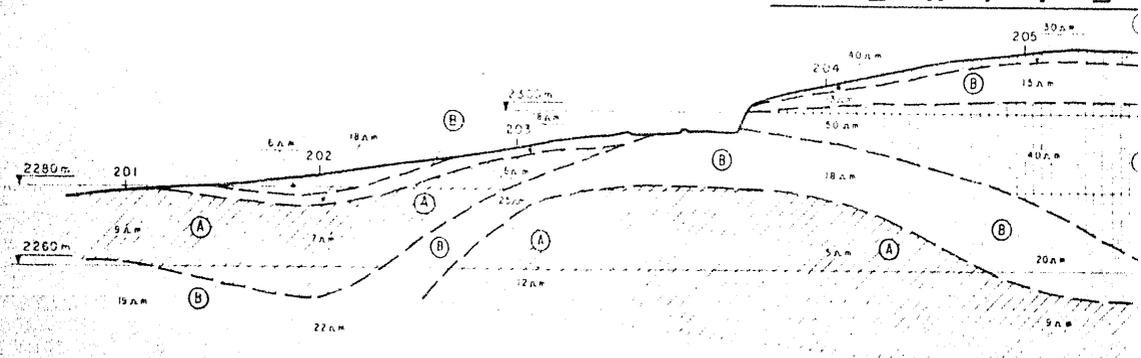
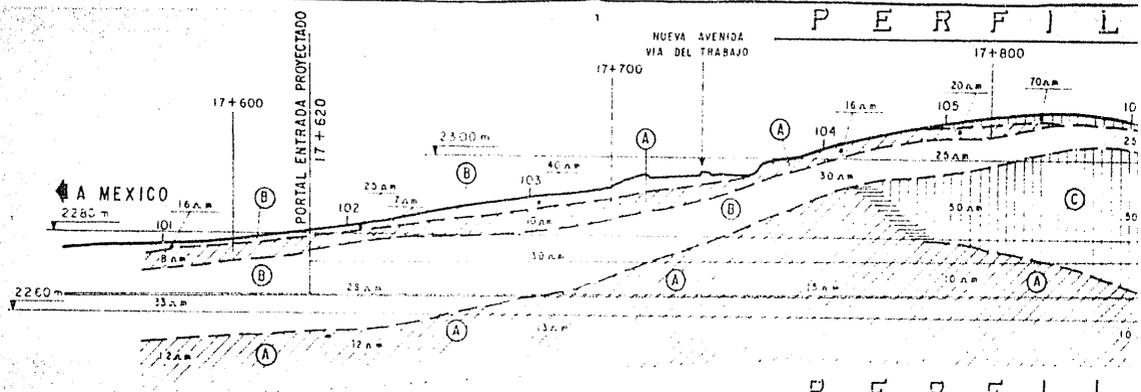
Contacto geológico.



Contacto geológico infe



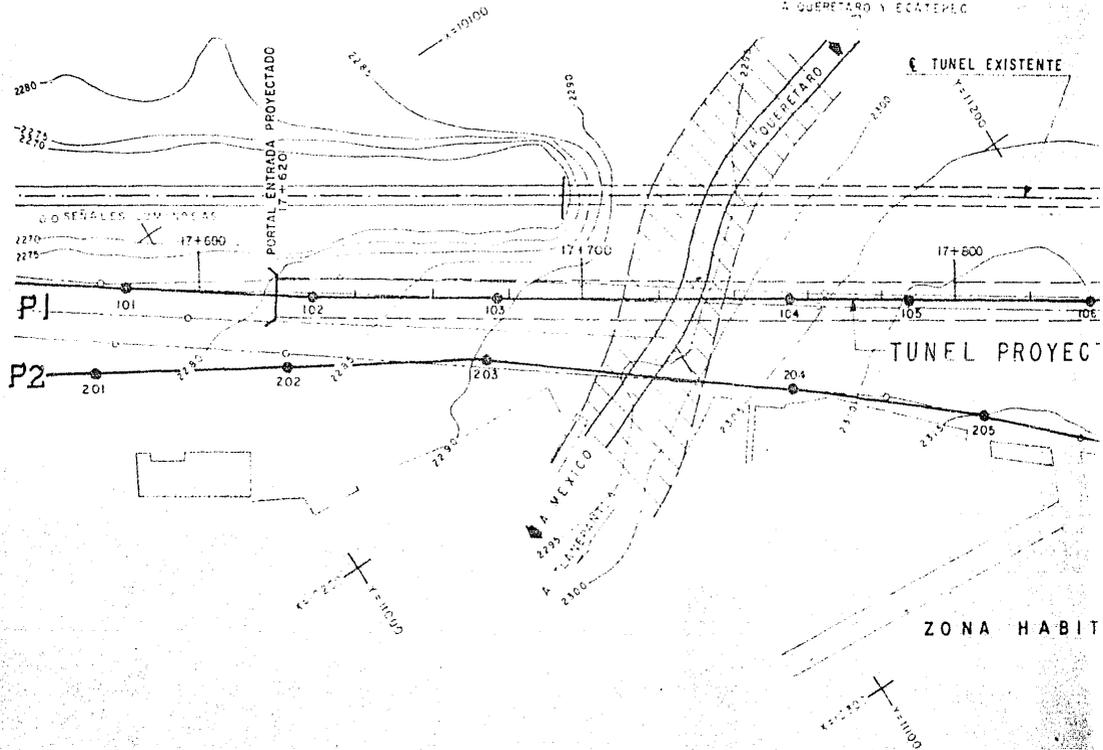
UNAM FACULTAD
 PLANO 2.- GEOLOG
 Ricardo G. López González



ESCALAS H. 1:1000
V. 1:1000

- (A) Material to
- (B) Material to
- (C) Tabas ande

NUOVA AVENIDA VIA DEL TRABAJO
A QUERETARO Y ECATEPEC



ESCALA : 1 : 1000

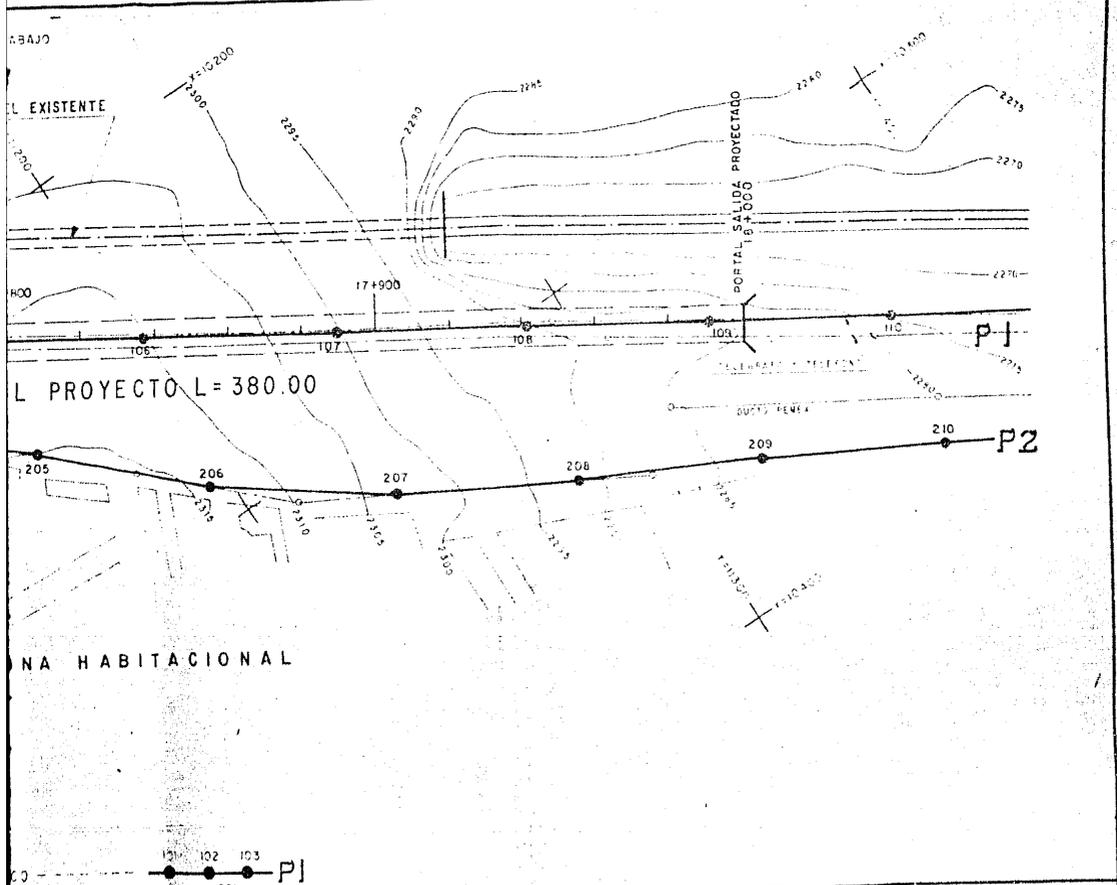
PERFIL GEOFISICO - - - - -
SONDED GEOFISICO - - - - -

A. BAJO

L. EXISTENTE

L. PROYECTO L = 380.00

NA HABITACIONAL



UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA
PLANO 3- PERFIL GEOELECTRICO	
Ricardo G. López González	TESIS PROFESIONAL

RECUPERACION DE MUESTRA

ELEV.
m.s.n.m

2320

2310

2300

2290

2280

2270

2260

PORTAL DE ENTRADA

CAMINO

0 10 20 30 40 50 60 70 80

SONDEO 1

NO HUBO RECUPERACION

17+600

17+620

17+640

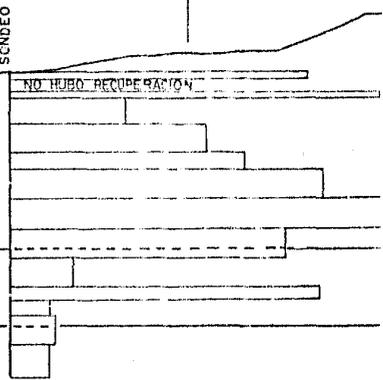
17+660

17+680

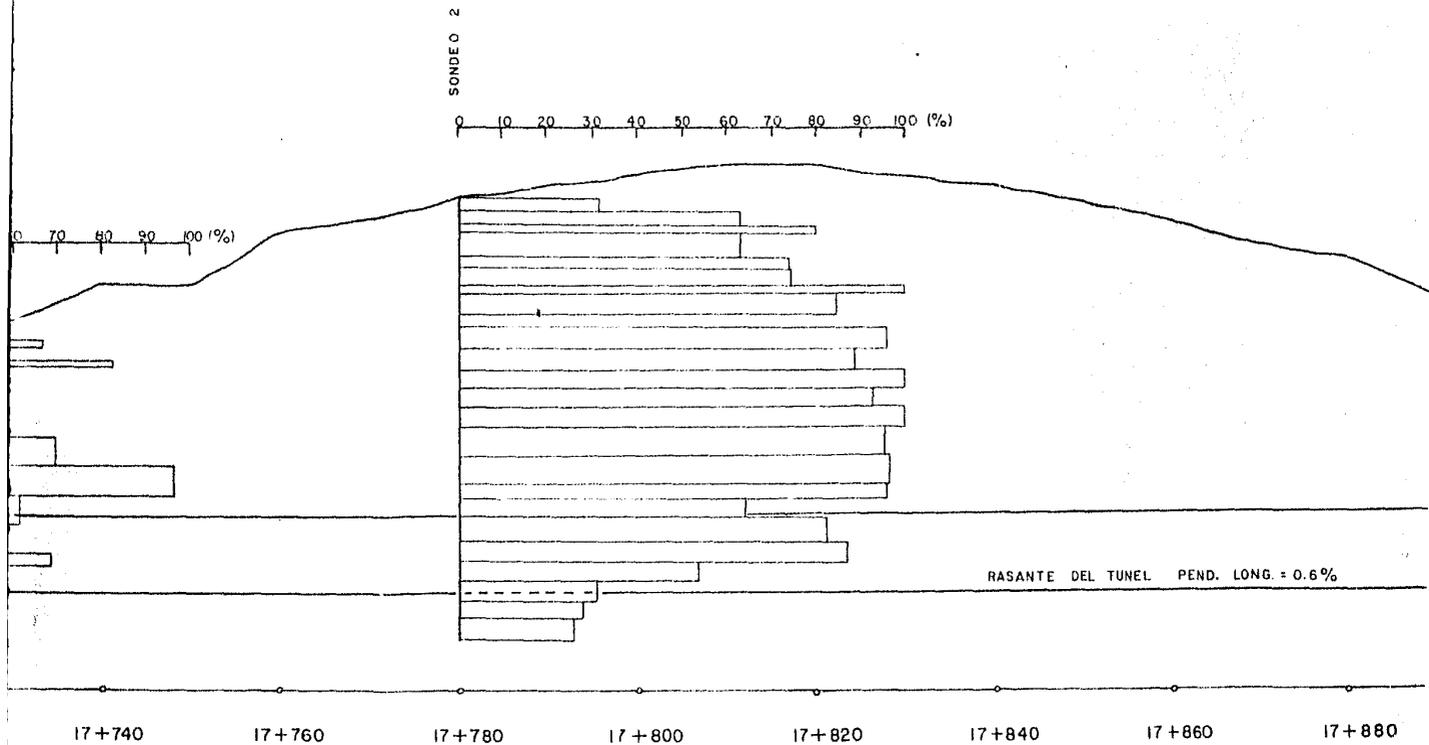
17+700

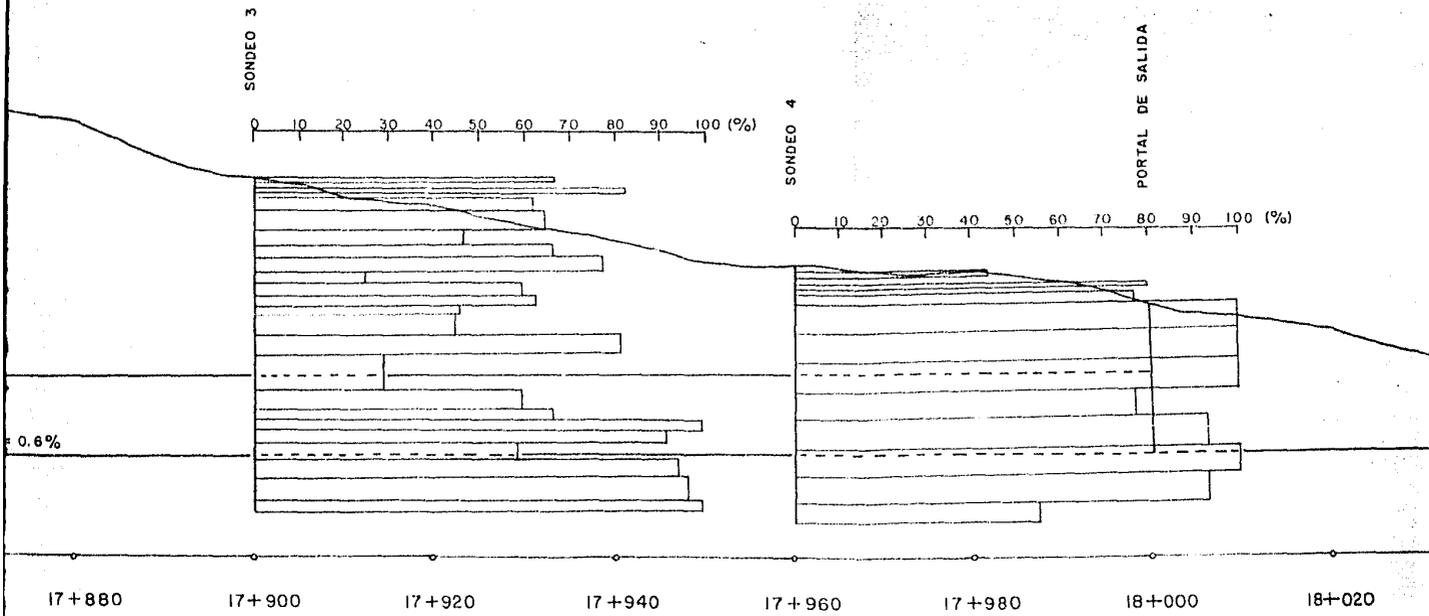
17+720

17+

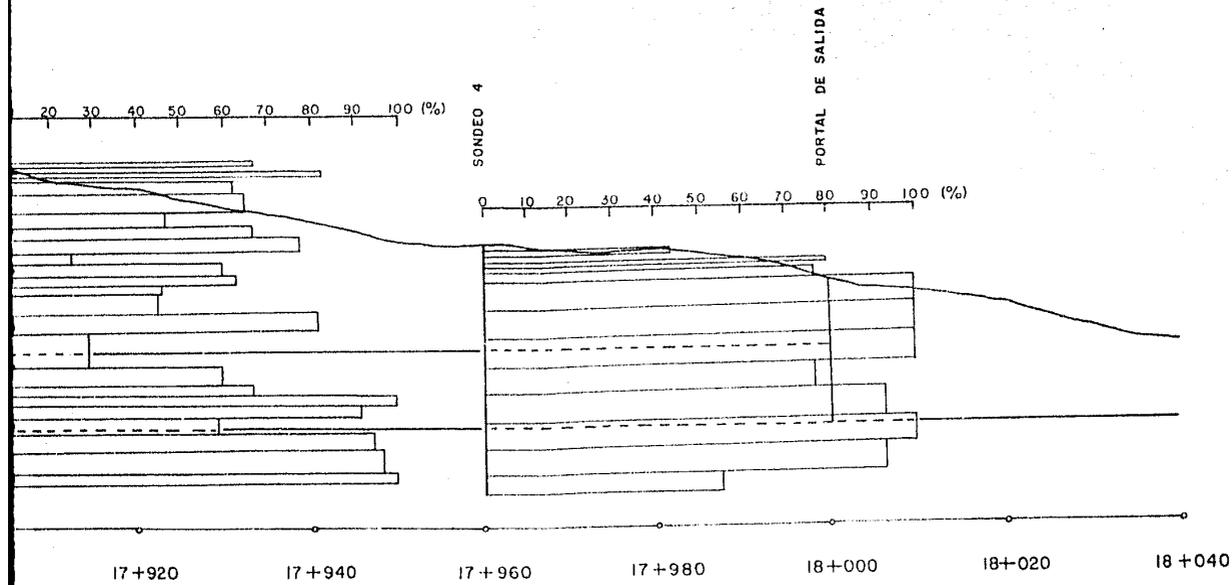


MUESTRAS EN LOS SONDEOS EXPLORATORIOS.





ESCALA VERTICAL Y HORIZONTAL
 0 10 20 30 40 50



ELEV.
m.s.n.m

2320

2310

2300

2290

2280

2270

2260

PORTAL DE ENTRADA

MUY MALA MALA REGULAR

SONDEO 1

CAMINO

10 20 30 40 50 60 70

17+600

17+620

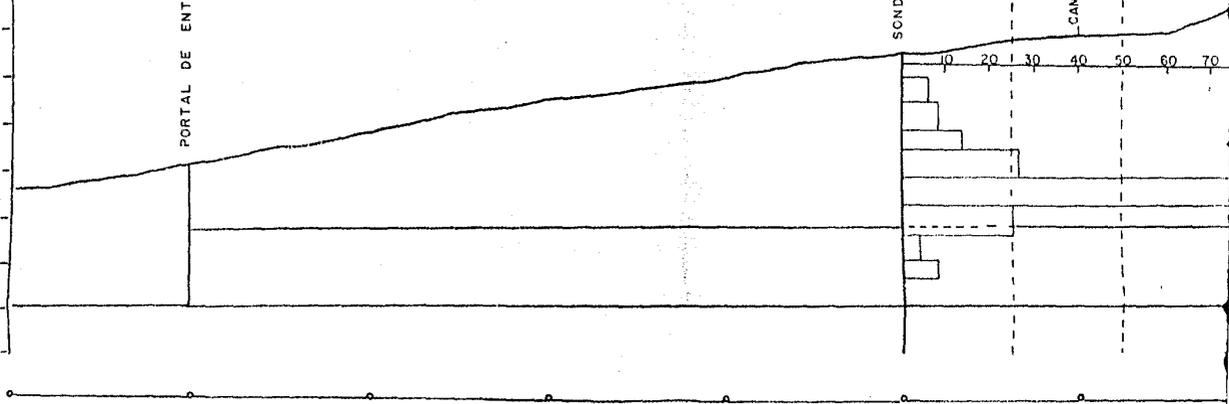
17+640

17+660

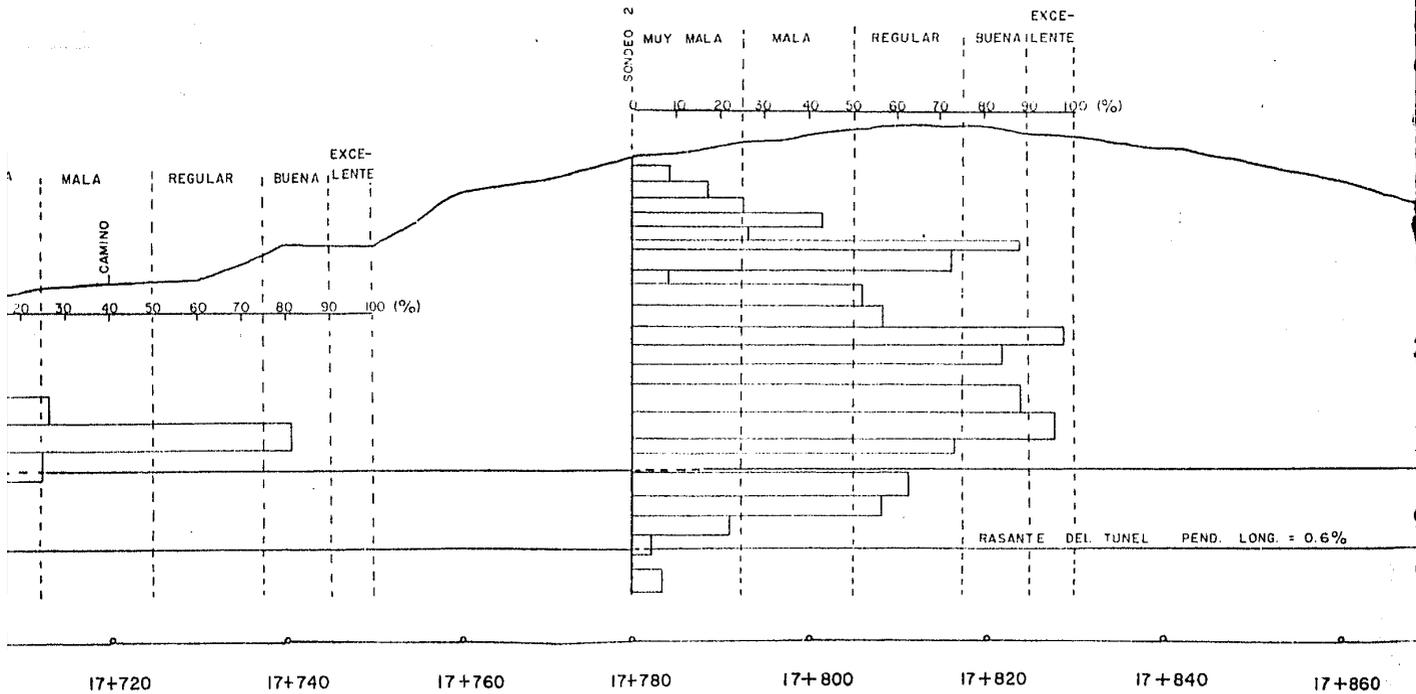
17+680

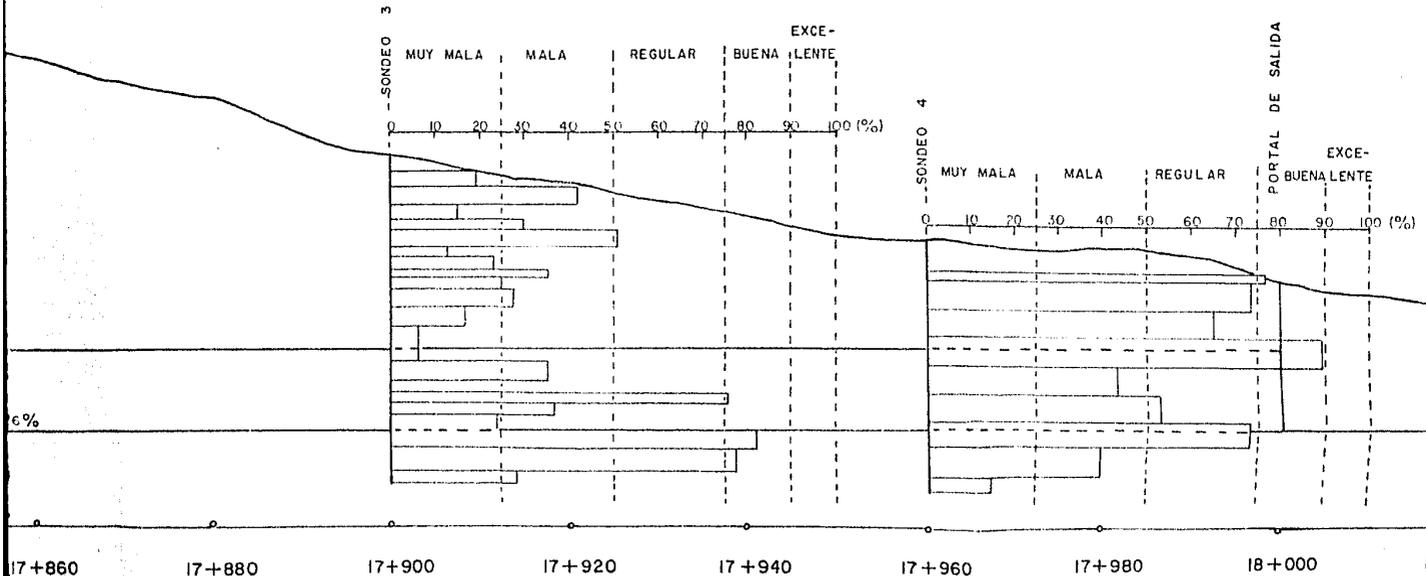
17+700

17+720



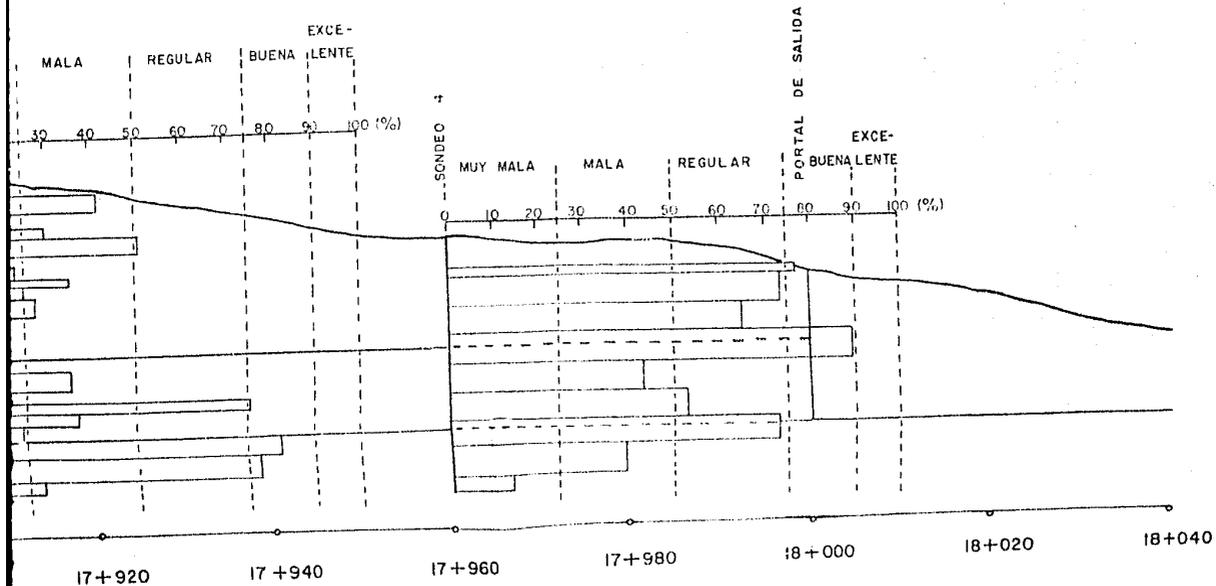
DE CALIDAD DE ROCA (RQD) OBTENIDO EN LOS SONDEOS EXPLORATORIOS.





UNAM FACULTAD
PLANO 4.- PERFIL
Ricardo G. López González

METROS



UNAM FACULTAD DE INGENIERIA

PLANO 4.- PERFIL GEOTECNICO

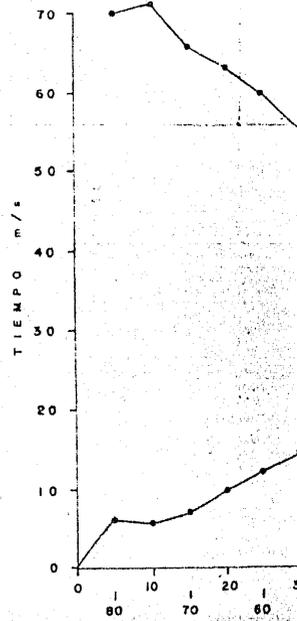
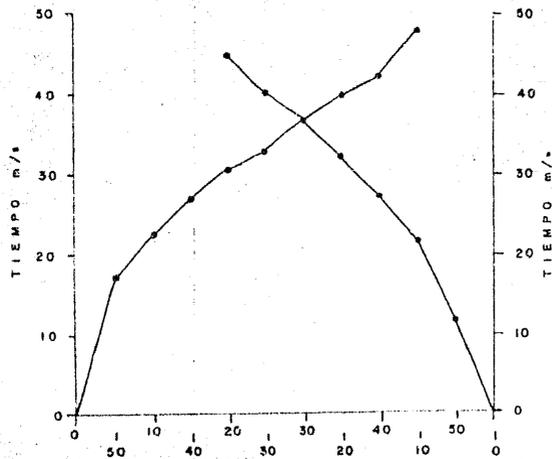
Ricardo G. López González

TESIS PROFESIONAL

DROMOC

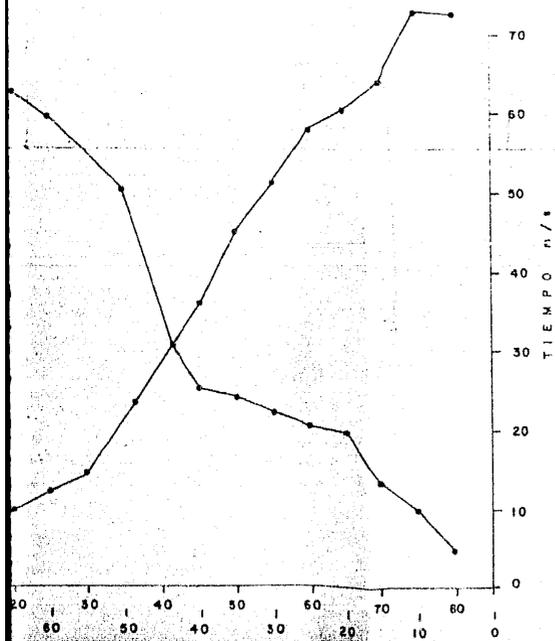
TE

TENDIDO — I

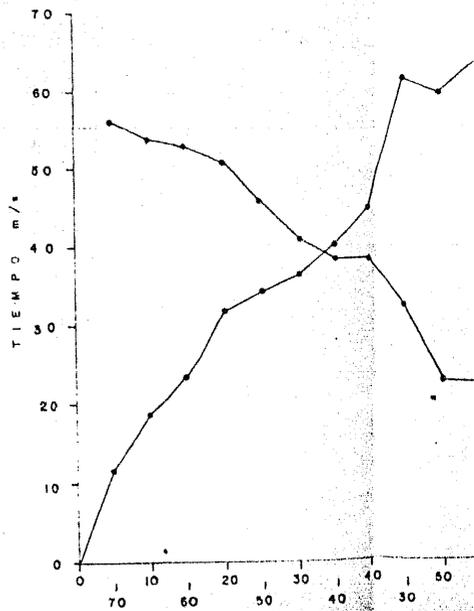


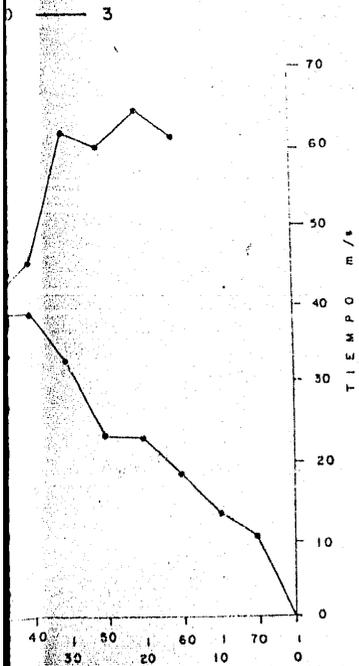
O C R O N I C A S

T E N D I D O — 2



T E N D I D O — 3





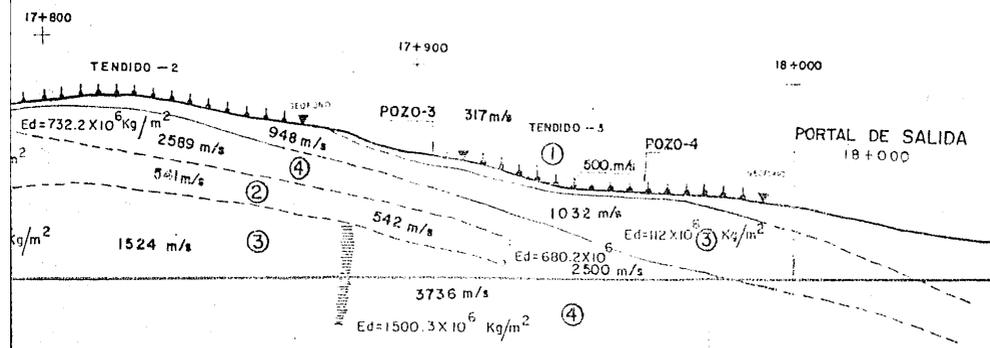
L E Y E N D A

- TOBAS LIMO - ARENOSAS _____ ①
- ANDESITA SUMAMENTE FRACTURADA POCO ALTERADA _____ ②
- ANDESITA MUY FRACTURADA Y ALTERADA _____ ③
- ANDESITA FRACTURADA POCO ALTERADA _____ ④

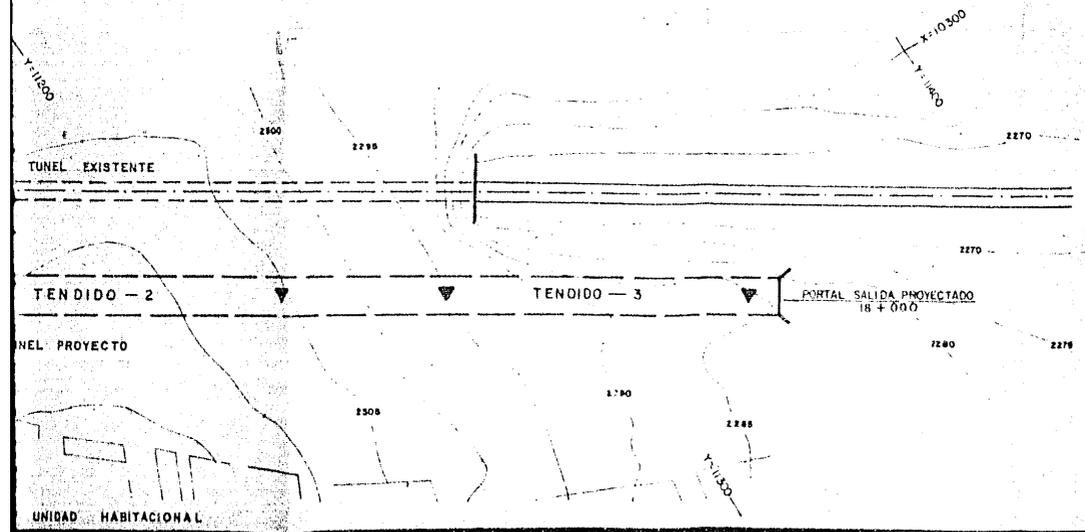
S I M B O L O G Í A

- GEOFONO _____ ▼
- PUNTO DE IMPACTO _____ ↓
- VELOCIDAD _____ 379 m/s
- CONTACTO ELASTICO _____

SISMICA



ZACION

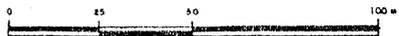


CONTACTO INFERIDO _____

ZONA DE TRANSICION _____

MM

ESCALA 1:1000



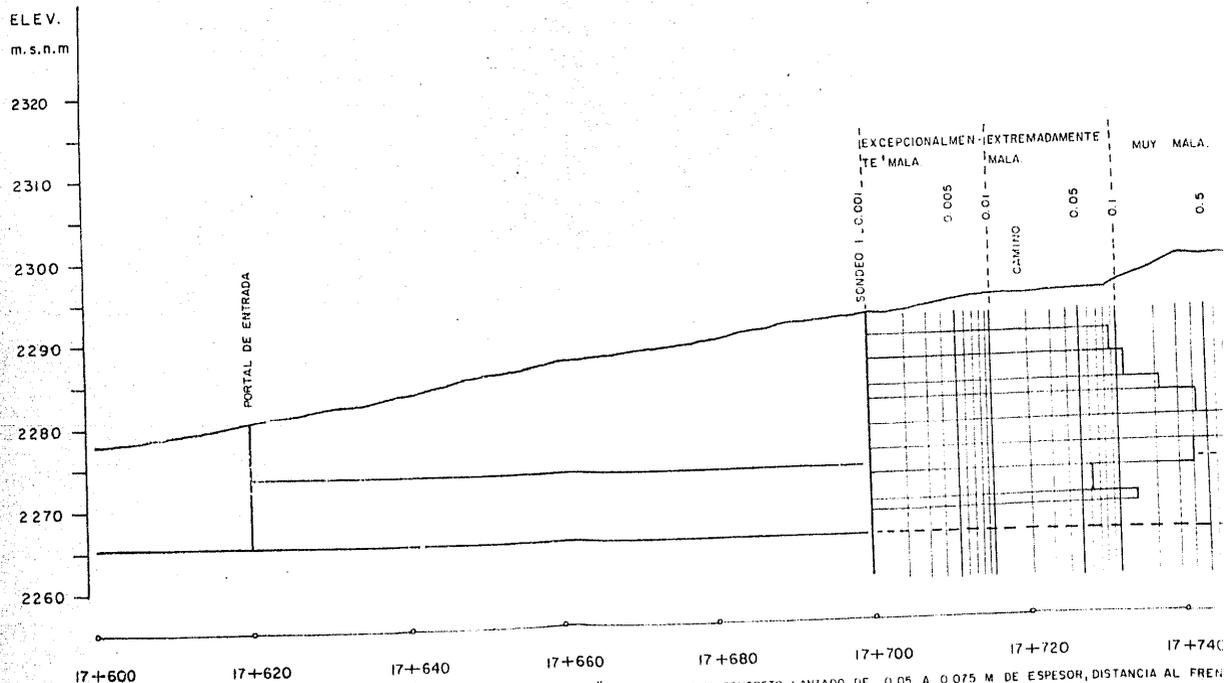
UNAM FACULTAD DE INGENIERIA

PLANO 5.- PERFIL GEOSISMICO

Ricardo G. López González

TESIS PROFESIONAL

INDICE Q DE BARTON PARA T

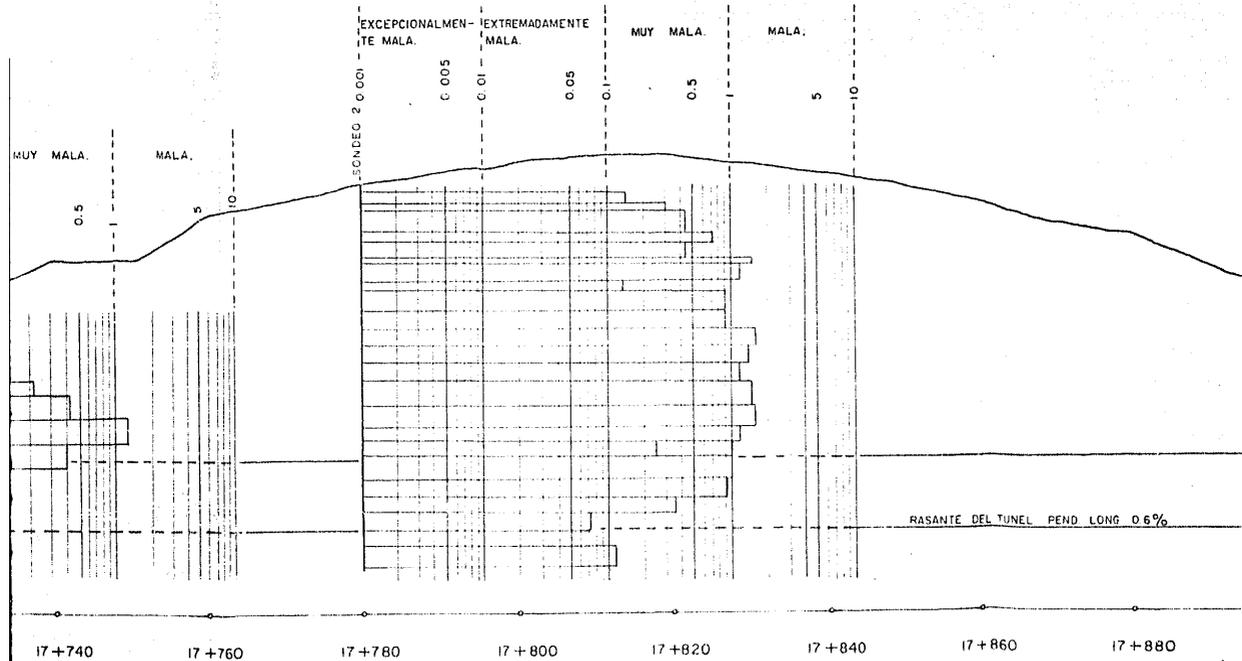


MARCOS DE ACERO IPR 8"
A CADA .50 M, CONCRETO
LANZADO DE JOM DE -
ESPESOR, DIST. AL FREN-
TE .50 M, TIEMPO PROM
DE ESTABILIDAD SIN SOPOR-
TE = 5 HRS. PARA UN CLA

MARCOS DE ACERO IPR 6" A CADA 0.75 M, CONCRETO LANZADO DE 0.05 A 0.075 M DE ESPESOR, DISTANCIA AL FREN-

ESCALA VERTICAL Y HORIZONT

PARA TUNELEO.

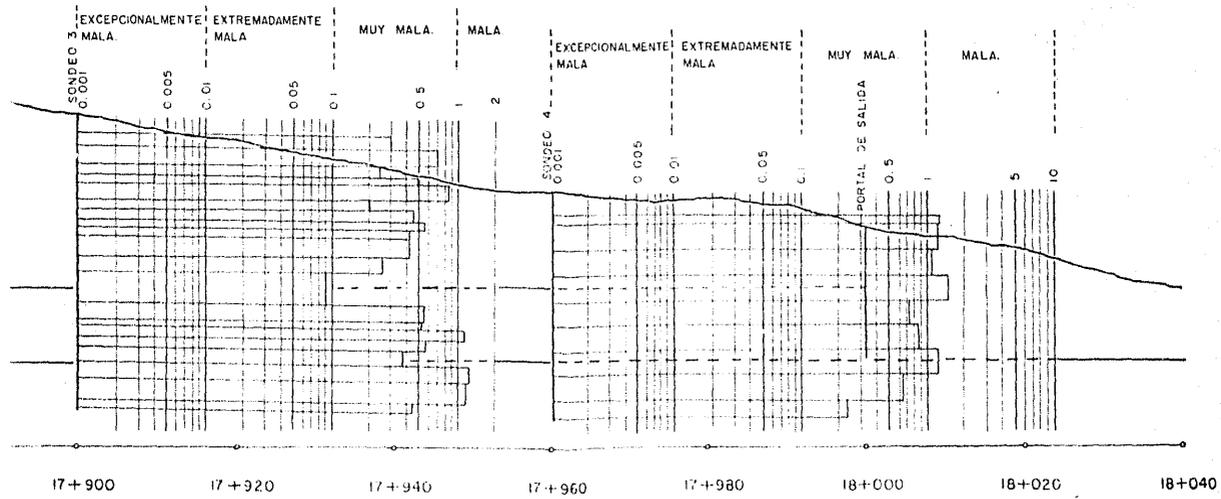


IA AL FRENTE 1.00 M, TIEMPO PROMEDIO DE ESTABILIDAD SIN SOPORTE: 5 HRS PARA UN CLARO ACTIVO DE 150 M.

MARCOS DE ACERO 1PR 8" A CADA 100 M, CONCRETO LANZADO DE 0.025 M DE ESPESOR, DISTANCIA AL FRENTE 150 M, TIEMPO PROM. DE ESTABILIDAD SIN SOPORTE: 5 HRS. PARA UN CLARO ACTIVO DE 150 M

MA
DA
DE
CIA
PRC
POR
HO

HORIZONTAL

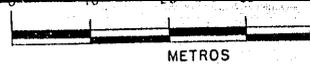


17+900
 MARCOS DE ACERO 1PR 8" A CA-
 DA 0.75 M, CONCRETO LANZADO
 DE 0.05 M DE ESPESOR, DISTAN-
 CIA AL FRENTE 1.00 M, TIEMPO
 PROM. DE ESTABILIDAD SIN SO-
 PORTE 5 HRS. PARA UN CLAR-
 O ACTIVO DE 1.50 M.

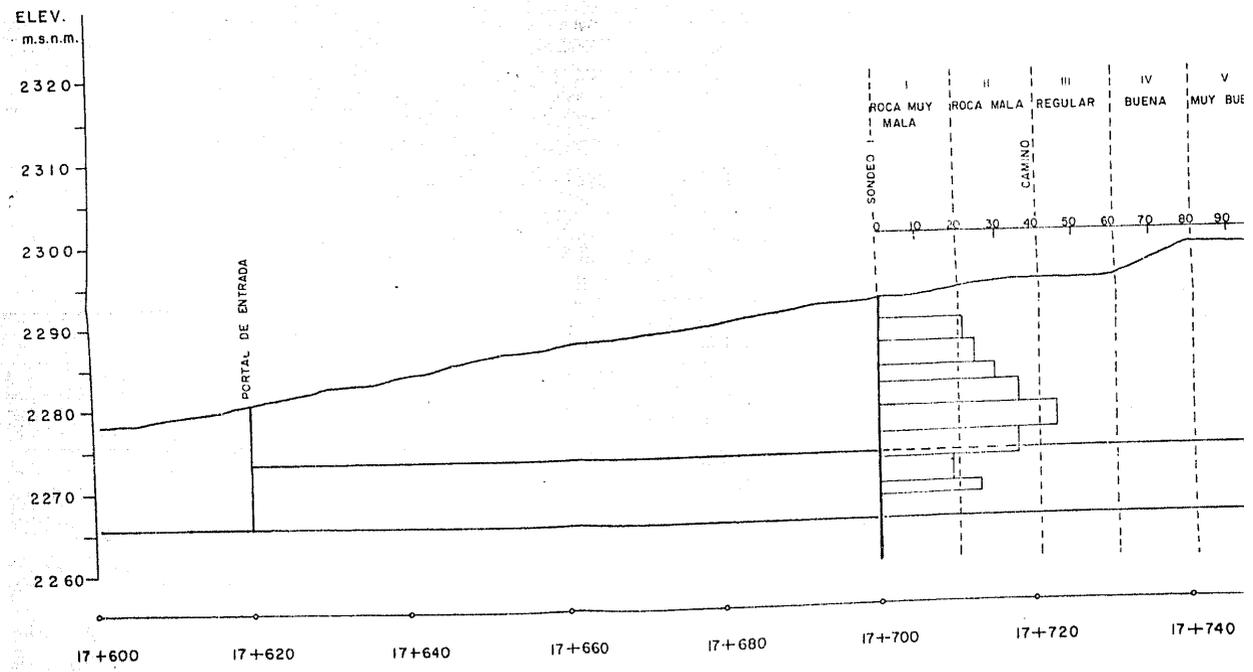
17+920
 MARCOS DE ACERO 1PR 8" A CA-
 DA 1.50 M, CONCRETO LAN-
 ZADO DE 0.025 M DE ESPESOR, DISTANCIA AL FRENTE
 2.00 M, TIEMPO PROM. DE ESTABILIDAD SIN SOPORTE 1.5
 MANA PARA UN CLARO ACTIVO DE 3.00 M

17+960
 MARCOS DE ACERO 1PR 8" A DISTAN-
 CIAS VARIABLES ENTRE 0.50 Y 0.75 M,
 CONCRETO LANZADO DE 0.10 M LE
 ESPESOR, DISTANCIA AL FRENTE 0.50 M,
 TIEMPO PROM. DE ESTABILIDAD SIN
 SOPORTE 1 SEMANA PARA UN CLARO
 ACTIVO DE 3.00 M

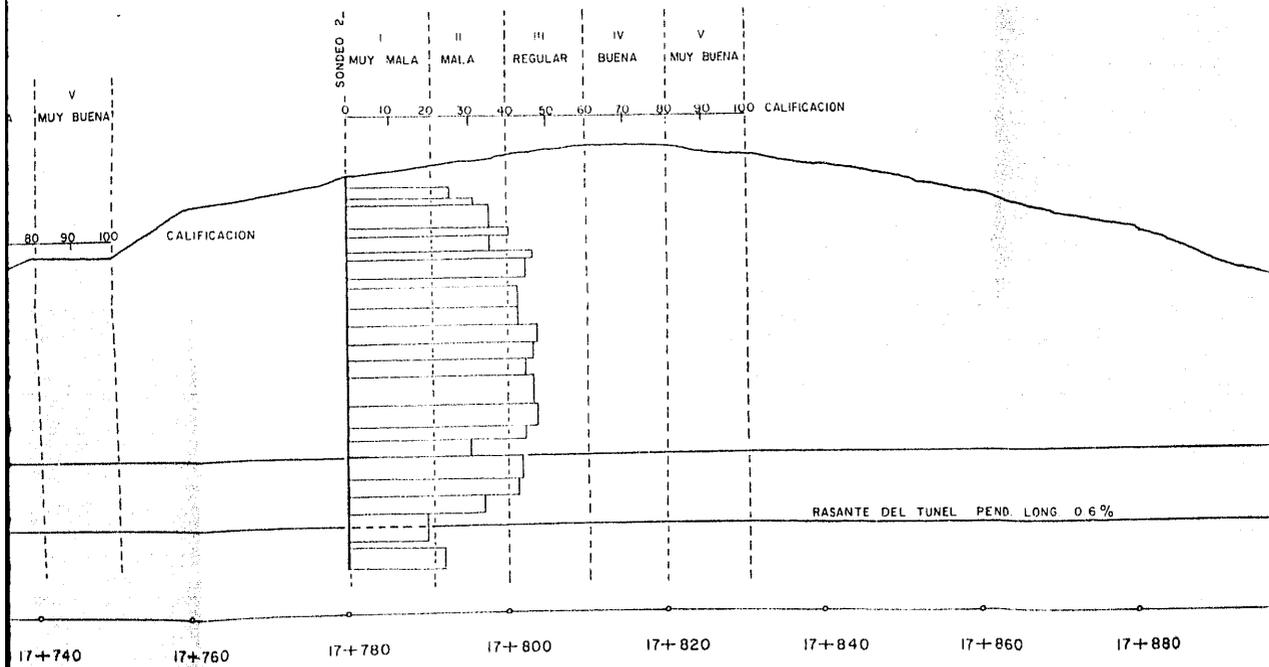
17+980
 18+000
 18+020
 18+040



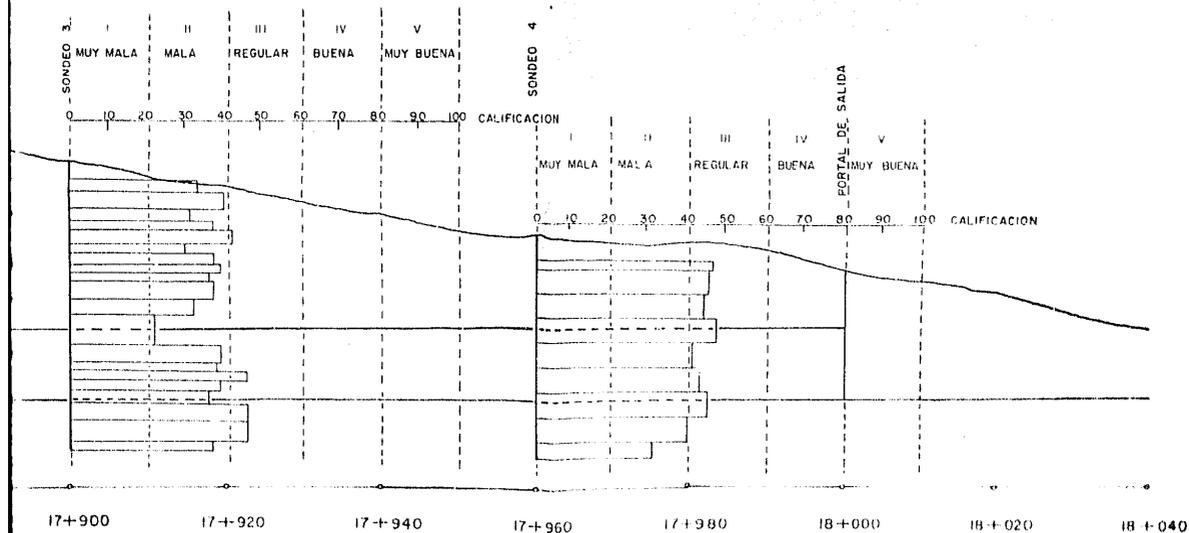
INDICE RMR DE BIENIAWSKI PA



SKI PARA TUNELEO.



NOTA.- El túnel se excavará a media sección y posteriormente se banqueará para completar la sección. Se colocarán anclas para soportar bloques inestables. El revestimiento definitivo se construirá con concreto armado.



UNAM FACULTAD DE INGENIERIA

PLANO 6: PERFIL GEOTECNICO

Ricardo G. López González

TESIS PROFESIONAL