

12  
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES  
EN LAS CUATRO BOQUILLAS DEL  
PROYECTO PICACHOS, SINALOA

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOLOGO  
P R E S E N T A :  
GUADALUPE IBARRA OLIVARES

MEXICO, D. F.

FALLA DE ORIGEN

1991



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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

**"ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LAS CUATRO BOQUILLAS DEL  
PROYECTO PICACHOS SINALOA"**

**CAPITULO I INTRODUCCION**

I.1 ANTECEDENTES -----	1
I.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO -----	3
I.3 METODO DE TRABAJO -----	4

**CAPITULO II GEOGRAFIA**

II.1 LOCALIZACION GEOGRAFICA -----	6
II.2 VIAS DE ACCESO -----	6
II.3 HIDROGRAFIA -----	8
II.4 CLIMA Y VEGETACION -----	8
II.5 POBLACION -----	9

**CAPITULO III GEOLOGIA**

III.1 FISIOGRAFIA Y GEOMORFOLOGIA -----	10
III.2 MARCO GEOLOGICO REGIONAL -----	13
III.2.1 ESTRATIGRAFIA -----	13
III.2.2 GEOLOGIA HISTORICA Y TECTONICA -----	17
III.3 GEOLOGIA DE LAS BOQUILLAS -----	26
III.3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS EN LA ZONA DE LAS ALTERNATIVAS -----	27
III.3.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL -----	32

**CAPITULO IV PROPIEDADES MECANICAS DEL MACIZO ROCOSO EN LAS BOQUILLAS**

IV.1	PRUEBAS DE LABORATORIO-----	35
IV.2	CLASIFICACION INGENIERIL DE LA ROCA INTACTA---	42
IV.3	CLASIFICACION GEOMECANICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS -----	43
IV.3.1	DESCRIPCION GEOTECNICA BASICA (B.G.D.) -----	47
IV.3.2	CLASIFICACION N G I -----	49
IV.3.3	CLASIFICACION CSIR -----	51
IV.4	INTERPRETACION DE RESULTADOS -----	53

**CAPITULO V ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LOS TALUDES DE LAS BOQUILLAS**

V.1	CARACTERISTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES -----	57
V.2	ANALISIS CINEMATICO DE LOS TALUDES -----	65
V.3	ANALISIS DE EQUILIBRIO LIMITE -----	87
V.3.1	INTRODUCCION -----	87
V.3.2	OBRAS AUXILIARES -----	88
V.3.3	ANALISIS DE EQUILIBRIO LIMITE PARA LOS PORTALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL TUNEL DE DESVIO -----	92

**CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

VI.1	CONCLUSIONES -----	104
VI.2	RECOMENDACIONES -----	109

ANEXO I Y II

BIBLIOGRAFIA

PLANOS

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

#### I.1 ANTECEDENTES

Debido a las diversas necesidades de desarrollo en el Estado de Sinaloa, principalmente en lo que respecta a sus Recursos Hidráulicos, se ha planeado la construcción de una presa con el objeto de aprovechar estos recursos del noroeste de México. Por esta razón se ha elaborado una serie de programas en los cuales se incluye la construcción de una presa sobre el Río Presidio en la zona conocida como Picachos.

El Río Presidio, es una de las corrientes más importantes del Estado, tanto por su longitud como por su caudal. Este río nace al oeste de la Ciudad de Durango y desemboca al sureste del Puerto de Mazatlán, drenando un área de más de 6,000 km<sup>2</sup> y recorriendo una gran distancia de aproximadamente 215 km.

Esta obra tendrá una gran importancia por el volumen de agua que podría almacenar siendo del orden de 1,932 millones de metros cúbicos, los cuales se aprovecharán ampliamente para diferentes fines.

De esta presa se pretende derivar parte de sus aguas hacia la zona norte del Estado de Sinaloa por medio de un acueducto, pudiendo así posibilitar el riego hacia aguas abajo de los Municipios de Concordia y Mazatlán y, pudiendo también ser una fuente de abastecimiento de agua potable para el Puerto de Mazatlán.

En el área de interés se han realizado ya algunos estudios geológicos previos, estos han tenido diferentes objetivos, por lo tanto también el grado de detalle ha sido diferente.

Por lo anterior, se han definido cuatro posibles alternativas para la construcción de la cortina. Sin embargo es necesario conocer cual de estas cuatro alternativas presenta las condiciones más adecuadas, en cuanto a condiciones geológicas y geotécnicas se refiere. Es por ello que se consideró conveniente realizar un estudio a detalle, encaminado a determinar y evaluar las condiciones litológicas, de fracturamiento y alteración de las unidades litológicas, asimismo llevar a cabo un análisis de la estabilidad en los taludes de cada una de las alternativas, objetivo principal de esta tesis, y con este fin anticipar los posibles problemas geotécnicos que se puedan presentar durante la construcción de la cortina.

Es por ello que con el presente estudio, se pretende definir las características geológicas superficiales y del subsuelo, haciendo hincapié en la estabilidad de los taludes de las cuatro alternativas, e identificar cual de estas ofrece las condiciones más adecuadas.

Como se mencionó anteriormente, se han elaborado estudios desde el año de 1977, cuando fue llevada a cabo una visita preliminar, realizada por personal de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, donde las alternativas 1 y 2 se consideraron como los sitios más atractivos y se recomendó hacer exploraciones directas, realizándose un total de 23 sondeos, de las cuales 22 fueron verticales y uno inclinado a 45 grados.

Los resultados de dichos estudios, así como los trabajos realizados de geología superficial, se encuentran en los siguientes informes:

- 1.- INFORME GEOLOGICO EXPLORATORIO Y DE PRUEBAS DE PERMEABILIDAD DE LAS BOQUILAS PARA PRESA DE ALMACENAMIENTO "PICACHOS I Y II" UBICADAS SOBRE EL RIO PRESIDIO, MUNICIPIO DE MAZATLAN, ESTADO DE SINALOA.

(Elaborado por el Ingeniero Trillo Romero, SARH, 1984).

- 2.- INFORME GEOLOGICO EXPLORATORIO COMPLEMENTARIO DEL PROYECTO PICACHOS, MUNICIPIO DE MAZATLAN, ESTADO DE SINALOA.

(Elaborado por los Ingenieros León V. y Pedraza S., SARH, 1988).

## I.2 OBJETIVOS

El objetivo básico del presente trabajo consistió en:

Determinar las condiciones geotécnicas de cuatro diferentes alternativas, y definir cual de ellas presenta las mejores condiciones para la construcción de la cortina. Para ello, se realizaron diversos estudios geológicos y de laboratorio y en base a los resultados obtenidos se formuló un modelo conceptual de cada sitio, los cuales anticipan la problemática y soluciones necesarias para el buen funcionamiento de la cortina y obras auxiliares, identificando zonas potencialmente inestables.

En base a estos lineamientos se proponen medidas y sistemas de refuerzo o tratamiento del macizo rocoso.

Se define cual alternativa se considera como mas adecuada y se recomiendan estudios específicos adicionales que se requieren para definir interrogantes que surgieron durante los trabajos, y que deberán conocerse durante las etapas más avanzadas del proyecto.

Los objetivos particulares que se pretenden cubrir en el desarrollo de este trabajo son:

- Definir el marco geológico regional en el cual se ubica el área de estudio.

- Cartografiar las diferentes unidades litológicas presentes en la zona de estudio.

- Determinar con detalle la distribución, estratigrafía y características geológico-estructurales de las unidades litológicas.

- Definir la posición de los contactos entre las unidades litológicas, así como sus espesores en las zonas de las boquillas y el vaso.

- Determinar la calidad del macizo rocoso tanto del vaso como de las boquillas.

- Definir la problemática de inestabilidad en los taludes de las boquillas.

- Proponer sugerencias sobre estudios específicos adicionales para etapas más avanzadas del proyecto.

### 1.3 METODO DE TRABAJO

A continuación se describen de una manera general las actividades realizadas a lo largo de este trabajo.

#### A) Recopilación, Selección y Análisis de Información

Esta actividad fue realizada de la siguiente manera: Primero se recopiló la información obtenida de las revistas técnicas, artículos publicados acerca de la zona, tesis, planos geológicos, así como fotografías aéreas. Esta información, y la existente en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos fue seleccionada y analizada cuidadosamente.

Por otro lado, la información fue complementada con estudios geológicos obtenidos de las Residencias en el Estado de Sinaloa.

#### B) Levantamiento Geológico

La actividad de campo se realizó en dos etapas; una con la finalidad de conocer regionalmente la zona, y otra la de un estudio local a detalle en la zona de las boquillas.

Tanto para el estudio regional como local se realizó un estudio fotogeológico, donde se delimitaron las diferentes unidades litológicas y se marcaron las principales estructuras (fallas, fracturas, etc.). Una vez realizada la fotointerpretación se verificó o en su defecto se modificó en campo.

Se elaboró una cartografía geológica de detalle escala 1:2000, apoyada en planos topográficos (M1 y M2) proporcionados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, diferenciando en cada una de las boquillas las unidades o subunidades correspondientes, así como también sus espesores y características principales.

Cada unidad litológica se describió de acuerdo con la convención utilizada por la (ISRM) Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (BQD).

Las discontinuidades como fallas, fracturas, foliación, etc. también se describieron de acuerdo a la descripción propuesta por la ISRM, marcando y cartografiando en planta las discontinuidades más sobresalientes.

Como un complemento a los estudios de campo, se llevó a cabo un muestreo con el fin de definir mediante pruebas de laboratorio las características de los diferentes materiales.

### C) Procesado de la Información Geológica

- Una vez verificada en campo la fotointerpretación y reinterpretada se dibujaron los planos geológicos definitivos.
- La información estructural de las discontinuidades se procesó por medio de histogramas y diagramas estereográficos, para definir las tendencias centradas y sus características cuantitativas.
- A la mayoría de unidades y subunidades litológicas se practicaron análisis petrográficos, como ayuda para una mejor interpretación.
- Se enviaron las muestras necesarias a laboratorio de mecánica de suelos y de rocas, para su análisis físico, con el fin de clasificar las unidades geotécnicamente, obteniéndose también módulos dinámicos elásticos.
- Se procesó cuidadosamente la información de las descripciones geotécnicas básicas de roca (BGD), así como los análisis cuantitativos de las discontinuidades.
- Se elaboró un plano geológico regional, escala 1:50,000, en base a la integración de la información cartográfica existente y a la fotointerpretación que se realizó de esa área, elaborándose 4 secciones geológicas regionales.
- Los datos litológicos y estructurales de cada una de las boquillas fueron pasados a un plano geológico escala 1:2000 y de igual forma se elaboraron un total de 6 secciones geológicas coincidiendo tres de ellas con los Ejes 1, 2 y 4.
- Se llevó a cabo un análisis geotécnico de estabilidad de taludes para cada una de las alternativas, por el método Cinemático en Tres Dimensiones y, posteriormente, se aplicó el de Equilibrio Límite para los portales de entrada y salida del túnel de desvío.

Con la información geológica obtenida, fue posible obtener o estimar los parámetros geomecánicos básicos y permitir determinar la calidad de la roca a través de las clasificaciones geomecánicas NGI y CSIR y, de la roca intacta (Deere y Miller).

Toda la información anteriormente descrita se integró para elaborar la presente tesis, que incluye cinco capítulos del trabajo y otro más con las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron del mismo.

## CAPITULO II

### GEOGRAFIA

#### II.1 LOCALIZACION GEOGRAFICA

El estudio de las cuatro boquillas se localiza en el cañón de Picachos en un tramo que abarca cerca de 2 km. de longitud.

Esta zona se encuentra ubicada en la porción sur del Estado de Sinaloa, aproximadamente a 42 km. al noreste de Mazatlán (Figura II.1).

Las coordenadas geográficas dentro de las cuales está comprendida la zona de estudio son las siguientes:

23° 25' y 23° 37' Latitud Norte

106° 05' y 106° 17' Longitud Oeste

#### II.2 VIAS DE ACCESO

El acceso a la zona de estudio se realiza partiendo del Puerto de Mazatlán hacia el norte, por la carretera Internacional No.15, México - Nogales, recorriendo una distancia de 10 km. donde se localiza el poblado de El Habal. En este lugar entronca la carretera estatal que conduce al poblado de La Noria después de hacer un recorrido de 23 km. Posteriormente de este sitio se continua por un camino de terracería hasta llegar al poblado de La Puerta de San Marcos, recorriendo aproximadamente 14 km; este camino de terracería es transitable en cualquier época del año.

Por último para poder llegar a cada una de las alternativas, se parte del poblado La Puerta de San Marcos con una dirección hacia el sur, a lo largo de todo el cauce del río y recorriendo aproximadamente 3 km. se llega a la alternativa 1, a partir de este sitio y para poder llegar a la alternativa 4 que es la última hacia aguas abajo, se recorre una distancia de 2.5 km, que es el tramo en el cual están incluidas todas las alternativas.

Para poder llegar a la alternativa 4, es necesario atravesar más de dos veces el cauce del Río Presidio, sin embargo esto es posible sólo en época de estiaje, ya que durante época lluviosa (julio, agosto, septiembre) el río se torna más caudaloso, por lo tanto será necesario bordearlo mediante una única vereda localizada a lo largo de toda la margen derecha, o en su defecto atravesarlo con algún tipo de embarcación.



### II.3 HIDROGRAFIA

En el Estado de Sinaloa existen corrientes muy importantes por su caudal, particularmente la zona de estudio la cual forma parte de la amplia cuenca de los Rios Presidio y Baluarte.

El Rio Presidio, nace en el Estado de Durango, continuando hacia el Estado de Sinaloa, donde su cuenca se extiende dentro de los Municipios de Concordia, Mazatlán y Rosario entre otros; siendo los dos primeros los de interés para este trabajo.

Los límites de la cuenca del Rio Presidio son:

Al norte con las cuencas de los Rios Quelite y Piaxtla, al este con las cuencas de los Rios San Pedro y Acaponeta y por último al sur y oeste con el Océano Pacífico.

El Rio Presidio nace al oeste de la Ciudad de Durango a unos 40 km. aproximadamente, y a una elevación de 2600 m.s.n.m. y después de recorrer 215 km. desemboca al sureste del Puerto de Mazatlan en el Océano Pacífico.

Durante su recorrido drena un área de más de seis mil kilómetros cuadrados, fluyendo en una dirección NNE y SSW.

### II.4 CLIMA Y VEGETACION

La temperatura en la región varía de 12 grados (en la parte más alta) a 25 grados en la zona más baja de la cuenca.

La evaporación también varía, siendo de 1,825 milímetros en la estación de Las Habitas, mientras que en el Puerto de Mazatlán es de 2,170 milímetros.

La precipitación es del orden de 1,110 milímetros concentrándose el 87% en los meses de junio a octubre y el 13% restante durante los meses de noviembre a marzo.

Tanto la temperatura como la evaporación y la precipitación, son datos medios anuales.

La vegetación en la zona de estudio es escasa, compuesta por algunas variedades de acacias, predominando matorrales espinosos y arboles de muy poca altura. Sin embargo hacia el este de la zona, la vegetación se torna más densa y diversa.

## II.5 POBLACION

El área estudiada se encuentra ubicada dentro del Municipio de Mazatlán y Concordia. El poblado más cercano a la zona es La Puerta de San Marcos el cual carece de la mayoría de los Servicios, contando sólo con electricidad y señal televisiva; existe también sólo una escuela primaria con una mínima cantidad de alumnos (15 como máximo).

Por otro lado, tenemos que la población mayor y más cercana, se encuentra a 14 kilómetros de distancia (La Noria), la cual cuenta ya con más servicios tales como: electricidad, señal televisiva, agua potable, correo, centro de salud, teléfono, etc. Así como también cuenta con escuelas tales como: preprimaria, primaria y secundaria.

Los poblados y rancherías que quedarían inundadas por el agua del embalse en caso de construirse esta obra son:

- a) La Puerta de San Marcos
- b) Casas Viejas
- c) Las Iguanas
- d) San Marcos
- e) El Alamo
- f) Las Azulitas
- g) Los Copales

## CAPITULO III

### GEOLOGIA

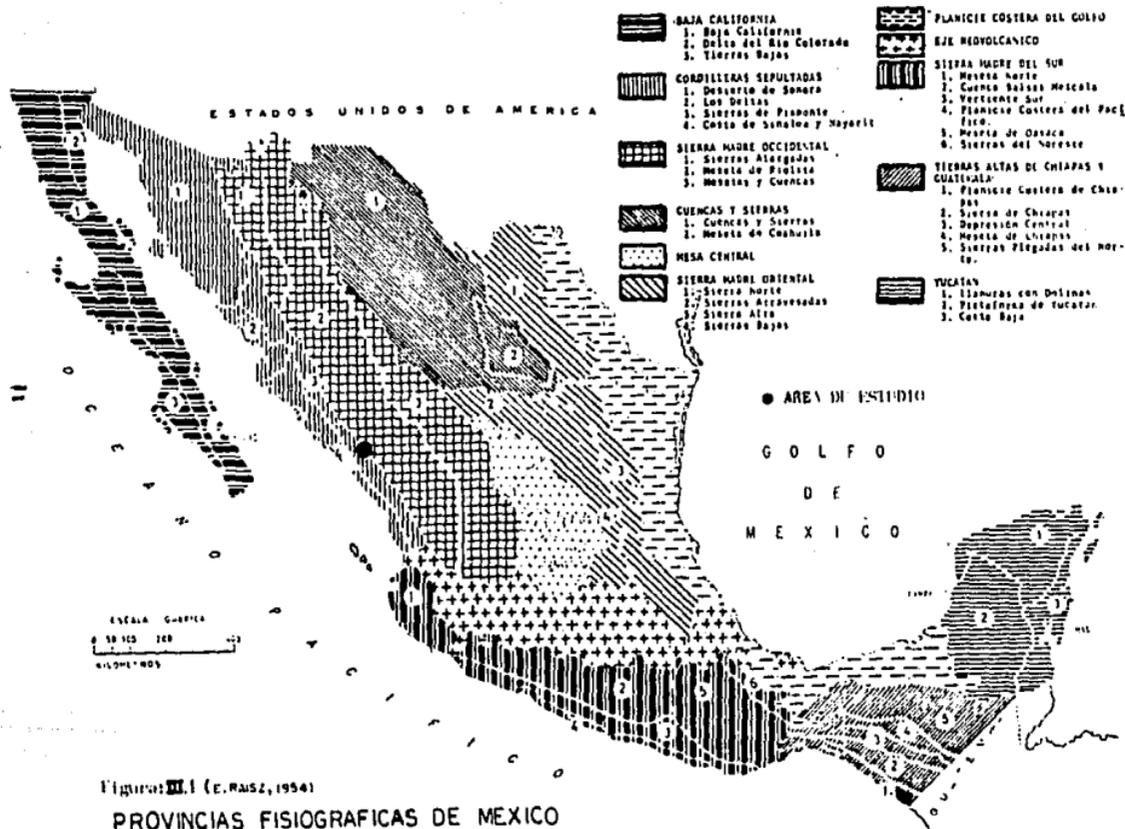
#### III.1 FISIOGRAFIA Y GEOMORFOLOGIA

El área de estudio se encuentra ubicada fisiográficamente según E. Raisz (1954), en la provincia denominada Sierra Madre Occidental y a su vez en la subprovincia Meseta de Riolita (Figura III.1). Esta subprovincia se caracteriza en el área por presentar una morfología, de valles o depresiones en las cuales afloran rocas volcánicas y sedimentarias cenozoicas y mesozoicas. Estas afloran en los valles fluviales, cañones y terrazas antiguas con elevaciones entre 70 y 100m y en zonas peniplanas entre 100 y 130 m.s.n.m. que generalmente contienen materiales residuales producto del intemperismo especialmente del granito. Por otro lado, esta subprovincia comprende también partes altas formadas por: a) pequeños lomeríos con elevaciones de 130 a 200 m.s.n.m. y pendientes suaves de 10 a 20 grados, formadas por rocas metamórficas y algunas tobas; b) sierras alargadas orientadas en dirección NNW-SSE con elevaciones de 100 a 300 m.s.n.m., las cuales se encuentran escarpadas con pendientes más fuertes, entre 30 y 50 grados, y aún mayor en zonas encañonadas, constituidas por rocas principalmente piroclásticas de la secuencia ignimbrítica, riolítica.

La región se encuentra drenada por un sistema fluvial integrado y formado por corrientes perennes que bajan de la Sierra Madre Occidental y por corrientes secundarias intermitentes, desarrollando un drenaje dendrítico, enrejado y a menor escala paralelo, dependiendo del tipo de roca que atravieza. El Río Presidio está controlado, en tramos, por el patrón estructural de fallas y fracturas, el cual ocasiona cambios bruscos de dirección, dando como origen formas de meandros, a diferencia de la zona de desembocadura del río, donde es por la competencia del material que se desarrollan estas formas.

En la zona de estudio, el Río Presidio fluye en dirección NNE-SSW, nace a 40Km al oeste de la Ciudad de Durango a 2600 m.s.n.m. y desemboca a 20km al sureste de Mazatlán, después de recorrer 215km.

El Río Presidio dentro de la zona de estudio, se encauza en un cañón estrecho que inicia a 1.5km aguas abajo de la población de La Puerta de San Marcos, extendiéndose hacia el Sur, dentro de la cual, están comprendidas las cuatro alternativas.



Figuras III.1 (C. RUSZ, 1954)

PROVINCIAS FISIOGRAFICAS DE MEXICO

Tesis Profesional. Ibarra, 1990

A lo largo de todo el cañón, el perfil transversal del río tiene forma de "V", por lo que la zona se encuentra en una etapa geomorfológica de madurez. La forma de las laderas es asimétrica, manifestando una pendiente de 33 grados para la margen izquierda y de 12 grados para la margen derecha en la zona donde inicia el cañón. Sobre la traza del eje 2, las márgenes presentan una pendiente equivalente de 20 grados. En la zona comprendida entre el eje 1 y el eje 3, la margen izquierda presenta una pendiente ascendente variable entre 28 y 44 grados, mientras que para la margen derecha, la pendiente varía entre 15 y 22 grados. El eje de la alternativa 4, la margen izquierda tiene un talud de 20 grados mientras que en la margen derecha es de 26 grados.

El ancho del cañón dentro de la zona de las boquillas varía entre 100-165m, y el río presenta una diferencia de altitud de 5m, comprendida entre el inicio del cañón aguas arriba de la alternativa 2 y el eje de la alternativa 4. Esto, por lo tanto, representa una pendiente extremadamente baja.

El nivel local, como el regional del cauce del río presenta una forma de avance sinuosa o meandriforme, esto es debido a un control estructural ejercido por la foliación en las rocas metamórficas y dos sistemas principales de fallas y fracturas (ver roseta de fracturas en Plano 1), uno en dirección NE 45 grados SW y otro WNW-ESE.

En un área comprendida entre los poblados de El Placer, Juantillos, Las Iguanas, Los Huanacastles, Puerta de San Marcos, hasta la zona donde inicia el cañón (aguas arriba) en que se ubican las boquillas, el Río Presidio atraviesa las partes topográficas más bajas de los alrededores, caracterizadas por pendientes relativamente suaves, esta morfología se debe a el intrusivo granítico altamente alterado que aflora en esta zona (Plano 1).

Por otro lado, afloran una serie de sierras que alcanzan hasta 100m de altura, a partir del nivel del río, con cimas arredondadas, y pendiente suave (10-20 grados). Este tipo de morfología está controlada por las unidades metamórficas representadas por pizarras y en menor proporción, por rocas piroclásticas terciarias correspondiente a tobas.

Sin embargo, dentro del paquete de rocas volcánicas existen algunas sierras que alcanzan alturas de hasta 200m a partir del nivel del río, con cimas agudas y escarpadas, con pendientes comprendidas entre 30 y 50 grados, pudiendo ser en algunas zonas del cañón, hasta de 90 grados.

La zona de estudio presenta un drenaje de tipo dendrítico, subparalelo, bien integrado, manifestado por arroyos intermitentes que en época de lluvias desembocan al Río Presidio. En menor proporción y más localmente, se pueden encontrar arroyos con drenaje de tipo rectangular, controlados por los sistemas de fallas y fracturas regionales que afectan a estas rocas.

### III.2 MARCO GEOLOGICO REGIONAL

El área regional considerada tiene una extensión de aproximadamente 480 km<sup>2</sup>. En esta zona afloran rocas con edades comprendidas desde el Paleozoico hasta el Cenozoico; se encuentran rocas metamórficas e ígneas, así como sedimentarias, las cuales reflejan los distintos fenómenos geológicos que sucedieron en la región a lo largo del transcurso del tiempo.

Las estructuras predominantes en esta zona son La Sierra Madre Occidental, representada por rocas ígneas extrusivas de edad Mioceno Temprano a Medio; el Gran Batolito, atribuible a las fases terminales de la tectónica Albo-Cenomaniana (edad 60 a 100 m.a.), representado por rocas graníticas; también están presentes rocas sedimentarias mesozoicas coronando en las partes altas, las cuales están constituidas por afloramientos aislados de caliza; y por último, el basamento de rocas metamórficas, producto de una secuencia sedimentaria del Paleozoico, afectada por fallas y plegamientos, posiblemente asociadas a una fase de deformación durante el Paleozoico Superior.

Todas las unidades, sin embargo, se encuentran afectadas por la tectónica Pliocuaternaria, relacionada con el sistema del Golfo de California-San Andrés, que da a la zona un aspecto distensivo característico de la región.

#### III.2.1 ESTRATIGRAFIA

A continuación se describen las unidades litológicas que afloran en la región, de la más antigua a la más reciente. La Tabla III.1 muestra la columna geológica de la zona.

**Paleozoico pizarras (Pp).**— Está formado por un complejo que comprende a rocas metamórficas formadas durante el Paleozoico y que afloran en la porción norte de la zona de estudio. Estas rocas constituyen el basamento de la secuencia Mesozoica y Cenozoica y comprende una secuencia metasedimentaria compuesta principalmente por esquistos, pizarras, filitas y cuarcitas, así como algunas intercalaciones calcáreas.

Afloran en la parte centro-oriental (Plano 1) y su expresión geomorfológica es en forma de lomeríos suaves con drenaje dendrítico.

CENOZOICO	CUATERNARIO		DEPOSITOS RECENTES	Q	Material de aluvión (bajos, gravas y arenas), material de lobos (acumulación in-situ de la alteración de rocas tales como platinos y lobos), y terrazas aluviales (constituidas principalmente por arenas).
	TERCIARIO			Tiv	Roas andesíticas con matriz oscura, de textura porfídica y estructura masiva, con un fracturamiento moderado.
				Tia	Talca blancas y raras rutilicas, de color gris y casi rojas, con un fracturamiento de moderado a alto. Brechas andesitas color gris claro y gris oscuro, de estructura masiva y un fracturamiento de moderado a alto.
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	INTRUSIVO ACIDO	Ia	Roas intrusivas de composición granítica y granodiorítica, diátrama intergranular.
		MEIO		Kcz	Roas andesitas, color blanco amarillento, de estructura masiva y textura equigranular, su resistencia es alta. Se presentan normalizadas por efecto de la presión granítica.
	SUBCUATERNARIO			SECUENCIA ANDAMAZAS Y VOLCANOCLASTICA	Pp
PALEOZOICO					

TABLA III.1. COLUMNA ESTRATIGRAFICA REGIONAL.

Litológicamente está constituida por pizarras y cuarcitas, las cuales en general son de color gris y amarillo óxido al intemperismo. Se encuentran foliadas, con una dirección de echado definida al SE y tienen un fracturamiento alto y cerrado.

Esta unidad se encuentra intrusionada por los emplazamientos batolíticos del Cretácico y a su vez cubierta por la secuencia volcánica-terciaria. Sus contactos son discordantes y algunos de ellos por fallas de tipo normal.

**Cretácico calizas (Kcz).**— Está constituida por calizas correspondientes a una secuencia calcárea masiva de aguas someras equivalentes a las rocas localizadas al norte del Estado de Sinaloa.

Dentro del plano geológico regional (Plano 1), estas rocas tienen una distribución limitada exclusivamente a los cerros La Calera y El Burro, entre los poblados de Juantillos y Las Higueras en la porción nor-occidental. Estos cerros forman una sierra alargada orientada casi E-W, los cuales tienen una extensión de 8 km aproximadamente, y se interrumpen por un cañón que tiene un desnivel de 300m.

Está constituida en parte por calizas marmorizadas, probablemente por efecto de la intrusión del granito, no obstante se observan aún las características originales, además de ser masiva y tener olor fétido al golpe del martillo. El color es pardo gris al intemperismo y blanco amarillento al fresco y presenta una textura sacaroide; tiene una alta resistencia; la orientación e intensidad de los echados es NE 86/53 grados.

Al encontrarse intrusionada por el granito, sus contactos son tectónicos y no concordantes por efecto de la intrusión batolítica.

Las rocas de esta unidad, reflejan los restos de una secuencia cretácica que cubrió, sin duda, una gran parte del área. La secuencia cretácica de Sinaloa es muy similar a la Formación Alisitos del norte de Baja California, que generalmente se considera como una acumulación típicamente miogeosinclinal. Estas dos regiones así como gran parte de Sonora, pertenecen a un mismo dominio paleogeográfico y por los fósiles encontrados se les ha asignado una edad Albiano Cenomaniano, la cual corresponde al Cretácico Medio.

**Intrusivo ácido (Ia).**— Con este nombre se define a la unidad constituida por granitos, granodioritas y cuarzo-monzonitas, que forman parte de lo que muchos autores han denominado "Gran Batolito" de Sonora-Sinaloa.

Están expuestos en la parte central del área de estudio (Plano 1) y corresponde a la unidad sobre la que se extiende la mayor parte del vaso, formando pequeños valles que son aprovechados como terrenos de cultivo.

Consisten esencialmente de granitos y granodioritas, los cuales contienen principalmente feldespatos y cuarzo; estas rocas se encuentran afectadas por la alteración que da por resultado lo que se conoce como "Tucuruquay".

Estas rocas se encuentran intrusionando a las rocas metamórficas del Paleozoico y a las calizas del Cretácico Inferior o Medio. A su vez, están cubiertas por tobas y derrames volcánicos del Cenozoico.

Se considera que la edad de estas rocas fluctúa entre los 45 y 120 m.a. y que corresponden al Cretácico Tardío - Terciario Temprano. Se pueden correlacionar con rocas similares de la Sierra Nevada de California. Se cree que se generaron como producto de magmas calco-alcalinos, a lo largo de una zona de subducción y que ascendieron para formar el batolito y quedar emplazado a lo largo de la margen continental, quedando al descubierto una vez que gran parte de la secuencia calcárea mesozoica se erosionó.

**Terciario volcánico y volcanoclástico (Tia,Tiv).-** En esta unidad, están comprendidas una secuencia de rocas piroclásticas de edad Terciario Inferior, representada por una unidad de brechas híbridas arenosas en la base, a las que le sobreyacen concordantemente una unidad ignimbrítica, una unidad volcanoclástica (constituida de tobas y brechas de textura arenosa y pseudoestratificadas), otra unidad ignimbrítica de composición riolítica (constituida por 4 subunidades de estructura masiva), y estas a su vez coronadas por un derrame de tipo fisural, de composición andesítica.

Esta serie volcánica alcanza un espesor de 250 a 300 metros aproximadamente.

Los contactos entre cada una de las diferentes subunidades son concordantes, aunque en ocasiones se presentan desplazamientos por fallas normales y de transurrencia. Toda la secuencia en su contacto inferior es por falla discordante con el Paleozoico, en tanto que el contacto superior es concordante con una serie volcanoclástica perteneciente al Terciario Medio, expuesta en la zona sur del área (plano 1) y compuesta por rocas híbridas tobas y clásticos continentales con un grado de cementación variable.

Por último, tenemos en la zona suroeste del área (plano 2), otra subunidad constituida por sedimentos clásticos continentales, los cuales cubren toda la secuencia anteriormente descrita.

Litológicamente, está constituida por conglomerados, areniscas, areniscas tobáceas, gravas y arenas, depósitos clásticos y epiclásticos continentales de edades diferentes.

Las rocas de esta unidad están formadas por fragmentos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, constituyendo antiguos depósitos de abanicos aluviales producto de una etapa erosiva post-orogénica de edad Mioceno-Plioceno.

**Cuaternario (Q).**.-Aquí se incluyen todos los depósitos continentales acumulados como producto de materiales residuales, acarreos, depósitos fluviales y de talud, por lo tanto, comprenden a rocas de diferente composición, que tienen que ver con los afloramientos de la región.

Se encuentran distribuidos principalmente a lo largo del Río Presidio, incluyendo antiguas llanuras de inundación, lo cual geomorfológicamente tiene expresión de terrazas y valles fluviales.

Generalmente, comprenden sedimentos arenosos de grano medio a fino y en menor proporción, gravas y boleos de rocas metamórficas e igneas. En algunos sitios se obtuvieron porcentajes de 15% de rocas metamórficas, 20-35% de rocas intrusivas, 40-45% de tobas y 30 % de andesitas. En el río, el material está redondeado y mal clasificado, no consolidado. En las terrazas, predominan arenas que van de gruesas a medias, con intercalación de horizontes de 20 a 30 cm de arcillas y limos.

Todos estos sedimentos del Reciente, comprenden el material producto de la erosión de las rocas preexistentes, debido a que estos procesos erosivos dieron lugar a clastos, arenas, y fragmentos de roca.

### III.2.2 GEOLOGIA HISTORICA Y TECTONICA

El área de estudio presenta como basamento rocas metamórficas formadas de una secuencia sedimentaria marina de edad Carbonífera, que se depositó en condiciones someras de plataforma (Rodríguez, R.; Córdoba, D., 1978). Se reconocen informalmente tres miembros de esta secuencia (Carrillo, M. 1977):

- a) MIEMBRO INFERIOR.- Consiste de micritas, pizarras, pedernal y cuarcitas en capas delgadas.
- b) PORCION MEDIA.- Consta de limolitas y cuarcitas, ambas masivas.
- c) MIEMBRO SUPERIOR.- Consiste de cuarcitas y lutitas alternadas con estratos delgados del tipo "flysch".

Estas unidades presentan deformación metamórfica incipiente paralela y oblicua a los planos de estratificación (Ortega, G., 1977).

En general, se puede considerar que esta secuencia se depositó en una faja miogeosinclinal que sería una continuación hacia el sur de la faja geosinclinal cordillerana del oeste de los Estados Unidos, desarrollada en el Paleozoico (Morán, Z., 1984).

Durante el Cámbrico-Pérmico se desarrollan episodios de sedimentación marina de ambiente de plataforma, ocurridos a finales del Precámbrico y durante el Paleozoico. Fries (1962), considera que a finales del Pérmico ocurrió un periodo de plegamiento no muy intenso, así como un levantamiento y fallamiento en bloques; todo lo cual, destruyó el patrón geosinclinal anterior.

En el Mesozoico, existe en Sinaloa una gran heterogeneidad de litologías que conforman, al parecer, un conjunto volcánico-sedimentario que vendría a ser la continuación, hacia el sureste, del arco volcánico-vulcanoclástico y sedimentario de la Formación Alisitos de Baja California (Rangin, 1978).

Las rocas sedimentarias mesozoicas están representadas por secuencias de calizas que en algunas localidades se observan parcialmente metamorfizadas. Los afloramientos de estas rocas se encuentran aislados. En algunas localidades se llegan a observar aparentemente intercalaciones con una secuencia metavolcánica mesozoica, pero los contactos no se observan claramente (Morán, 1984).

El Triásico-Jurásico se caracteriza por dos elementos paleogeográficos: por un lado, la Paleobahía en donde se acumuló una gruesa secuencia marina alimentada por áreas positivas al oriente; y, por otro, la cuenca palustre de San Marcial, ubicada al sureste de Hermosillo, Son., en donde se acumularon capas de carbón, calizas yesíferas, areniscas y lutitas (Alencaster, 1961).

El Jurásico Inferior indica el inicio de la actividad volcánica del Mesozoico. Esta actividad volcánica ha sido atribuida por numerosos autores a la presencia de una zona convergente ubicada al oeste del área. El hundimiento de una placa paleopacífica debajo de la corteza continental y la fusión parcial de la placa, originaron la edificación de un arco magmático, activo durante el Mesozoico. La actividad magmática relacionada con este arco es sólo interrumpida por el desarrollo de una zona de corrimiento lateral izquierdo llamado por Silver y Anderson (1974), como el "Megacizallamiento de Mojave-Sonora".

Durante el Jurásico Tardío-Cretácico, el Complejo de Subducción creció en extensión a lo largo de la costa de California y Baja California. Consecuentemente, la zona de subducción cambió gradualmente hacia el mar y el antearco principal se desarrolló en intervalos a lo largo del Sistema Arco-Trinchera (Ingersoll, 1979). El arco magmático ocupó un cinturón amplio, dentro del cual, el batolito principal se emplazó al norte en la Sierra Nevada, y al sur en la Cordillera Peninsular. La dirección del cinturón igneo se emplazó hacia el mar desde su previa posición en el Mesozoico Medio (Schweickert, 1976; Coney y Reynolds, 1977).

Ocurren dos migraciones importantes, tanto del arco magmático como de la deformación orogénica hacia el interior del continente. Este se puede atribuir al cambio en la inclinación del echado de la placa de subducción (Coney, 1978a; Dickinson y Snyder, 1978).

La mayor parte de las rocas calcáreas que afloran en Sinaloa, son, al parecer, de edad Cretácica; el conjunto mesozoico volcánico y sedimentario se encuentra afectado por los emplazamientos plutónicos mesozoicos y terciarios.

Para las rocas ígneas, muchos autores (Dickinson, 1981; McDowell y Clabaugh, 1981; Henry, 1975) citan que existe similitud con relación a su constitución química, distribución y edad entre la actividad plutónica silícica y el vulcanismo del área. Los autores argumentan que estos procesos son simplemente diferentes manifestaciones del mismo fenómeno geológico, es decir, la generación de magmas calco-alcálicos de una zona de subducción, por la relación estrecha entre las rocas graníticas y las secuencias volcánicas inferior y superior, como parte de un modelo de tectónica de placas.

En base a estudios realizados en esta zona de México, se han relacionado las rocas ígneas a diferentes etapas de actividad magmática, así como a mecanismos de migración de tipo arco-magmático, a través del tiempo geológico. Servais, Rojo y Colorado (1982) postulan la formación de cuatro arcos magmáticos con carácter calco-alcálico, tomando como base la acción casi continua de la subducción de la Placa Farallón hacia el este, desde el Mesozoico Temprano al Mioceno. Estos arcos corresponden a los siguientes:

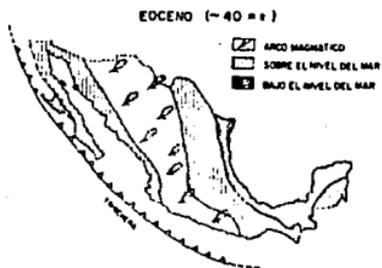
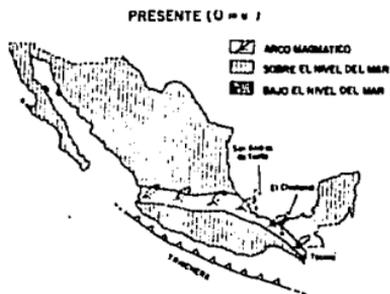
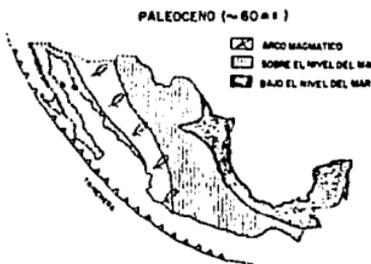
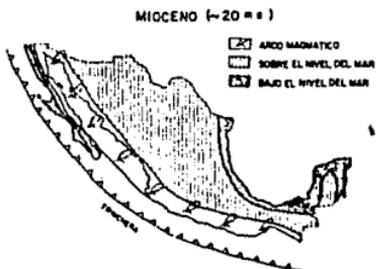
- 1) Jurásico Medio-Tardío y Cretácico Temprano:  
Arco Volcánico Sonora-Sinaloa
- 2) Jurásico Tardío-Cretácico Medio:  
Arco Alisitos en Baja California
- 3) Jurásico Tardío-Eoceno:  
Batolito Sinaloa y Vulcanismo Intermedio  
Calcoacalino en Sinaloa, Sonora y  
Sur de Baja California
- 4) Oligoceno-Mioceno:  
Vulcanismo Ignimbrítico de la Sierra  
Madre Occidental

De acuerdo con Damon (1981), los principales eventos geológicos ocurridos pueden sintetizarse de la siguiente manera (Figura III.2): El primero se relaciona a la migración del arco magmático cordillerano como un resultado de cambios en el movimiento de placas (Coney y Reynolds, 1977; Keith, 1978) y el levantamiento continental de una margen convergente en respuesta al ajuste isostático (Damon, 1979). La colisión de la Placa Norteamérica con la de Farallón que dió como resultado un extenso levantamiento en Estados Unidos y México. En el Cretácico Temprano, la mayoría de la porción oeste de Norteamérica era tierra somera cubierta por mares epicontinentales y bordeada por un arco magmático, la cual evolucionó hasta su estado actual.

Durante el Cretácico Tardío, hace 90 m.a., parte de México estaba bordeado por un arco magmático (de tipo andesítico), pero un tercio de Norteamérica (Damon y Mauger, 1966) estaba cubierto por mares epicontinentales, (Fig. III.2) sólo su margen oeste y algunas islas aisladas sobresalían del nivel del mar. Hace 60 m.a., el arco había migrado hacia el Este y se encontraba en el centro de la actual Sierra Madre Occidental y se extendió a lo largo de la costa, desde Cabo Corrientes hasta el Istmo de Tehuantepec. El levantamiento comenzó en el Cretácico Tardío, a medida que el continente chocaba con la Placa Farallón.

A fines del Cretácico y durante el Eoceno se emplazaron en las rocas mesozoicas, los granitos y granodioritas de Sinaloa reconocidas como la prolongación de un arco volcánico (Alisitos), cubiertas a su vez, por una serie de rocas volcano-sedimentarias y calcáreas (Bonneau, 1969) y éstas, también cubiertas por la secuencia Volcánica Inferior. Existen además evidencias de que se depositaron grandes cuerpos de caliza arrecifal en medio de rocas volcánicas y rocas vulcanoclásticas, tanto en el norte de Baja California, norte de Sonora y en la costa de Sinaloa, cerca de Mazatlán, (Bonneau, 1976).

Durante el Eoceno (40 m.a.), el arco había migrado hacia el Este y el continente continuaba levantándose, exponiendo rocas mesozoicas a una extensa erosión, para el Mioceno (Damon y Mostesinos, 1978; Damon y otros 1979).



**Figura 3.2** Migración del arco magnético y paleogeografía de México desde el Cretácico.

tomado de Damon, et. al. 1981.

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

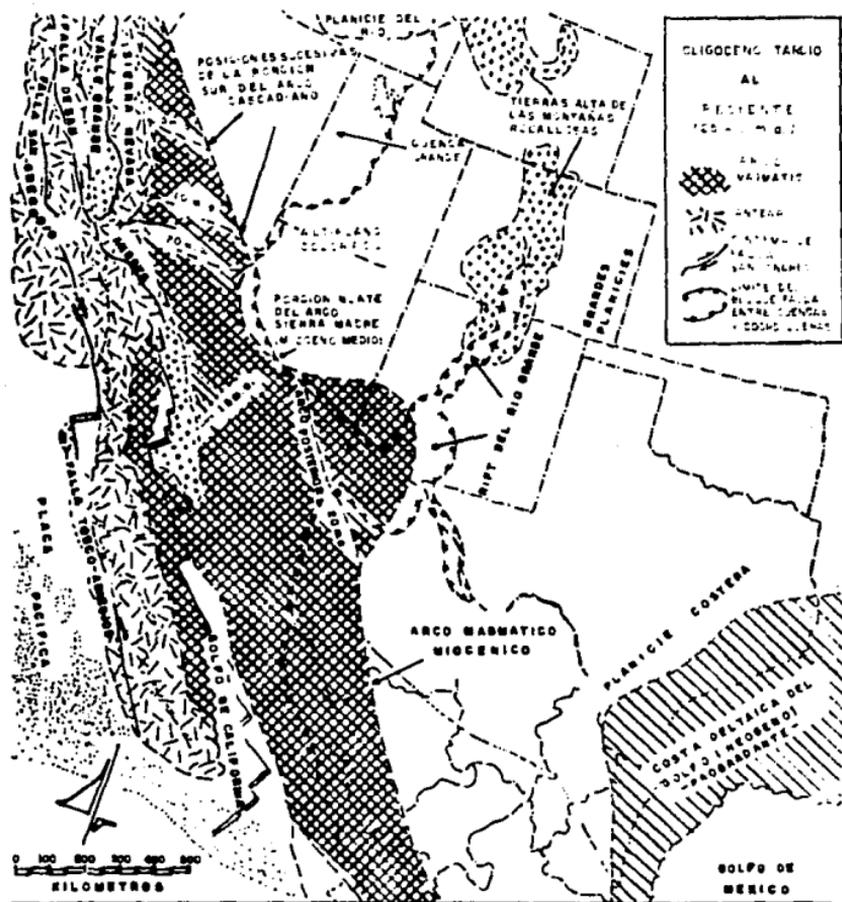
El arco magmático había regresado al Pacífico-Golfo de la Costa de California y los depósitos subvolcánicos habían sido cubiertos por rocas piroclásticas mientras que para el Mioceno Tardío la actividad volcánica corresponde a un arco activo que se extiende hacia el Golfo de México, San Andrés Tuxtla y se conecta con el Arco Centroamericano en el sureste de Chiapas. La subducción continúa al sur de Cabo Corrientes; y el levantamiento, así como la denudación, son continuas.

Durante el Cenozoico Medio el incremento del echado de la placa en subducción se ha asociado con una tectónica pronunciada con efectos locales. Mientras que el echado pequeño de la placa, produjo una tectónica de contracción, el incremento del mismo originó una tectónica prominente de extensión. Este proceso comenzó durante el Oligoceno, pero continuó hasta el Mioceno; Damon y Bikerman (1964) fueron los primeros en argumentar la importancia de los eventos tectónicos y magmáticos del Cenozoico Medio que fueron Post-Laramídicos.

La evolución tectónica de la Sierra Madre Occidental, durante el Cenozoico Tardío, fue dominada por tres procesos interrelacionados (Fig. III.3):

- 1) La extinción de la zona de subducción a lo largo de la margen continental y el desarrollo del sistema transforme de San Andrés.
- 2) La terminación del arco magmático relacionado a la subducción y su reemplazo por un vulcanismo disperso de centros basálticos y riolíticos.
- 3) El desarrollo de la provincia de cuencas y cordilleras con una tectónica de extensión dentro de esa porción del bloque continental contiguo al sistema transforme de San Andrés.

La evolución del sistema transforme de San Andrés, empezó en el Oligoceno Tardío, debido a la colisión de la placa Pacífica con la placa Farallón Americana. La resultante del Sistema Transforme Pacífico-Americana se ha alargado con el tiempo, aunque diferentes fallas (aisladas) han absorbido el desplazamiento principal en diferentes tiempos durante su evolución (Dickinson y Snyder, 1979a). El principal desplazamiento en la zona fue probablemente a lo largo de la margen continental hasta el Mioceno Medio. La falla de San Andrés propiamente no se convirtió en el sistema principal sino hasta principios del Plioceno. Desde entonces empezó a abrirse el Golfo de California y separó los arcos volcánicos del Mioceno del continente y de la península (Gastil y otros, 1981).



Tomado de Dickinson, 1981.

Figura III.3

PLANO PALEOTECTONICO

En el Presente, no existe un arco volcánico dentro de la región. En cambio, se tiene un vulcanismo basáltico extenso acompañado por actividad ígnea menos máfica y sin que presente una distribución sistemática en la zona. Este tipo de vulcanismo está asociado en espacio y tiempo con una tectónica de extensión formando un estilo de cuencas y sierras.

En el plano regional (Plano 1), se reflejan las estructuras que predominan en la región, afectando a los grupos litológicos principales: metamórfico, plutónicos y volcánicos.

En primer lugar, el basamento en la región lo constituyen las rocas metamórficas, las cuales fueron intrusionadas por el gran batolito de composición ácida, estas rocas metamórficas presentan una foliación general con buzamiento en dirección al SE, que refleja los esfuerzos compresionales que afectaron y que son correlacionables con el Sistema Marathon-Duachita de finales del Pérmico, el cual afectó esta parte de Norteamérica.

En tanto las rocas volcánicas son producto de un vulcanismo ácido de carácter explosivo a causa de la interacción de placas tectónicas y se encuentran afectadas por dos periodos de deformación, los cuales están asociados a la Orogenia Laramide y a la apertura del Golfo de California respectivamente, y se refleja en las orientaciones preferenciales de los sistemas de fallas y fracturas, el plegamiento de la Sierra Madre Occidental, la orientación de sierras de la secuencia calcárea del Mesozoico en Durango, Zacatecas y Chihuahua y por otro lado con las estructuras en Baja California y las dorsales y fallas transformes del Golfo de California. En el plano regional (Plano 1) estas rocas volcánicas se encuentran distribuidas en forma de franjas alargadas en dirección NW-SE y una pseudoestratificación con rumbo NW-SE, buzando al SW.

El primer periodo de deformación referido a la Orogenia Laramide, se asocia a la deformación final de este evento, representado con el desarrollo de una fase compresiva en dirección NE-SW a finales del Cretácico y principios del Terciario; y el segundo periodo referido a la apertura del Golfo de California en dirección NW-SE durante el Mioceno. Estas dos manifestaciones de deformación implican que en la región se ha producido un reactivamiento y rejuvenecimiento de las fallas y fracturas, inclusive con un cambio de sentido del movimiento. Las fallas de desplazamiento lateral en su mayoría de tipo izquierdo, posiblemente se reactivaron y se sugiere que podrían estar asociados a esta última fase de deformación.

Durante el Mioceno y por las evidencias del gran depósito de los ríos que bajan de la sierra, la región sufrió una fuerte erosión de las partes levantadas de lo que hoy es la Sierra Madre Occidental. Durante esa misma época, también se desarrolla una tectónica distensiva que permite el desarrollo de grabens, o fosas de hundimiento, relacionados a la apertura del Golfo de California, con el consecuente depósito de material vulcanoclástico que cubre a la secuencia ignimbrítica. Eso sugiere también, la existencia de cuencas intracratónicas de sedimentación en periodos de calma, en que la erosión y la sedimentación acaecían entre etapas o pulsaciones de actividad volcánica y tectónica.

En el Plio-Cuaternario, la Placa de Farallón desapareció completamente debajo de la Placa Americana; sin embargo, en la entrada del Golfo de California se desarrolla un sistema de fallas en extensión que se relaciona con el sistema de San Andrés. Baja California por estas fallas se solidarizó así con el noroeste, (Atwater, Sykes, Larson, Karing, Jansky, Gastil).

La evolución geológica de la Sierra Madre Occidental (cordillera sur) ha sido influenciada a todo lo largo del Fanerozoico por la interacción de las placas corticales a lo largo de ambos márgenes del Cratón de Norteamérica (Cordillerano y Ouachita). De tal forma, que los elementos tectónicos involucrados han pertenecido parcialmente a la Faja Orogénica Circunpácífica, o a un sistema tectónico paleopacífico.

### III.3 GEOLOGIA DE LAS BOQUILLAS

#### CARACTERISTICAS GENERALES

Los cuatro ejes propuestos se ubican en el Cañón de Picachos. Este cañón es un estrechamiento de casi 2km de largo, donde se planea la construcción de la presa.

El tipo de cortina que se pretende construir es de materiales graduados, siendo de 70 metros la altura máxima sobre el nivel de los acarrees. La longitud de la corona de las Alternativas 1,2,3 y 4 es de 440, 595, 526 y 565 metros respectivamente; con una capacidad del vaso de 1932 millones de metros cúbicos (Trillo Romero, 1984).

Los ejes de las cuatro alternativas se ubican en un cañón en el cual afloran rocas metamórficas, ígneas y vulcanoclásticas; el cañón abarca un tramo entre los poblados de La Puerta de San Marcos y Pichilingue.

Estas rocas presentan características geológico-geotécnicas y geofísicas diferentes, por lo cual se han tomado estas características para subdividirlas.

De la más antigua a la más reciente corresponden a pizarras y cuarcitas del Paleozoico, granitos y granodioritas del Cretácico; volcánicas y vulcanoclásticas del Terciario; y sedimentos del Cuaternario.

Las rocas metamórficas del Paleozoico afloran en las alternativas 1, 2 y la margen derecha de la 3. Mientras que, en la margen izquierda de la alternativa 3 y en las dos márgenes de la 4 corresponden a rocas volcánicas y vulcanoclásticas del Terciario.

Los contactos entre estas dos unidades son discordantes y en algunos sitios tectónicos que reflejan el proceso de levantamiento, deformación y erosión a que ha estado sujeta la región.

Las rocas metamórficas presentan cinco familias de discontinuidades, las cuales, tienen un espaciamiento moderado a cerrado. Las rocas volcánicas que sobreyacen a las metamórficas, coronan y forman partes altas y escarpadas; han sido afectadas por fallas normales y de transurrencia, las cuales se asocian a los esfuerzos regionales del Sistema San Andrés, como consecuencia de una tectónica distensiva que empezó a desarrollarse en el Oligoceno Tardío. Sin embargo, es interesante mencionar que entre las rocas metamórficas y volcánicas falta todo el paquete de rocas sedimentarias del Cretácico que afloran en las cercanías, lo que indica que en la zona se erosionó esta porción originando con esto una gran discordancia litológica, estratigráfica y angular.

### III.3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS EN LA ZONA DE LAS ALTERNATIVAS

En la zona de las Alternativas y sus vasos, sólo afloran algunas de las unidades expuestas en la geología regional (Plano 1). Las rocas que afloran en el cañón, consisten esencialmente de rocas metamórficas paleozoicas (Pp), constituidas por pizarras y cuarcitas de color gris oscuro a negro, de estructura foliada y una unidad intrusiva de composición granodiorítica (Ia), perteneciente al Gran Batolito Sonora-Sinaloa del Cretácico Superior-Terciario Inferior, completamente alterada, de textura arenosa gruesa. En discordancia erosional y angular muy marcada, descansan sobre estas dos unidades una secuencia de rocas volcánicas y otra volcanoclástica del Terciario.

Cubriendo discordantemente a las rocas anteriores, el Cuaternario, está constituido de material de talud (Qtd), formado por bloques de distintas dimensiones de rocas volcánicas y pizarras; terrazas aluviales (Qte), constituidas principalmente por arenas y en menor proporción por gravas. Estos, formando masas topográficamente más altas al río; materiales de acarreo (Qac), constituida por boleos, arenas y en menor proporción, gravas en estado suelto (Tabla III.2).

Todas y cada una de las unidades mencionadas, presentan características geológicas y geotécnicas diferentes. En el caso de las rocas piroclásticas se determinó que en la mayoría de las subunidades se inclinan hacia aguas abajo, en dirección SW, y el espesor se mantiene sensiblemente constante a lo largo de ambos márgenes, siendo afectadas por algunas fallas entre las que sobresale una falla normal que pone en contacto rocas metamórficas con la secuencia piroclástica del Terciario entre los ejes 3 y 4.

Como parte del levantamiento geológico del embalse, se lograron estudiar la mayoría de las unidades distribuidas en el área cartografiada. A través de este levantamiento, se pudieron definir las variaciones litológicas presentes, así como la distribución a lo largo del embalse.

La interpretación individual del origen de cada una de las unidades litológicas definidas se expone a continuación, incluyendo sus características específicas y su distribución.

#### UNIDAD METAMORFICA (Pp)

Es la unidad más antigua que aflora en el área cartografiada; producto de una alternancia de cuarcitas y lutitas en estratos delgados tipo "flysch", los cuales posteriormente sufren fuerte actividad tectónica que dió lugar a diversos grados de metamorfismo.



En general estas rocas, son de color pardo rojizo al intemperismo y gris oscuro al fresco. Presenta estructura foliada, su textura es pizarrosa, de grano fino y compacta, en sección delgada presenta una textura granoblástica, con un microfracturamiento de moderado a alto.

La resistencia de estas rocas es de moderada a alta. Esta unidad se halla distribuida de la siguiente manera:

Para la margen derecha, afloran desde 400 metros aguas abajo del eje 3 hacia el norte, hasta el contacto con el Intrusivo granítico en tanto que en la margen izquierda afloran de manera aislada desde 270 metros aguas abajo del eje 3 hasta la traza de este eje, posteriormente afloran de manera continua desde 250 metros aguas arriba del citado eje, hasta el contacto con el Intrusivo granítico, a la altura del poblado de Casas Viejas.

El espesor de esta unidad varía hasta 120 metros de altitud a partir del nivel del río.

#### **INTRUSIVO ACIDO (Ia)**

Posteriormente a un período de levantamiento, y deformación seguido de un período intenso de erosión que se manifestó sobre la secuencia de rocas sedimentarias del Cretácico y metamórfica del Paleozoico, queda al descubierto el intrusivo granítico denominado "Batolito Sinaloa", producto de magmas alcalinos generados a lo largo de una zona de subducción, y emplazados sobre la margen continental durante el Cretácico y Terciario.

El color de estas rocas varía de blanco rosáceo al intemperismo a gris verdoso al fresco, de estructura masiva compacta y fracturada. Microscópicamente presenta textura holocristalina e hipidiomórfica con fenocristales de tamaño variable. El intemperismo es de alto grado, ya que forma el característico material arenoso llamado "Tucuruquay", y por lo tanto la resistencias es muy baja (se disgrega fácilmente a tamaño de arena gruesa).

Esta unidad se halla distribuida en ambas márgenes en la porción septentrional del área. Topográficamente forma las partes más bajas de la zona.

#### **UNIDAD VOLCANICA Y VOLCANOCLASTICA (Tia, Tiv)**

A continuación se presenta un pequeño resumen, en el cual se describe de manera breve y general las características más sobresalientes de esta unidad (Delgado S. y Absalón M., 1989).

Para el Terciario Inferior, se desarrollaron rocas asociadas a un vulcanismo ácido de carácter explosivo y constituido por brechas, ignimbritas, derrames y tobas riolítica, estas debieron formarse durante el Eoceno, Oligoceno y Mioceno dando lugar a las potentes unidades volcánicas que constituyen la Sierra Madre Occidental.

Estas rocas en la zona de estudio afloran entre los ejes 3 y 4 de ambas márgenes del Río Presidio.

La secuencia volcánica está constituida por varias unidades, las cuales se han clasificado como se muestra en la columna geológica (Tabla III.2A).

TABLA III.2A

SUBUNIDADES DE LA SECUENCIA VOLCANICA

UNIDAD	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA
Tia-0	Brechas arenosas basales	Constituida por fragmentos de rocas metamórficas y volcánicas
	Ignimbritas inferiores	De composición vitreoriolítica, masiva y de alta resistencia
	Derrame volcánico	Constituido por andesita color inferior marrón de estructura lajosa (fracturamiento).
	Secuencia volcanoclástica	Constituida por brechas tobáceas, riolíticas, tobas arenosas, brechas arenosas riolíticas.
Tia-1, 2,3,4	Secuencia Ignimbrítica	Comprende tobas vitreas riolíticas, tobas liticas arenosas y tobas liticas riolíticas.
Tiv	Derrame volcánico	Consiste en andesitas color marrón, masivas y alteradas.

Esta serie volcánica tiene un espesor aproximadamente de 250 a 300m.

Toda la serie en su contacto inferior es por falla y discordancia con el Paleozoico, y el contacto superior concordante con una serie volcanoclástica perteneciente al Terciario Medio.

Regionalmente, el espesor de estas rocas supera en ciertos lugares los 1000m; su origen puede ser interpretado como asociado a un arco andesítico, relacionado a una zona de subducción. El magma nace así de una zona de fusión de la corteza continental encima de la zona de Benioff (Karing D., Jensky W. 1972).

El Terciario Inferior volcánico, está constituido también de rocas ígneas volcánicas pero no se diferenciaron y se caracterizan por estar alteradas y deformadas.

"Está constituida en general por una secuencia volcánica formada por la intercalación irregular de tobas líticas y derrames andesíticos. Presenta colores oscuros y, en algunas localidades, se observan alteraciones secundarias de clorita y epidota. Las andesitas poseen una textura que varía de afanítica a porfídica, presentan fenocristales de plagioclasas" (Delgado S. y Absalón M., 1989).

Sus contactos tanto superior como inferior son concordantes, con tobas ignimbriticas el primero y con una secuencia vulcanoclástica el último.

Durante el Terciario Medio se depositaron rocas híbridas, tobas y clásticos continentales. Se trata de una secuencia volcánica piroclástica constituida por brechas volcánicas riolíticas, con algunas intercalaciones irregulares de derrames y tobas, las cuales presentan una pseudoestratificación definida al SW.

Por último tenemos el Terciario Superior continental, que está constituida por sedimentos clásticos continentales, los cuales cubren tanto a la unidad vulcanoclástica anterior como a la secuencia ignimbritica denominada Terciario Inferior ácido. Su distribución en el plano regional (plano 1) se limita a la parte suroeste del área.

Esta unidad tiene una estructura masiva, con drenaje rectangular, alcanzando elevaciones de entre 100 y 300 m.s.n.m.

Litológicamente está constituida por conglomerados, areniscas, areniscas tobáceas, gravas y arenas, depósitos clásticos y epiclásticos continentales de diferentes edades.

Los fragmentos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas de esta unidad, constituyen antiguos depósitos de abanicos aluviales, producto de una etapa erosiva post orogénica de edad Mioceno Tardío Plioceno.

#### DEPOSITOS RECIENTES (0)

Están constituidos por material de acarreo, de talud, así como terrazas aluviales. El material de acarreo está formado por boleos, gravas y arenas; mientras que el de talud por bloques de roca volcánica y metamórfica.

### III.3.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El área de estudio en general refleja principalmente el comportamiento regional estructural predominante, el cual corresponde a la deformación Marathon Ouachita por un lado y al sistema "San Andrés" que se presenta en el Golfo de California, como consecuencia de la tectónica distensiva que empezó a desarrollarse en el Oligoceno Tardío, pero que se acentuó en el Plioceno (Atwater 1970).

Regionalmente, la mayoría de las estructuras y discontinuidades (fallas y fracturas) se identificaron mediante fotointerpretación y trabajos realizados con anterioridad de la zona (cartas geológicas elaboradas por el INEGI y el Instituto de Geología, UNAM).

Al elaborarse la roseta de discontinuidades (Plano 1), se observaron tres orientaciones preferenciales, una de ellas, con rumbo NW 70 grados a NW 80 grados (15%) ("J"), otra al NE entre 40 y 50 grados (12%) ("F") y con menor grado de desarrollo la familia "G" con una orientación de SW 55 grados a SW 66 grados (9%).

El Río Presidio en ciertos tramos y algunos arroyos secundarios labran su cauce siguiendo estas direcciones preferenciales.

Como se observa en el Plano 1 los rasgos estructurales importantes a nivel regional son las fallas normales que afectan primordialmente a la Secuencia Ignimbrítica Terciaria. Este estilo afecta en menor proporción a la unidad metamórfica e intrusiva, observándose en algunos sitios contactos tectónicos entre sí; sin embargo, las rocas metamórficas muestran un estilo de deformación completamente diferente asociado a la deformación Pérmica. Sobre las unidades Terciarias se observan fallas de desplazamiento lateral izquierdo paralelas entre sí, con rumbo preferencial N 20 grados E localizadas al oriente y poniente de la zona de las boquillas. Esta situación afecta la continuidad de las unidades ignimbríticas y volcánoclasticas desplazándolas de 150 a 200 m lateralmente.

Las trazas de las discontinuidades mayores varían entre 1 y 4 Km.

En las boquillas de los ejes 1 y 2, así como en la margen derecha del eje 3, afloran pizarras, mientras que en el eje 3 margen izquierda y eje 4, aflora la secuencia volcánica del Terciario.

Aparte del fracturamiento que presentan las rocas en el área de las boquillas se aprecian dos estructuras predominantes o paralelas; en las pizarras la foliación, y para la secuencia volcánica, la pseudoestratificación. El drenaje en las ignimbritas sigue la tendencia general de estas estructuras.

En el plano geológico 2 y en las secciones geológicas se han marcado los rasgos geológico-geotécnicos más importantes, identificando con un número las fallas y las fracturas que se han considerado como más sobresalientes.

A continuación se describe cada una de ellas:

Al oriente del Eje 3 se ubican dos fallas de desplazamiento lateral izquierdo (F1 y F2), cuyas trazas tienen direcciones que varían de N 10 grados E a N 40 grados E. La primera falla (F1) tiene una longitud observada de 600m y se encuentra dentro de la secuencia metamórfica paleozoica, pero se infiere que se continúa hacia el Sur afectando al intrusivo mesozoico.

La segunda estructura (F2) se desarrolla a lo largo de 700m con desplazamiento aproximado de 150m cortando a la secuencia ignimbrítica, volcánoclastica y metamórfica.

A 150m aguas abajo del eje 3, margen izquierda se observa una repetición de contacto entre la pizarra y la secuencia volcánoclastica inferior, por lo tanto se infiere una falla de tipo normal (F3) en este sitio. Esta estructura tiene una dirección de N 30 grados E donde el bloque caído se sitúa al oriente de ésta.

La estructura anterior en el extremo sur se encuentra truncada por otra falla normal (F4) cuya traza tiene una dirección de N40 grados W y tiene una longitud de 350m, cuyo bloque occidental es deslizado y pone en contacto a la secuencia volcánoclastica inferior con la secuencia ignimbrítica basal.

Al norte del Eje 4 se infiere una falla de tipo normal (F5), la cual tiene una dirección de su traza de W-E y una longitud calculada de 600m., esta estructura atraviesa de la margen izquierda a la margen derecha afectando a la secuencia ignimbrítica superior (Tia-2) y duplicando el espesor de esta en la margen derecha; mientras que en la margen izquierda pone en contacto la secuencia paleozoica con la ignimbrítica.

Por último, observamos una falla normal (F6) exactamente en el Eje 4 en la margen derecha, con una orientación N-S, con un plano de falla casi vertical (70 grados) y pared ondulada rugosa, su longitud es de aproximadamente 60m.

Es notoria la presencia de fracturas de menor extensión que siguen un cierto paralelismo con las discontinuidades mayores antes mencionadas, originando de esta manera bloques de forma tabular.

La estratificación de la secuencia volcánica se presenta con un echado al SW con inclinaciones de 40 a 60 grados en tanto que la foliación de las pizarras se inclinan al SE preferentemente.

Durante el estudio se realizó una comparación entre discontinuidades en las boquillas y la orientación preferencial regional; se observó que existía continuidad.

En las rocas metamórficas, parte de la deformación tectónica, se ha explicado a través de la orientación de la foliación que concuerda excelentemente con los esfuerzos compresionales SE-NW del Sistema Marathon-Quachita de finales del Pérmico.

Para las rocas ígneas extrusivas del Terciario su carácter volcánico y la deformación frágil a la que estuvieron sujetos, hacen suponer que la deformación ha sido diferente a la anterior.

Además de determinarse las orientaciones preferenciales de los sistemas de fracturas y fallas post-laramídicas en la zona, así como la relación que guardan con las estructuras en Baja California, las dorsales y fallas transformes del Golfo de California, se define regionalmente también la fase compresiva Laramide que tiene una dirección NE-SW y el evento relacionado a la apertura del Golfo de California en dirección NW-SE, lo cual dió lugar a que las fallas y fracturas de la región se hubieran reactivado.

## CAPITULO IV

### PROPIEDADES MECANICAS DEL MACIZO ROCOSO EN LAS BOQUILLAS

#### IV.1 PRUEBAS DE LABORATORIO

Como parte inicial del estudio geotécnico, fueron programadas una serie de pruebas de laboratorio en muestras de roca representativas del macizo rocoso con el objetivo de definir las propiedades físicas y mecánicas necesarias para caracterizar al mismo.

Las pruebas realizadas consistieron en determinar: el peso volumétrico (seco y saturado), índice de carga puntual, resistencia a la compresión simple, módulo de elasticidad estático, medición de velocidades sísmicas de onda longitudinal ( $V_p$ ) y transversal ( $V_s$ ), módulo de elasticidad dinámico, relación de Poisson, y módulo de corte (Tabla IV.1). Para conocer los módulos dinámicos "in situ", se realizaron pruebas de campo en ciertas unidades geotécnicas. Las pruebas se realizaron sobre especímenes de las cuatro alternativas; asimismo, se llevó a cabo una serie de análisis petrográficos (GEOPROYECTOS S.A., 1988) a distintas subunidades de roca, tanto en muestra de mano obtenidas de los afloramientos como de núcleos de roca obtenidos a distinta profundidad del subsuelo. Los núcleos de perforación a que se refiere lo anterior se obtuvieron de etapas de exploración previas al presente trabajo.

La Tabla IV.2, agrupa las propiedades elásticas a partir de los estudios geosísmicos de campo.

A continuación, se hace un pequeño resumen de cada una de las pruebas y su importancia en la definición del macizo rocoso.

##### IV.1.1 PESO VOLUMETRICO ( $P_d$ , $P_w$ )

El peso volumétrico de una roca es el cociente del peso de la muestra entre el volumen que ésta ocupa. Esta propiedad es básica para el cálculo de cargas verticales y en base a diferentes condiciones geológicas y empíricas es posible establecer los esfuerzos horizontales junto con otras propiedades deformacionales.

A las muestras obtenidas se les calculó el peso volumétrico seco ( $P_d$ ) y saturado ( $P_w$ ) (Tabla IV.1). En general la diferencia entre el peso saturado con el seco es mayor en las tobas que en las pizarras, indicando que tiene una mayor porosidad.

SUBANIZACION LITOLÓGICA	Pd (gr/cm <sup>3</sup> )	Pw (gr/cm <sup>3</sup> )	Is (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pc (Kg/cm <sup>2</sup> )	E(50) (ton/cm <sup>2</sup> )	Vp (m/s)	Vst (m/s)	Edm (ton/cm <sup>2</sup> )	u	δ (ton/cm <sup>2</sup> )
FIARRA(Pd)	2.67 2.66-2.73	2.7 2.66-2.74	121.5 81-162	876.5 667-1086	671.5 511-822	7533; 5362-5700	4841 3807-5875	1464.35 690.79-2237.92	0.292 0.283-0.351	593.68 83.41-901.95
TGBA										
VITREA										
RÍOLÍTICA (Tia-0)	2.7	2.26	68.5	---	---	6739	4133	864.00	0.198	360.43
ANDESITA										
(Tia-0)	2.65	2.66	51.0	---	---	6260	3576	864.1	0.250	345.43
TGBA										
VITREA										
RÍOLÍTICA (Tia-1)	2.26 2.21-2.32	2.38 2.34-2.42	---	417.5 406-429	439.5 413-466	6396.5 6272-6521	3660 3450-3750	756.54 719.22-793.87	0.267 0.252-0.283	299.53 280.27-316.80
TGBA										
LÍTICA	2.21	2.34	104	---	---	4421.5	2531.5	378.71	0.293	151.46
ARENOSA (Tia-2)	2.08-2.35	2.16-2.43	38-170			3503-5340	1930-3133	220.03-537.80	0.237-0.350	83.81-217.0
TGBA										
VITREA										
RÍOLÍTICA (Tia-3)	2.32 2.26-2.39	2.41 2.37-2.45	72 50-106	---	---	4837.5	2812.5	469.09	0.245	188.93
TGBA LÍTICA										
RÍOLÍTICA (Tia-4)	2.05	2.24	45	---	---	2901	1468	119.56	0.327	45.03

Pd: Peso volumétrico seco  
 Pw: Peso volumétrico saturado  
 Is: Índice de carga puntual  
 Pc: Resistencia a la compresión simple  
 E(50): Módulo de elasticidad estático  
 Vp: Velocidad de la onda longitudinal  
 Vst: Velocidad de la onda transversal  
 Edm: Módulo de Young dinámico  
 u: Relación de Poisson  
 δ: Módulo de corte

TABLA IV.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

TABLA IV.2 PROPIEDADES ELASTICAS A PARTIR DE ESTUDIOS GEOSISMICOS DE CAMPO

ALTERNATIVA	M U E S T R A	UNIDAD LITOLÓGICA	$V_L$ (cm/s)	$V_S$ (cm/s)	$\mu$	$E$ (ton/cm <sup>2</sup> )	$\nu$ (ton/cm <sup>2</sup> )
1	ALMIV1	PIZARRA (Pa)	720	268	0.468	20.77	7.67
	ALMIV2	PIZARRA (Pa)	3048	1042	0.430	84.77	29.49
1	ALMIV1	PIZARRA (Pa)	610	242	0.375	6.74	2.17
	ALMIV2	PIZARRA (Pa)	1740	604	0.346	47.45	17.72
1	ALMIV1	PIZARRA (Pa)	394	140	0.344	21.75	7.44
	ALMIV2	PIZARRA (Pa)	1292	429	0.334	21.57	7.76
2	ACBIV2	PIZARRA (Pa)	981	386	0.352	22.42	7.77
2	ACBIV1	PIZARRA (Pa)	448	206	0.357	4.65	1.45
	ACBIV2	PIZARRA (Pa)	1823	608	0.437	28.92	11.04
3	ACBIV1	ROCA LITICA MIGRIFIC (Pa-C)	2004	726	0.341	114.93	42.78
3	ACBIV1	PIZARRA (Pa)	871	469	0.302	17.45	5.73
4	ACBIV	CONCRETAS (Pa)	1778	601	0.274	99.42	32.75

DONDE:

$V_L$ : velocidad de onda longitudinal  
 $V_S$ : velocidad de la onda transversal  
 $\mu$ : Relación de Poisson  
 $E$ : Módulo de Young dinámico  
 $G$ : Módulo de corte

Tesis Profesional:  
 Ibarra, D.V., 1984.

En las muestras de Pizarras (Pp) se determinaron pesos volumetricos secos altos, con diferencia de 0.12gr/cm<sup>3</sup> entre su valor maximo y minimo y promedio de 2.69 gr/cm<sup>3</sup>; los pesos volumetricos saturados obtenidos tambien son altos con promedio de 2.7 gr/cm<sup>3</sup> y una diferencia de 0.08 gr/cm<sup>3</sup> entre sus valores maximo y minimo. La diferencia entre los promedios de peso volumetrico secos y saturados es insignificante, lo que indica que las pizarras estan muy compactas con una muy baja porosidad como roca intacta.

Para la unidad de toba vitrea riolitica (Tvib), se obtuvieron pesos volumetricos seco y saturado más bajos que en las pizarras, con valores de 2.07 y 2.26 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente; en este caso existe una diferencia que indica cierta porosidad.

En la Unidad Ignimbrítica Superior (Tia) se determinaron pesos volumetricos secos bajos, con valor promedio de 2.21 gr/cm<sup>3</sup> y una diferencia de 0.21 gr/cm<sup>3</sup> entre sus valores maximo y minimo; los pesos volumetricos saturados también se consideran de bajos a moderados, con valor promedio de 2.34 gr/cm<sup>3</sup> y una diferencia de 0.17 gr/cm<sup>3</sup> entre sus valores maximo y minimo.

La diferencia entre los promedios de los pesos secos y saturados en las rocas volcánicas indican que son porosas y tienen mucho mayor porosidad que las pizarras, especialmente las tobas (Tia-0), lo cual es lógico, debido a su origen piroclástico y su edad joven donde posiblemente no han soportado una carga litostática considerable como fue en el caso de las pizarras.

#### IV.1.2 INDICE DE CARGA PUNTUAL (Is)

Esta prueba consiste en aplicar a especimenes de roca una carga axial puntual sin confinamiento; la sección debe ser aproximadamente circular, es decir, debe cumplir la condición de que la relación D/L esté en el intervalo 1.0 a 1.4, donde D es el diámetro de la muestra y L la longitud.

Este tipo de prueba es muy importante, ya que sus resultados son correlacionables con la resistencia a la compresión simple (Tabla IV.I)

En las pizarras (Pp) solo se realizaron dos pruebas de carga puntual (muestra 18 y Fc-31) cuyo valor promedio es del orden de 121.5 kg/cm<sup>2</sup>.

Para las Unidades Ignimbríticas Superior (Tia) se obtuvieron indice de carga puntual de moderados en las subunidades intermedias (Tia-2, Tia-3) siendo del orden de 78 y 104 kg/cm<sup>2</sup>, a bajos en la subunidad superior (Tia-4) cuyo valor es de 45 kg/cm<sup>2</sup>.

Como podemos observar en la Figura IV.1 al comparar los valores correspondientes entre las pruebas de carga puntual y la resistencia a la compresión se determinó que existía correlación en los valores obtenidos. Sin embargo esta correlación fue la siguiente;  $R_c = 8 I_s$ , que no concuerda exactamente con la de Bieniawski que es la de  $R_c = 24 I_s$ .

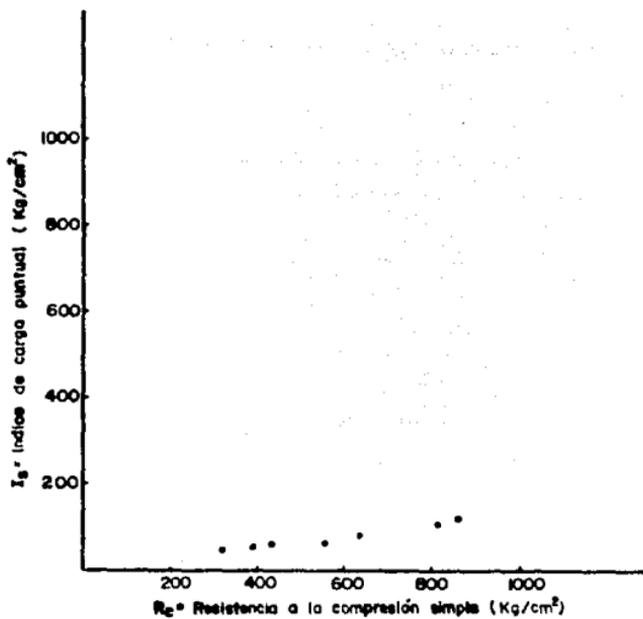


FIGURA IV.1 - RELACION ENTRE EL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL Y EL DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE.

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

#### IV.1.3 RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE (Rc)

La resistencia a la compresión simple es una propiedad que ayuda a conocer la resistencia de la roca intacta al verse sometida a esfuerzos compresionales, además de ser un elemento importante que ayuda a la caracterización del macizo rocoso. Este tipo de prueba se realizó a especímenes cilíndricos con una relación de esbeltez de dos. Esta prueba se ejecuta aplicando cargas axiales sin confinamiento a cada una de las muestras. Los valores obtenidos se agrupan en la Tabla IV.1.

Las pruebas de resistencia a la compresión simple se realizaron sólo en núcleos de perforaciones, registrándose valores relativamente altos en las pizarras con promedio de 876.5 kg/cm<sup>2</sup> (Tabla IV.1); y menores en las rocas volcánicas. Los valores obtenidos en la subunidad Tia-1 se consideran moderados con un valor promedio de 417.5 kg/cm<sup>2</sup> y una diferencia de 23 kg/cm<sup>2</sup> entre sus valores máximos y mínimos.

#### IV.1.4 MODULO DE ELASTICIDAD ESTADICO (E 50)

Para tener mayores elementos de juicio para el diseño de la presa, será necesario e indispensable conocer los módulos elásticos de la roca intacta y del macizo rocoso. Para ello, se han realizado estudios de laboratorio e "in situ", para de esta manera establecer factores de reducción que los relacionen. Stagg y Zienkiewicz (1968) han propuesto que en el mismo cuerpo rocoso de interés, se lleven a cabo pruebas de presión de placa y mediciones de velocidades sísmicas, con la finalidad de determinar los módulos elásticos del macizo rocoso. Estos autores también recomiendan realizar conjuntamente perforaciones con recuperación de núcleos, con el objeto de complementar la información a través del Índice de Calidad de la Roca (R.Q.D) y módulos elásticos estáticos a las muestras de los núcleos recuperados.

El módulo de elasticidad estático se obtuvo en laboratorio, se define como la pendiente de una curva esfuerzo-deformación al 50% del esfuerzo final soportado; para fines prácticos se obtuvo creando un entorno pequeño al punto de la curva que corresponde a la mitad del esfuerzo resistido; por lo tanto, se dividió el incremento del esfuerzo, entre el incremento de la deformación unitaria.

Esta prueba tiene como objetivo conocer la resistencia máxima que pueden soportar los materiales, así como el comportamiento del material conforme se aplica la carga. Los valores obtenidos se agrupan en la Tabla IV.1.

En las pizarras, el módulo de elasticidad estático se tuvo una diferencia de 374 ton/cm<sup>2</sup> entre sus valores máximo y mínimo, mientras que su promedio se calculó de 671.5 ton/cm<sup>2</sup>. (Tabla IV.1).

En las tobas (Tia) también de núcleos de roca se obtuvieron módulos de elasticidad estáticos moderados, con valor promedio de 439.5 ton/cm<sup>2</sup> y una diferencia de 53 ton/cm<sup>2</sup> entre sus valores máximos y mínimos.

#### IV.1.5 MODULOS ELASTICOS-DINAMICOS

Los módulos dinámicos son importantes para estimar la deformabilidad de los materiales al someterlos a un esfuerzo, sea éste, compresional o tensional. Los módulos fueron obtenidos a través de pruebas de campo, por medio de geosísmica, y en laboratorio por medio de un equipo sónico; con este tipo de pruebas, se obtienen velocidades de ondas longitudinales (Vp) y transversales (Vs), con las cuales es posible determinar: Módulo de Young dinámico (Edin), Relación de Poisson ( $\nu$ ) y Módulo de Corte (G).

Tomando en consideración este análisis, se concluye que las pizarras corresponden a una unidad litológica de buena calidad a nivel de roca íntacta pero de regular a mala calidad como macizo rocoso.

En la unidad Tia-0 los módulos de elasticidad dinámicos de laboratorio, se obtuvieron velocidades de onda compresional y transversal altas con valor de 6739 y 4133 m/s respectivamente; se obtuvo un Módulo de Young alto con valor de 864 ton/cm<sup>2</sup>, una Relación de Poisson de 0.198 y un Módulo de Corte de 360.43 ton/cm<sup>2</sup>.

En relación a los módulos de elasticidad dinámicos de campo se obtuvieron velocidades de onda compresional y transversal moderados con valor de 2904 y 1424 m/s; una Relación de Poisson de 0.341 y Módulos de Young y de Corte con valor de 114.81 y 42.78 ton/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

A partir de las propiedades obtenidas de laboratorio se deduce que esta unidad presenta una calidad geomecánica buena, sin embargo, con los resultados de campo se le considera de calidad geomecánica regular.

Respecto a los parámetros elasto-dinámicos de laboratorio, se obtuvieron velocidades de onda compresional de medias a altas con valor promedio 4639 m/s y una diferencia entre sus valores máximo y mínimo de 3495 m/s; las velocidades de onda transversal registradas se consideran medias con un promedio de 2603 m/s y una diferencia de 2132 m/s entre sus valores máximo y mínimo; cabe destacar que los valores más bajos de velocidad de estos tipos de onda, se registraron en la subunidad superior (Tia-4); se obtuvieron Módulos de Young con promedio de 431 ton/cm<sup>2</sup> y una diferencia de 636 ton/cm<sup>2</sup>; la Relación de Poisson de 0.283 y una diferencia entre sus valores mínimo y máximo de 0.06; el módulo de corte con promedio de 171 ton/cm<sup>2</sup> y una diferencia de 253 ton/cm<sup>2</sup>.

En cuanto a los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos en campo, se obtuvieron velocidades de onda compresional y transversal medias, con valor de 1778 y 1021 m/s respectivamente; y se obtuvo un módulo de corte bajo, de 22.10 ton/cm<sup>2</sup>.

De los resultados anteriores se establece que la pizarra como roca intacta es prácticamente indeformable y de alta calidad geomecánica, sin embargo al comparar los parámetros de laboratorio con los de campo, resultan contrastantemente bajos los últimos; lo cual implica un intenso fracturamiento que se traduce en alta permeabilidad del macizo rocoso. Así, para fines prácticos se establece la necesidad de efectuar una limpia con espesores considerables, así como un tratamiento de impermeabilización considerable en caso de desplantar la cortina sobre las rocas metamórficas.

Las rocas de la secuencia ignimbrítica de la margen izquierda de la Alternativa 3 y ambas márgenes de la Alternativa 4 son de calidad inferior como roca intacta, sin embargo sus parámetros de campo resultan ser, por un lado, cuantitativamente mejores que los de la pizarra y, por otro lado, no tan contrastantes respecto con los de laboratorio, lo que se traduce en reducidos espesores de limpia y menor fracturamiento, lo que implica una zona impermeable en el macizo rocoso.

Tomando en consideración estas propiedades, se deduce que la secuencia ignimbrítica presenta una calidad geomecánica buena.

#### **IV.2. CLASIFICACION INGENIERIL DE LA ROCA INTACTA**

Para el presente trabajo, la clasificación ingenieril utilizada fue la propuesta por Deere y Miller (1966), la cual tiene gran aceptación por los resultados obtenidos de ella.

Por roca intacta se entiende aquella en la que se pueden tomar muestras para su ensaye en laboratorio, las cuales no cuentan con estructuras a gran escala como son estratificación, fallas, fracturas, etc.

Las propiedades que la Clasificación Ingenieril de Roca Intacta utiliza son: resistencia a la compresión simple y el módulo de elasticidad dinámico.

Los resultados se representan en una gráfica bilogarítmica (Figura IV.2). Las categorías de resistencia se indican en la parte superior de la gráfica y el módulo relativo, se deduce de la posición respecto a las líneas diagonales. La clasificación ingenieril se realizó para cada unidad litológica. La Tabla IV.3 agrupa los valores de resistencia, módulo de elasticidad y módulo relativo. Como puede apreciarse las resistencias son de medias a altas en las pizarras, mientras que resultan de medias a bajas para las tobas. Sin embargo, la mayoría de los valores de resistencia de las tobas son a partir de las pruebas de carga puntual y solo dos provienen de pruebas de resistencia a la compresión simple, por lo cual, la resistencia puede ser mayor.

En cuanto a los módulos relativos, como se aprecia en la (Figura IV.2) los valores fueron todos altos.

TABLA IV.3 CLASIFICACION INGENIERIL DE LA ROCA  
(Según Deere y Miller, 1966)

ALTERNATIVA	LITOLOGIA	RESISTENCIA (Kg/cm <sup>2</sup> )	DESCRIPCION	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	MODULO RELATIVO
EJE 1 M. D. C	PIZARRA	1082.0	ALTA	1'304.240	ALTO
	PIZARRA	678.0	MEDIA-ALTA	2'147.380	ALTO
	PIZARRA	449.0	BAJA-MEDIA	589.990	ALTO
EJE 2 M. D. C	PIZARRA			2'410.740	ALTO
	PIZARRA	895.0	MEDIA-ALTA	1'570.330	ALTO
EJE 3 M. D. C	TOBA			844.000	ALTO
	PIZARRA			690.790	ALTO
	PIZARRA			1'014.710	ALTO
EJE 4 M. D. C	TOBA			418.830	ALTO
	TOBA			321.860	ALTO
	TOBA	417.9	BAJA-MEDIA	794.540	ALTO

Notas: M. D. = Mergon Esquelense, M. D. = Mergon Derecha, C = Cauce

#### IV.3 CLASIFICACION GEOMECANICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS

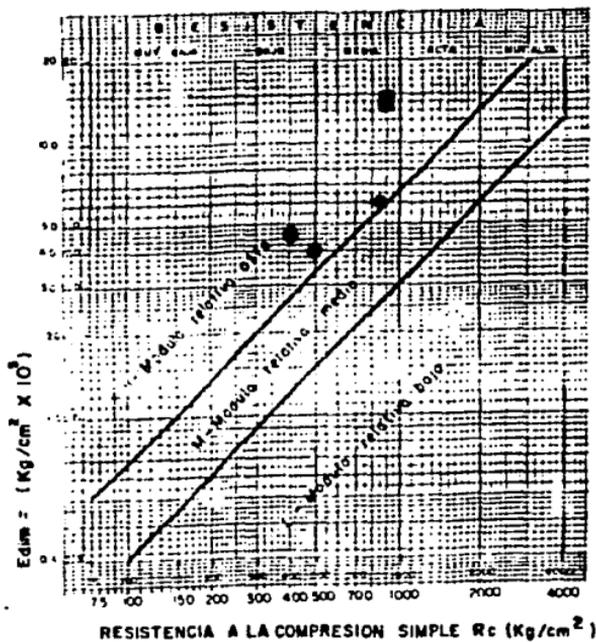
Una vez procesada la información geológica y geotécnica contenida en campo se pudo establecer y agrupar en clases de similar calidad al macizo rocoso.

Esta clasificación es el resultado de la integración obtenida a través de:

- La clasificación ingenieril de la roca intacta.
- Las clasificaciones geotécnicas para macizos rocosos propuestos por el ISRI, y CSIR.
- La Descripción Geotécnica Básica (GBD).

# CLASIFICACION DE ROCA INTACTA

(Según Deere y Miller 1966)



- ..... TOBAS
- ..... PIZARRAS

<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA UMAH	
IBARRA OLIVARES GUADALUPE	
FIGURA: IV. 2	1990

## EVALUACION DEL RQD

El RQD o índice de calidad de la roca propuesto por Deere (1963), es un parámetro muy importante dada la información sobre fracturamiento que proporciona, así como por su utilización en varias de las clasificaciones posteriores. En los sitios donde no fue posible contar con núcleos de perforación para evaluar este parámetro, el valor se obtuvo en forma indirecta a partir del índice volumétrico de fracturas (Jv) por medio de la expresión:

$$RQD = 115 - 3.3 Jv$$

Esta expresión fue propuesta por Palmstron (1975) y aceptada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1979), la cual da una buena aproximación al valor real. El "Jv" corresponde al número de fracturas por metro cúbico, y se obtiene selectivamente por unidad de roca y/o unidad geotécnica.

Este índice se evaluó utilizando los promedios de intersección entre las discontinuidades medidas en campo para el BGD y por medio del valor modal obtenido del espaciamiento registrado en la descripción cuantitativa de las discontinuidades.

La Tabla IV.4 agrupa los resultados obtenidos en cada alternativa y para cada unidad litológica.

En las pizarras el fracturamiento es muy cerrado en función del Jv, resultando un valor bajo de RQD, como francamente se observó del RQD obtenido en la perforaciones. (Ejes 1, 2 y 3), que fue de malo a muy malo, como consecuencia de la foliación y fracturamiento que presentan estas rocas. Mientras que en las tobas, el Jv mejora, especialmente en la Alternativa 4 donde la perforación sobre el cauce revela un RQD promedio debajo de los acarrees, de un 72% (Tabla IV.4).

TABLA IV.4  
ESTIMACION DE RQD

ALTERNATIVA	LITOLOGIA	JV (LAI)	RQD (CALCULADO)	C A L I F I C A C I O N (CALCULADO)	RQD (EJEMPLO)	C A L I F I C A C I O N (REAL)
<b>1</b>						
MARGEN DER.	PIZARRA	20 30	49 14	HALA A MUY MALA	2 25 30	MUY MALA MALA MALA
MARGEN IZQ.	PIZARRA	20 20	49 14	MUY MALA	2 24 30	MUY MALA MALA MALA
<b>2</b>						
MARGEN DER.	PIZARRA	20 30	49 14	HALA A MUY MALA	5 14	MUY MALA MUY MALA
MARGEN IZQ.	PIZARRA	20 30	49 14	HALA A MUY MALA	5 14	MUY MALA MUY MALA
<b>3</b>						
MARGEN DER.	PIZARRA	20 30	49 14	HALA A MUY MALA	0 (CAUCI)	MUY MALA
MARGEN IZQ.	TOBAS	9 10	98 82	MUY BUENA A BUENA		
	TOBA LAJOSA	30 35	0 17	MUY MALA		
<b>4</b>						
MARGEN DER.	IONIBRITAS	7 10	92 82	MUY BUENA A BUENA		
MARGEN IZQ.	IONIBRITAS	0 30	82 14	BUENA A MUY MALA	72 (CHUCE)	REGULAR

#### IV.3.1 DESCRIPCION GEOTECNICA BASICA (BGD)

La descripción geotécnica básica (BGD) propuesta por la comisión para la clasificación de rocas y macizos rocosos de la ISRM (1980) define 5 parámetros fundamentales para la descripción o zonificación de un macizo rocoso en base a su comportamiento. Estas características están enmarcadas en:

- Nombre de la roca.
- Dos características estructurales del macizo rocoso (espesor de capas e intersección de fracturas).
- Dos características mecánicas (resistencia a la compresión simple de la roca intacta y el ángulo de fricción de las fracturas).

En base a este análisis se pudieron reconocer 2 unidades cuyas características se discuten en este capítulo. Se hace la aclaración que el ángulo de fricción se definió indirectamente a través de los valores obtenidos por medio del RMR y otros por las observaciones de campo.

Como puede apreciarse en la Tabla IV.5, las unidades litológicas de la Alternativa 4 presentan desde el punto de vista de la clasificación BGD, las mejores características geotécnicas en ambas márgenes, especialmente en la margen derecha.

TABLA IV.5

ZONIFICACION SEGUN LA DESCRIPCION  
GEOTECNICA BASICA (BGD)

UNIDAD LITOLÓGICA	LITOLÓGIA	ESPEZOR DE CAPAS	INTERSECCION DE FRACTURAS	RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE	ANGULO DE FRICCION	SIMBOLOGIA
<b>ALTERNATIVA 1</b>						
Pd (ND)	PIZARRA	GRUESA L2	CERRADO F4	ALTA-MODERADA S2, 3	ALTO A2	L2 F4 S2,3 A2
Pd (NI)	PIZARRA	MODERADA-DELGADA L3,4	CERRADO F4, 5	MODERADA S3	ALTO A1, 2	L3,4 F4,5 S3 A1,2
<b>ALTERNATIVA 2</b>						
Pd (ND)	PIZARRA	GRUESA L2	CERRADO F4	ALTA-MODERADA S3	ALTO A2	L2 F4 S3 A2
Pd (NI)	PIZARRA	MODERADA-DELGADA L3,4	CERRADO F4, 5	BAJA S4	ALTO A1, 2	L3,4 F4,5 S4 A1,2
<b>ALTERNATIVA 3</b>						
Pd (ND)	PIZARRA	GRUESA L2	CERRADO F4	BAJA S4	ALTO A2	L2 F4 S4 A2
TOBAS (NI)	TOBAS	MODERADA DELGADA L3,4	CERRADO F4	MODERADA-ALTA S2,3	ALTO A2	L3,4 F4 S2,3 A2
	TOBA LAJOSA	MUY DELGADA L5	MUY CERRADO F5	BAJA S4	ALTO A2	L5 F5 S4 A2
<b>ALTERNATIVA 4</b>						
TOBA (ND)	IGNIMBRITA	MUY GRUESA L1	MODERADO F3	MODERADO S3	ALTO A2	L1 F3 S3 A2
TOBA (NI)	IGNIMBRITA	MODERADA L2,3	MODERADO-SEPARADO F2,3	ALTA S1,2	ALTO A2	L3,3 F2,3 S1,2 A2

### IV.3.2 CLASIFICACION NGI

La clasificación ingenieril de "Norwegian Geotechnical Institute" (NGI) de macizos rocosos para el diseño de soporte de túneles fue propuesta por Barton, Lien y Lunde (1974), definiendo el parámetro "Q", representativo de la calidad del macizo rocoso con relación a la estabilidad de túneles.

El valor de "Q" está en función de 6 características que, se identifican durante el levantamiento geotécnico.

La expresión que define a "Q" es:

$$Q = (RQD/J_n) (J_r/J_a) (J_w/SRF)$$

DONDE:

- RQD = Índice de calidad de roca
- J<sub>n</sub> = Número de familias de discontinuidades
- J<sub>r</sub> = Valor de rugosidad de las discontinuidades
- J<sub>a</sub> = Valor de la alteración de las discontinuidades
- J<sub>w</sub> = Factor de relación de agua en discontinuidades
- SRF = Factor de relación de esfuerzo

La Tabla IV.6 agrupa los valores de "Q" obtenidos en base a la expresión anterior. En las pizarras los valores de RQD utilizados corresponden a los obtenidos de las perforaciones, mientras que los de las rocas piroclásticas a través del J<sub>v</sub> en la forma en que ya se explicó además del apoyo de los valores obtenidos de la perforación en el cauce de la Alternativa 4. Los demás valores se obtuvieron en base a la inspección superficial y apoyadas en las tablas de conversión para J<sub>n</sub>, J<sub>r</sub>, J<sub>a</sub>, J<sub>w</sub> y SRF propuesta por Barton.

Las unidades litológicas estudiadas en estos sitios por el método de Barton resultaron generalmente de muy mala calidad sobre todo en las pizarras. La calidad del macizo se ha clasificado como muy malo y puede observarse esto en la Tabla IV.6. Las características que más influyen son el fracturamiento representado a través del parámetro RQD y el número de discontinuidades.

En cambio en las rocas volcánicas, margen izquierda de la Alternativa 3 y ambas de la Alternativa 4 sobre todo para la margen derecha, existe una mejora sustancial en cuanto a la calidad del macizo rocoso siendo la unidad ignimbrítica la de mejor calidad.

TABLA IV.6

CLASIFICACION GEOMECANICA NGI (EN BASE A BARTON)

ALTERNATIVA	LITOLOGIA	R	D	J <sub>n</sub>	J <sub>r</sub>	J <sub>a</sub>	J <sub>w</sub>	SRF	Q	CALIDAD
1										
MARGEN DER.	PIZARRA	a: 5		12	2	2	1	4	0.049	EXTREMADAMENTE MALA
		b: 28							0.347	MUY MALA
		c: 30							0.417	MUY MALA
MARGEN IZO.	PIZARRA	a: 5		12	3	2	1	4	0.104	MUY MALA A EXTREMADAMENTE MALA
		b: 26							0.242	MUY MALA
		c: 30							0.425	MUY MALA
2										
MARGEN DER.	PIZARRA	a: 5		12	2	2	1	6	0.049	EXTREMADAMENTE MALA
		b: 14							0.194	MUY MALA
		c: 5							0.104	MUY MALA A EXTREMADAMENTE MALA
MARGEN IZO.	PIZARRA	b: 16		12	3	2	1	6	0.333	MUY MALA
3										
MARGEN DER.	PIZARRA	a: 49		12	2	2	1	4	0.481	MUY MALA
		b: 16							0.222	MUY MALA
MARGEN IZO.	TOBA	a: 98		6	1	1.5	1	1	11.000	BUENA
		b: 82							9.11	REGULAR
	TOBA LAJOBA	14		6	1	1.5	1	5	0.355	MUY MALA
4										
MARGEN DER.	IGNIMBRITA	82		6	1.5	1.5	1	1	13.67	BUENA
MARGEN IZO.	IGNIMBRITA	82		6	1	1.5	1	1	9.11	REGULAR

Nota: Para las Alternativas 1, 2, 3, se distinguieron 2 o 3 zonas con R0D diferente lo cual se ha distinguido con las letras a, b y c.

#### IV.3.3 CLASIFICACION CSIR

La clasificación geomecánica de macizos rocosos propuesta por Bieniawski (1979) del Instituto de Investigaciones de Sudáfrica, (CSIR) se evalúa a partir del índice RMR. Esta clasificación esta basada también en las características del macizo rocoso y analiza características semejantes a las de Barton pero desde otro punto de vista.

El índice RMR se calcula mediante 6 parámetros; 5 derivados de las características del macizo rocoso y el sexto asociado a un ajuste en base a la orientación de las discontinuidades, las cuales, en el mejor de los casos, sumarán 100 puntos.

La expresión que define el índice es:

$$RMR = A + B + C + D + E - F$$

Donde:

- A = Resistencia a la compresión simple o índice de carga puntual
- B = RQD (índice de calidad de la roca)
- C = Espaciamiento de discontinuidades
- D = Características de las discontinuidades
- E = Condiciones de agua subterránea
- F = Ajuste por orientación de las discontinuidades

Con esta clasificación al igual que la anterior, se ha podido caracterizar a diferentes unidades del macizo rocoso. En la Alternativa 4, las unidades presentan una calidad regular. La Tabla IV.7 agrupa los resultados obtenidos por cada unidad.

Los valores triples indican las zonificaciones existentes en algunos de los parámetros por presentarse variaciones en las propiedades del macizo rocoso.

En esta clasificación como en la anterior se ha acentuado la mala calidad de las pizarras (Pp) de las Alternativas 1, 2 y 3 y la calidad buena a regular de las rocas volcánicas de la Alternativa 4 (Tabla IV.7).

**TABLA IV.7**  
**CLASIFICACION GEOMECANICA EN BASE A**  
**BIENIASMKI (CSIR)**

ALTERNATIVA	LITOLOGIA	RESISTENCIA	R Q D	ESPAÑAMIENTO	CARACTERISTICAS DISCONTINUIDADES	FLUJO DE AGUA	AJUSTE	R R R (VALOR)	CLASE	CALIDAD
1										
MARGEN DER.	PIZARRA	6	3 8	15	6	10	-5	35 40	IV IV	MLA MLA
MARGEN IZQ.	PIZARRA	4	3 8	15	10	10	-5	37 42	IV III	MLA REGULAR
2										
MARGEN DER.	PIZARRA	6	3	15	6	10	-5	35	IV	MLA
MARGEN IZQ.	PIZARRA	4	3 8	15	10	10	-5	37 42	IV IV	MLA REGULAR
3										
MARGEN DER.	PIZARRA	6	3	15	6	10	-5	35	IV	MLA
MARGEN IZQ.	TOMAS	10 20	17 3	20	6	10	-5	56 36	III IV	REGULAR MLA
4										
MARGEN DER.	IGNIBRITA	7	17	20	20	10	-5	69	II	BUEN-
MARGEN IZQ.	IGNIBRITA	6	17	20	6	10	-5	54	III	REGULAR

#### IV.4 INTERPRETACION DE RESULTADOS

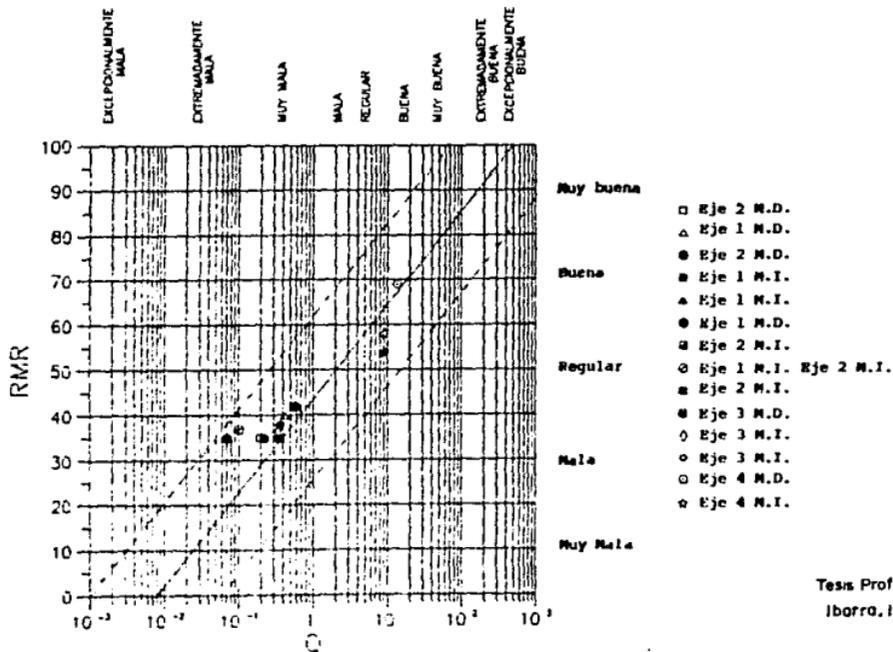
El resultado del análisis de las características del macizo rocoso se basó en el BGD, Q y RMR. Los 2 últimos índices fueron calculados reciprocamente con la finalidad de definir la desviación de los valores obtenidos, en base a la ecuación:

$$R.M.R. = 9 (\ln Q) + 44$$

En la Figura IV.3 se observa que los valores correlacionados entre Q y RMR quedan dentro de los límites de confiabilidad del 90%. La concentración de los datos para rocas de extremadamente mala a mala calidad corresponden a muestras analizadas en las pizarras, mientras que de calidad regular a buena, a muestras de tipo volcánico.

La Tabla IV.8 agrupa los resultados de las correlaciones de las diferentes clasificaciones (BGD, Q y RMR). En las clasificaciones se define que la Alternativa 4 presenta las mejores condiciones geológicas en cuanto a la calidad del macizo rocoso.

FIGURA IV.3 CORRELACION ENTRE EL INDICE Q Y RMR



Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

TABLA IV.8  
RESUMEN DE CLASIFICACION PARA EVALUAR LA  
CALIDAD DE LAS UNIDADES GEOTECNICAS

ALTERNATIVA	LITOLOGIA	R <sub>PK</sub>	R <sub>W1</sub> (Q)	Q	Q1(R <sub>PK</sub> )	CLASE		BED	CARACTERIZACION	
						R <sub>W1</sub>	Q			
ALT. 1	PIZARRA	35	20	0.069			E. MALA		MALA A REGULAR	
		35	35	0.347	0.368	MALA	MUY MALA	L2F452,3 A2		
		40	36	0.417	0.641	MALA	MUY MALA			
	MI	PIZARRA	37	24	0.104	0.459	MALA	MUY MALA	L3,4F4,353A1,2	MALA A REGULAR
			42	39	0.342	0.801	REGULAR	MUY MALA		
			40		0.625					
ALT. 2	PIZARRA	35	20	0.069			E. MALA		MALA A REGULAR	
		35	30	0.194	0.368	MALA	MUY MALA	L2F453 A2		
	MI	PIZARRA	37	24	0.104	0.459	MALA	MUY MALA	L3,4F4,354A1,2	MALA A REGULAR
			42	34	0.333	0.801	REGULAR	MUY MALA		
	ALT. 3	PIZARRA	35	30	0.681	0.459		MUY MALA		MALA REGULAR
			35	30	0.222	0.368	MALA	MUY MALA	L2F454 A2	
MI		TOBAS	58	64	11.00	4.74	REGULAR	REGULAR A BUENA	L1,4F452,3 A2	REGULAR
			66		9.11					
		TOBA LATOSA	36	35	0.353	0.41	MALA	MUY MALA	L2F554 A2	MUY MALA
ALT. 4		IGNIMBRITA	68	68	15.33	16.10	BUENA	BUENA	L1F552 A2	BUENA
	69			13.666		BUENA	BUENA			
	MI	IGNIMBRITA	54	64	9.11	3.04	REGULAR	REGULAR MALA	L2,3F2,351,2 A2	REGULAR A BUENA

## CAPITULO V

### ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LOS TALUDES DE LAS BOQUILLAS

#### GENERALIDADES

Los problemas que presenta la estabilidad de taludes, tanto naturales como excavados, han sido objeto de análisis y estudios profundos por parte del ser humano, poniendo especial atención en los incluidos en la ingeniería civil y las obras mineras.

En general existen pocos textos dentro de Ingeniería Geológico-Geotécnica, que contemplen desde un punto de vista teórico y práctico, toda la información que pueda ser útil a aquellos que en un sentido general trabajan con problemáticas derivadas de la existencia de taludes.

El siguiente análisis está enfocado a evaluar la estabilidad de los taludes en la zona de las boquillas, dado que al producirse corrimientos inesperados en dichos taludes, los efectos que se producen pueden ser importantes.

Desde el punto de vista económico por ejemplo, su importancia global es realmente grande, aunque cabe hacer notar que tratándose de estabilidad de taludes, debemos tener presente que puede haber algunos casos especialmente difíciles de tratar, ya que la distinta naturaleza de las rocas que forman los macizos rocosos implica una problemática determinada en su comportamiento ante la estabilidad de los taludes.

Este análisis se basa en los estudios estadísticos-estructurales de las discontinuidades superficiales levantadas a lo largo de las diferentes alternativas y de las observaciones visuales realizadas en campo, esto en combinación con los datos obtenidos respecto al macizo rocoso (descrito en el capítulo anterior), nos da una idea más clara del problema de inestabilidad que pudiera existir en cada uno de los taludes.

## V.1 CARACTERISTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES

Para conocer la estructura tridimensional del macizo rocoso en cada una de las alternativas, además del levantamiento geológico de campo se construyeron una serie de diagramas estereográficos con el objeto de tener una idea mas clara de la orientación preferencial de las fallas, familias de fracturas y otras discontinuidades; además de saber como se relacionan unas con otras y, que influencias podrian tener con respecto a la estabilidad de los taludes. Para lograr este objetivo, durante el levantamiento de campo, se realizó una medición minuciosa de las estructuras geológicas tratando de obtener el tipo de discontinuidad de que se trataba, la orientación que presentaba y una serie de características que ayudan a definir el comportamiento del macizo rocoso.

El comportamiento del macizo rocoso, depende de las características de las discontinuidades ( estratificación, fallas, foliación, superficies de debilidad, etc.) que presenta, así como de la litología y su historia evolutiva.

Las características medidas y calculadas son las que a continuación se enumeran:

- a) Espaciamiento de las familias de discontinuidades.
- b) Continuidad.
- c) Rugosidad de las paredes de las discontinuidades.
- d) Resistencia a la compresión simple del macizo rocoso (este valor fue estimado).
- e) Abertura de las paredes de las discontinuidades.
- f) Material de relleno.
- g) Resistencia a la compresión simple del relleno (este valor fue estimado).
- h) Grado de intemperismo del macizo rocoso.
- i) Filtración en las discontinuidades con material de relleno.
- j) Forma de bloques del macizo rocoso.
- k) Tamaño de bloques.

El conocimiento del conjunto de características antes mencionadas constituye el paso previo en el análisis de estabilidad de taludes.

La orientación preferencial y el número de familias de las discontinuidades, se determinó por medio de diagramas estereográficos, los cuales presentan la concentración y orientación preferencial de los polos agrupados en familias (Figuras V.1 y V.2) y la orientación preferencial de las familias de discontinuidades proyectadas como arcos (Figuras V.3 y V.4).

Dado que en las boquillas se definieron básicamente dos grupos litológicos: las pizarras y las rocas piroclásticas, cada una presenta un comportamiento singular característico, reflejando los esfuerzos a los que estuvieron sujetas a lo largo del transcurso del tiempo. Por lo que se dividió y analizó separadamente la información de estas dos unidades. Posteriormente, se observó a través de los diagramas estereográficos que efectivamente la orientación de las discontinuidades eran diferentes para una y otra unidad.

En las pizarras sobre las que se encuentran los Ejes 1, 2 y margen derecha del 3, se definieron 5 familias, de las cuales 3 son principales: A, B y C (donde C corresponde a la foliación), mientras que D y E son secundarias.

El sistema "A" es el más desarrollado, tiene una orientación 045/90 grados y es más persistente en la margen izquierda. Se cree corresponde a un sistema tensional por la posición que guarda respecto a las otras familias. Además que coincide con la estructura tensional que debieron formarse durante la deformación pérmica (Figura V.1).

El sistema "B", con orientación 317/54 grados es normal a la foliación y más persistente en la margen izquierda se cree también pueda corresponder a un sistema tensional.

El sistema "C", definido en el diagrama estereográfico su carácter principal por la dispersión existente corresponde a la foliación, la cual es muy cerrada y refleja los esfuerzos compresionales en dirección NW-SE que afectaron a estas rocas.

Las familias "D" y "E" corresponden a sistemas secundarios, con orientación de 071/45 y 211/50 grados respectivamente son más persistentes en la margen derecha se piensa que estos sistemas pertenecen a discontinuidades formadas por esfuerzos cortantes.

Por otro lado, las rocas extrusivas de tipo tobáceo ignimbrítico del Terciario que afloran en el eje 4 y margen izquierda del eje 3, muestran un patrón de discontinuidades diferente al anterior. Se manifiestan en esta secuencia 4 familias que se han denominado F, G y H como principales, y J a una familia secundaria (Figura V.2).

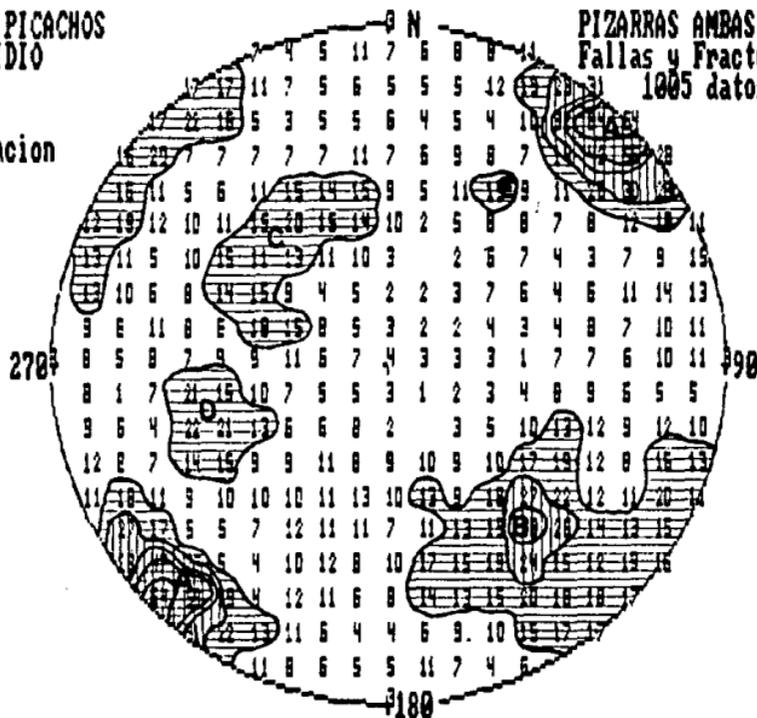
BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

PIZARRAS AMBAS MARGENES  
Fallas y Fracturas  
1005 datos

Concentracion



Familias  
A: 045/90  
B: 317/54  
C: 140/40  
D: 071/45  
E: 211/50



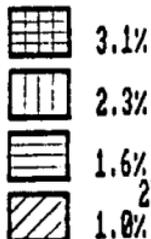
RED DE SCHMIDT (HI)

FIGURA V.1. DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE CONCENTRACION DE POLOS DE LOS PLANOS DE DISCONTINUIDADES (PIZARRAS). RIO PRESIDIO. Ibarra, 1990. Tesis Profesional

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

TOBAS AMBAS MARGENES  
Discontinuidades  
953 datos

Concentracion



Familias  
F:040/47  
C:217/44  
H:123/90  
J:267/81

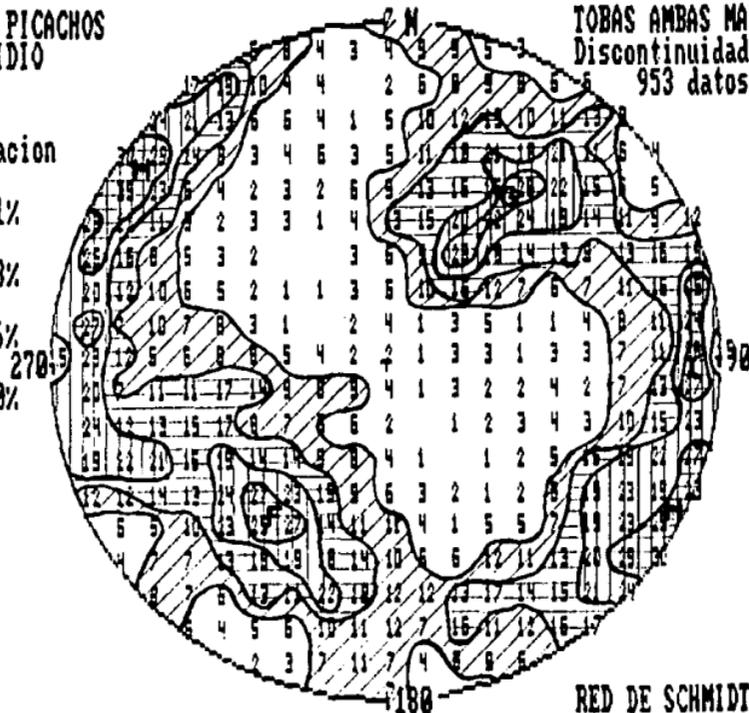


FIGURA V.2 DIAGRAMA ISOTERECOGRAFICO DE CONCENTRACION DE POLOS DE LOS PLANOS DE DISCONTINUIDADES (TOBAS) . RIO PRESIDIO Ibarra, 1990. Tesis Profesional

BOQUILLA PICACHOS  
RÍO PRESIDIO

PIZARRAS AMBAS MARGENES  
Discontinuidades

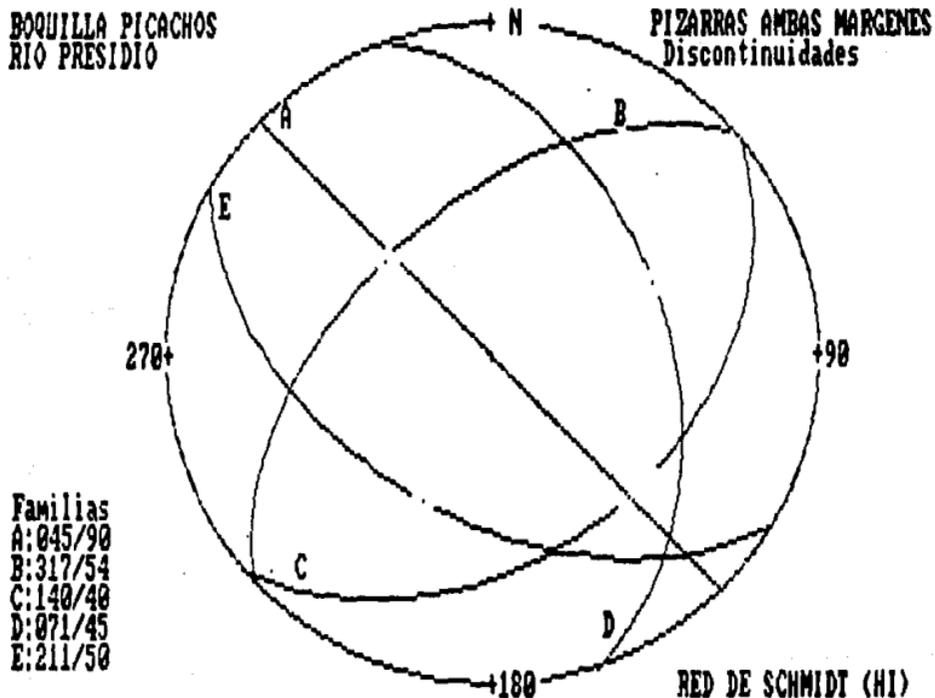


FIGURA V.3 DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO DE ORIENTACIÓN PREFERENCIAL DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES EN LAS PIZARRAS. Ibarra, 1990. Tesis Profesional

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

TOBAS AMBAS MARGENES  
Discontinuidades

82

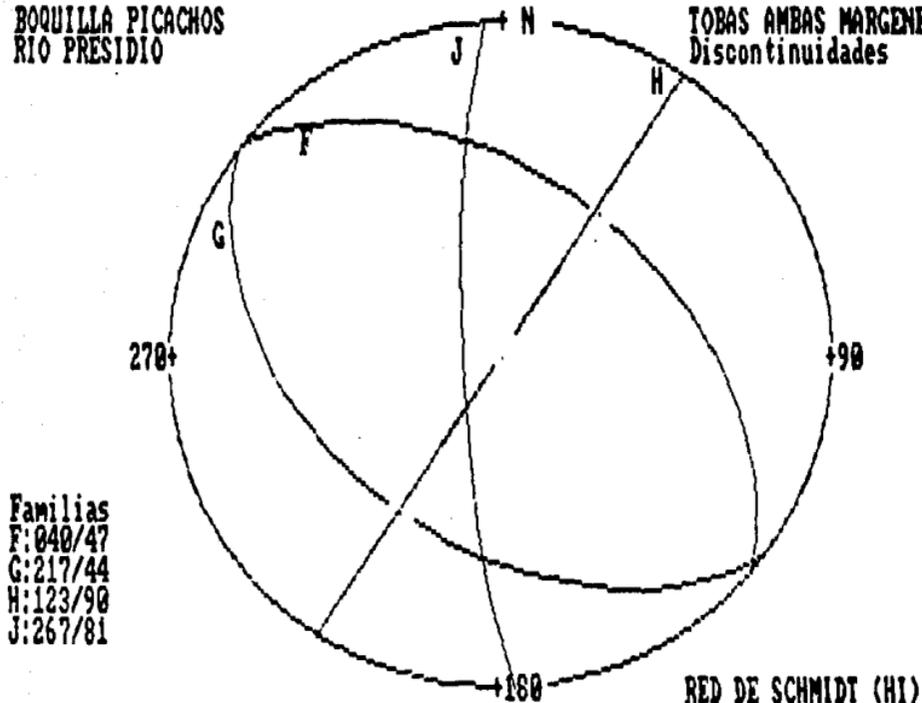


FIGURA V.4 DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE ORIENTACION PREFERENCIAL DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES EN LAS TOBAS. Tesis Profesional. Ibarra, 1990.

"El sistema "F" es el más desarrollado tiene una dirección preferencial de 040/47 grados y se encuentra reflejado regionalmente (Plano 1). Se encuentra mejor desarrollado en la margen izquierda y corresponde a un sistema de tipo tensional es normal al esfuerzo principal. 1

El sistema "G" que corresponde a la pseudoestratificación se encuentra también bastante desarrollado, presenta una dirección de 217/44 grados.

La familia "H" se considera como principal, la cual, tiene una orientación de 123/90 grados asociada a un sistema tensional paralelo al esfuerzo principal.

La familia "J" no es muy significativa tiene una orientación de 267/81 grados, y corresponde a un sistema posiblemente desarrollado por cizalla" (Delgado S. y Absalón M., 1989).

Por otro lado considerando la orientación preferencial que presentaba cada una de las familias de discontinuidades, así como las características más frecuentes y sobresalientes de estas estructuras, se procedió a elaborar la Tabla V.1.

TABLA V.1. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS DISCONTINUIDADES

T O D A S

FAMILIA	LITOLOGÍA	ESPACIAMIENTO			CONTINUIDAD			RUGOSIDAD			RESISTENCIA			APERTURA			FRECUENCIA DE AGUA			F L O J O S			RELLENDO		
		FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI
F	TOCAL	2-60	4-20	20-60	C	C	C	IV	I	IV	II	II	II	AI	AI	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
G	TOCAL	20-60	4-20	20-60	C	C	C	IV	VIII	IV	II	II	II	AI	AI	F	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	
H	TOCAL	20-60	4-20	20-60	C	C	C	IV	VIII	IV	II	II	II	AI	AI	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	
J	TOCAL	20-60	4-20	20-60	C	C	C	IV	IV	IV	II	II	II	AI	A2	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	

F I Z A N K A S

FAMILIA	LITOLOGÍA	ESPACIAMIENTO			CONTINUIDAD			RUGOSIDAD			RESISTENCIA			APERTURA			FRECUENCIA DE AGUA			F L O J O S			RELLENDO		
		FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI	FD	FI	MI
A	PIZARRA	2-60	20-60	20-60	<I	C	C	V	IV	IV	II	II	II	AI	A2	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
B	PIZARRA	20-60	20-60	20-60	<I	C	C	VIII	I	IV	II	II	II	AI	A2	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	
C	PIZARRA	4-20	20-60	4-20	<I	C	C	V	IV	IV	II	II	II	AI	AI	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	
D	PIZARRA	20-60	3-60	20-60	<I	C	C	VIII	VII	VIII	II	II	II	AI	AI	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	
E	PIZARRA	20-60	20-60	20-60	<I	C	C	VIII	VIII	VIII	II	II	II	AI	AI	AI	Sup	Sup	Sup	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	

FD: MUY BAJA  
FI: BAJA  
MI: ALTA

FD: MUY BAJA  
FI: BAJA  
MI: ALTA

MI: MUY BAJA  
FI: BAJA  
MI: ALTA

C: CONTINUA  
FI: BAJA

MI: MUY BAJA  
FI: BAJA

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990.

## V.2 ANALISIS CINEMATICO DE LOS TALUDES

Para poder estudiar la estabilidad de los taludes en los posibles cortes se utilizó el método cinemático. El método cinemático es una técnica gráfica que nos permite evaluar la estabilidad de los taludes de una manera preliminar, utilizando como herramientas las proyecciones estereográficas, así como también algunos datos de resistencia de los materiales y aspectos geométricos de los taludes. Se consideró un ángulo de fricción estimado de 30 grados.

Los estudios se realizaron de la siguiente manera: primero mediante un análisis alrededor de los 360 grados en intervalos de 15 grados, con el objetivo de determinar el comportamiento del macizo rocoso en todas las direcciones y conocer la orientación e inclinación de los cortes óptimos que llegarán a realizarse para la construcción de la cortina, así como en las obras auxiliares de la presa. Posteriormente, se realizó un análisis exclusivamente sobre las laderas de las cuatro alternativas. Debido a que las alternativas quedan comprendidas en dos unidades litológicas, pizarras y tobas, y dado que cada unidad presenta características particulares. Esto con el fin de conocer y evaluar los posibles mecanismos de falla.

Para evaluar la estabilidad cinemática de las laderas se elaboraron, para cada unidad litológica y por margen, diagramas estereográficos mostrando la orientación preferencial de las fracturas principales, las cuales se han proyectado como arcos así como la resistencia al corte de los planos de fractura representada por un ángulo de fricción interna (estimado en 30 grados). La orientación e inclinación de las laderas actuales fue variable, según la alternativa y margen.

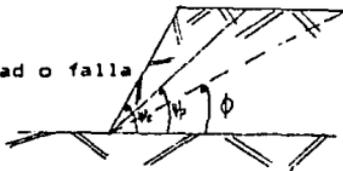
Mediante los diagramas estereográficos tanto de las pizarras como de las tobas, se determinó la dirección del echado y el ángulo de inclinación de las familias preferenciales. Estos valores juegan un papel muy importante en este análisis, ya que nos indican el ángulo de máxima pendiente permitido para determinada dirección de un corte en el caso que este fuera mayor que el ángulo de fricción.

Los polos de los planos y su correspondiente posición también se ha definido con el fin de poder observar la inestabilidad por volteo.

De acuerdo al dibujo esquemático siguiente, para que pueda ocurrir un deslizamiento es necesario que la condición  $\psi_c > \psi_p > \phi$  se cumpla.

donde:

- $\psi_c$  = Pendiente del talud
- $\psi_p$  = Echado del plano de debilidad o falla
- $\phi$  = Ángulo de fricción



Del análisis de las Figuras V.6 y V.7 se determinaron las Tablas V.2 y V.3 que definen el ángulo máximo de seguridad y el modo de falla que intervienen en el caso de que se realizaran excavaciones alrededor de los 360 grados.

Con base en estas tablas, es posible dibujar las Figuras V.8 y V.9 que de una manera simple nos ilustran a través del cono truncado, las direcciones y el máximo ángulo de seguridad cinemático recomendado.

En la Figura V.8 que corresponde a los resultados del análisis sobre las pizarras se aprecia que existe inestabilidad cinemática a partir de los 40 grados en promedio, a través del mecanismo de cuña, alrededor de casi los 360 grados debido a la intersección de las diferentes discontinuidades y sólo en algunos intervalos entre 65 a 80 ó 200 a 215 grados de azimut por falla plana.

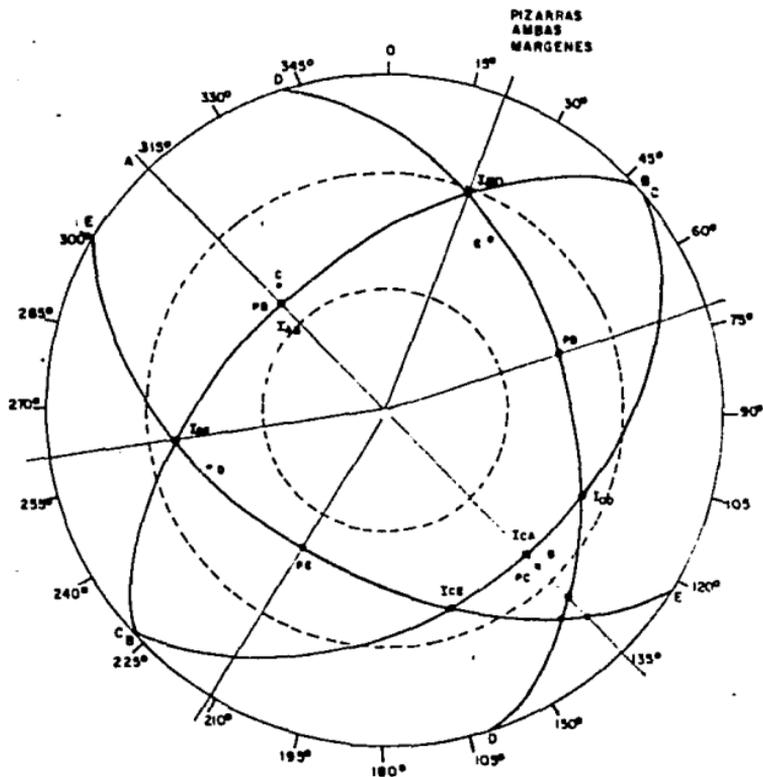
Como podemos notar en la Figura V.9, cuando el ángulo de seguridad cinemático se considera bajo (40 grados) existen intervalos que pueden lograr ángulos de seguridad cinemáticos mayores de 60 grados. De igual forma que en el caso anterior, la inestabilidad es principalmente por mecanismo de cuña sin embargo, existe un intervalo sobre todo hacia las direcciones E y W, donde la inestabilidad puede ocurrir a través de falla plana o volteo.

Una situación que se ha notado, corresponde a que, aún cuando en la Figura V.9 se observa un ángulo de seguridad bajo del orden de 35 a 45 grados entre los 300 a 30 grados de azimut, en la realidad los taludes que se forman en el cañon en la zona de la margen izquierda de la Alternativa 3 son mucho mayores. Sin embargo también se encontraron bloques de varias toneladas al nivel del cauce por lo que existe cierta relación con lo que se indica en la Figura V.9.

Además por otro lado se ha observado que, los valores obtenidos a través de las Figuras V.8 y V.9 concuerdan muy bien, con los valores obtenidos de las inclinaciones de los taludes naturales lo que indica que han obtenido la posición de equilibrio natural.

También es común observar que las pizarras (Pp) presentan taludes con pendientes muy bajos, la geomorfología que tienen estas rocas en esta zona son suaves y arredondadas. En cambio, en las rocas piroclásticas (tobas) de la zona de estudio, los taludes naturales son de mayor desnivel y con pendientes mucho más fuertes, alcanzando en algunos sitios del cañon, hasta los 90 grados.

# DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO MOSTRANDO LOS MODOS DE FALLA DE PIZARRAS



## FAMILIAS

- A: 043/80
- B: 317/54
- C: 140/40
- D: 071/45
- E: 211/50

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990.

FIGURA V.6

TABLA V.2

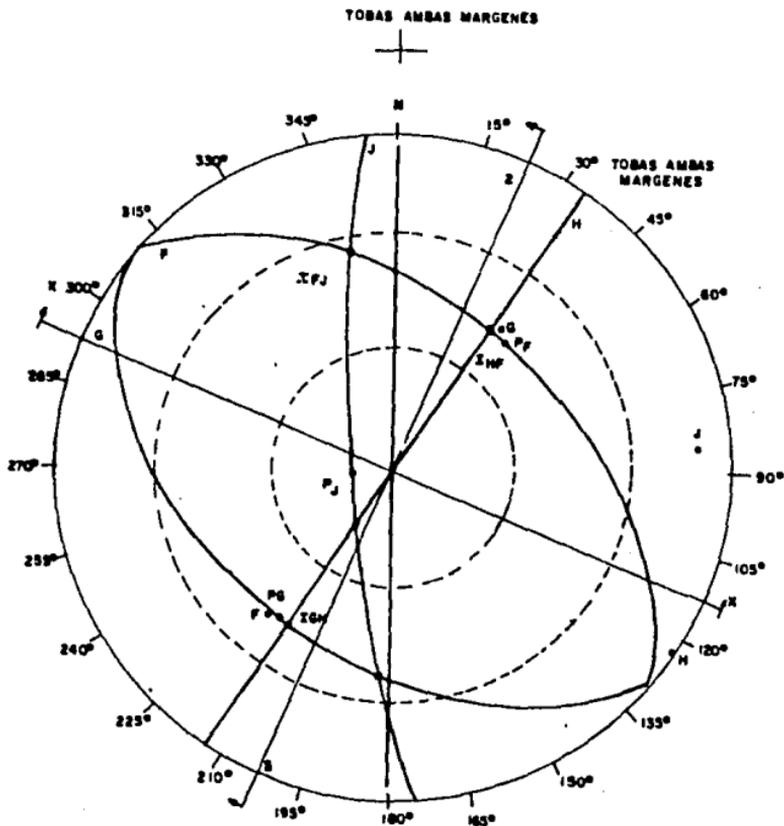
ANALISIS CINEMATICO DE MAXIMO ANGULO  
DE SEGURIDAD DE CORTES (PIZARRAS)

RANGO DE CORTE (GRADOS)	DIRECCION DE LA INCLINACION DEL CORTE (GRADOS)	ANALISIS DE FALLAS												MODO DE FALLA	MAXIMO ANGULO DE SEGURIDAD CINEMATICA			
		P L A N A				C U R A				V O L T E O								
		PO	PC	PO	PE	1AB	1BO	1BE	1CA	1CO	1CE	V0	V1			V0	VE	
0	90	91	52	47	90	90	82	90	50	39	68	90	90	90	90	ICD	37	
15	105	90	46	50	90	90	80	90	44	37	55	90	90	90	90	ICD, 1CA	37,44	
30	120	90	42	57	90	90	70	90	41	38	46	67	90	90	90	ICD, 1CA, PC	38,41,42	
45	135	90	40	66	78	90	60	90	40	39	41	66	90	90	90	ICE, 1CA, PC, ICE	39,40,40,41	
60	150	90	41	79	68	90	50	90	41	44	39	67	90	90	90	1CE, 1CA, PC	39,41,41	
75	165	90	43	90	60	90	40	90	44	50	38	90	90	90	90	1CE, PC, 1CA	38,43,44	
90	180	90	49	90	54	90	30	90	79	50	62	40	90	90	90	ICE	40	
105	195	90	56	90	51	90	20	90	62	79	44	50	90	90	90	ICE	40	
120	210	90	68	90	50	90	10	90	51	72	30	50	90	90	90	1CE, PE, 1BE	50,50,51	
135	225	90	84	90	51	90	00	90	44	99	00	60	90	90	78	90	1BE, PE	44,51
150	240	81	90	90	54	80	00	90	40	90	30	76	90	90	76	90	1BE	40
165	255	71	90	90	60	70	00	38	90	90	90	90	90	90	75	90	1BE	38
180	270	63	90	90	63	63	00	38	90	90	90	90	90	90	77	90	1BE	38
195	285	58	90	90	78	58	00	40	90	90	90	90	90	90	90	90	1BE	40
210	300	55	90	90	90	55	76	44	30	90	90	90	90	90	90	90	1BE	44
225	315	54	90	90	90	54	57	52	90	90	90	90	90	90	90	90	1BE, 1AB, FB	52,54,54
240	330	55	90	90	90	55	45	64	90	90	90	90	90	90	90	90	1BO	45
255	345	56	90	87	90	56	38	62	90	90	90	90	90	90	90	90	1BO	38
270	360	62	90	72	90	63	34	90	90	90	90	90	90	90	90	90	1BO	34
285	15	69	90	61	90	70	32	90	90	90	90	90	90	90	90	71	1BO	32
300	30	78	90	53	90	79	33	90	90	62	90	90	90	90	90	90	1BO	33
315	45	89	90	48	90	90	35	90	90	64	90	90	90	90	90	71	1BO	35
330	60	90	79	46	90	90	40	70	73	51	90	90	90	90	90	90	1BO	40
345	75	90	67	45	90	70	49	90	59	64	86	90	90	90	90	90	1CA, PO, 1BO	44,45,43

Notas:

- P - Falla plana
- I - Cufa
- V - Volteo

# DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO MOSTRANDO LOS MODOS DE FALLA DE LAS TOBAS



FAMILIAS

F : 040/47

G : 217/44

H : 225/90

J : 267/81

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990.

FIGURA: V.7

(Tomada de Geoproyectos S.A, 1989.)

TABLA V.3

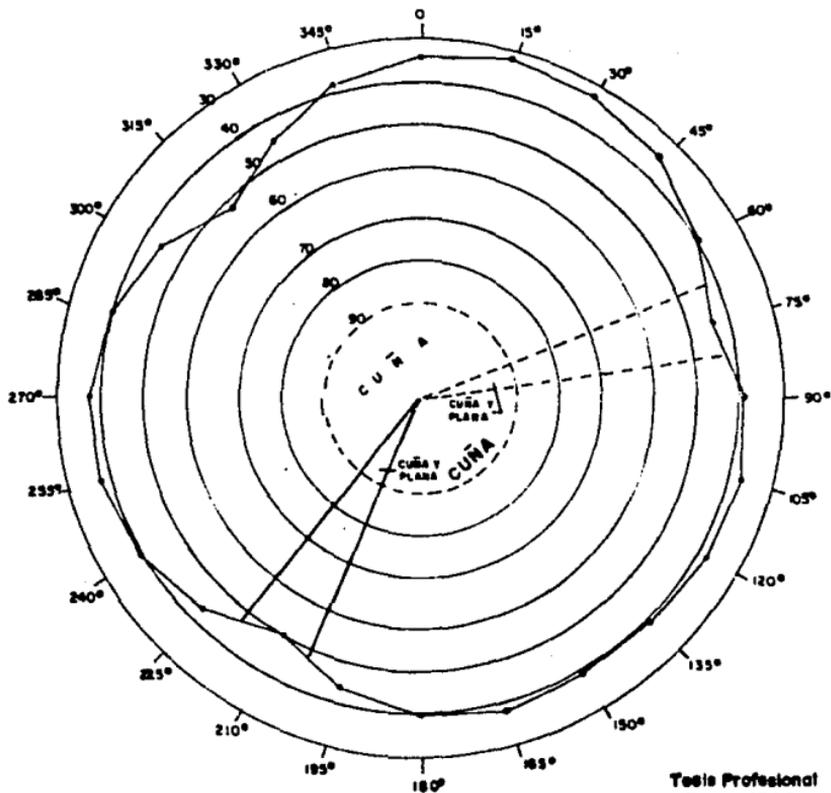
ANALISIS CINEMATICO DE MAXIMO ANGULO  
DE SEGURIDAD DE CORTES (TOBAS)

RUMBO DE CORTE (GRADOS)	DIRECCION DE LA INCLINACION DEL CORTE (GRADOS)	ANALISIS DE FALLAS									MODO DE FALLA	MAXIMO ANGULO DE SEGURIDAD CINEMATICA
		PLANA			CUÑA			VOLTEO				
		PF	PG	PA	IHF	IFJ	IGH	VF	VS	VJ		
0	90	60	90	90	64	90	90	90	90	40	VJ	40
15	105	69	90	90	74	90	90	90	90	41	VJ	41
30	120	81	90	90	87	90	90	90	90	40	Pf	81
45	135	90	82	90	90	90	78	90	90	90	IGH	78
60	150	90	68	90	90	90	65	90	90	70	IGH,PG	65,68
75	165	90	57	90	90	90	53	90	90	90	IGH,PG	53,57
90	180	90	50	90	90	90	46	90	90	90	IGH,PG	46,50
105	195	90	45	87	90	90	45	75	90	90	IGH,PG	45,56
120	210	90	44	85	90	90	44	73	90	90	IGH,PG	44
135	225	90	44	83	90	90	44	72	90	90	IGH,PG	44
150	240	90	46	82	90	90	47	74	90	90	PG,IGH	46,47
165	255	90	51	80	90	90	52	90	90	90	PG,IGH	51,52
180	270	90	58	80	90	73	60	90	90	90	PG,IGH	58,60
195	285	90	69	81	90	56	72	90	90	90	IFJ	56
210	300	90	87	82	90	45	90	90	90	90	IFJ	45
225	315	85	90	84	79	38	90	90	90	90	IFJ	38
240	330	72	90	85	67	35	90	90	90	90	IFJ	35
255	345	62	90	87	58	33	90	90	90	90	IFJ	33
270	360	54	90	90	52	34	90	90	90	90	IFJ	34
285	15	50	90	90	48	37	90	90	77	90	IFJ	30
300	30	47	90	90	47	42	90	90	76	90	IFJ	42
315	45	47	90	90	48	50	90	90	76	90	VF, IHF	47,43
330	60	49	90	90	50	64	90	90	78	41	VJ	41
345	75	53	90	90	56	84	90	90	90	40	VJ	40

Nota:

- P - Falla plana
- I - Cuña
- V - Volteo

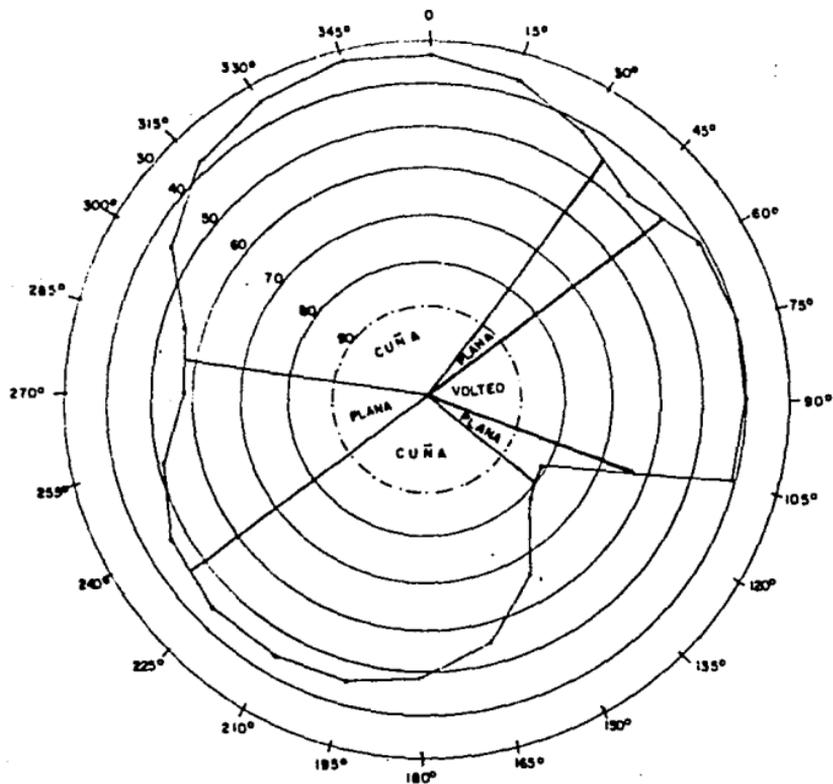
DIAGRAMA DEL CONO TRUNCADO DE LAS PIZARRAS  
 INDICANDO EL MODO DE FALLA Y EL ANGULO MAXI-  
 MO DE SEGURIDAD SEGUN LA DIRECCION DE LA INCLI-  
 NACION DE LA EXCAVACION.



Tesis Profesional  
 Ibarra, 1990.

FIGURA: V.8

**DIAGRAMA DEL CONO TRUNCADO DE LAS TOBAS  
INDICANDO EL MODO DE FALLA Y EL ANGULO  
MAXIMO DE SEGURIDAD SEGUN LA DIRECCION  
DE LA INCLINACION DE LA EXCAVACION**



Testis Profesional  
Ibarra, 1990.

**FIGURA : V.9**  
(Tomada de Geoproyectos S.A., 1989)

## **.Análisis Cinemático de Estabilidad por Alternativa**

### **EJE 1**

Como se observa en la Figura V.8, la orientación más desfavorable para los cortes en las pizarras serán aquellas que se inclinan hacia las direcciones comprendidas entre 0 a 60, 105 a 180 y 240 a 285 grados respectivamente, donde básicamente se forman cuñas entre 30 y 40 grados de inclinación. Hacia la dirección 195 a 240 grados y 300 a 345 grados, los cortes también son desfavorables pero con cuñas que pueden soportar ángulos de inclinación un poco mayores entre 40 y 52 grados. Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, en general las rocas metamórficas que afloran en esta zona no soportan cortes con taludes altos, ni con pendientes fuertes.

Al analizar el talud de la margen izquierda del Eje 1, (Figura V.10) se observa una cuña (IBE) formada por las familias B y E que representa el sistema más inapropiado sin embargo, se observó que la familia "E" no es muy persistente, por lo que las cuñas formadas no son frecuentes. En el caso que se realizara un corte en la misma dirección del talud, la familia formada por A y B podrían soportar inclinaciones del orden de 60 grados. Comparando la Figura V.10 y la Figura V.8 se concluye que el talud natural observado en la margen izquierda, que corresponde a 42 grados, es sensiblemente semejante al calculado de 39 grados existiendo una desviación de solo 4 grados.

El talud de la margen derecha (Figura V.11) se observa que está afectada por mayor número de discontinuidades, considerándose que puede tener mayores problemas de inestabilidad. Esta margen tiene un desnivel y una pendiente menor que la margen izquierda. En esta margen se observan las cuñas (IBD) formada por las familias B y D, (ICD) formadas por las familias C y D. La familia A puede influir fuertemente en caso de un corte de 80 grados de inclinación por efecto de volteo. Sin embargo, la familia D puede afectar en forma de falla plana. En general, desde el punto de vista cinemático estos sistemas deben fallar si el talud es mayor de los 39 grados (Figura V.8), es por esa razón que los taludes naturales de esta margen son del orden de los 30 grados.

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

Ladera:  
261/42

Familias  
A: 045/90  
B: 317/54  
C: 140/40  
D: 071/45  
E: 211/50

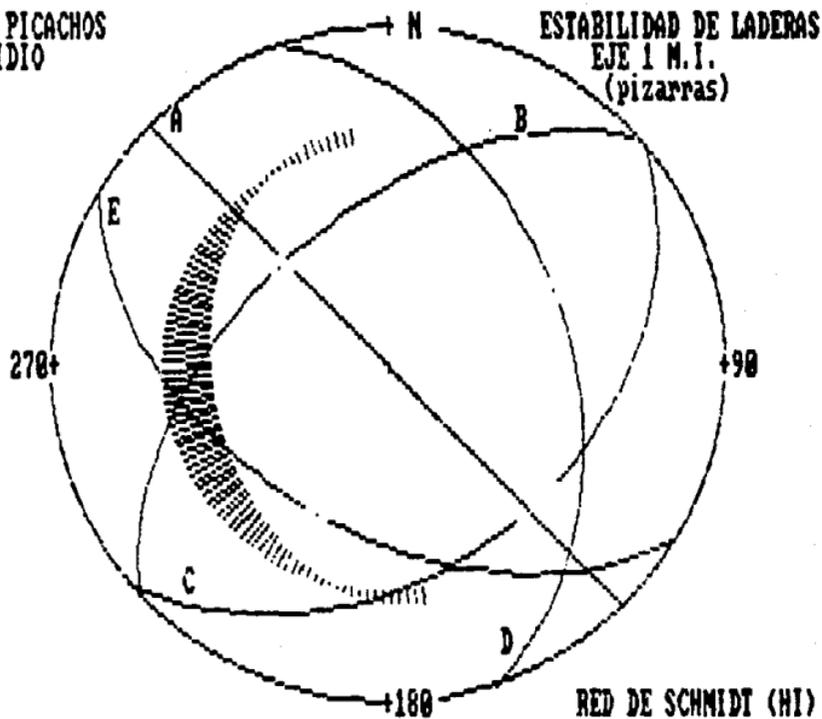


FIGURA V.10 ESTABILIDAD DE LADERAS MARGEN IZQUIERDA. EJE 1

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

Ladera:  
076/30

Familias  
A: 045/90  
B: 317/54  
C: 140/40  
D: 071/45  
E: 211/50

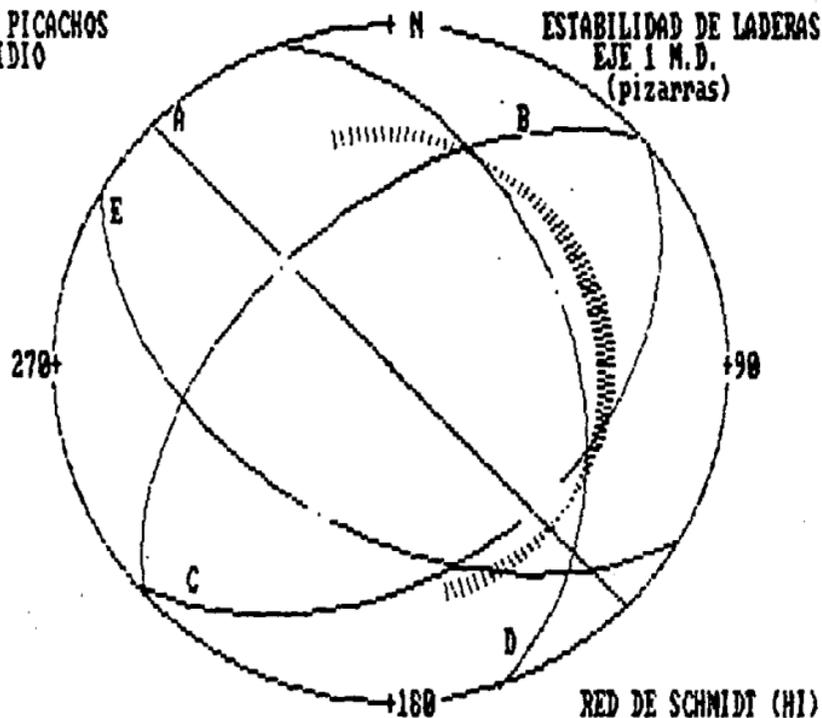


FIGURA: V.11

ESTABILIDAD DE LADERAS, MARGEN DERECHA. EJE 1

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

## EJE 2

De manera similar al Eje 1, el macizo rocoso del Eje 2 está constituido, por pizarras (Pp), así que el comportamiento de las principales familias de discontinuidades debe ser semejante, variando en base a la inclinación del talud.

En la margen izquierda del Eje 2 (Figura V.12) se han observado la cuña (IBE) formada por la Familias B y E que constituyen el sistema más inapropiado para taludes mayores de 40 grados y, en segundo término el sistema de falla plana "E" para taludes mayores de 50 grados. La Familia A, que se ha identificado de primer orden puede actuar en taludes con pendientes fuertes y altos desniveles a través del mecanismo de falla por volteo. Cabe destacar que la familia "E" no es persistente, por lo que las cuñas formadas no son frecuentes. El talud natural de esta margen es de 48 grados (Figura V.12), el cual es semejante al calculado de 40 grados (Figura V.8) existiendo una desviación de solo 8 grados.

El talud de la margen derecha del Eje 2, se ha considerado más inestable que el izquierdo. En este caso, la inclinación del talud natural y el desnivel es menor que el de la margen izquierda. Al analizar el diagrama estereográfico (Figura V.13) se observa que pueden influir 4 mecanismos de fallas dos asociados a cuñas (IBD e IDC), otro por falla plana (PD) y uno más por volteo (VA).

En el caso de las cuñas (IBD y IDC) los taludes mayores de 40 grados se consideran inapropiados desde el punto de vista cinemático, con un factor de seguridad bajo. También se observa como riesgo el sistema "D" para taludes mayores de 45 grados.

Esta familia fallaría a través de falla plana y se considera importante debido a que se asocia a la foliación de las pizarras esta estructura está bien desarrollada además de que es continua.

Esta puede ser una de las razones por que los taludes naturales de la margen derecha tanto de la Alternativa 1 como de la 2 sean de menor elevación e inclinación que los de la margen izquierda.

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

ESTABILIDAD DE LADERAS  
EJE 2 M.I.  
(pizarras)

Ladera:  
235/48

Familias  
A:045/90  
B:317/54  
C:140/40  
D:071/45  
E:211/50

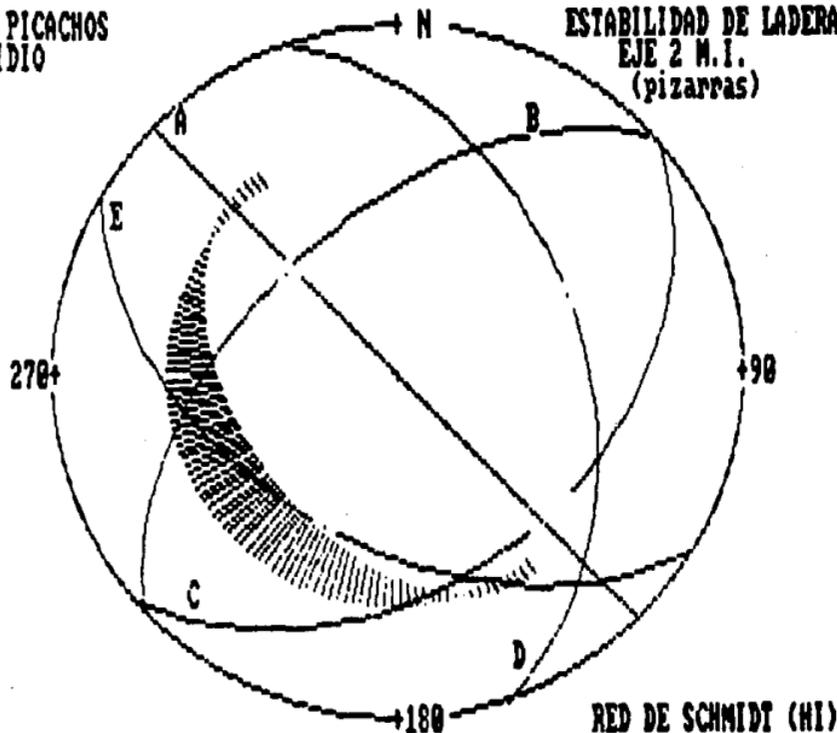


FIGURA: V.12

ESTABILIDAD DE LADERAS, MARGEN IZQUIERDA. EJE 2

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

Ladera:  
065/35

Familias  
A: 045/90  
B: 317/54  
C: 140/40  
D: 071/45  
E: 211/50

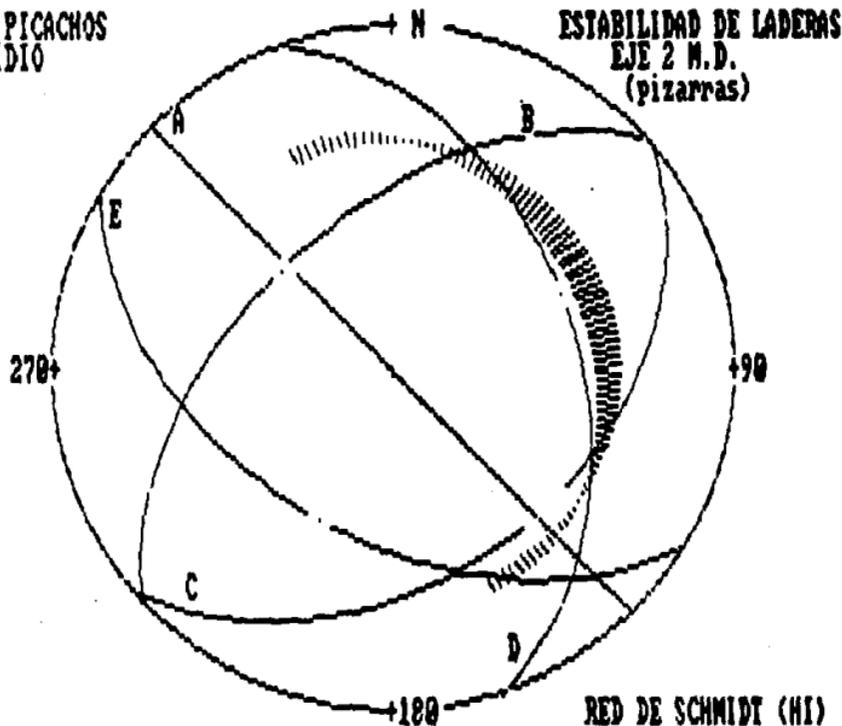


FIGURA: V.13

ESTABILIDAD DE LADERAS, MARGEN DERECHA. EJE 2

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

EJE 3

En esta alternativa se presentan características diferentes que en las anteriores, ya que sobre la margen derecha afloran pizarras, en tanto en la margen izquierda tobas además de que cambia considerablemente la dirección de sus taludes naturales con respecto a las demás alternativas.

Analizando el cono truncado para las tobas (Figura V.9), las orientaciones más desfavorables para los cortes serían aquellas que se inclinan hacia las direcciones NNW, NEE y SW las cuales corresponden a una zona muy amplia, bajo la cual, existe riesgo de inestabilidad, con ángulo máximo de seguridad cinemática de 33 a 47 grados. En tanto en la dirección SSW, a partir de los 160 grados y hasta los 255 grados, los valores máximos de seguridad cinemática son de 55 grados.

Las zonas complementarias, es decir entre 105 y 160 grados y 255 y 300 grados, son los más estables, con ángulos máximos cinemáticos de 41 y 81 grados. Esto significa que las tobas en este caso pueden soportar taludes más empinados que las pizarras en esa dirección.

En la margen izquierda del Eje 3, (Figura V.14) se observan las cuñas (IFJ) y (IFH), como las más inapropiadas. Además, la Familia "F" se presenta como un sistema que puede fallar como plana con superficie libre a través de las familias "J" y "H". En esta margen hay evidencia en campo de muchos caídos y de derrumbes. El talud natural en esta margen es del orden de los 50 grados, el cual no es muy congruente con el ángulo máximo de seguridad calculado, de 34 grados, (Figura V.9) debido a que existe una desviación de cerca de 16 grados.

La margen derecha formada por la unidad de rocas metamórficas presenta el talud de menor desnivel y pendiente. Como puede observarse en el diagrama estereográfico (Figura V.15), la dirección del talud con respecto a la orientación de las discontinuidades es el más desfavorable de todos. En este caso, hay una conjugación de la mayoría de las discontinuidades a excepción de la familia "A". Los sistemas más desfavorables corresponden a las cuñas IDC y ICE pero principalmente C que debe actuar como falla plana. La familia B actúa como superficie libre en la porción posterior de los bloques.

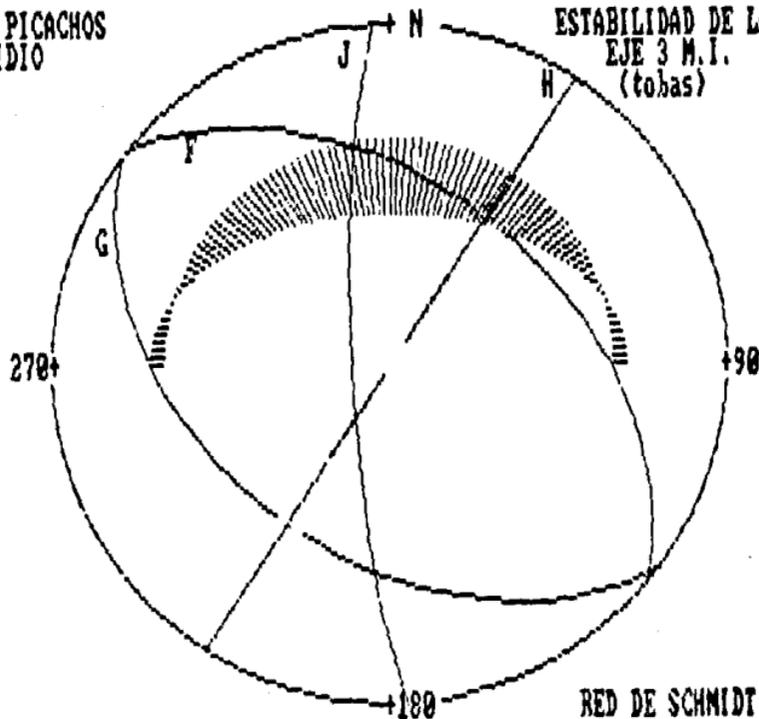
Posiblemente, esta margen sea la más afectada por las discontinuidades y por esta razón sea la de menor altura y pendiente. Los cortes que se realizaran paralelos al talud no podrían tener pendientes fuertes a menos que fueran tratados.

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

ESTABILIDAD DE LADERAS  
EJE 3 M.I.  
(tobas)

Ladera:  
000/50

DN



Familias  
F:040/47  
G:217/44  
H:123/90  
J:267/81

FIGURA: V.14

ESTABILIDAD DE LADERAS, MARGEN IZQUIERDA. EJE 3

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

Ladera:  
176/31

Familias  
A:045/90  
B:317/54  
C:140/40  
D:071/45  
E:211/50

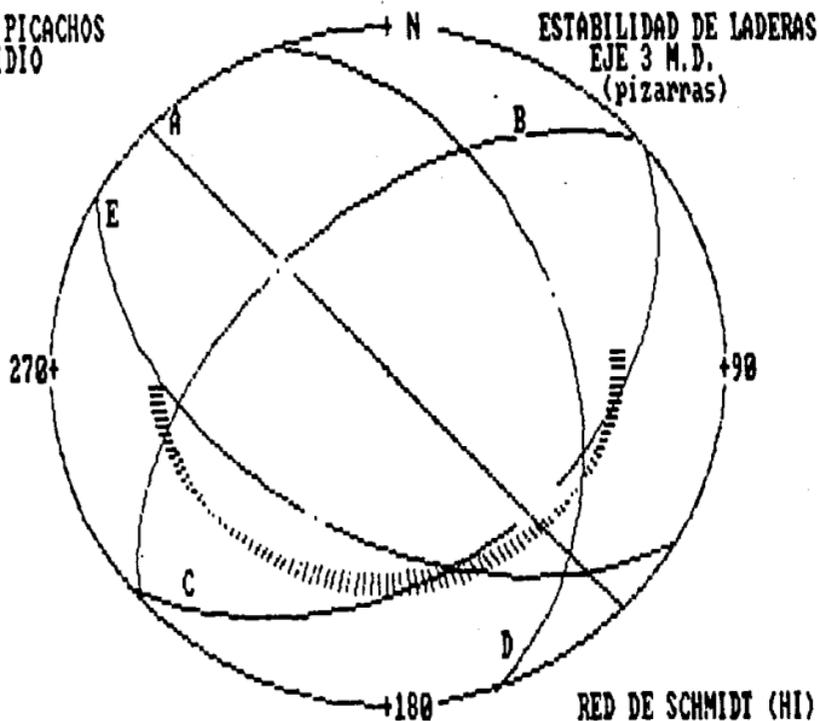


FIGURA: V.19

ESTABILIDAD DE LADERAS, MARGEN DERECHA. EJE 3

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

El análisis cinemático alrededor de los 360 grados para las tobas en el Eje 4 es el mismo que se realizó para el Eje 3 en la margen izquierda, debido a que se trata de la misma unidad litológica y el comportamiento estructural respecto de las discontinuidades también es el mismo. Por lo tanto, las zonas más estables en base al análisis del cono truncado son (Figura V.9) entre 110 y 160 y 255 y 300 grados, con valores máximo de seguridad de 45 a 81 grados.

Para la margen izquierda (Figura V.16) se considera que sólo la Familia "G" asociado a un mecanismo de falla plana puede afectar al talud, además que la Familia "H" pueda influir en inestabilidad por volteo. Esta margen presenta una pendiente también no muy fuerte del orden de los 36 grados por lo que se cree sea estable, a menos de que se excaven cortes paralelos de mayor inclinación.

Para la margen, derecha al analizar la Figura V.9, se observa que el problema principal es la inestabilidad por volteo. Sin embargo, aunque existen las Familias "J" y H que corresponden a los sistemas de inestabilidad que indica la Figura V.9, éstas tienen un espaciamiento muy amplio por lo cual no deben influir considerablemente.

Esta margen es la que presenta un desnivel mayor, además de ser la que tiene un talud más fuerte (en algunos sitios hasta de 90 grados).

En efecto, al analizar el diagrama estereográfico (Figura V.17) aparecen las familias de discontinuidad "J" y "H" que podrían afectar al talud en forma de falla por volteo pero como ya se ha mencionado estos sistemas tienen una separación amplia por lo que no deben afectar sustancialmente sin embargo se han observado algunas discontinuidades del sistema "J" por lo que puede existir percolación de agua a través de estas fracturas. La familia de discontinuidades más riesgosa y que afectaría a este talud sería a través de la familia "F" como falla plana esta familia presenta un espaciamiento amplio por lo que se cree, no está bien desarrollado.

Como resumen, en la tabla V.4 se presentan las direcciones de los deslizamientos de las cuñas, así como la inclinación de las intersecciones.

También se observan en esta tabla, los sistemas de fracturamiento que forman dichas cuñas, el eje al que pertenecen y la margen donde se localizan.

Podemos notar que las cuñas más impropiedades se localizan en los ejes 1 y 2 y margen izquierda del 3, debido a las características que presentan los sistemas de fracturamiento en la unidad de pizarras sin embargo para la unidad de tobos el deslizamiento por cuñas es menos probable debido a que la familia "J" es secundaria y poco significativa, y para la familia "G" el fallamiento es mas bien de tipo plano.

BOQUILLA PICACHOS  
RIO PRESIDIO

Ladera:  
280/36

Familias  
F:040/47  
G:217/44  
H:123/90  
J:267/31

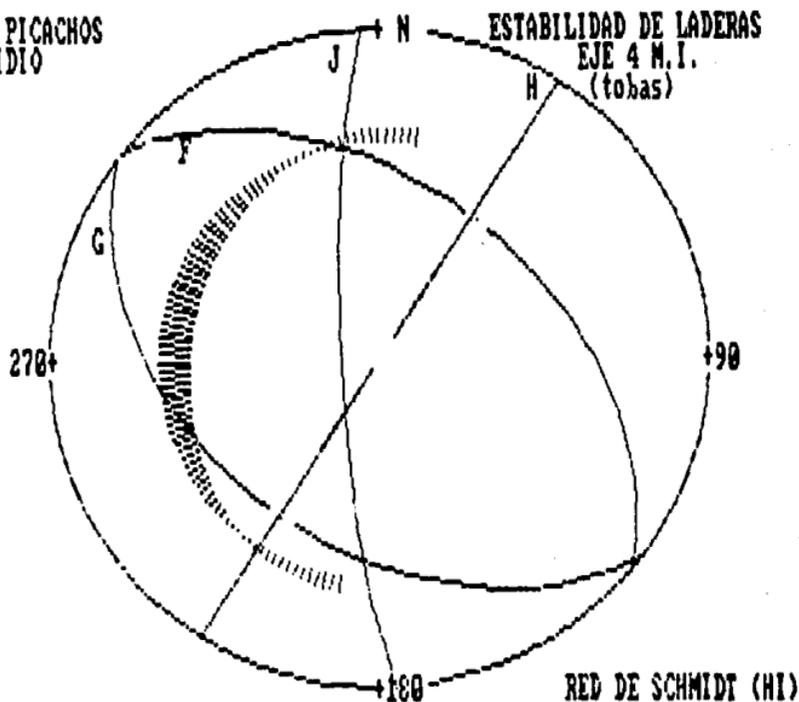


FIGURA: V.16

ESTABILIDAD DE LADERAS, MARGEN IZQUIERDA. EJE 4

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

BOQUILLA PICACHOS  
RÍO PRESIDIO

Ladera:  
082/64

Familias  
F: 040/47  
G: 217/44  
H: 123/90  
J: 267/81

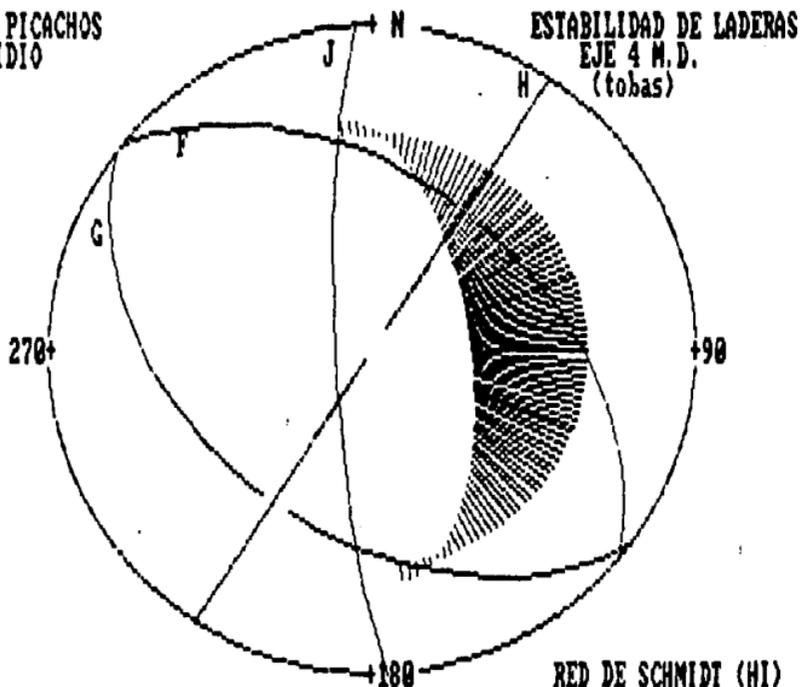


FIGURA: V.17

ESTABILIDAD DE LADERAS, MARGEN DERECHA. EJE 4

Tesis Profesional  
Ibarra, 1990

TABLA V.4

P I Z A R R A S

CURA	SISTEMA	INCLINACION DE LA INTERSECCION	DIRECCION DE DESPLAZAMIENTO	EJE	MARGEN	LADERA (GRADOS)
IAB	A:045/90 B:317/54	55 GRADOS	315 GRADOS	1	M.I	42
IBE	B:317/54 E:211/50	38 GRADOS	261 GRADOS	1 2	M.I M.I	42 43
IBD	B:317/54 D:071/45	33 GRADOS	020 GRADOS	2	M.D	30
ICD	C:140/40 D:071/45	37 GRADOS	113 GRADOS	1 2	M.D M.D	30 35
ICA	A:140/40 B:045/90	40 GRADOS	135 GRADOS			
ICE	C:140/40 E:211/50	38 GRADOS	161 GRADOS	3	M.D	31

T O B A S

CURA	SISTEMA	INCLINACION DE LA INTERSECCION	DIRECCION DE DESPLAZAMIENTO	EJE	MARGEN	LADERA (GRADOS)
IFJ	F:040/47 J:267/81	34 GRADOS	351 GRADOS	3	M.I	50
IHF	H:123/90 F:040/47	47 GRADOS	33 GRADOS	4	M.D	64
IGH	G:217/44 H:123/90	44 GRADOS	213 GRADOS	4	M.I	36

## V.3 ANALISIS DE EQUILIBRIO LIMITE

### V.3.1 INTRODUCCION

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se clasifican en varios grupos.

El método de equilibrio límite que se utilizó en este subcapítulo, corresponde a uno de los métodos propuestos por Hoek y Bray, el cual se basa exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable.

Los métodos de equilibrio límite son mucho más utilizados que los métodos de cálculo en deformaciones, debido a que estos últimos resultan ser más largos y costosos en su ejecución.

Los métodos de equilibrio límite son ampliamente utilizados en la práctica, pero deberán conocerse las propiedades de los materiales además de las limitaciones que este método presenta.

Generalmente en los métodos de equilibrio límite, la seguridad de un talud se cuantifica por medio del factor (o coeficiente) de seguridad FS, que está definido como el cociente entre la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento y la necesaria para mantener el equilibrio de la masa deslizante.

Las deficiencias que podemos obtener al aplicar el método de equilibrio límite son básicamente las siguientes:

- a) Se determina la tensión en la superficie de corte sin considerar para nada las características deformacionales del suelo (el desarrollo de la resistencia al corte requiere una deformación).
- b) Se hace la hipótesis de que el factor de seguridad (FS) es el mismo en todos los puntos de la línea de rotura.

### V.3.2 OBRAS AUXILIARES

En el análisis realizado para las obras auxiliares, se propuso que tanto el vertedor de demasías, como el tunel de desvío se situaran sobre la margen izquierda del Eje 4 (plano 2), debido a las condiciones estructurales y morfológicas que presenta (Geoproyectos S.A.).

#### Vertedor

Tomando en cuenta la topografía del Eje 4 y el curso del río, el cual cambia su dirección de flujo de E-W a N-S aguas arriba de este Eje, se consideró como idónea para la localización del vertedor de demasías la margen izquierda (ver plano 2). El trazo se dividió en 3 tramos con las siguientes direcciones:

EJE	MARGEN	ORIENTACION (GRADOS)	TALUD (GRADOS)
4	M.I.	TRAMO 1 NW 63 TRAMO 2 NW 42 TRAMO 3 NW 18	63

(Geoproyectos S.A.).

Siguiendo la dirección del trazo, la obra se desplantaría en su primer tramo sobre la unidad Tia-1, que consiste en una toba vitrea riolítica de color café rojizo pseudoestratificada, y para los tramos 2 y 3 sobre la unidad Tia-2, a la que le corresponden tobas liticas arenosas de composición riolítica.

Uno de los rasgos estructurales más importantes en esta zona es la falla F4, la cual se presenta a lo largo del trazo del vertedor de demasías.

#### Túnel de desvío

El túnel de desvío se localiza en la margen izquierda del Río Presidio. Este sitio presenta las condiciones adecuadas para una obra de este tipo, tomando en cuenta la dirección del río y la topografía principalmente.

El trazo del tunel propuesto, alcanza una longitud de 320 m. dividido en tres tramos. Sin embargo, al realizar el presente trabajo, se están considerando como importantes los tramos 1 y 3, que corresponden a los portales de entrada y salida del tunel de desvío, los cuales son objeto del estudio en el análisis de equilibrio límite.

El área del portal de entrada comprende la unidad Tia-i, correspondiente a una toba vitrea riolítica, de color café rojizo, la cual contiene abundante contenido de vetillas de sílice, que hacen que la roca sea más resistente.

El tramo 3, en el cual se encuentra el portal de salida, le corresponden rocas de la unidad Tia-3, la cual consiste de tobas vitreas riolíticas de color gris pardo y estructura masiva.

Antes de comenzar el análisis, fue necesario conocer la estabilidad cinemática para la excavación subterránea del túnel de desvío.

Se utilizó el patrón estructural que se levantó en la Alternativa 4, donde es posible determinar cuatro sistemas o familias de discontinuidades de fracturas, que son las siguientes:

FAMILIA	ORIENTACION
F	040/47
G	217/44
H	123/90
J	267/B1

La combinación de al menos tres planos de estos sistemas de fracturas y una cara libre (la bóveda o una pared del túnel), nos formará una cuña en la excavación subterránea.

Conociendo la orientación de las familias de discontinuidades se pudo anticipar y conocer la combinación de cuñas formadas por los sistemas F, G, H, y J.

Las dimensiones y pesos máximos de las cuñas, están regidas por los claros de la excavación que se postulan, el espaciamiento y la persistencia de las fracturas.

Al estudiar la formación de cuñas en los portales de entrada y salida, se empleó la proyección estereográfica que se muestra en las Figuras V.18 y V.19. Donde podemos observar que las familias de discontinuidades básicas para la formación de cuñas son las F y G, mientras que las secundarias son H y J.

PICACHOS  
RIO PRESIDIO

Familias:  
F: 040/47  
G: 217/44  
H: 123/90  
J: 267/81

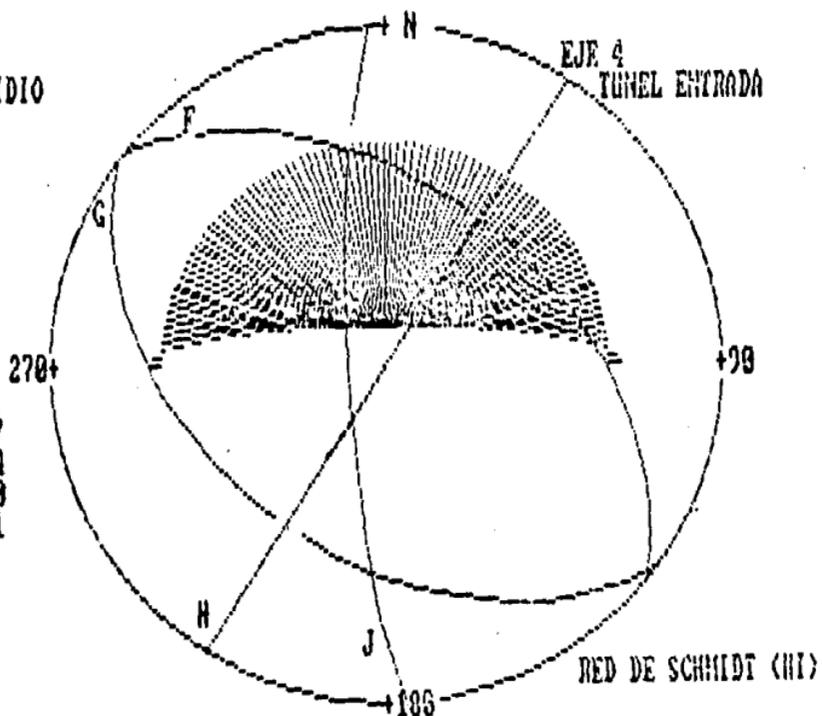


Figura V.1B Orientación del portal de entrada.

PICACHOS  
RÍO PRESIDIO

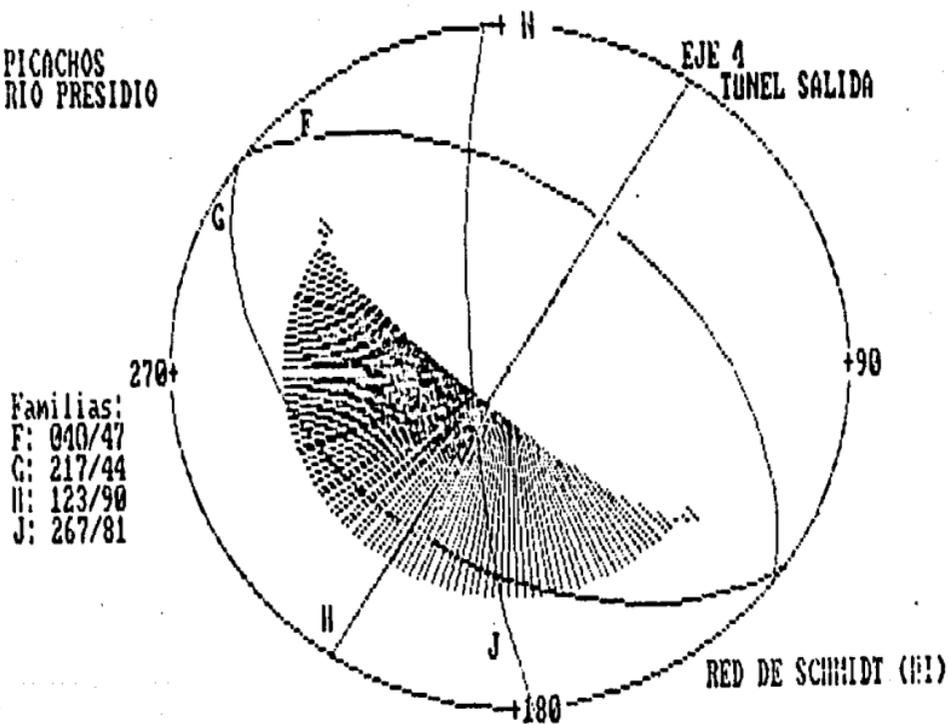


Figura V.19 Orientación del portal de salida.

### V.3.3 ANALISIS DE EQUILIBRIO LIMITE PARA LOS PORTALES DE ENTRADA Y SALIDA DEL TUNEL DE DESVIO, EJE 4, MARGEN IZQUIERDA

Se efectuó un análisis de equilibrio límite para los portales de entrada y salida del túnel de desvío, en el cual se determinó la problemática existente para cada uno de ellos y, mediante este análisis (equilibrio límite) definir las fuerzas resistentes contra las fuerzas actuantes, y tener un factor de seguridad (FS) determinado.

El presente estudio se realizó, por medio de un método gráfico a través de proyecciones esféricas, y se complementó con álgebra vectorial.

En las Figuras V.18 y V.19 se presentan las orientaciones de los portales en diagramas estereográficos, así como las familias de discontinuidades que las afectan.

Durante el estudio se consideraron las siguientes suposiciones:

- 1.- En el caso de fallamiento por cuña, los planos de discontinuidades permanecieron en contacto durante el deslizamiento.
- 2.- Los deslizamientos se consideraron irrotacionales, es decir, sin que los momentos intervinieran.
- 3.- La resistencia al esfuerzo cortante se consideró lineal.

$T$  = Esfuerzo cortante

$$T = C + t \tan O$$

$C$  = Cohesión

$t$  = Esfuerzo normal

$O$  = Angulo de fricción

- 4.- El deslizamiento es cinemáticamente posible, debido a que la intersección de los planos de discontinuidades tienen salida hacia el talud.

## ANALISIS DEL PORTAL DE ENTRADA

El portal de entrada del túnel de desvío tiene una orientación hacia el norte (0 grados), con un buzamiento de 70 grados las familias de discontinuidades que afectan de manera desfavorable al portal corresponden a "F" y "J", las cuales forman una cuña dirección de deslizamiento es de 351 grados con 35 grados de inclinación hacia el frente del portal. Existe también la posibilidad de manera secundaria de otra falla por cuña formada por las familias "F" y "H", sin embargo la familia "H" tiene una inclinación de 90 grados (vertical), por lo que es más posible que falle por volteo.

Tomando en cuenta lo anterior, se realizó el análisis de equilibrio límite para la cuña más desfavorable, tanto por su posición como por sus dimensiones, en este caso particular del portal de entrada fué la cuña I(FJ).

Durante el análisis se determinó, primero la cuña de mayor dimensión probable a deslizar, posteriormente se calculó su peso, así como su dirección de deslizamiento (Fig V.20). por otro lado se obtubieron parámetros tales como: la subpresión de agua subterránea que se desarrollaría, y se estimó una fuerza dinámica externa, a consecuencia de los efectos causados por la posible sismicidad y/o voladuras durante la excavación, este valor se consideró de  $c = 0.2 g$ .

Por otro lado aunque no se tuvo valores del ángulo de fricción, éste se estimó de 30 grados, que es un valor dentro de los rangos que presentan estas rocas y que aún es conservador.

La Tabla V.5 presenta las orientaciones y propiedades utilizadas para este portal.

TABLA V.5

FAMILIA DE DISCONTINUIDADES	RUMBO (grados)	DIRECCION DE ECHADO (grados)	ECHADO (grados)	PROPIEDADES
F	310	040	47	OF=30 GRADOS
J	357	267	81	OJ=30 GRADOS
				DENSIDAD=2.21gr/cm3
TALUD	90	0	70	CF=100 Kg/m2
				CJ=100 Kg/m2
				c=0.2 g.

OF = Angulo de fricción de la familia "F"

CJ = Angulo de fricción de la familia "J"

c = Coeficiente sísmico y/o de voladuras

Análisis de equilibrio Límite del proyecto Picachos,  
 Río Presidio - Túnel de desvío, Portal de Entrada.

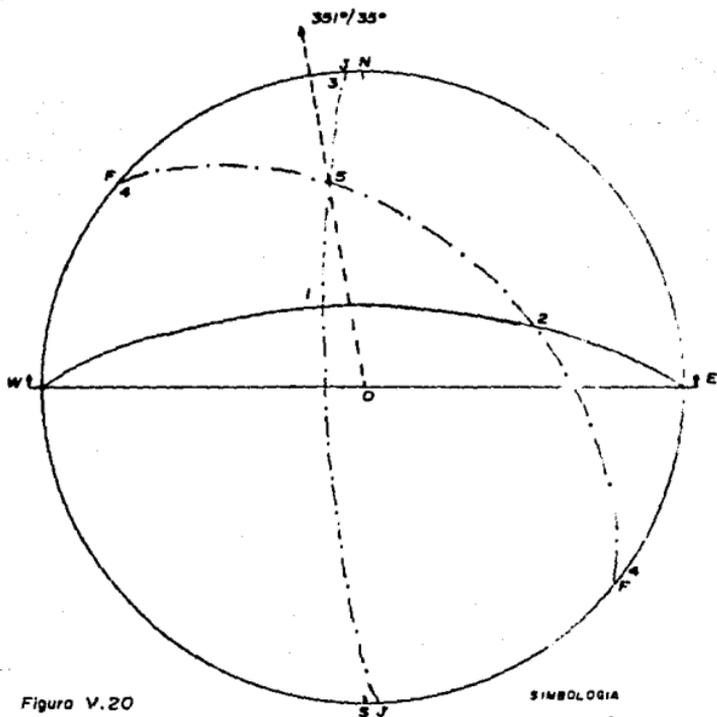


Figura V.20

FAMILIA Y PARED	ORIENTACION		
	Acumdo	Dir. de Echeo	Echeo
F	310°	040°	47°
J	357°	267°	81°
Portal	90°	0°	70°

SIMBOLOGIA

- Sección Tarda
- Familia de Discontinuidades
- Orientación de Sección Tarda
- 5 Vértice de Corte

Para tener un conocimiento general del factor de seguridad (FS), el análisis se efectuó igualando a cero la cohesión de los planos de discontinuidades, la subpresión provocada por el agua y la fuerza dinámica a consecuencia de la sismicidad y/o voladuras, con lo cual el problema se simplificó.

Para este caso el factor de seguridad (FS) se obtuvo de la ecuación:

$$FS = A \tan OF + B \tan OJ \quad (\text{según Hoek y Bray, 1974})$$

donde: A y B = fuerzas que actúan sobre los planos de deslizamiento

$$OF = 30 \text{ grados}$$

$$OJ = 30 \text{ grados}$$

y substituyendo valores se obtuvo un FS = 1.21 en estado seco.

Un factor de seguridad de 1.21, para un tipo de obra permanente como lo es el de una presa, resulta ser muy bajo, y por otro lado al agregársele los parámetros de presión de agua debido a que parte de esta zona quedaría inundada, y el coeficiente sísmico, el factor de seguridad FS, se reduce considerablemente, por lo cual se está calculando una fuerza de soporte la cual aumenta el factor de seguridad FS mayor a 1.8, que es un factor de seguridad óptimo para este tipo de obras permanentes.

Una vez conociendo las magnitudes y orientaciones de estas fuerzas y superficies cuyo desarrollo se encuentra en el Anexo I, se definió la fuerza y la presión de soporte necesaria, así como la zona estable e inestable (Figura V.21).

$$\sigma = \frac{T}{A}$$

donde:

T = 6,800 Ton.-----Fuerza de soporte

A = 376.74 m<sup>2</sup> -----Superficie donde actúa

$\sigma$  = 6.58 Ton/m<sup>2</sup>-----Presión de soporte

De acuerdo a los valores anteriormente obtenidos, se procedió al cálculo de la longitud de separación entre cada una de las anclas considerando su diámetro, y el límite de fluencia del acero del cual están constituidas dichas anclas.

La presión de soporte (  $\sigma$  ) fué de 6.58 Ton/m<sup>2</sup>, y el área de la sección transversal de la varilla o ancla , cuyo diámetro es de 1.5", fué de A = 11.40 cm<sup>2</sup>, que multiplicada por el límite de fluencia del acero (Fy = 4.2 Ton/cm<sup>2</sup>), origina un valor fuerza de soporte de cada ancla de 47.88 toneladas.



Sin embargo se está considerando que cada ancla tiene una eficiencia del 75%, por lo que la fuerza de soporte real es de 35.91 toneladas, que al ser dividido entre la presión de soporte, tenemos como resultado el área de soporte en torno al ancla.

$$\frac{35.91 \text{ Ton.}}{X \text{ m}^2} = \frac{6.58 \text{ Ton.}}{1 \text{ m}^2}$$

de donde:

$$X = 5.46 \text{ m}^2$$

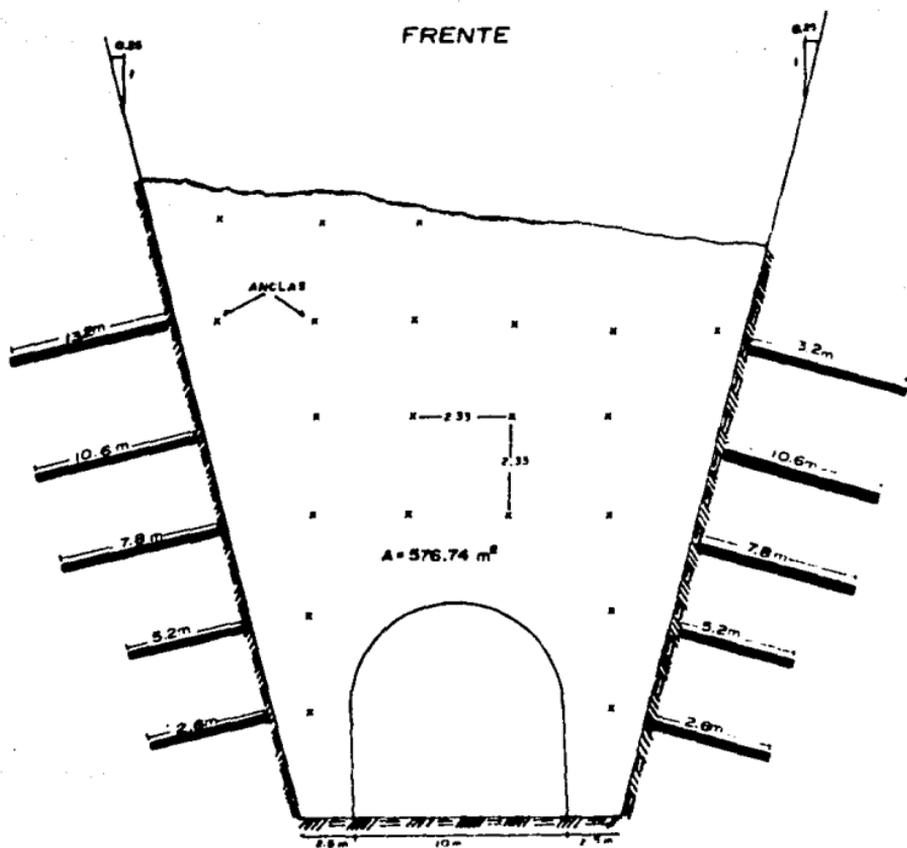
Para este caso particular, la separación entre cada una de las anclas es la raíz cuadrada de X, por lo tanto esta longitud es de 2.34 m., mismas que serán distribuidas en toda la zona de anclaje del frente del portal (Figura V.22).

Por otro lado, se consideró pertinente el empleo de anclas de fricción, ya que este tipo de anclaje puede tener contacto con la roca a todo lo largo del barreno en que se instalan, por ejemplo se conocen anclas en las cuales, la varilla que las forma, queda embebida en mortero de cemento, otras en que el elemento de relleno es una lechada de cemento portland, y recientemente un elemento cementante que se ha elaborado a base de resinas.

Se recomienda que el elemento de relleno sea una lechada de cemento, lo cual permitirá diseñar un patrón de anclaje seguro y suficientemente económico.

El diámetro de la varilla que se recomienda utilizar es de 1 1/2" (una pulgada y media), dada la fuerza de soporte. Esto aunado a que este diámetro de varilla es el más comercial.

La dirección de inclinación de las anclas es de 171 grados, y su inclinación es de 30 grados ascendentes con respecto a la horizontal. En cuanto a la longitud, esta varía gradualmente con respecto a la altura, teniendo una longitud de 2.6 m. la primera hilera (primer nivel) de anclas y de hasta 10.6 m. a la altura media del portal (ver figura V.25, anexo I).



V.22 DISTRIBUCION DE ANCLAS EN EL PORTAL DE ENTRADA

## ANALISIS DEL PORTAL DE SALIDA

El portal de salida del túnel de desvío, tiene una dirección de inclinación de 219 grados con una pendiente de 70 grados la familia de discontinuidades que afecta más desfavorablemente al portal corresponde a "G", la cual forma el bloque más grande y desliza como falla plana. La dirección de deslizamiento es de 216 grados con 44 grados de inclinación hacia el frente del portal.

La Figura V.23 muestra la relación que presenta el talud con la familia.

La Tabla V.6 presenta las orientaciones y propiedades utilizadas para este portal.

TABLA V.6

FAMILIA DE DISCONTINUIDADES	RUMBO (grados)	DIRECCION DE ECHADO	ECHADO (grados)	PROPIEDADES (grados)
G	127	217	44	OG=30 GRADOS DENS.=2.21gr/cm3
TALUD	129	219	70	C=0 c=0.2 g

OG=Angulo de fricción de la familia "G"  
C=Coeficiente de fricción  
c=Coeficiente siemico y/o de voladuras

El análisis se efectuó, considerando la superficie de deslizamiento en estado seco, es decir sin considerar presión de agua.

Para este caso el factor de seguridad (FS), se obtuvo en base a la ecuación:

$$FS = \frac{C(A)}{W \sin Y_p} + \cot O \cdot \tan O \text{ (según Hoek y Bray, 1974)}$$

Donde:

C= Cohesión en la superficie

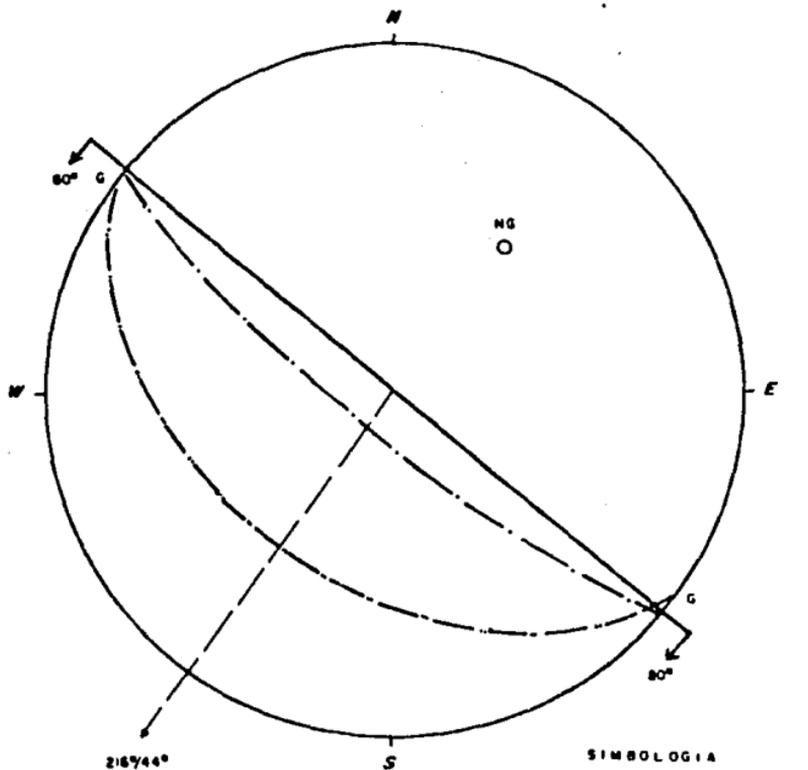
W= Peso del bloque deslizante

Yp= Angulo del plano potencial de deslizamiento

O= Angulo de fricción estimado

A= Factor de elevación y altura de fractura de tensión

**ANALISIS DE EQUILIBRIO LIMITE - PROYECTO  
PICACHOS, RIO PRESIDIO -EJE 4 M. I. TUNEL  
DE DESVIO, PORTAL DE SALIDA**



FAMILIA Y PARED	ORIENTACION		
	RUMBO	DIRECCION DE ECHADO	ECHADO
G	127°	217°	44°
Portal	129°	219°	70°

**SIMBOLOGIA**

- SECCION TALUD
- FAMILIA DE DISCONTINUIDAD
- NG POLO DE FAMILIA DE DISCONTINUIDAD
- ORIENTACION DE SALIDA DE BLOQUE

**FIGURA V.23**

Pero si estamos considerando la cohesión (C) igual a cero, la condición de equilibrio limite se simplifica.

$$F_s = \text{Cot } Y_p \cdot \tan O$$

entonces, el factor de seguridad  $F_s = 0.597$  es menor que 1, y por lo tanto se requiere soporte.

También se obtuvo el factor de seguridad ( $F_s$ ) cuando se tiene la presencia de agua en una fractura de tensión, que afecta al talud que desliza. El factor de seguridad ( $F_s$ ) se obtuvo por medio de la ecuación:

$$F_s = \frac{(C) (A) + (W \cos Y_p - U - V \sin Y_p) \tan O}{W \sin Y_p + V \cos Y_p}$$

(según Hoek y Bray, 1974).

donde:

C = Cohesión en la superficie

A = Factor de elevación y altura de fractura de tensión

W = Peso del bloque

V = Fuerza horizontal del agua

U = Fuerza de subpresión sobre la superficie de deslizamiento

$Y_p$  = Angulo del plano potencial de deslizamiento

O = Angulo de fricción

Considerando la cohesión igual a cero, a partir de este análisis se obtuvo un factor de seguridad  $F_s = 0.369$ , (más bajo que el anterior) por lo tanto también indica que se trata de un bloque inestable y necesitará tratamiento.

Una vez conociendo las magnitudes y orientaciones de las fuerzas que tienden a provocar el deslizamiento así como las que se oponen al mismo, se pudo definir la fuerza y la presión de soporte necesaria para la estabilidad del bloque, para un factor de seguridad mayor a 1.8, utilizando en este caso un análisis gráfico de estabilidad (ver Anexo II).

$$T = \frac{T}{A}$$

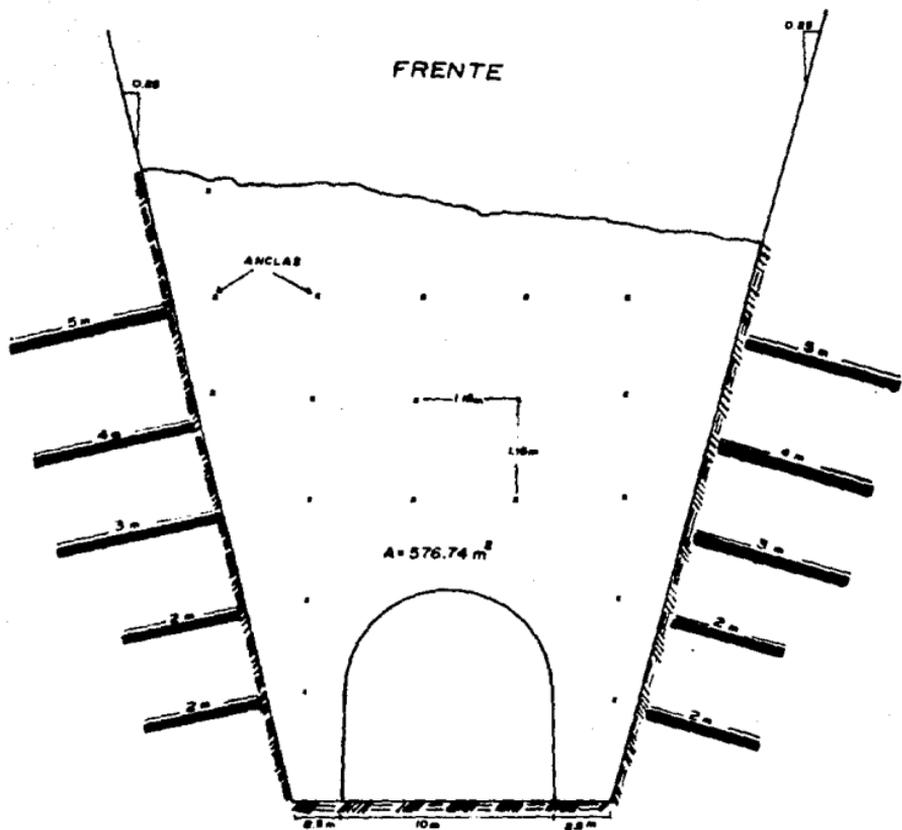
donde:

T = 15,300 ton. ----- Fuerza de soporte

A = 576,74 m<sup>2</sup> ----- Superficie donde actúa

$$T = 26.52 \frac{\text{ton.}}{\text{m}^2} \text{ ----- Presión de soporte}$$

De igual forma que en el caso del portal de entrada, se calculó el área de soporte en torno a cada ancla y ésta fué de 1.35 m<sup>2</sup>, por lo tanto la separación entre cada una de las anclas fué de 1.16 m como se muestra en la Figura V.24.



V.24 DISTRIBUCION DE ANCLAS EN EL PORTAL DE SALIDA

El ángulo de inclinación que debe tener el patrón de anclaje, fue medido a partir de la normal a la superficie de deslizamiento, y para poder obtener un factor de seguridad mayor a 1.8, este ángulo tiene que medir  $\theta=25$  grados es decir 21 grados ascendentes con respecto a la horizontal.

La dirección de inclinación de las anclas será el opuesto a la dirección del deslizamiento del bloque y esta es de 39 grados.

Por otro lado notamos que la longitud de las anclas se va incrementando gradualmente de abajo hacia arriba, teniendo una longitud de sólo 1.0 m., la hilera más baja del portal, llegando a tener hasta 10.0 m. a la altura media del portal (ver figura V.26, anexo II).

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### VI.1 CONCLUSIONES

La estructura geológica en el Cañón de Picachos, está constituida por cuatro unidades de roca; la más antigua, que forma el basamento de la región, corresponde a rocas metamórficas (Pp) del Paleozoico, que se encuentran intrusionadas por un cuerpo ácido (Ia) del Cretácico Terciario; a su vez, estas dos unidades se encuentran cubiertas en forma discordante por rocas vulcanosedimentarias (Tia) y volcánicas (Tiv) del Terciario.

Toda la secuencia anterior se ve cubierta por aluviones y acarreos fluviales recientes (Dac).

En el área de estudio, en un radio de 100km., no se han reportado evidencias de fallas tectónicas activas, por lo que el área se considera estable.

Para llevar a cabo el proyecto Picachos se han estudiado a detalle cuatro alternativas, las cuales se han denominado de aguas arriba hacia aguas abajo como ejes 2, 1, 3, y 4. Las alternativas 1, 2 y margen derecha de la 3 se ubican dentro de la unidad metamórfica, mientras que en la margen izquierda de la 3 y ambas de la 4, la obra se desplantaría sobre las unidades volcánicas. En el eje 4, se encuentran las unidades más jóvenes correspondientes a las tobas de la secuencia ignimbrítica superior.

La región está afectada por un conjunto de fallas de transcurrancia de tipo izquierdo asociadas a una fase de deformación relacionada con la apertura del Golfo de California.

Asimismo existen fallas normales y fracturas asociadas a la Orogenia Larámide.

Localmente la mayor discontinuidad, por su longitud y cercanía a alguna de las boquillas, es una falla que pone en contacto a pizarras y tobas entre los Ejes 3 y 4, además existen algunas fallas y fracturas cercanas al Eje 4, las cuales no presentan evidencias de haber sido reactivadas.

Las pizarras presentan cinco sistemas de discontinuidades, de las cuales una de las principales corresponde a la foliación. Los sistemas de discontinuidades de estas rocas son los siguientes:

FAMILIA	ORIENTACION (EN GRADOS) *
A	045/90
B	317/54
C	140/40
D	071/45
E	211/50

\* Rumbo de echado y echado.

La pizarra se considera de muy buena calidad como roca intacta, sin embargo como macizo rocoso se caracterizó de mala a muy mala calidad (Tabla V), ya que se encuentra afectada por los cinco sistemas de discontinuidades citados anteriormente, persistiendo las familias A y B y la foliación muy bien desarrollada (familia C).

Presenta valores de densidad que no contrastan entre muestra secas y saturadas, lo cual nos indica una porosidad despreciable.

Su resistencia es alta y tiene un módulo de elasticidad relativo alto (estático) a muy alto (dinámico).

Estas rocas se encuentran demasiado alteradas en toda la zona del cañón, alcanzando un espesor de intemperismo o zona de limpia y decompresión ó zona de tratamiento de entre 20 y 30m.

Todas y cada una de las características mencionadas sobre estas rocas, son similares en toda la zona del cañón, considerando que estas afloran en los ejes 1, 2 y margen derecha del 3.

Las tobas están afectadas por cuatro sistemas de discontinuidades, una que corresponde a la seudoestratificación bien desarrollada y tres más consideradas como familias de discontinuidades persistentes dentro de esta unidad.

Los sistemas de discontinuidades para la unidad de tobas son los siguientes:

FAMILIA	ORIENTACION (EN GRADOS) *
F	040/47
G	217/44
H	123/90
J	267/81

\* Rumbo de echado y echado.

Como roca intacta presenta valores bajos de densidad en seco (entre 2.03 y 2.32 g/cm<sup>3</sup>) que contrastan con las densidades para muestras saturadas (entre 2.26 y 2.4) g/cm<sup>3</sup>, lo cual implica una porosidad efectiva. Cabe hacer notar que la unidad de tobas como macizo rocoso se caracterizó de regular a buena calidad (Tabla IV.6).

Las resistencias que se obtuvieron fueron de bajas a medias con módulos de elasticidad relativos medios a altos, lo cual implica una roca fracturada y deformable, por otro lado, los espesores de roca alterada y decomprimida fueron reducidos de menos de 2m.

En general las rocas de esta unidad (tobas), son de mucho mejor calidad que las correspondientes a la unidad metamórfica (pizarras).

Del análisis de estabilidad de los taludes en las Alternativas 1 y 2 se obtuvieron características similares, debido a que la cortina para ambos ejes se desplantaria sobre la misma unidad litológica, pizarras fracturadas.

La orientación más desfavorable para los cortes en las pizarras serán aquellas que se inclinan hacia las direcciones 0 a 60, 105 a 180 y 240 a 285 grados respectivamente donde básicamente se forman cuñas entre 30 y 40 grados de inclinación.

En general se estableció que estas dos Alternativas presentan pocos problemas de inestabilidad potencial en las laderas, aunque cabe hacer notar que en general las rocas metamórficas que afloran en esta zona, no soportan cortes con taludes altos, ni con pendientes, fuertes.

Tanto la Alternativa 1 como la 2 se han descartado básicamente debido a los fuertes espesores de limpieza y de impermeabilización que alcanzan hasta los 28 metros.

La Alternativa número 3 presenta pocas posibilidades, aunque se consideró en mejores condiciones que las alternativas anteriores (1 y 2); la cortina se desplantará sobre dos unidades litológicas ya descritas anteriormente (metamórficas y volcánicas), que tienen un comportamiento geomecánico diferente; las rocas metamórficas (pizarras) en la margen derecha y las volcánicas (tobas) en la margen izquierda. Esto implica un tratamiento diferente para cada margen, dadas las características de cada una de estas unidades. La longitud de la corona es la más larga, con 595m. El material de limpia comprende suelos, acarreos y terrazas, así como roca muy fracturada y alterada, su espesor máximo se encuentra al nivel del cauce y es del orden de 17m; el espesor de tratamiento para impermeabilización solo se pudo definir en la margen derecha, siendo hasta de 14m.

La margen derecha no presenta mayores problemas de inestabilidad en laderas y cortes para taludes, sin embargo en la margen izquierda, se encuentran grandes bloques que han caído al cauce y los análisis de estabilidad potencial la señalan como la más problemática; como se observó en el subcapítulo de análisis cinemático.

En esta Alternativa se ha interpretado la presencia de una gran discontinuidad en la margen izquierda, se trata de una gran falla de tipo normal, cuya traza se ha cartografiado a nivel del cauce.

De esta forma, dados los siguientes problemas:

- a) Considerables espesores de limpia y tratamiento
- b) Problemas de inestabilidad en la margen izquierda
- c) Longitud de la corona
- d) Presencia de dos unidades litológicas de diferente comportamiento geotécnico
- e) Posición de la falla

Se concluye que existe otra Alternativa con mejores características para el desplante de la cortina.

Se consideró que la Alternativa 4 presenta las mejores condiciones de las cuatro estudiadas. La cortina se desplantará sobre la unidad de tobas, misma que fué separada en cuatro subunidades. La longitud de la corona es de 526m. y es la segunda más corta. Los materiales de limpia comprenden suelos, acarreos, terrazas y roca alterada y muy fracturada; al nivel del cauce presentan su mayor espesor siendo del orden de 23m. hasta la margen derecha y de sólo 5m para la margen izquierda.

Se opina que la zona de tratamiento para impermeabilización se reduce al cauce y donde se ubica la falla en la margen derecha.

La calidad de la roca se consideró como regular para las subunidades de la margen izquierda y de regular a buena para las subunidades de la derecha.

Las laderas de la margen izquierda se consideran estables al igual que los cortes para taludes; sin embargo en la margen derecha, aunque no presenta evidencias de deslizamientos ni bloques caídos, es posible que se presenten problemas de estabilidad para ciertas orientaciones en cortes para taludes.

La margen izquierda de la Alternativa 4 se clasificó como de Resistencia Baja a Media con Módulo Relativo Alto (Tabla IV.3 Clasificación de Deere y Miller), con RQD estimado de 82%, que se considera como buena (Tabla IV.4), caracterizada de acuerdo a la Tabla IV.5 como L3, 3F2, 3S1, 2A2. Según la clasificación de Barton (Tabla IV.6) tiene un índice Q de 9.11 que la define como de Regular Calidad; mientras que conforme a la clasificación de Bieniawski (Tabla IV.7) tiene un RMR de 54, que también la caracteriza como de Regular Calidad. Tomando en cuenta que para algunas zonas, el fracturamiento es fuerte, se considera que la calidad disminuye a mala exclusivamente para esas zonas que no son tan amplias.

La margen derecha de la Alternativa 4 se clasificó como de Resistencia Baja a Media, con Módulo Relativo Alto (clasificación de Deere y Miller), con RQD estimado entre 82 y 92% que es de buena calidad (Tabla IV.4), y se caracterizó de acuerdo al BGD como L1 F3 S3 A2. Según Barton tiene un índice Q entre 13.67 y 15.33, que la caracteriza de buena calidad.

El macizo rocoso para ambas márgenes, tiene baja permeabilidad primaria, aunque es posible que la permeabilidad secundaria debido a fallas y fracturas afecte considerablemente a dicho macizo, por lo que se requerirá de algún tratamiento.

Por todas las características antes mencionadas, y aún considerando la presencia de las dos fallas en esta alternativa, se concluye que esta es la que presenta las condiciones más adecuadas de las cuatro estudiadas.

Se elaboró un análisis de equilibrio límite para los portales de entrada y salida del túnel de desvío, en la margen izquierda del Eje 4.

El portal de entrada se encuentra afectado por una cuña formada por las familias F y J, la cual presenta un problema de inestabilidad poco considerable cuando la superficie de deslizamiento se encuentra en estado seco, esto se comprueba al obtener un  $F_s$  mayor que uno; sin embargo, al agregársele parámetros tales como presión de agua y coeficiente sísmico, el factor de seguridad ( $F_s$ ) disminuye considerablemente por lo que se recomienda el uso de anclaje.

El portal de salida es afectado desfavorablemente por un sistema de discontinuidades que pudieran ocasionar una falla de tipo plano, cuya dirección de salida es hacia el frente del talud, con una dirección de 216 grados y una inclinación de 44 grados.

## VI.2 RECOMENDACIONES

En base a los resultados de los estudios geológicos y de estabilidad de los taludes realizados en el Cañón Picachos, se recomienda construir la cortina en la Alternativa número 4, ya que esta presenta menores problemas que las otras alternativas en cuanto a estabilidad, y el macizo rocoso en ambas márgenes, se considera con características de regular a buena calidad.

Previo a lo anterior se recomienda realizar los siguientes estudios adicionales:

A) Un programa de exploración que contemple perforaciones con extracción de núcleos, los cuales deberán cubrir los objetivos siguientes:

- Obtener la columna estratigráfica completa, con muestras para pruebas de mecánica de rocas.
- Verificar zonas de anomalías (por ejemplo zonas de falla) y determinar el comportamiento del macizo rocoso a profundidad.
- Realizar pruebas "in situ" en los barrenos para determinar la permeabilidad del macizo rocoso.

B) Pruebas de laboratorio a los Núcleos de Roca.

De acuerdo a los resultados de pruebas de laboratorio, se podrá definir un factor de correlación que contemple la obtención de parámetros de cálculo de una manera directa como son: cohesión, módulos de elasticidad, resistencia, entre otros. La certeza que tengamos en los estudios de la estabilidad de los taludes dependerá considerablemente de estas pruebas de laboratorio, ya que nos permitirían afinar los resultados obtenidos en este trabajo.

## C) Socavones

Este programa de excavación de socavones, tendrá como objetivo, conocer en forma directa la calidad de la roca y las filtraciones en el macizo rocoso, así como también las características del fracturamiento de las rocas, tales como orientación, continuidad, apertura, espaciamiento, etc., e identificar a cual de las familias de toba pertenece, o en su defecto saber si se trata de una nueva familia. Estos socavones deben realizarse en cada una de las márgenes de la Alternativa.

## D) Localización de Bancos de Materiales

### a) Enrocamiento

De acuerdo a estudios previos existen dos bancos de enrocamiento (Delgado S. y Absalón M., 1989), sin embargo de estos dos bancos, sólo uno es el que se localiza cercano a la Alternativa 4, por lo tanto es necesario realizar un reconocimiento geológico aguas abajo de este eje, con el fin de encontrar otro posible banco que reúna las características de los ya localizados. Por otro lado se recomienda realizar perforaciones directas en cada uno de los bancos, para poder verificar los espesores de limpia y las posibles variaciones en la calidad de la roca.

### b) Materiales Granulares y Arcillosos

De igual forma que el inciso anterior, se realizó una exploración previa, efectuada en diferentes puntos sobre el cauce y zonas aledañas, y se estableció que tanto la composición litológica como la granulometría de los acarrees, no varían sustancialmente de un sitio a otro, por lo tanto estos acarrees pueden ser explotados.

Al igual que los acarrees, también fueron localizados los bancos de material arcilloso, esto en el área de la Puerta de San Marcos y Casas Viejas, es decir aguas arriba de las alternativas 1 y 2.

Sin embargo, existe el siguiente inconveniente:

Estos bancos de material tanto granular como arcilloso, se encuentran localizados cerca de las alternativas 1, 2 y 3, ya que inicialmente se consideraron como las mejores opciones; por lo tanto, será necesario explotar este material (al menos el granular) aguas abajo de la Alternativa 4 en cualquier zona que se amplíe el cauce. Al material arcilloso tendrá que realizarse un reconocimiento geológico en las zonas próximas a esta Alternativa.

E) Tratamiento para Impermeabilización

En general el macizo rocoso tiene baja permeabilidad primaria, pero esta permeabilidad puede incrementarse debido a las fracturas y fallas que afectan al macizo (permeabilidad secundaria). Es por esta razón que será necesaria una exploración detallada de la permeabilidad de estas rocas e impermeabilizar en caso necesario, y tener especial cuidado en las zonas de falla.

F) Anclaje para los Portales de Entrada y Salida

Al realizar el análisis de equilibrio límite tanto para el portal de entrada como el de salida, se llegó a la conclusión de que ambos portales son inestables, por lo que se recomienda el uso de anclaje en cada uno de ellos.

El tipo de anclaje recomendado es el de fricción para este caso particular, dado que resulta ser un anclaje seguro y económico.

A N E X O I

ANALISIS DE EQUILIBRIO LIMITE DEL  
PROYECTO PICACHOS SINALOA, PORTAL  
DE ENTRADA, FALLA POR CURA.

## ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL PORTAL DE ENTRADA

Fam. dedisc.	Rumbo	Dir. deechado	Echado	Propiedades
F	310°	040°	47°	Of = 30°
J	357°	267°	81°	Oj = 30°

Análisis exclusivamente en base a fricción

$$Cf = 0$$

; Drenado

$$Cj = 0$$

$$F = A \tan YA + B \tan YB$$

	Echado	Dirección	Y
Plano F	47°	40°	30°
Plano J	81°	267°	30°
Diferencia	34°	227°	

Utilizando las gráficas (Hoek y Bray, 1974) pags. 194 a 201, se obtienen los valores de A y B.

$$A = 1.4$$

$$B = 0.7$$

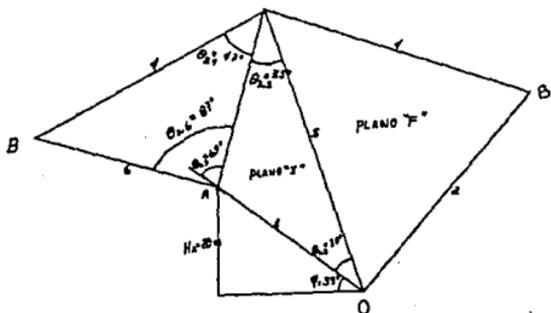
$$F = (1.4) \tan 30^\circ + (0.7) \tan 30^\circ$$

$$F = 0.8082 + 0.4041$$

$$F = 1.21$$

Para una obra permanente el valor de seguridad es muy bajo, por lo tanto se requiere soporte dado que el portal sería inestable.

CALCULO DE ANGULOS Y LINEAS DE LA CURVA



ANGULO (Grados)	VALOR	LINEAS (Metros)	VALOR
3,5	35	L1	35
1,5	35	L2	50
1,3	69	L3	36
4,5	52	L4	51
2,5	60	L5	58
3,6	87	L6	37
3,4	47		
Y	35		

CALCULO DE AREAS Y VOLUMENES DE LA CURA

Plano "J"

$$\begin{aligned} \text{Area del triángulo ACO} &= 1/2 (L5) (L3) \text{ sen } \theta \\ &= 1/2 (58 \text{ m}) (36 \text{ m}) \text{ sen } 35^\circ \end{aligned}$$

$$\text{Area ACO} = 598.8 \text{ m}^2$$

Plano "F"

$$\begin{aligned} \text{Area del triángulo BCO} &= 1/2 (L5) (L4) \text{ sen } \theta \\ &= 1/2 (58 \text{ m}) (51 \text{ m}) \text{ sen } 52^\circ \end{aligned}$$

$$\text{Area BCO} = 1165 \text{ m}^2$$

Volumen:

$$V = \frac{1}{6} (L3 \ L4 \ L5) K$$

$$\text{donde } K = (1 - \cos^2 \theta_{31} - \cos^2 \theta_{32} - \cos^2 \theta_{12} + 2 \cdot \cos \theta_{31} \cdot \cos \theta_{32} \cdot \cos \theta_{12})$$

$$K = (1 - \cos^2 47^\circ - \cos^2 35^\circ - \cos^2 52^\circ + 2 \cdot \cos 47^\circ \cdot \cos 35^\circ \cdot \cos 52^\circ)$$

$$K = 0.414$$

$$V = \frac{1}{6} (36) (51) (58) (0.414)$$

$$V = 7,347.6 \text{ m}^3$$

## CALCULO DE LAS FUERZAS QUE ACTUAN SOBRE LA CUÑA

Peso de la cuña ADBC

$$\begin{aligned}W &= (\gamma) (V) \\ &= 2.21 \text{ gr./cm}^3 = 2210 \text{ Kg./m}^3 \\ V &= 7,347.6 \text{ m}^3\end{aligned}$$

de donde;

$$\begin{aligned}W &= (2210 \text{ Kg./m}^3) (7,347.6 \text{ m}^3) \\ W &= 16,238 \text{ ton.}\end{aligned}$$

Fuerzas Debidas a Subpresión de Agua

$$U = \frac{1}{3} (\gamma_w) (h_w) (A)$$

donde;

$\gamma_w$  = Peso específico del agua  
hw = Altura de agua que rellena la fractura  
A = Area del triángulo donde actúa la subpresión del agua

Para el triángulo ACD  
(plano "J")

Datos:

$$\begin{aligned}\gamma_w &= 1000 \text{ Kg/m}^3 \\ h_w &= 10 \text{ m.} \\ A &= 598.8 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$U_j = 1,996 \text{ ton.}$$

Para el triángulo BCD  
(plano "F")

Datos:

$$\begin{aligned}\gamma_w &= 1000 \text{ Kg/m}^3 \\ h_w &= 10 \text{ m.} \\ A &= 1165 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$U_f = 3,883 \text{ ton.}$$

## CALCULO DE LA FUERZA Ni

Ni = Fuerza componente normal a la linea de intersección del vector peso (W).

es decir:

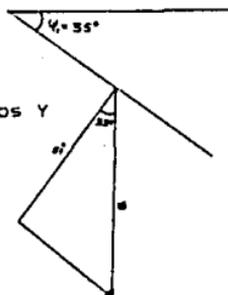
$$\cos Y = \frac{Ni}{W} \quad ; \quad \text{por lo tanto} \quad Ni = W \cos Y$$

Substituyendo datos:

$$Ni = (16,238 \text{ ton.}) (\cos 35^\circ)$$

$$Ni = 13,301 \text{ ton.}$$

$$\text{Esc. } 1\text{cm} = 4,000 \text{ ton.}$$



Obtención de las magnitudes nF y nJ

nota.- nF y nJ, son fuerzas coplanares con Ni.

Conociendo Ni y los ángulos que esta forma con nF y nJ (ver figura V.21), se procede al

cálculo de sus magnitudes.

Analíticamente;

$$nJ = \frac{Ni \operatorname{sen} 34}{\operatorname{sen} 114}$$

$$nJ = 8,141 \text{ ton.}$$

$$nF = \frac{nJ \operatorname{sen} 80}{\operatorname{sen} 34}$$

$$nF = 14,338 \text{ ton.}$$



$$\text{Esc. } 1\text{cm} = 4000 \text{ ton.}$$

1a.

Gráficamente

CALCULO DE ANGULOS DE FRICCION APARENTES

$$\tan \gamma_{aF} = \tan \theta_F + \frac{CF \ AF}{nF}$$

Datos:

$\theta_F = 30^\circ$   
 $CF = 100 \text{ Kg/m}^2$   
 $AF = 1165 \text{ m}^2$   
 $nF = 14,338 \text{ ton.}$

Para el plano "F"

$$\tan \gamma_{aF} = \tan 30^\circ + \frac{(100) (1165)}{14,338000}$$

$$\tan \gamma_{aF} = 30.3^\circ$$

Datos:

$\theta_J = 30^\circ$   
 $CJ = 100 \text{ Kg/m}^2$   
 $AJ = 598.8 \text{ m}^2$   
 $nJ = 8,141 \text{ ton.}$

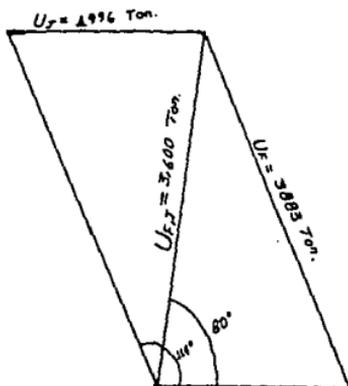
Para el plano "J"

$$\tan \gamma_{aJ} = \tan 30^\circ + \frac{(100) (598.8)}{8,141000}$$

$$\tan \gamma_{aJ} = 30.3^\circ$$

CALCULO DE LA PRESION DE AGUA (U F, J)

Los puntos UF y UJ, se localizan opuestos a nF y nJ, a partir del centro y sobre la línea E-W...



UF = 3,883 ton.

UJ = 1,996 ton.

UFJ = 3,600 ton.

Esc. 1cm = 500 ton.

### CALCULO DEL PESO EFECTIVO (We)

Con las magnitudes del peso y la presión de agua, y el ángulo entre ambas se calcula el peso efectivo (We).

Datos:

W = 16,238 ton. ----- Peso de la cuña

UFJ = 3,600 ton. ----- Fuerza de presión de agua

El ángulo entre W y UFJ es igual a 9°.

We = 13,200 ton.

$$F_s = \frac{\tan \gamma_a}{\tan n} = \frac{\tan 48^\circ}{\tan 46^\circ} = 1.07$$



Esc. 1cm = 2000 ton.

### CALCULO DEL COEFICIENTE SISMICO (Ws)

Datos:

W = 16,238 ton.

c = 0,2g

Weq = 13,200 ton.

Vo = c W = 3,247 ton.

Ws = 14,200 ton.

$$F_s = \frac{\tan \gamma_a}{\tan n} = \frac{48^\circ}{59^\circ} = 0.67$$

Esc. 1cm = 2000 ton.

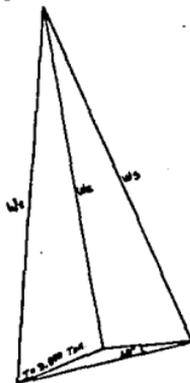


## CALCULO DE LA FUERZA RESISTENTE (Wt)

Datos:

- $W_s = 14,200 \text{ ton.}$  ----- Fuerza de coeficiente sismico  
 $\alpha + W \text{ y } W_s = 6^\circ$  ----- Angulo entre fuerzas (W y  $W_s$ )  
 $\theta = 10^\circ$  ----- Angulo con respecto a la horizontal

$W_t = 14,600 \text{ ton.}$



$$F_s = \frac{\tan \alpha}{\tan n} = \frac{\tan 48^\circ}{\tan 31^\circ} = 1.84$$

Para estabilizar la cuña, con un factor de seguridad  $F_s$  mayor a 1.8, se necesitará una fuerza resistente o de soporte de  $T = 3,800$  toneladas, y por lo tanto la fuerza de presión de soporte es la siguiente:

Fórmula	Sustitución
$\bar{U} = \frac{T}{A}$	$\bar{U} = \frac{3,800 \text{ ton.}}{576.74 \text{ m}^2} = 6.58 \text{ ton/m}^2$

Donde:

$A$  = Area de anclaje del frente del portal

$T$  = Fuerza del soporte

$\bar{U}$  = Fuerza de presión de soporte

$\bar{U} = 6.58 \text{ ton/m}^2$

Ih

Si la presión de soporte es de 6.58 ton/m<sup>2</sup>, y el diámetro de la varilla o ancla es de una pulgada y media (Ø = 1.5"); entonces se procede al cálculo del área de la sección transversal y a la resistencia de la misma.

Fórmula	Datos	Sustitución
$A = \pi r^2$	$\pi = 3.1416$	$A_v = (3.1416) (1.905)^2$
	$r = 1.905 \text{ cm}$	$A_v = 11.40 \text{ cm}^2$

El material del cual esta constituida una varilla de acero, tiene un límite de fluencia de 4,200 Kg/cm<sup>2</sup> (4.2 ton/cm<sup>2</sup>), por lo tanto para conocer la resistencia de la sección transversal de la varilla se tiene que:  $R = (F_y) (A_v)$ .

Datos:	Sustitución
$F_y = 4.2 \text{ ton/cm}^2$	$R = (4.2) (11.4)$
$A_v = 11.4 \text{ cm}^2$	$R = 47.88 \text{ ton.}$

Sin embargo para un caso práctico, se considera la resistencia de la varilla al 75% , y por lo tanto el valor real de la resistencia es:

$$R = 35.91 \text{ ton.}$$

Para conocer el área de soporte en torno a cada ancla, solo se divide el valor de la resistencia entre la presión de soporte, es decir;

$$X = \frac{35.91 \text{ ton.}}{6.58 \text{ ton/m}^2}$$

$$X = 5.46 \text{ m}^2$$

Y por último, la separación tanto horizontal como vertical entre cada una de las anclas, será la raíz cuadrada de "X". Por lo tanto el valor es de  $L = 2.33 \text{ m.}$

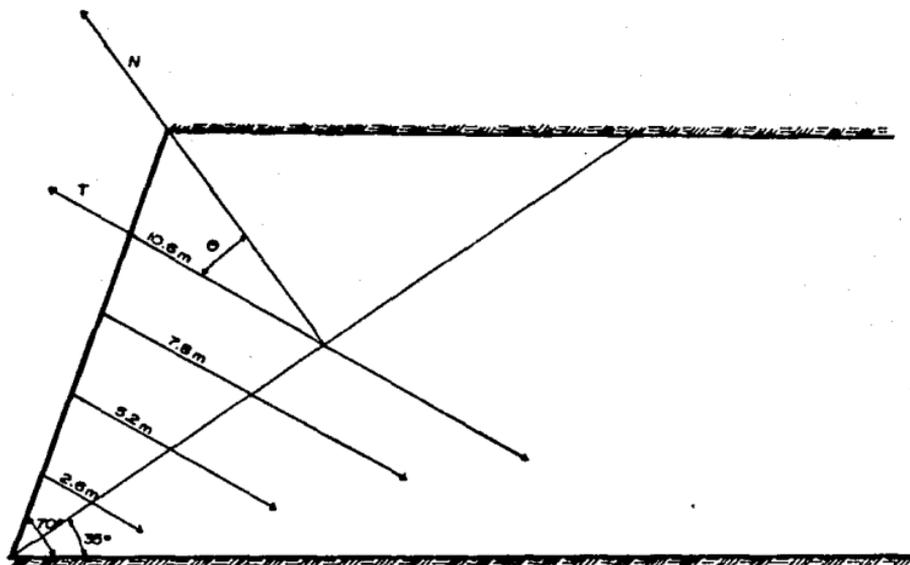
$$L = 2.33 \text{ ----- Separación entre cada una de las anclas}$$

$$L = 2.33 \text{ m.}$$

Si observamos la figura V.25, notamos que el ángulo de inclinación que debe tener cada ancla es de 25 grados con respecto a la normal a la superficie de deslizamiento es decir, 30 grados ascendentes con respecto a la horizontal. La dirección de la inclinación debe ser la opuesta a la dirección del deslizamiento de la cuña, es decir de 171 grados.

Tanto la dirección de inclinación como la inclinación, es la óptima tomando en cuenta que de ser otra, la longitud de cada una de las anclas aumentaría considerablemente.

Notamos en la figura, que la longitud de las anclas se va incrementando en la medida que aumenta la altura, teniendo una longitud de 2.6 m. en la zona más baja del portal, y más de 10.0 m. en la parte media.



$N$  = Normal a la superficie de deslizamiento

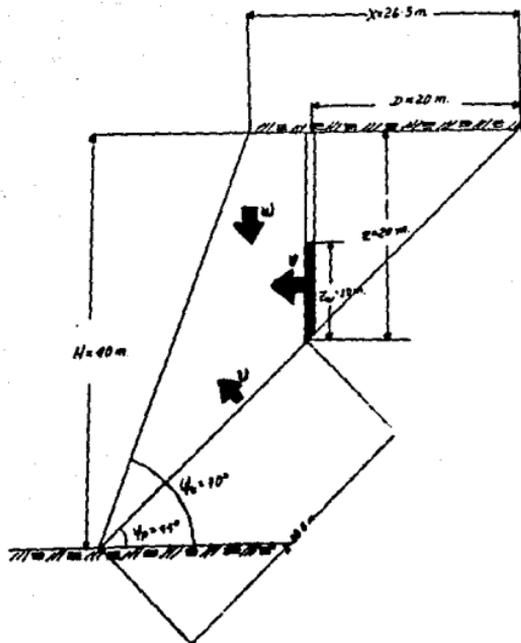
$T$  = Carga en las anclas

$\theta$  = Angulo entre el buzamiento del malla y la normal a la superficie de deslizamiento

**FIGURA V.25 POSICION DE LAS ANCLAS EN EL PORTAL DE ENTRADA**

A N E X O II

ANALISIS GRAFICO DE ESTABILIDAD  
DE UNA FALLA PLANA.



Geometría del talud y ecuaciones para el cálculo de fuerzas que actúan sobre él.

Fórmulas

$$W = 1/2 \gamma' (HX - DZ)$$

$$V = 1/2 \gamma' W (Zw)^2$$

$$U = 1/2 \gamma' W (Zw) (A)$$

Sustitución de datos

$$W = 1/2 (2210 \text{ Kg/m}^3) (40 \text{ m}) (26.5 \text{ m}) - (20 \text{ m}) (20 \text{ m})$$

$$W = 729,300 \text{ Kg/m}$$

$$W = 729.3 \text{ ton/m}$$

Datos

$$H = 40 \text{ m}$$

$$Z = 20 \text{ m}$$

$$Zw = 10 \text{ m}$$

$$X = 26.5 \text{ m}$$

$$D = 20 \text{ m}$$

$$Yp = 44^\circ$$

$$Yf = 70^\circ$$

$$A = 28.5$$

$$\gamma'w = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{roca} = 2210 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = 1/2 (1000 \text{ Kg/m}^3) (10 \text{ m})^2$$

$$V = 50 \text{ ton/m}$$

$$U = 1/2 (1000 \text{ Kg/m}^3) (10 \text{ m}) (28.5 \text{ m})$$

$$U = 142.5 \text{ ton/m}$$

Nota.- Estos valores son unitarios  
fta.

**CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD TOMANDO EN CUENTA LA PRESION DE AGUA**

Fórmula

$$F_s = \frac{C(A) + (W \cos Y_p - U - V \sin Y_p) \tan \theta}{W \sin Y_p + V \cos Y_p} \quad (\text{según Hoek y Bray, 1974})$$

Donde:

- C = 0 ----- Cohesión en la superficie de deslizamiento  
A = 28.5 m ----- Factor de elevación y altura de la fractura de tensión  
W = 729.3 ton/m ----- Peso del bloque  
V = 50 ton/m ----- Fuerza horizontal del agua  
U = 142.5 ton/m ----- Fuerza de subpresión sobre la superficie de deslizamiento  
Y<sub>p</sub> = 44 ----- Angulo del plano potencial de deslizamiento  
θ = 30° ----- Angulo de fricción

Sustitución de datos:

$$F_s = \frac{(729.3 \cos 44^\circ) - 142.5 - (50 \sin 44^\circ) \tan 30^\circ}{729.3 (\sin 44^\circ) + 50 (\cos 44^\circ)}$$

$$F_s = 0.369$$

### CALCULO DE LA FUERZA RESISTENTE (T)

$$F_s = \frac{C A + ( W (\cos Y_p) - U - V (\sin Y_p) ) \tan \theta}{W \sin Y_p + V \cos Y_p - T \sin \theta}$$

Donde:

T = Fuerza resistente aplicada por las anclas, necesaria para evitar el deslizamiento y obtener un factor de seguridad de 1.8.

$\theta = 25^\circ$  ----- Angulo de inclinación de la fuerza resistente (T) con respecto a la normal a la superficie de deslizamiento

C = 0 ----- Cohesión en la superficie de deslizamiento

Sustitución de datos:

$$1.8 = \frac{(729.3) (\cos 44^\circ) - 142.5 - 50 (\sin 44^\circ) \tan 30^\circ}{(729.3) (\sin 44^\circ) + 50 (\cos 44^\circ) - T \sin 25^\circ}$$

$$T = 1020 \text{ ton/m } \text{ valor unitario}$$

Para conocer los valores reales del peso de la cuña, así como las fuerzas que actúan sobre ella, basta multiplicar los valores anteriormente obtenidos por la longitud del frente del portal, que en este caso es de 15 metros, entonces:

$$W = (729.3) (15) = 10,939 \text{ ton.}$$

$$V = (50) (15) = 750 \text{ ton.}$$

$$U = (141.5) (15) = 2,137 \text{ ton.}$$

$$T = (1020) (15) = 15,300 \text{ ton.}$$

La presión de soporte esta dada por la siguiente expresión;

$$\bar{\sigma} = \frac{T}{A}$$

Donde:

T = 15,300 ton. ----- Fuerza de soporte

A = 576.74 m<sup>2</sup> ----- Area de anclaje (figura V.23)

$\bar{\sigma}$  = Presión de soporte

$$\bar{\sigma} = \frac{15,300 \text{ ton.}}{576.74 \text{ m}^2} = 26.53 \text{ ton/m}^2$$

$$\bar{\sigma} = 26.53 \text{ ton/m}^2$$

Si  $\bar{\sigma} = 26.52 \text{ ton/m}^2$ , y el diámetro de la varilla es de  $D = 1.5 \text{ "}$ , el área de la sección transversal de la varilla es entonces:

Fórmula

Sustitución

$$A = \bar{11} r^2$$

$$\bar{11} = 3.1416$$

$$r = 1.905 \text{ cm}$$

$$A_v = 11.40 \text{ cm}^2$$

Por otro lado el límite de fluencia del acero, material del cual está constituida la varilla es  $F_y = 4,200 \text{ Kg/cm}^2$  es decir  $4.2 \text{ ton/cm}^2$ , entonces para conocer la resistencia de la sección transversal de la varilla tenemos que  $R = (F_y) (A_v)$

$$R = (4.2 \text{ ton/cm}^2) (11.40 \text{ cm}^2) = 47.88 \text{ ton.}$$

Sin embargo se está considerando que la resistencia de la varilla es al 75% , por lo tanto

$$\text{Id } R = 35.91 \text{ ton.}$$

Para conocer la separación entre cada una de las anclas tenemos que:

$$\frac{26.52 \text{ tan}}{1\text{m}^2} = \frac{35.91 \text{ tan}}{X \text{ m}^2}$$

De donde:

$$X = 1.35 \text{ m}^2$$

Es el Área que cubrirá un ancla en su entorno, tomando en consideración la fuerza de soporte de cada una de ellas.

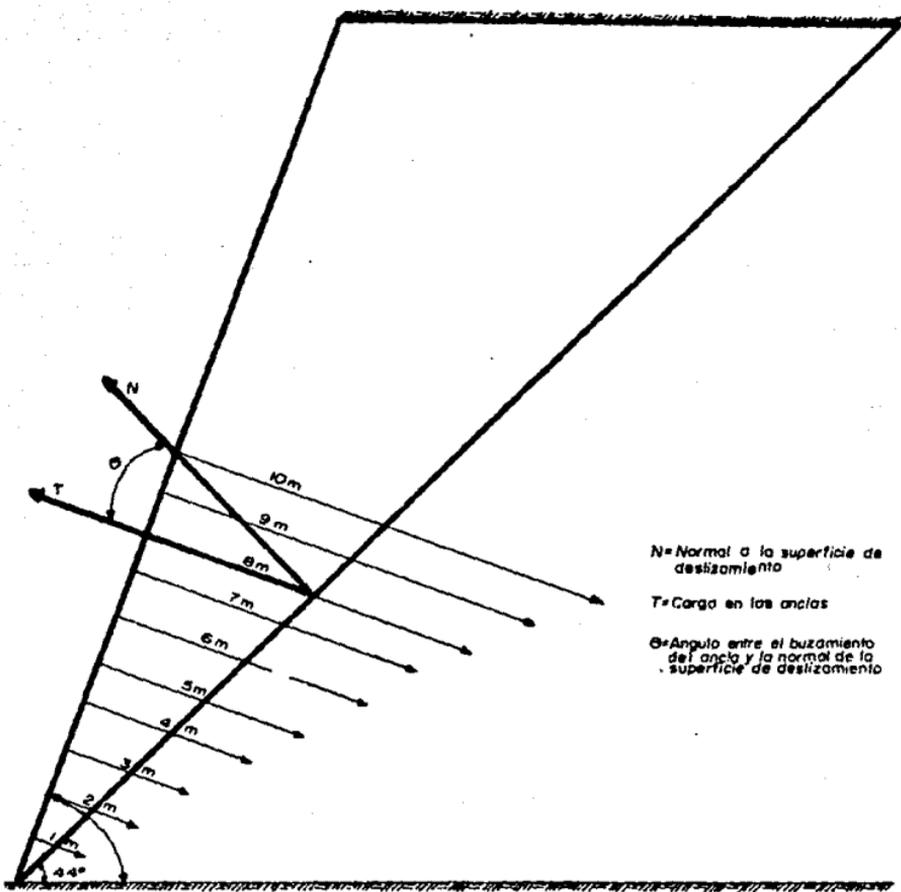
Entonces la separación tanto horizontal como vertical es de 1.16m.

$$L = 1.16 \text{ m}$$

Al analizar la figura V.26, observamos que el ángulo de inclinación al que deben estar instaladas las anclas es de  $\theta=25$  grados con respecto a la normal a la superficie de deslizamiento, es decir de 21 grados ascendentes con respecto a la horizontal. Este ángulo es el más adecuado, tomando en cuenta que de ser mayor o menor, la longitud de cada una de las anclas se incrementaría considerablemente.

Para poder contrarrestar el posible deslizamiento en una falla de tipo plano es evidente que la dirección que tendrá el patron de anclaje, será la opuesta a la dirección del deslizamiento del bloque, que para este caso particular es de 39 grados.

Por otro lado observamos que la longitud de las anclas se incrementa para cada nivel de altura, mientras que para la primera hilera de anclas que irán instaladas a una misma altura la longitud es de 1.0 m., para la segunda hilera (segundo nivel de altura), la longitud es de 2.0 m., para la siguiente de 3.0 m., y así sucesivamente, hasta tener en la parte más alta del portal una longitud de cada ancla de 20.0 m. (figura V.26).

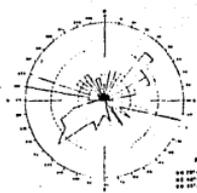
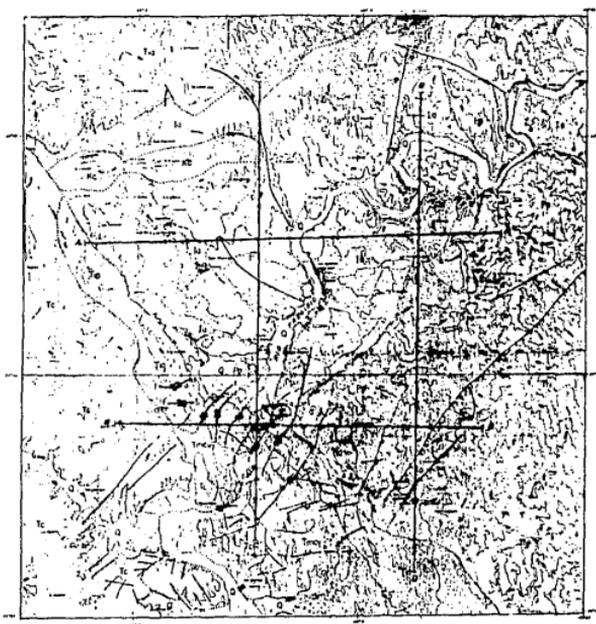


$N$  = Normal a la superficie de deslizamiento

$T$  = Carga en las anclas

$\theta$  = Angulo entre el buzamiento del ancla y la normal de la superficie de deslizamiento

FIGURA V-26 POSICION DE LAS ANCLAS EN EL PORTAL DE SALIDA



COORDINADAS  
PROYECTUALES  
N 20° 00' 00" LONGITUD  
82 00' 00" 00" 00" 00"  
E 100° 00' 00" 00" 00"

**LEYENDA**

- 1. Terreno con cultivos (maíz, trigo, etc.)
- 2. Terreno con cultivos (caña de azúcar, etc.)
- 3. Terreno con cultivos (arroz, etc.)
- 4. Terreno con cultivos (frutas, etc.)
- 5. Terreno con cultivos (pasto, etc.)
- 6. Terreno con cultivos (bosque, etc.)
- 7. Terreno con cultivos (montaña, etc.)
- 8. Terreno con cultivos (lago, etc.)
- 9. Terreno con cultivos (río, etc.)
- 10. Terreno con cultivos (carretera, etc.)
- 11. Terreno con cultivos (puerto, etc.)
- 12. Terreno con cultivos (edificio, etc.)
- 13. Terreno con cultivos (fuerza eléctrica, etc.)
- 14. Terreno con cultivos (línea férrea, etc.)
- 15. Terreno con cultivos (línea telefónica, etc.)
- 16. Terreno con cultivos (línea de gas, etc.)
- 17. Terreno con cultivos (línea de agua, etc.)
- 18. Terreno con cultivos (línea de drenaje, etc.)
- 19. Terreno con cultivos (línea de alcantarillado, etc.)
- 20. Terreno con cultivos (línea de saneamiento, etc.)

**SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS**

- 1. Puntos de elevación
- 2. Líneas de elevación
- 3. Líneas de elevación (contorno)
- 4. Líneas de elevación (perfil)
- 5. Líneas de elevación (perfil)
- 6. Líneas de elevación (perfil)
- 7. Líneas de elevación (perfil)
- 8. Líneas de elevación (perfil)
- 9. Líneas de elevación (perfil)
- 10. Líneas de elevación (perfil)
- 11. Líneas de elevación (perfil)
- 12. Líneas de elevación (perfil)
- 13. Líneas de elevación (perfil)
- 14. Líneas de elevación (perfil)
- 15. Líneas de elevación (perfil)
- 16. Líneas de elevación (perfil)
- 17. Líneas de elevación (perfil)
- 18. Líneas de elevación (perfil)
- 19. Líneas de elevación (perfil)
- 20. Líneas de elevación (perfil)

**SÍMBOLOS GEOLÓGICOS**

- 1. Granito
- 2. Gneiss
- 3. Schisto
- 4. Pizarra
- 5. Arenisca
- 6. Arcilla
- 7. Esquistosidad
- 8. Pliegues
- 9. Fallas
- 10. Líneas de fractura
- 11. Líneas de fractura
- 12. Líneas de fractura
- 13. Líneas de fractura
- 14. Líneas de fractura
- 15. Líneas de fractura
- 16. Líneas de fractura
- 17. Líneas de fractura
- 18. Líneas de fractura
- 19. Líneas de fractura
- 20. Líneas de fractura

NOTA: Para más detalles de los símbolos geológicos, ver el libro "Símbolos Geológicos" de la Universidad Nacional Autónoma de México.

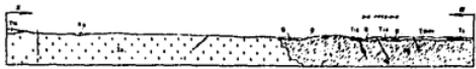
SECCION A-A'



SECCION B-B'



SECCION C-C'



SECCION D-D'



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN GEOLOGICO REGIONAL EN EL RIO INHERROLAN  
TÉRMINO PASADIZO  
CARRILLO GARCÍA  
Escala 1:50,000





## BIBLIOGRAFIA

- Alencaster, Gloria (1961). Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del Estado de Sonora. Paleontología Mexicana 11, Parte 1, Instituto de Geología, UNAM, pp. 18.
- Atwater, T. (1970) Implications of Plate Tectonics for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America. Bull. Geo. Soc. Amer., V. 81, pp. 3513-3536.
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1974). Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunnelling. Proc. Third International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Denver, Vol. 11A, pp. 27-32.
- Bonneau M. 1969 (1970). Una Nueva Area Cretácica Fosilifera en el Estado de Sinaloa. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 32, No. 2, pp. 159-167.
- Bonneau, Michel. (1976). A propósito de la Edad Cretácica de los Afloramientos Volcánicos y Volcanoclásticos de la Región de Zihuatanejo, Guerrero (Sierra Madre del Sur, México). Acapulco, Cong. Lat. Amer. Geología 3, resúmenes.
- Carrillo, M. (1977). Notas Referentes al Paleozoico de San José de Gracia, Sinaloa., Resumen, Instituto de Geología, UNAM.
- Coney, P. J. and S. J. Reynolds (1977). Cordilleran Benioff Zones, Nature 270, pp. 403-405.
- Damon, P. E. Birkeman, M. (1964). Potassium-Argon Dating of Post-Laramide Plutonic and Volcanic Rocks within the Basin and Range Province of Southeastern Arizona and Adjacent Areas Arizona. Geological Society Digest, V. 7 pp. 63-78.
- Damon, P. E. and Mauger, R. L. (1966). Epeirogeny-Orogeny Viewed from the Basin and Range Province. Transactions Society of Mining Engineers, V. 235, pp. 99-112.

- Damon, P. E. y Montesinos, E. (1978). Late Cenozoic Volcanism and Metallogenesis over an Active Benioff Zone in Chiapas, México. Arizona Geological Society Digest, V. 11, pp. 155-168.
- Damon, P. E., Nieto, O. J. and Delgado, A. L. 1979. Geochronologic, Petrologic and Structural Data Related to Large Morfologic Features Between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt. Geophysical International Special Volume Dedicated to the Mexican Volcanic Belt.
- Damon, P. E., Shaffiquillah, M. y Clark, R. F. (1981). Age Trends of Igneous Activity in Relation to Metallogenesis in the Southern Cordillera. Geol. Soc. Digest Vol. XIV, Tucson, Arizona, pp. 137-354.
- Deere, D. V. and Miller, R. P. (1966). Engineering Classification an Index Properties for Intact Rock. Technical Report NO. AFHL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory New Mexico.
- Delgado S. y Absalon M. (1989). Estudio Geológico de la Boquilla Picachos sobre el Rio Presidio, Estado de Sinaloa. Tesis profesional U.N.A.M.
- Dickinson, W.R. (1981). Plate Tectonic Evolution of the Southern Cordillera. Univ. of Arizona 85721, U.S.A. pp. 113-135.
- Fries, Carl. (1962). Reseña Geológica del Estado de Sonora, con Enfasis en el Paleozoico. Asoc. Mex. de Geólogos Petroleros, Bol. 14. pp. 257-273.
- Gastil, G., Morgan, B. and Krummenacher, D. (1981). The Tectonic History of Peninsular California. In Ernest, W. G. (Ed.) The Geotectonic Development of California. (Rubey Vol.1) Prentice Hall, pp. 285-305.
- GEDPROYECTOS, S.A. (1988). Estudio Geológico-Geofísico en el Subsistema Presidio-Culiacán Sinaloa. 229 pp. Informe inédito.
- Henry, C. D. (1975). Geology and Geochronology of the Granitic Batholithic Complex, Sinaloa, México. Unpubl. Doctoral Dissert, Univ. Texas, Austin, 158 pp.
- Hoek, E. and Bray, J. W. (1974). Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy, Londres, 2da. ed. 402 pp.

- Hoek, E y Brown E. T. (1985). Excavaciones Subterráneas en Roca Ed. Mc. Graw-Hill. PP634.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCKS MECHANICS, (ISRM). 1980. Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. Basic Geotechnical Description (B.G.D.).
- Karing, D. E. and Jensky, W. (1972). The Proto-Gulf of California. Earth and Planetary Science Letters, V. 17, pp. 169-174.
- Keith, S. B. (1978). Paleo-Subduction Geometrics Inferred from Cretaceous and Tertiary Magmatic Patterns in Southwestern North America. Geology, V. 6, pp. 516-521.
- Larson, R. L. Menard, H. W., and Smith, S. M. 1968. Gulf of California a Result of Ocean Floor Spreading and Transform Faulting. Science, V. 161, pp. 781-784.
- León, V. M. y Pedraza, S. P. (1988). Informe Geológico Exploratorio Complementario del Proyecto Picachos, Municipio de Mazatlán, Estado de Sinaloa. DGSCOH, SARH.
- McDowell, F. W. y Clabaugh, S. E. (1981). The Igneous History of the Sierra Madre Occidental and its Relation to the Tectonic Evolution of Western Mexico. Revista Instituto de Geología, Vol. 5, No. 2, pp. 195-206.
- Menache, V. A. S. (1977). Estabilidad de Taludes Rocosos. Tesis profesional U.N.A.M.
- Morán, Z. D. (1984). Geología de la República Mexicana. Facultad de Ingeniería, UNAM; INEGI. pp. 15-30.
- Ortega, G. F. (1977). Reconocimiento preliminar de la geología de la Hoja Tamazula, Estado de Sinaloa. Instituto de Geología, UNAM.
- Raisz, E. (1964). "Landforms of Mexico". Map Prepared for the Geography. Branch of the office Naval Research, Second Scale 1:3000,000, Lambridge, Mass.
- Rangin, C. (1978). Consideraciones sobre la evolución geológica de la parte septentrional del estado de Sonora. Libreto Guía del Primer Simposio sobre la Geología y Potencial Minero del estado de Sonora. Hermosillo, Sonora. Instituto de Geología, UNAM. pp.35-36.

- Rodríguez, R. y Córdoba, D. A. (1978). Atlas Geológico de Evaluación Geológico-Minera del Estado de Sinaloa. Instituto de Geología, UNAM y Secretaría del Desarrollo Económico del Estado de Sinaloa, 702 pp.
- Servais M., Rojo Y. R. y Colorado L. D. (1982). Estudio de las Rocas Básicas y Ultrabásicas de Sinaloa y Guanajuato. Postulación de un Paleogolfo de Baja California y de una Digitación Tethysiana en México Central. Revista Geomimet no. 115 ene./feb., C.R.M.
- Silver, L.T. and Anderson, T. H. (1974). Possible Left-Lateral Early to Middle Mesozoic Disruption of the South Western North America Craton Margin. Geol. Soc. of America Abs., With Programs. V. 6, 955 pp.
- Trillo, R. M. (1984). Informe Geológico Exploratorio y de Pruebas de Permeabilidad de las Boquillas para Presa de Almacenamiento "Picachos I y II" ubicadas sobre el Río Presidio, Municipio de Mazatlán, Estado de Sinaloa. Dirección General de Estudios, SARH.
- Zavala, J. R. (1979). Bosquejo Geológico y Geotécnico de las Provincias Fisiográficas de México. Tesis Profesional, UNAM.