

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA



### Estudio Geológico de la Alternativa “Las Cruces” proyecto hidroeléctrico Pozolillo, Estado de Nayarit.

#### TESIS

Que para obtener el Título de Ingeniero Geólogo

Presenta:

**Juan Carlos Montaña Salinas**

ING. MIGUEL ILDEFONSO VERA OCAMPO (DIRECTOR DE TESIS)

CIUDAD DE MÉXICO, 2016.

## DEDICATORIA

*Esta tesis está dedicada a dios por darme la vida, a mis padres por formar al ser humano que soy y que gracias a sus esfuerzos hoy estoy culminando uno más de mis sueños.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por haberme desarrollado como persona y profesionista.*

*A mi familia que sin su apoyo y sacrificio sería imposible realizarme como profesionista y que han contribuido para que yo alcance esta meta. A mis hijos, que algún día pueda yo tener la satisfacción de ver el mismo esfuerzo reflejado en ustedes.*

*A mi madre y hermanas, gracias por creer en mí y ser un ejemplo todos estos años y enseñarme que con esfuerzo y dedicación se logran las metas.*

*A mi asesor, el Ing. Miguel I. Vera Ocampo, por haberme dado la posibilidad de desarrollar mi tesis, creer en mi proyecto y ser un ejemplo a seguir como profesionista.*

*Y finalmente a mis compañeros de trabajo de Comisión Federal de electricidad (CFE), en especial al Ing. Vicente Páez Juárez por su apoyo y aquellas personas que a lo largo de mi vida han contribuido a mi formación profesional y académica.*

**"La persistencia es el camino más corto hacia el éxito."  
(Charles Chaplin)**

# INDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>Pág.</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Trabajos Previos.....	2
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Generalidades .....	3
a) Ubicación geográfica y vías de acceso .....	3
b) Clima.....	3
c) Provincia fisiográfica.....	4
d) Hidrología .....	6
2. TRABAJOS REALIZADOS.....	7
2.1. Geología Regional.....	7
a) Litología .....	7
Unidad andesítica (Tm-ata).....	7
Unidad Las Cruces (Tm-ic) .....	9
Unidad Corapan (Tm-ct1-4 y Tm-ci1-3).....	9
Unidad La Soyamichera (Tm-s) .....	10
Intrusivo pórfido granodiorítico (Tm-gd).....	10
Diques riolíticos (Tm-dr) .....	11
Intrusivo pórfido andesítico (Tm-pa) .....	11
Diques diabásicos (Tm-p-dd) .....	11
Depósitos no consolidados (Qal, Qsr y Qt).....	12
b) Geología Estructural .....	12
2.2 Geología .....	14
a) Litología .....	14
Unidad Las Cruces (Tm-ic) .....	14
Unidad Corapan (Tm-c).....	17
Intrusivos.....	19
Aluvión (Qal).....	20
Suelo residual (Qsr).....	20

Depósitos de talud (Qdt) .....	20
b) Discontinuidades .....	21
Fallas .....	21
Falla Los Bueyes .....	21
Falla El Cantil.....	22
Falla Las Cruces.....	23
Falla Bordones.....	24
Falla PHC-2 .....	25
Fracturas.....	27
Seudoestratificación .....	29
C) Perforación con Diamante.....	30
Calidad de Roca (RQD) .....	31
Pruebas de permeabilidad. ....	32
2.3 Estudios Geofísicos.....	37
a) Prospección Sísmica.....	38
b) Prospección Eléctrica.....	38
c) Sondeo eléctrico vertical (SEV) .....	38
3 INTEGRACIÓN DE RESULTADOS.....	39
3.1 Geológico-Geofísica.....	39
3.2 Sismotectónica .....	44
Marco Tectónico .....	44
Sismicidad Local.....	47
3.3 Bancos de Materiales.....	50
a) Banco La Sanguijuela I .....	50
b) Banco La Sanguijuela II .....	50
c) Banco El Limón .....	52
d) Banco Presidio .....	53
d) Banco Arroyo Hondo.....	54
e) Banco El Zopilote .....	55
4.- ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	58
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	60
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
ANEXOS.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁG.</b>
Figura 1.1	Ubicación y acceso .....	4
Figura 1.2	Provincias fisiográficas.....	5
Figura 2.1	Columna Litológica regional.....	8
Figura 2.2	Estereograma de fallas regionales P.H Las Cruces. ....	13
Figura 2.3	Columna Litológica, marco geológico del sitio.....	15
Figura 2.4	Estereograma de Fallas en zona de boquilla.....	27
Figura 2.5	Estereograma de fracturas margen derecha. ....	28
Figura 2.6	Estereograma de fracturas de margen izquierda.....	29
Figura 2.7	Estereograma de la pseudoestratificación en la zona de la boquilla.....	30
Figura 3.1	Configuración de espesores de roca P.H. Las Cruces .....	43
Figura 3.2	Marco tectónico regional.....	46
Figura 4.1	Modelo geológico Las Cruces, con eje de cortina. ....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁG.</b>
Tabla 2.1	Resumen de las principales fallas en la zona de la boquilla. ....	26
Tabla 2.2	Promedio general de la recuperación y RQD obtenidos en cada barreno.....	31
Tabla 2.3	Criterio de Deere, entre el valor obtenido y su correspondiente valor en calidad de roca.....	31
Tabla 2.4	Resumen de la Recuperación y RQD.....	32
Tabla 2.5	Tabal de clasificación cualitativa de permeabilidad .....	33
Tabla 2.6	Resumen de los valores de permeabilidad de cada barreno .....	35
Tabla 2.7	Resumen de los valores de permeabilidad de cada barreno .....	36
Tabla 2.8	Resumen de los valores de permeabilidad de cada barreno .....	37
Tabla 3,1	Unidades geofísicas y su interpretación .....	42
Tabla 3.2	Resultados de los Módulos Elásticos Dinámicos .....	42

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

<b>FOTOGRAFÍA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁG.</b>
Fotografía 2.1.	Aspecto del Miembro inferior de la ignimbrita Las Cruces (Tm-ic1), aguas abajo del eje de boquilla. ....	16
Fotografía 2.2.	Alternancia de tobas e ignimbritas de coloración blanquecina de la unidad Corapan, afloran en la margen izquierda de la boquilla.....	19
Fotografía 2.3	Expresión de la falla Los Bueyes, aguas abajo del eje, donde forma escarpes de hasta 8 m de altura. ....	22
Fotografía 2.4.	Falla El Cantil en la ladera de la margen izquierda.....	23
Fotografía 2.5.	Panorámica de la falla Las Cruces vista desde la margen derecha del río San Pedro; se observa abertura de esta estructura por erosión.....	24
Fotografía 2.6	Falla Bordones, presenta una actitud N 80° W/48° SW. Su traza está definida por una pared plana rugosa.....	25
Fotografía 3.1.	Pozo a cielo abierto ejecutados en el banco La Sanguijuela I. ....	51
Fotografía 3.2.	Imagen que muestra parte de la distribución del material arcilloso del banco La Sanguijuela II.....	52
Fotografía 3.3.	Material arcillo-limoso de color rojizo del banco El Limón.....	53
Fotografía 3.4	Panorámica que muestra la distribución del material arcilloso expuesto en el banco Presidio.....	54
Fotografía 3.5	Banco Arroyo Hondo, en donde se nota la coloración rojiza en el corte del camino, debido al material arcilloso. ....	55
Fotografía 3.6.	Material arcilloso encontrado en uno de los pozos ejecutados en el banco El Zopilote.....	56

## RESUMEN

El presente informe pretende detallar un sitio, que cuente con las características geológicas necesarias, para la ubicación de una presa que genere energía eléctrica en el río San Pedro, estado de Nayarit, el sitio seleccionado se localiza a 65 km en línea recta al N-NW de la ciudad de Tepic, Nayarit, en la cuenca baja del río San Pedro Mezquitil, en la porción central del estado de Nayarit, el lugar a estudiar se le conoce como La alternativa Las Cruces, del proyecto hidroeléctrico Pozolillo

Regionalmente el proyecto pertenece a la subprovincia denominada Sierras de Pie de Monte, ubicada entre la meseta Riolítica de la costa de Sinaloa y Nayarit, Raisz E. (1964), el área de estudio geomorfológicamente presenta sierras y lomeríos irregulares, con fuertes pendientes. El marco geológico que rodea el sitio está constituido por ocas ígneas extrusivas e intrusivas del periodo Terciario, cubiertas por depósitos no consolidados del Reciente.

Las rocas que enmarcan el sitio están representadas por rocas de composición andesítica, subyaciéndole ignimbritas riolíticas de la formación las Cruces y por encima de estas, tobas e ignimbritas de composición ácida de la unidad Corapan y al final se depositaron ignimbritas riolíticas de la unidad Soyamichera, todas estas intrusionadas por cuerpos de composición riolíticos, diabásicos y andesíticos, y cubriéndolos a estos últimos suelos residuales y material de talud, así como al nivel de río depósitos aluviales. El área de estudio tiene un estrechamiento asimétrico, formado por rocas de la unidad Las Cruces y rocas de la unidad Corapan.

Las estructuras más importantes son fracturas, la seudoestratificación y fallas, entre las principales se tienen: La falla Bordonos, El Cantil, Las Cruces, PHC-2, con rumbo general e NW-SE y echados al SW. La seudoestratificación en general tiene una orientación de N 48°-50°W con inclinación de 24° al NE.

Se realizaron 543,20 m en total perforados, con una recuperación promedio de 90,09 % y un RQD promedio de 62,02 %, resultado una roca de calidad regular, donde las pruebas de permeabilidad Tipo Lugeón efectuadas en los barrenos indican que la roca es poco permeable.

En base a trabajos de geofísica e integración geológica, se identificaron tres unidades geofísicas (U1, U2 y U3), que se correlacionan con las unidades litológicas, U1 asociada a depósitos no consolidados, U2 que pertenece a rocas de la unidad Corapan y la U3 relacionadas a rocas de la unidad Las Cruces, que a su vez se dividieron en subunidades para cada unidad, resaltando características de cada unidad.

Las fallas de orientación E-W, pueden ser las probables detonadoras de sismos en la zona, las cuales pueden presentar un riesgo para el proyecto.

Los bancos de préstamos de materiales impermeables, se estima tener una capacidad de alrededor de 1 4000 000 m<sup>3</sup> de material para las necesidades del proyecto.



# 1 INTRODUCCIÓN

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene interés en construir una obra hidráulica, en el estado de Nayarit, con fines de generación eléctrica sobre el río San Pedro Mezquital, uno de los sitios estudiar corresponde a la alternativa Las Cruces que es parte del Proyecto Hidroeléctrico Pozolillo, el elegir la ubicación de la obra en ese sitio evitará afectar comunidades como San Pedro Ixcatán, Presidio y San Juan Corapan, un beneficio adicional que se obtendría sería el de proteger de inundaciones a poblaciones de la importancia como son Tuxpan, San Vicente, Estación Ruiz y El Venado.

El río San Pedro Mezquital inicia al sur del estado de Durango, donde toma el nombre de río La Saucedá, ya dentro del estado de Nayarit, se le conoce como río San Pedro o San Pedro Mezquital, drena una área de 15.56% del total del territorio de Nayarit, fluye con dirección nortesur, para cambiar en el sur su orientación hacia el oeste, desembocando en el Océano Pacífico.

En el presente trabajo se integran los resultados de los estudios de exploración geológicos, de perforación y geofísicos que se realizaron en la alternativa Las Cruces. Esta información tiene el carácter de avance en la etapa de factibilidad geológica del proyecto, ya que para concluir el estudio sólo falta completar la exploración directa.

En el capítulo 1, se describen los trabajos previos, objetivos y generalidades de la zona de estudio.

En el capítulo 2, se describen los estudios geológicos, que incluyen secuencia litológica, geología estructural, discontinuidades, fracturamiento y perforación de núcleos, además de los estudios geofísicos como prospección sísmica y eléctrica.

En el capítulo 3, se integran los resultados, tanto de geología y geofísica, anexando estudios de sismotectónica y bancos de materiales

En el capítulo 4, se analiza la información obtenida y realizan los comentarios respectivos de acuerdo a los resultados obtenidos.

## **1.1 Trabajos Previos**

Al inicio de los años ochenta, se iniciaron diversos estudios de exploración a lo largo de la Cuenca del río San Pedro Mezquital. La Residencia de Estudios de los ríos Baluarte y Presidio de CFE, efectuó en 1982, la geología regional de la porción inferior del río San Pedro Mezquital; donde se destacaron las características geológicas de los estrechamientos Ixcatán, Tecarita, Las Cruces, El Limón, Pozolillo y Platanares.

En 1983, se concluyó la etapa de evaluación geológico-geotécnica de gran visión de los mismos, donde se recomendó Tecarita como mejor opción, en tanto que en 1984, se efectuó el análisis geológico de Las Cruces y se estableció el marco geológico regional de una porción de las cuencas de los ríos San Pedro y Acaponeta.

A partir de 1995, la Comisión Federal de Electricidad, a través de la Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte (SEZPN), inicia el estudio geológico de prefactibilidad del P.H. Pozolillo, Nay.

En 1997, se establece como parte integral de los estudios del P.H. Pozolillo, la ejecución de la prefactibilidad geológica de la alternativa Las Cruces en donde, de acuerdo con los estudios de integración y análisis geológico-geofísico y de exploración directa que se realizan desde entonces, se busca que el sitio presente características favorables para alojar las posibles obras civiles.

## **1.2 Objetivo**

Los trabajos de exploración geológica y geofísica que se presentan en este trabajo, tienen por objetivo conocer a detalle las condiciones geológicas del sitio y definir la factibilidad del proyecto P.H. Pozolillo alternativa "Las Cruces" y facilitar la ubicación del posible eje de la obra de contención del proyecto y establecer opciones de exploración directa para el mejor conocimiento de las características del macizo rocoso.

## 1.3 Generalidades

### a) Ubicación geográfica y vías de acceso

La alternativa Las Cruces se localiza en la cuenca baja del río San Pedro Mezquital, en la porción central del estado de Nayarit, aproximadamente a 65 km en línea recta al N-NW de la ciudad de Tepic; está limitada por las siguientes coordenadas geográficas.

22° 04' 37" a 22° 05' 26" Latitud Norte  
104° 56' 30" a 104° 57' 34" Longitud Oeste

El acceso al proyecto se realiza partiendo de la población de Tepic, a partir del km 66 de la carretera federal No. 15 "Tepic-Acaponeta", para desviarse por la carretera estatal, que conduce al poblado de Estación Ruiz, se continua por la estatal No. 19 hasta el poblado del El Venado, siguiendo con rumbo a San Pedro Ixcatán (Figura 1.1).

De este punto se continúa, por la margen izquierda del río San Pedro Mezquital, a través de una brecha de penetración que conduce al sitio de estudio, una vez recorridos poco más de 11 km.

### b) Clima

El clima que predomina en el estado de Nayarit es cálido y cubre la mayor parte del territorio, en menor grado los climas semicálidos se distribuyen de manera irregular, los climas templados se restringen a pequeñas áreas en elevadas mesetas y partes altas de la sierra, los secos se encuentran en los estrechos y profundos cañones de los ríos.

En la zona de estudio existe un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano  $Aw_2(w)$ , con mayor humedad, según la clasificación del año 1918 de tipos de climas de Köpen modificados por E. García en 1964. Es el clima más húmedo de los cálidos subhúmedos, su distribución es la de mayor homogeneidad en la entidad, ya que comprende una franja continua y más o menos paralela a la línea de costa. Con una temperatura media anual mayor de 22 °C y precipitación total anual superior a 1 200 mm, el porcentaje de lluvia invernal es menor de 5 mm.

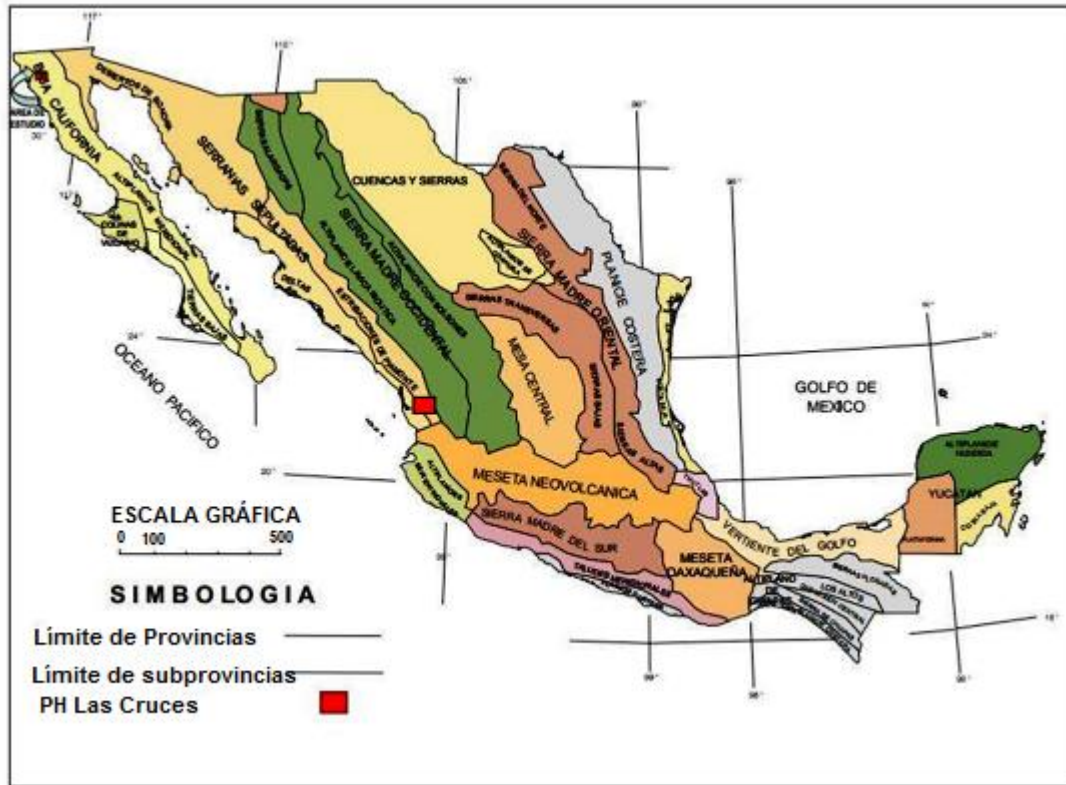


Figura 1.1 Ubicación y acceso

### c) Provincia fisiográfica

En el estado de Nayarit se tienen cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Llanura Costera del Pacífico, Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur, donde el relieve que predomina es de altas sierras, mesetas, cañones, laderas, lomeríos, llanuras, valles, barras y marismas.

Debido a su gran magnitud, es una provincia de mayor relevancia del país, está formada principalmente por rocas ígneas extrusivas, con una superficie aproximada de 250,000 km<sup>2</sup>; con orientación noroeste-sureste, predominan en las partes altas rocas como tobas, ignimbritas, volcanoclásticas y algunas emisiones riolíticas pseudohorizontales, lo que le da la apariencia de una gran meseta.



**Figura 1.2 Provincias fisiográficas.**

El área de estudio se encuentra cerca del límite de la vertiente oeste de la Sierra Madre Occidental y de acuerdo con la publicación de la síntesis de Información Geográfica del Estado de Nayarit (INEGI) de 1999, pertenece a la subprovincia denominada Pie de la Sierra, la cual se extiende hacia el oeste como una franja angosta entre la meseta riolítica y los deltas de la costa de Sinaloa y Nayarit, con una orientación noroeste-sureste (Figura 1.2). La subprovincia Pie de la Sierra se cataloga como una región transicional entre la Sierra Madre Occidental y la Llanura Costera del Pacífico.

En Nayarit los sistemas de topofomas que se encuentran son: sierra baja con cañadas donde se localiza la población de San diego El Naranjo; valle abierto de montaña con lomeríos; llanura aluvial de piso rocoso o cementado con lomeríos, en la población del Resbalón, sierra alta con lomeríos, la cual se localiza al este, norte y sureste del poblado Rosa Morada; lomeríos con llanuras, ubicado al noroeste de Rosa Morada y al noreste de Santiago Ixcuintla; valle abierto de montaña, al este de la localidad Ruíz.

En el área de influencia del proyecto, está expuesto un conjunto de sierras y lomeríos de relieve irregular, con fuertes pendientes y diversas altitudes, cuya expresión topográfica disminuye hacia el occidente, hasta formar la planicie costera. Las mayores expresiones orográficas corresponden a los cerros Las Cruces y El Espinazo del Diablo (La Soyamichera), con elevaciones del orden de 710 y 610 m.s.n.m., respectivamente.

Las formas del relieve dominante han sido modeladas sobre un potente paquete de rocas piroclásticas de composición ácida, que fueron depositadas sobre una antigua superficie de rocas andesíticas cuya actitud, en ambos casos, fue modificada por fallas de tipo normal y el emplazamiento de cuerpos intrusivos, dando lugar a una serie de montañas en bloque, basculadas hacia el noreste.

#### **d) Hidrología**

Según la clasificación del año de 1958, de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, el territorio estatal queda comprendido en cuatro regiones hidrológicas: RH-11 Presidio-San Pedro, RH-12 Lerma Santiago, RH-13 Huicicila y RH-14 Ameca, a su vez cada región se subdivide en cuencas y subcuencas.

El área de estudio comprende la Región Hidrológica Presidio-San Pedro, cayendo dentro de la Cuenca (A) Río San Pedro, la cual se localiza en la porción oriental y sur de la región.

El río San Pedro Mezquital y sus tributarios drenan completamente la zona de norte-sur para terminar desembocando sus aguas en el Océano Pacífico. Están controlados por el patrón estructural regional; forman valles fluviales con partes encajonadas de sección en "V" que alternan con otras de mayor amplitud, donde pierden capacidad de arrastre de su carga de fondo, lo que permite establecer un nivel de erosión del río en una etapa de madurez temprana.

## **2 TRABAJOS REALIZADOS**

### **2.1 Geología Regional**

#### **a) Litología**

Las unidades litológicas que se presentan en el área corresponden a rocas ígneas extrusivas e intrusivas, del período Terciario, parcialmente cubiertas por depósitos de materiales no consolidados recientes. La base de la secuencia litológica está formada por rocas de composición andesítica, de la unidad (Tom-ata), las cuales están cubiertas discordantemente por ignimbritas riolíticas de la unidad Las Cruces (Tm-ic); esta unidad subyace a la secuencia de tobas e ignimbritas riolíticas de la unidad Corapan (Tm-ct1-4 y Tm-ci1-3), la que a su vez está cubierta por otro paquete de ignimbritas riolíticas, denominado unidad La Soyamichera. En conjunto, estas rocas fueron afectadas por el emplazamiento de cuerpos intrusivos de composición granodiorítica (Tm-gd), andesítica (Tm-pa) y diabásica (Tm-p-dd). Los depósitos no consolidados corresponden a la acumulación de suelo residual, material aluvial y de depósito de talud. En la (Figura 2.1), se presenta la columna litológica, de la más antigua a la más reciente respectivamente.

#### **Unidad andesítica (Tom-ata)**

Sus afloramientos están restringidos al norte, en ambas riberas del río San Pedro y en la zona de confluencia de los arroyos; Los Limos y Las Mojarras. Compuesta por la intercalación de brechas, derrames y tobas andesíticas; las primeras, son de estructura pseudoestratificada, de color gris oscuro con tonalidades verdosas, formadas por fragmentos angulosos a subredondeados de andesitas de hasta 20 cm de diámetro, contenidos en una matriz de grano fino, de color gris oscuro. Los derrames consisten de andesitas de color gris oscuro verdoso que intemperizan a gris oscuro pardusco a ocre rojizo, su textura varía de afanítica a porfídica y por lo general muestran una estructura masiva. Las tobas presentan un color gris oscuro verdoso con tonalidades violáceas, textura piroclástica y estructura pseudoestratificada a masiva; están compuestas por líticos angulosos a subredondeados de andesitas de 1,5 cm de diámetro, englobados en una matriz inequigranular compuesta por fragmentos de cristales de plagioclasa, máficos y óxidos de hierro diseminados.

El contacto inferior de la unidad andesítica no aflora en el área de estudio y el superior se estima discordante con las ignimbritas de la unidad Las Cruces.

Por su posición estratigráfica la unidad andesítica se asocia con el Complejo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Keizer, 1977), y se considera que en la zona de estudio sus afloramientos representan altos estructurales resultados de los procesos tectónicos que afectaron la región.

De acuerdo a estudios anteriores efectuados a rocas de composición similar de la cuenca vecina del río Santiago (Clark K. F., et al, 1979), se le asigna una edad Oligoceno-Mioceno Temprano.

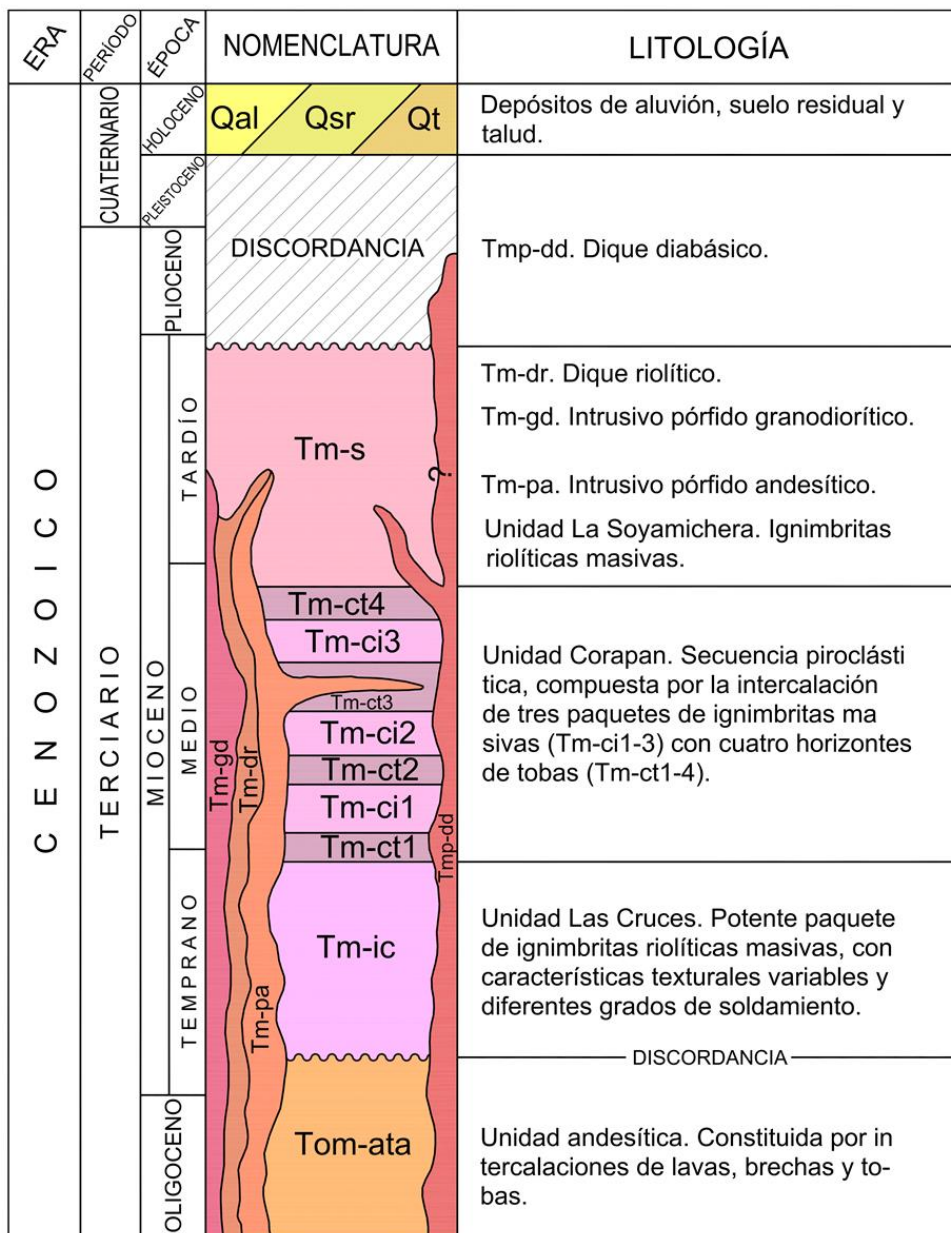


Figura 2.1 Columna Litológica regional.



## **Unidad Las Cruces (Tm-ic)**

Se trata de un potente paquete de ignimbritas de composición riolítica que aflora de manera extensa en la margen derecha, mientras que en la izquierda aflora en la parte baja, formando un acantilado.

Por sus características texturales y estructurales, esta unidad fue dividida en tres miembros cuyos contactos entre sí son graduales. El miembro inferior (1) corresponde a ignimbritas moderadamente soldadas de color rosa grisáceo, con textura piroclástica de grano fino y estructura pseudoestratificada a masiva, con planos de fluidez que provocan el lajeamiento de la roca. El miembro medio (2) está constituido por ignimbritas masivas, bien soldadas, con numerosas oquedades producto de la desvitrificación de la roca; muestra una textura piroclástica de grano medio, en ocasiones eutaxítica, y un color rosa grisáceo a pardo rojizo. El miembro superior (3) está representado por ignimbritas riolíticas de estructura masiva, fuertemente soldadas, con textura piroclástica eutaxítica, compuestas por fragmentos líticos riolíticos y andesíticos de diámetro variable, contenidos en una matriz de grano fino e inequigranular, formada principalmente por cristales de cuarzo y feldespatos. Como característica especial se puede mencionar su contenido abundante de “fiammes” pumicíticas y riolíticas.

El espesor de esta unidad se desconoce, pues su contacto inferior no aflora en el área de estudio; sin embargo, se supone discordante con la unidad de rocas andesíticas (Tom-ata), en tanto que su contacto superior es concordante con las tobas e ignimbritas de la unidad Corapan (Tm-ct1-4 y Tm-ci1-3).

Por sus características litológicas y posición estratigráfica, a la unidad Las Cruces se le considera como de edad Mioceno Temprano.

## **Unidad Corapan (Tm-ct1-4 y Tm-ci1-3)**

Corresponde a una secuencia formada por tres paquetes de ignimbritas riolíticas, intercalados con cuatro horizontes de tobas de la misma composición, con un espesor aproximado de 240m. Esta secuencia se distribuye en ambas márgenes del río San Pedro formando una franja alargada.

Las tobas ((Tm-ct1-4) son de color gris violáceo a rojizo, de textura piroclástica de grano fino a grueso y estructura pseudoestratificada a masiva. Contienen cantidades variables de fragmentos líticos subangulosos a subredondeados de composición andesítica y riolítica, con tamaños que van desde unos cuantos milímetros hasta 8 cm de diámetro aproximadamente, englobados en una matriz inequigranular de cristales de cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas y material volcánico fino. Con un grado de oxidación de moderado a intenso.

Las ignimbrítas (Tm-ci1-3) de la unidad Corapan presentan una textura piroclástica eutaxítica y estructura masiva. Están compuestas por rocas de color gris claro que contienen fragmentos líticos subangulosos a subredondeados de composición andesítica y riolítica, de 0,2 a 4 cm de diámetro, además de “fiammes” pumicíticas de 0,1 a 5 cm de longitud y cristales de cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas y biotita, englobados en una matriz de grano fino.

Las rocas de la unidad Corapan sobreyacen concordantemente a las ignimbrítas riolíticas de la unidad Las Cruces y están cubiertas de la misma manera por el paquete ignimbrítico de la unidad La Soyamichera. Su edad se estima en el Mioceno Temprano a Medio.

### **Unidad La Soyamichera (Tm-s)**

Esta unidad se distribuye principalmente en la porción oriente y norte-noroeste del área cartografiada; está representada por un potente paquete de ignimbrítas color rosa grisáceo que intemperizan a gris oscuro pardusco, de estructura masiva y textura piroclástica eutaxítica, formadas por fragmentos líticos andesíticos y riolíticos, con diámetro desde 0,5 a 4cm, con “fiammes” pumicíticas y riolíticas inferiores a 10 cm, así como con cristales de cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas y biotita.

La unidad La Soyamichera sobreyace a la secuencia de tobas e ignimbrítas riolíticas de la unidad Corapan. Su espesor total se desconoce, ya que en el área de estudio no aflora su contacto superior; sin embargo, en la zona está expuesto un espesor aproximado de 450 m. Por su posición estratigráfica se le asigna una edad Mioceno Medio a Tardío.

### **Intrusivo pórfido granodiorítico (Tm-gd)**

Se trata de un cuerpo irregular, de composición granodiorítica, que aflora en la porción norte de la región estudiada, entre los arroyos Las Mojarras y Caimanero II. Las rocas que lo constituyen exhiben textura porfídica y estructura masiva, son de color gris claro con tonalidades rosas a

pardo y contienen fenocristales de cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas, biotita y hornblenda, en una matriz afanítica. Este intrusivo afecta a las unidades Las Cruces, Corapan y la base de La Soyamichera, por lo que tentativamente se asigna al Mioceno Tardío.

### **Diques riolíticos (Tm-dr)**

Se tienen dos estructuras tabulares de tendencia vertical con espesor inferior a los 30 cm expuestas, una entre la ranchería La Sanguijuela y el Puerto Los Tepetates y otra al oriente del cerro Espinazo del Diablo, estos diques riolíticos muestran un color rosa grisáceo y una textura afanítica, por su composición ácida se asocian con el emplazamiento del pórfido granodiorítico, por lo que le asigna la misma edad.

### **Intrusivo pórfido andesítico (Tm-pa)**

Es una roca de color gris oscuro verdoso a violáceo, de composición andesítica, de textura porfídica, formada por fenocristales de plagioclasas y máficos contenidos en una matriz afanítica con óxidos de hierro diseminados, en forma de manto (sill), alojada entre los horizontes tobáceos Tm-ct3 y Tmct4 de la unidad Corapan, su mayor distribución es en la margen izquierda, en el sector sureste, donde intrusión a la unidad La Soyamichera, por lo que se considera que este cuerpo ígneo es contemporáneo al emplazamiento del intrusivo granodiorítico (Tm-gd), se le asigna una edad del Mioceno Tardío. Son rocas de composición andesítica (Orozco G. V. M y Vázquez R.R, 1977), de textura porfídica, formadas por fenocristales de plagioclasas y máficos contenidos en una matriz afanítica.

### **Diques diabásicos (Tm-p-dd)**

Cuerpos tabulares de composición andesítica a diabásica, que se presentan de manera aislada, con espesores variables entre 0,5 y 20 m y longitud hasta de 250 m. Por lo general corresponden a rocas de color gris oscuro verdoso, de textura afanítica y porfídica, que contienen fenocristales de plagioclasas, máficos y óxidos de hierro diseminados en una matriz afanítica. De acuerdo con Clark et (1979), el emplazamiento de este tipo de rocas se registra en la región a partir del Mioceno Medio, pero dado que se han observado afectando a rocas de niveles superiores, se estima que algunas de esas estructuras fueron emplazadas probablemente en el Plioceno.

## **Depósitos no consolidados (Qal, Qsr y Qt)**

En el área de estudio los materiales no consolidados están representados por suelo residual (Qsr), aluvión (Qal) y depósitos de talud (Qdt). El material aluvial está compuesto por bloques, gravas y arenas de diferente composición, mal clasificadas, que se distribuyen principalmente en ambas riberas del río. Los depósitos de talud corresponden a fragmentos de roca y material areno-arcilloso acumulados al pie de las zonas con cambios fuertes de pendiente; con bloques de roca de hasta 10 m de diámetro. El suelo residual exhibe espesores variables y se distribuye de manera irregular en la zona, cubriendo parcialmente a las unidades de roca, se le asigna edades del Cuaternario.

## **b) Geología Estructural**

Los rasgos estructurales expuestos en el área a nivel regional, corresponden a fallas de tipo normal, lineamientos, fracturas y emplazamientos de cuerpos intrusivos. El resultado de estos esfuerzos provocó el basculamiento de las unidades litológicas hacia el noreste, con una intensidad muy variable en la inclinación de sus capas, entre 5 y 58°.

Destacan las fallas normales y lineamientos por su relativa frecuencia y marcada tendencia estructural al noroeste-sureste, con buzamiento hacia el suroeste, existen dos sistemas principales, uno orientado de manera preferencial al N 28° W/78° SW y otro de rumbo N 54° W/80° SW, (figura 2.2).

Sobresalen en la zona las fallas: Rosario Viejo, fallas Los Limos, Los Bueyes, Las Cruces, Arroyo Hondo, PHC-1 y el lineamiento Las Peñas (ver plano regional), La cuales forman parte de la Familia 1, mientras que las fallas de la Familia 2 pertenecen a las estructuras La Soyamichera, Piedra Parada, PHC-4, PHC-5, PHC-6, El Cantil, El Risco y Bordones, entre otras de menor importancia.

Por lo general, las estructuras muestran en superficie una traza irregular, cuya expresión más notable se refiere a zonas de espesor variable de roca triturada, con planos de falla alabeados de tendencia vertical.

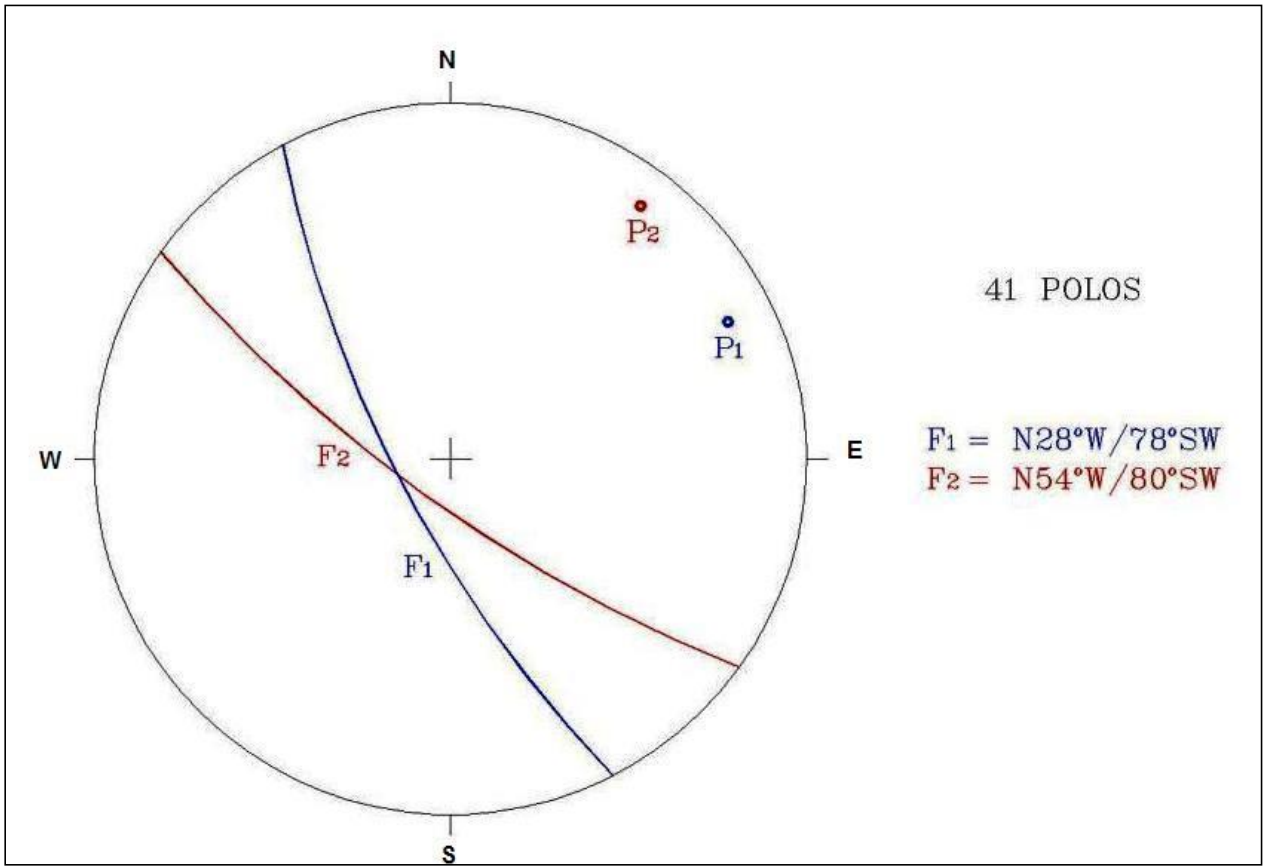


Figura 2.2 Estereograma de fallas regionales P.H Las Cruces.

## **2.2 Geología**

### **a) Litología**

Se llevaron a cabo levantamientos geológicos superficiales, realizados en la zona de estudio de la alternativa “Las Cruces”, complementados con exploración del subsuelo, con estudios de geofísica (sísmica y eléctrica) y estudios directos de perforación, donde se recuperaron núcleos de roca y se realizaron pruebas de permeabilidad tipo Lugeón. Con base en todo lo anterior se determinaron las características de las unidades más importantes del sitio, donde las rocas expuestas en la zona de influencia de la boquilla están representadas por las ignimbritas riolíticas de la unidad Las Cruces (Tm-ic1-3) y por las tobas (Tm-ct1-4) e ignimbritas (Tm-ci1-3) de la unidad Corapan. Afectan a la primera algunos diques diabásicos (Tm-p-dd) de reducidas dimensiones, en tanto que emplazado en la segunda y en forma de manto (sill) se tiene a un pórfido andesítico (Tm-pa); por último, cubriendo parcialmente a las unidades anteriores, se encuentran los depósitos no consolidados: aluvión (Qal), suelo residual (Qsr) y depósitos de talud (Qdt).

A continuación se describirán estas unidades de la más antigua a la más reciente, (figura 2.3).

#### **Unidad Las Cruces (Tm-ic)**

Constituye la base de la secuencia en la zona, compuesto por un potente paquete de ignimbritas riolíticas con características de soldamiento diferencial y cambios texturales notables, por lo que ha sido dividida en tres miembros, debido a sus distintas variaciones.

El miembro inferior (Tm-ic1) corresponde a la base de este paquete ignimbrítico y está constituido por rocas de color rosa grisáceo, seudoestratificadas a masivas, compactas y muy resistentes, de textura piroclástica de grano fino, caracterizadas por formar lajas, las cuales se separan a través de los planos de fluidez (Fotografía 2.1). Petrográficamente se clasifica como ignimbrita desvitrificada de grano fino con vetillas de calcita, (ver muestras Anexo). Los minerales esenciales son esquistos vítreos, cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa sódica, mientras que como secundarios están los minerales arcillosos, hematita y calcita.

ERA	PERIODO	EPOCA	NOMENCLATURA	LITOLOGÍA	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qal / Qsr / Qt	Depósitos de aluvión, suelo residual y talud.	
		PLEISTOCENO			
	TERCIARIO	PLIOCENO		DISCORDANCIA	Tmp-dd. Diques diabásicos.
		MIOCENO		Tm-ct4	Tm-pa. Intrusivo pórfido andesítico.
				Tm-ci3	
				Tm-ct3	
				Tm-ct3	Unidad Corapan. Compuesta por la intercalación de tres paquetes de ignimbritas riolíticas masivas, con cuatro horizontes de tobas de la misma composición.
				Tm-ci2	
				Tm-ct2	
	Tm-ci1	Unidad Las Cruces. Formada por paquetes de ignimbritas riolíticas, que fueron diferenciados de acuerdo a sus características texturales y estructurales.			
	Tm-ct1				
		Tm-ic3			
		Tm-ic2			
		Tm-ic1			

Figura 2.3 Columna Litológica, marco geológico del sitio.

Las rocas del miembro inferior se distribuyen en la parte baja de ambas márgenes, inmediatamente aguas abajo del eje de cortina; la base no se observa, por lo que no se pudo

determinar su espesor, en tanto que el contacto superior con el miembro medio de esta misma unidad litológica es gradual.



**Fotografía 2.1 Aspecto del Miembro inferior de la ignimbrita Las Cruces (Tm-ic1), aguas abajo del eje de boquilla.**

El miembro medio (Tm-ic 2) es una ignimbrita de color rosa grisáceo que intemperiza igual que las rocas del miembro anterior, a un material blanquecino deleznable, pero de espesor no mayor a los 30 cm, roca masiva muy compacta, resistente, con textura piroclástica de grano medio; los minerales esenciales son fragmentos pumicíticos, cuarzo y feldespatos, siendo la característica principal de este miembro el desarrollo de oquedades y vacuolas por desvitrificación de hasta 5 cm de diámetro; también en ocasiones presenta “fiammes” pumicíticas de 1,5 cm de longitud y líneas delgadas de fluidez menores de 1 mm de espesor por 6 cm de longitud.

Este horizonte igualmente aflora en ambas márgenes, aunque en mayor proporción en la margen derecha. El espesor aproximado para este miembro varía de 65 a 100 m.

El miembro superior (Tm-ic3) constituye la cima de la unidad Las Cruces y está formado por una ignimbrita riolítica con alto grado de soldamiento. Es una roca con estructura compacta masiva, densa, de alta densidad y mecánicamente muy competente. Su textura es piroclástica eutaxítica y su coloración varía de gris rosáceo en fractura fresca a pardo y gris oscuro al



intemperismo; presenta lentes rojizas y blanquecinas. La diferencia con el miembro medio es que exhibe menos cantidad de cavidades y oquedades provocadas por desvitrificación, pero en cambio presenta abundantes “fiammes” riolíticas y pumicíticas con longitud y espesor variables de hasta 40 y 5 cm. Macroscópicamente se le observan cristales de cuarzo, feldespatos, ferromagnesianos y fragmentos líticos subangulosos de 1 a 5 cm de diámetro.

Al microscopio petrográfico presenta textura eutaxítica, minerales esenciales como cuarzo, sanidino, oligoclasa y fragmentos de roca riolítica y andesítica oxidados; como accesorios únicamente zircón y minerales opacos y como secundarios minerales arcillosos y abundantes óxidos de hierro, todos ellos englobados en una matriz vítrea desvitrificada; la roca se clasificó como una ignimbrita riolítica (muestra 07-78 Apéndice A). Su distribución es amplia en las dos márgenes, aunque predomina en la margen derecha coronando las partes altas; su contacto inferior es transicional, observándose un espesor aproximado de 150 m.

### **Unidad Corapan (Tm-c)**

Se encuentra en la margen izquierda cubriendo concordantemente a la unidad Las Cruces. Constituida por la alternancia de cuatro horizontes de tobas riolíticas con tres paquetes de ignimbritas de la misma composición. Los miembros tobáceos (Tm-ct1-4), en roca fresca se presentan, compactos y densos.

Las tobas tienen textura piroclástica, varían de grano fino a grueso con fenocristales de feldespatos, cuarzo, máficos (hornblenda y biotita) y óxidos de hierro, en una matriz criptocristalina cuarzo-feldespática por desvitrificación. La coloración varía de gris violáceo a rojizo. Es muy frecuente la alteración por hematización, que afecta a estos horizontes a tal grado que en ocasiones se observan espesores importantes de material arcillo-arenoso cubriendo a la roca sana; en zonas donde convergen fracturas o fallas importantes, las tobas se reducen a fragmentos de escasos centímetros de diámetro, tal es el caso del horizonte (Tm-ct1), donde atraviesan las fallas Las Cruces y El Cantil.

En el área de la boquilla aparecen tres horizontes a lo largo de toda la margen izquierda con espesores de 25 a 40 m en promedio. El horizonte Tm-ct1 corresponde a la base de la unidad Corapan y es el que se encuentra cubriendo a la unidad Las Cruces, se caracteriza por estar afectado por las fallas Las Cruces, El Cantil y El Mango; estas dos últimas, ubicadas aguas abajo del eje, en la margen izquierda. El horizonte Tm-ct2 se distribuye en forma paralela a la falla Los Bueyes, presenta las mismas características mecánicas que los otros y alcanza un

espesor aproximado de 25 m. Finalmente el horizonte Tm-ct3 se encuentra en el límite oriente del área estudiada, donde exhibe intercalado con un pórfido andesítico de 10 a 15 m de espesor. La toba de este horizonte se encuentra alterada, muy hematizada como consecuencia de la intrusión del pórfido antes mencionado, lo que ha disminuido en gran medida su calidad de roca.

Los tres paquetes ignimbríticos de la unidad Corapan (Tm-ci1-3), son rocas con estructura compacta, masiva, mecánicamente competentes, con alteración (hematizadas), de textura piroclástica eutaxítica y de coloración gris clara a rosácea, siendo muy susceptibles de caolinizarse y en menor grado de silicificarse. Los minerales observables son cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas, minerales arcillosos y hematita, así como fragmentos líticos, todos ellos contenidos en una matriz criptocristalina cuarzo-feldespática por desvitrificación. Se observan “fiammes” pumicíticas de 0,5 a 5 cm de longitud por 0,5 cm de espesor; algunas veces también muestra oquedades por erosión de la pómez y fragmentos de roca subangulosos de 0,1 a 1 cm de diámetro.

Este paquete de ignimbritas tiene un espesor que varía de 25 a 40 m en promedio. El horizonte Tm-ci1 es el que se encuentra más ampliamente distribuido, formando partes planas o inclinadas; es notable la mayor resistencia a la erosión con respecto a las tobas entre las que se encuentra intercalado, pues su amplia exposición comparada con estas últimas es muy marcada.

El horizonte ignimbrítico Tm-ci2 igualmente se encuentra formando una parte plana y escalonada, aunque un poco menos expuesto que el anterior, se localiza al este de la falla Los Bueyes y en forma paralela a esta misma. Por último, el miembro Tm-ci3 aflora parcialmente en el extremo noreste del área de estudio.

En general, las rocas de la unidad Corapan están basculadas al noreste con una inclinación de 20° a 25°. Topográficamente forman escalones por la resistencia a la erosión entre tobas e ignimbritas (Fotografía 2.2).



**Fotografía 2.2** Alternancia de tobas e ignimbritas de coloración blanquecina de la unidad Corapan, afloran en la margen izquierda de la boquilla.

### **Intrusivos**

El cuerpo pórfido andesítico (Tm-pa) emplazado en forma de diquestrato dentro del horizonte tobáceo Tm-ct3, corresponde a una roca de estructura compacta, masiva, muy densa, de alta dureza y resistencia mecánica. Presenta hematización, propilitización y silicificación; tiene textura afanítica a porfídica y es de color gris verdoso a rojizo. Se clasifica como pórfido andesítico de piroxenos y microscópicamente se observaron plagioclasas sódicas (oligoclasa y andesina) como minerales esenciales; piroxenos (augita) y minerales opacos como accesorios; en tanto que como secundarios aparecen los óxidos de hierro, clorita y sericita. La textura es porfídica y la matriz microlítica de plagioclasa, con piroxenos y olivino (muestras 20-96 y 87-96).

Los diques diabásicos (Tmp-dd) son cuerpos tabulares con actitud vertical a subvertical emplazados en las rocas piroclásticas antes descritas. Dentro del área de la boquilla se localizan en la margen izquierda. El primero de ellos se ubica en el miembro Tm-ic3 de la unidad Las Cruces, aflora aproximadamente a lo largo de 400 m con un espesor promedio de 1,50 m. Se observa compacto, denso, de color gris oscuro a verdoso y textura afanítica; ocasionalmente muestra alteración propilítica. Su orientación es casi norte-sur con una inclinación de 88° al oeste.

El segundo dique se encuentra emplazado en el horizonte tobáceo Tm-ct3 de la unidad Corapan, mide aproximadamente 250 m de longitud y tiene 1,50 m de espesor; es una roca compacta, muy resistente, densa, de textura afanítica y coloración gris oscura a verdosa; presenta un rumbo N 20° W/75° NE.

El tercer dique se ubica en el extremo sur, afecta al miembro Tm-ic3 de la unidad Las Cruces, con un rumbo N 15° W y 87° de inclinación al SW; se observa aflorando en un tramo de aproximadamente 50 m con espesor de 1,20 m; muy alterado y presenta una coloración gris verdosa, superficialmente es deleznable, poco compacto y de textura afanítica a porfídica. Al microscopio fue clasificado como diabasa, teniendo como minerales esenciales a la labradorita y andesina; como accesorios al apatito, pigeonita, minerales opacos y augita y secundarios a la hematita, sílice y clorita.

### **Aluvión (Qal)**

Está formado por fragmentos de diferente composición y tamaño variable que va desde material limo-arenoso hasta fragmentos subredondeados de 2 a 3 m de diámetro. Se distribuye en ambas márgenes del río San Pedro, aguas arriba y abajo del eje de la boquilla, con espesores no mayores a los 8 m.

### **Suelo residual (Qsr)**

Compuesto por material arcillo-arenoso, originado por la desintegración in situ de las rocas expuestas en la zona; es de color rojizo o blanquecino. Depositado principalmente en las partes planas de la margen izquierda, con espesores que no rebasan los 3 m.

### **Depósitos de talud (Qdt)**

Los depósitos de talud (Qdt) presentan fragmentos líticos angulosos a subangulosos, de tamaños variables que van desde bloques de 5 cm hasta 5 m de diámetro, empacados en una matriz arcillo-arenosa. Se encuentran distribuidos en ambas márgenes principalmente en las porciones medias de las laderas con espesores de 1 a 4 m.

## **b) Discontinuidades**

### **Fallas**

Las fallas en el área son de tipo normales con rumbo preferencial NW-SE. Se consideran 5 de ellas como las más importantes, de acuerdo con su continuidad y zona de influencia, estas son: falla Los Bueyes, falla El Cantil, falla Las Cruces, falla Bordones y falla PHC-2.

#### **Falla Los Bueyes**

Esta falla se encuentra alineada en forma longitudinal al río en la margen izquierda; sus límites quedan fuera del área de la boquilla, con variaciones en su actitud (N 15-30° W/72-80° SW); en la parte sur del área se manifiesta cerrada, mientras que en la parte norte, se observa continua y bien definida; representada por relices o planos separados, en ocasiones alcanzan 8 m de altura (Fotografía 2.3). El espacio entre paredes en ocasiones se ve relleno por fragmentos de roca de diferente tamaño y en otras ocasiones se observa descubierto con superficies sin estrías. Esta estructura fue explorada mediante el barreno PHC-3, tal barreno cortó a esta falla en el intervalo que va de 40,50 a 47,00 m y se caracteriza por estar emplazada por un dique diabásico, el cual se encuentra muy fragmentado, alterado y en ocasiones con material brechoide en una matriz arcillosa de color rojo oscuro.

A la altura del eje se une con otra falla de menor importancia con orientación variable de N 20-30° W y buzamiento de 77 a 80° al SW; está representada por un plano con una continuidad aproximada de 550 m. aunque en algunos tramos se comporta como una fractura cerrada, pero en ambos extremos muestra una abertura entre planos de 2 a 3 m, sin notarse movimiento.



**Fotografía 2.3** Expresión de la falla Los Bueyes, aguas abajo del eje, donde forma escarpes de hasta 8 m de altura.

### **Falla El Cantil**

Esta estructura se localiza en la margen izquierda de la boquilla, teniendo sus límites al oeste y a la altura del cauce del río La Falla PHC-2, no se ve continuidad en la margen derecha, en tanto que hacia el este se interrumpe con la falla Los Bueyes, se le asigna una longitud aproximada de 800 m; rumbo general de NW-SE con variaciones de 65 a 80° y buzamiento que va de 70 a 80° al SW (Fotografía 2.4); de traza ondulada ligeramente convexa al NE, en ocasiones se observa material triturado o brecha de falla de 2 m de espesor.

El extremo que da al cauce del río no se observa, debido a que se encuentra cubierto por depósitos no consolidados, pero por métodos geofísicos se detectó que esta estructura continúa todavía al nivel del playón. Por lo que respecta al extremo opuesto, se desplaza sobre la toba Tm-ct1 de la unidad Corapan, observándose únicamente la alteración de la roca, pero no la falla; sin embargo, con las secciones de geofísica se determinó su continuidad. El barreno PHC-2 exploró la falla, por lo que se observó sus características en los tramos de

43,00 a 45,50 m y de 48,50 a 54,00 m. El primer intervalo se asocia a una estructura secundaria paralela a la falla El Cantil, en tanto que el segundo corresponde a esta última; en ambas estructuras se recupera material muy fragmentado, triturado y estrías, en ocasiones material arcilloso hematizado.

En la parte acantilada se muestra planos estríados, ondulados a rugosos, con un salto estructural que no rebasa los 5 m. En forma paralela a ésta, existe otra falla de menor importancia.

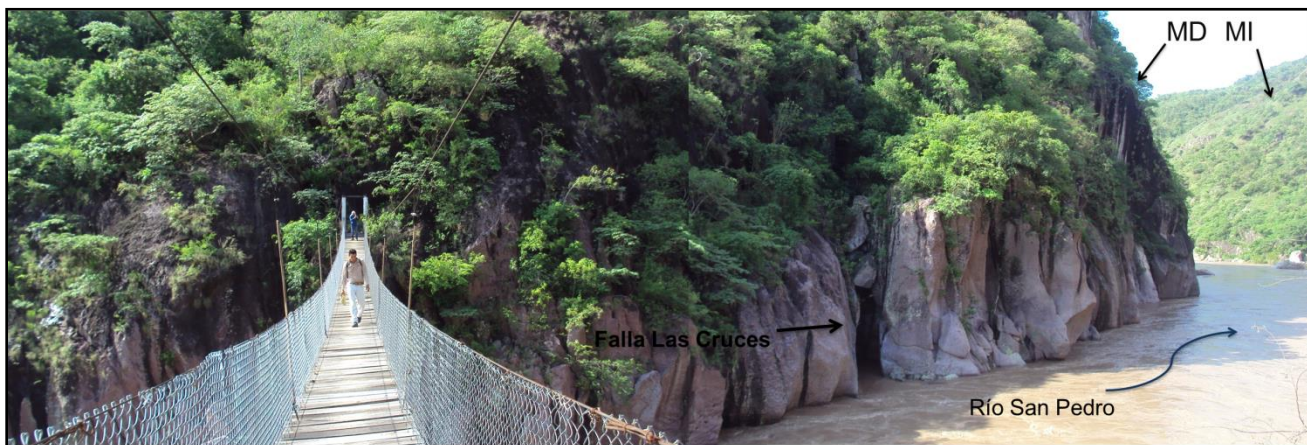


**Fotografía 2.4** Falla El Cantil en la ladera de la margen izquierda.

### **Falla Las Cruces**

Se localiza en su mayor parte en la margen izquierda, aunque en su extremo norte atraviesa el río y pasa a la margen derecha; su orientación es N 20° W con buzamiento de 85° al SW. En ambas márgenes, al nivel del río, presenta entre 5 y 7 m de ancho. En la margen derecha exhibe estructuras variables en forma y actitud, con superficies planas a onduladas y rugosas, además de una zona de brecha tectónica de 70 cm de espesor; en cambio en la margen izquierda esta estructura a nivel del cauce se observa abierta con un máximo de 4,20 m de ancho disminuyendo hacia el interior a 2,30 m (Fotografía 2.5). Se encuentra rellena por

bloques de tamaño variable y material areno-arcilloso, muestra una forma irregular, alabeada y planos ondulados.



**Fotografía 2.5** Panorámica de la falla Las Cruces vista desde la margen derecha del río San Pedro; se observa apertura de esta estructura por erosión.

La falla en el sitio muestra una zona cizalla de 60 a 80 cm de espesor, siendo su traza de forma sinuosa y la zona de influencia de aproximadamente 15 m sobre la ignimbrita de la unidad Las Cruces.

### **Falla Bordones**

Esta falla se ubica en la parte alta de la margen derecha, (ver plano geológico del sitio), con un rumbo general N 60°-80° W y una inclinación de 45° a 52° al SW; a lo largo de varios metros coincide con la depresión del arroyo El Fortín. Se observó cerrada con una zona de falla de 1 a 3 m de espesor, con material de falla de 1 a 2 m. En el cruce con la sección del eje se observa un reliz de 3 m de alto, plano rugoso, con rumbo N 80° W e inclinación de 48° al SW. Muestra un relleno de material arcilloso de 50 cm de espesor, pero en su mayor parte el contacto es roca a roca. Su traza es sinuosa, su salto estructural no fue posible determinarlo, ya que se carece de horizontes índice (Fotografía 2.6).





**Fotografía 2.6** Falla Bordonos, presenta una actitud N 80° W/48° SW. Su traza está definida por una pared plana rugosa.

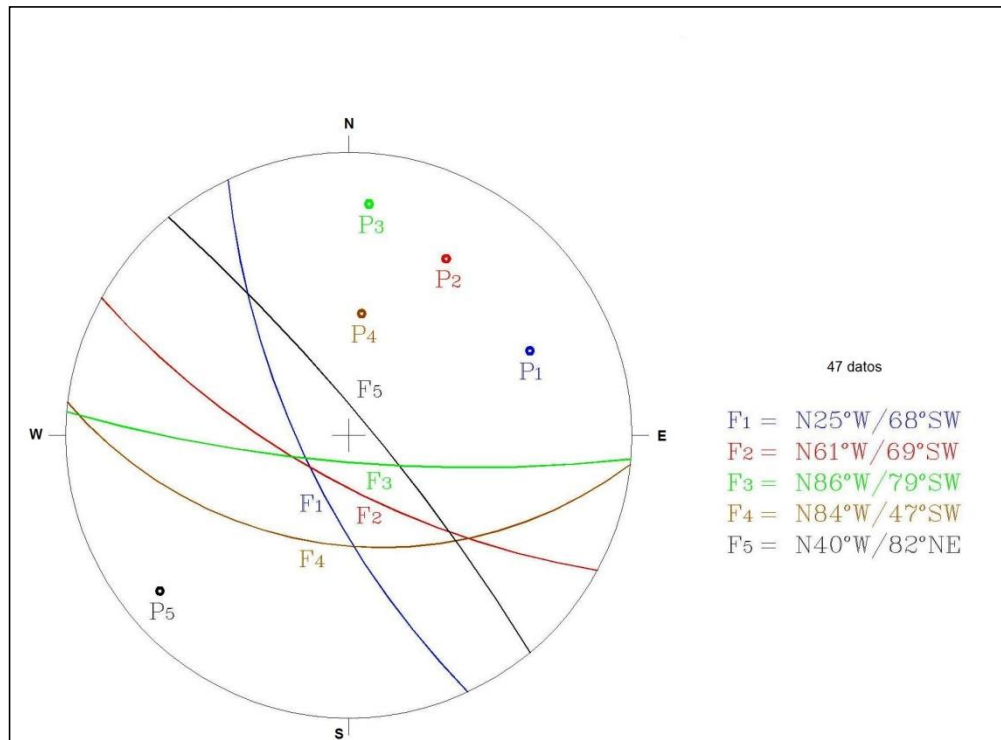
### **Falla PHC-2**

La falla PHC-2 se presenta en la margen derecha, con una longitud aproximada de 550 m y una orientación N 35° W/75° SW, se observa el reliz de la falla rugoso y ondulado con rumbo N 30° W con 75° de buzamiento al SW, siendo el contacto roca-roca. En el extremo norte se encuentra cubierta por depósitos de talud, en tanto que en la parte sur atraviesa en forma diagonal al cauce del río, y se infiere su continuidad de acuerdo con el barreno CR-1 por el cual fue cortada; además con esta misma perforación fue atravesado un dique diabásico emplazado posiblemente en dicha estructura. No se tienen evidencias de su continuidad en la margen izquierda.

En la tabla 2.1 se indican de manera resumida las características de las fallas que afectan al macizo rocoso en la zona de la boquilla.

	Ubicación	Rumbo	Espesor máximo (m)	Relleno	Longitud (m)	Características generales
Los Bueyes	Margen izquierda	N15-30°W/ 72-80°SW	15	Roca triturada	550	Superficialmente se observa sin estrías con planos lisos y en ocasiones rugosos.
El Cantil	Margen izquierda	N65-80°W/ 75-80°SW	25	Roca triturada	800	Es de traza sinuosa, con paredes onduladas y estrías.
Las Cruces	Margen izquierda	N20°W/ 80-85°SW	15	Roca triturada	850	Alcanza aberturas hasta de 3 m con relleno de material arcilloso o grava-arena.
Bordones	Margen derecha	N60-80°W/ 45-52°SW	4	Roca triturada	500	Se observa sin relleno, siendo el contacto roca-roca.
PHC-1	Margen derecha	N30°W/ 75°SW	1 - 2	-	400	Se encuentra cerrada estando el contacto roca-roca.
PHC-2	Margen derecha	N30-35°W/ 68-75°SW	5	Roca triturada	550	Fue cortada por el barreno CR-1, encontrándose roca muy triturada.
PHC-3	Margen derecha	N48°W/ 62-70°SW	2	-	300	No se observan estrías ni material de falla.
Escarpe	Margen izquierda	N10°W/ 70-75°NE	2	Roca triturada	150	El plano de falla tiene estrías verticales. Esporádico material de falla.
Cerro Partido	Margen derecha	N5-25E°/ 68-85°SW	1 - 2	Roca triturada	200	Presenta material triturado como relleno.
El Mango	Margen izquierda	N50°W/ 88°NE	1 - 2	Roca triturada	400	Forma un aparente graben en conjunto con la falla El Cantil.
El Risco	Margen derecha	N60-70°W/ 70-76°SW	1	Roca triturada	270	Ocasionalmente presenta relleno de material de falla.

**Tabla 2.1 Resumen de las principales fallas en la zona de la boquilla.**



**Figura 2.4 Estereograma de Fallas en zona de boquilla.**

### Fracturas

En la zona de la boquilla se llevó a cabo un levantamiento del fracturamiento existente, totalizando 297 datos en la margen derecha y 253 en la margen izquierda. En la primera, la toma de datos fue exclusivamente sobre la unidad Las Cruces, mientras que en la segunda se tomaron los datos de las unidades Las Cruces y Corapan, en proporción menor. De acuerdo con la información obtenida el fracturamiento en el sitio es muy persistente, tiene una continuidad de 10 a 30 m en promedio, aunque en ocasiones hay algunas fracturas que alcanzan hasta 100 m de longitud. En general la frecuencia es de 1 a 2 estructuras por metro, de traza regular plana a irregular con superficies onduladas rugosas; sus aberturas varían de 2 a 8 cm con relleno de suelo y fragmentos de roca. También existe fracturamiento con planos cerrados en contacto roca-roca.

Los datos estructurales se analizaron separadamente, en primer término en la margen derecha arrojan dos sistemas (Figura 2.5):

$$F_1 = N 28^\circ W / 78^\circ SW$$

$$F_2 = N 54^\circ W / 80^\circ SW$$

El sistema F1, es el sistema estructural representativo del área, pues es el mismo que también resultó para las fallas. Este fracturamiento es predominante con una continuidad de 10 a 30 m, espaciamiento de 1 a 2 planos por metro, de traza irregular y de superficie ondulada rugosa. El F<sub>2</sub> es menos persistente, de continuidad variable, 2 a 3 fracturas por metro, traza regular a irregular y muestra superficies onduladas rugosas.

En la margen izquierda los sistemas preferenciales de fracturamiento que se determinaron observan el siguiente comportamiento (Figura 2.5):

$$F_1 = N 04^\circ W / 86^\circ SW$$

$$F_2 = N 60^\circ W / 83^\circ SW$$

Por lo que respecta a las características del fracturamiento de esta margen, son muy semejantes a las de la margen anterior, incluyendo las que se localizan sobre la unidad Corapan. Ambas márgenes presentan gran similitud en sus sistemas de fracturamiento, así como en sus características físicas.

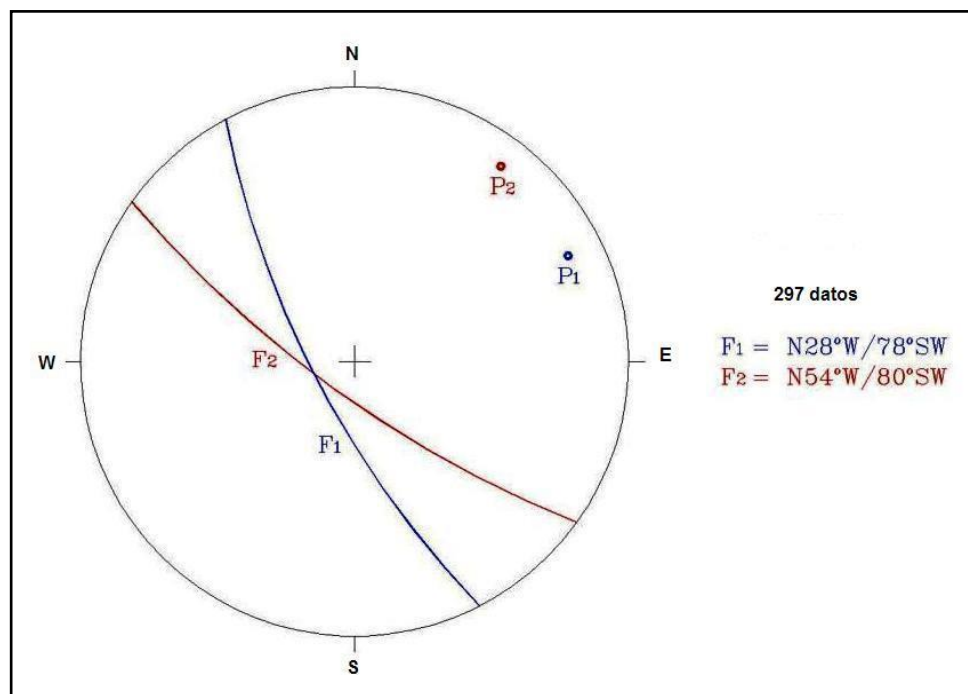
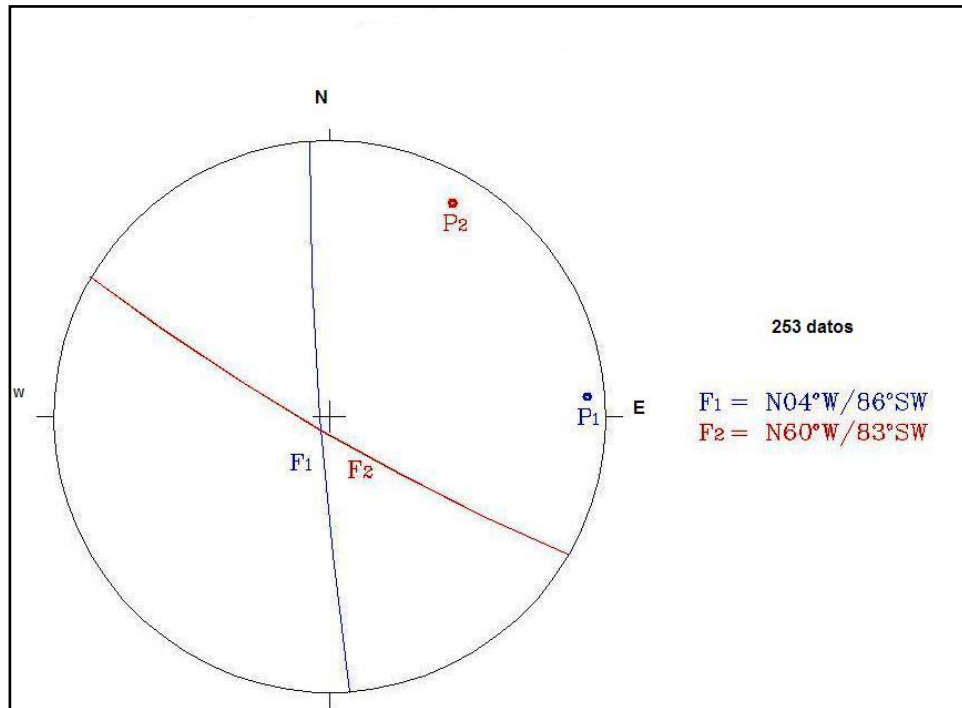


Figura 2.5 Estereograma de fracturas margen derecha.

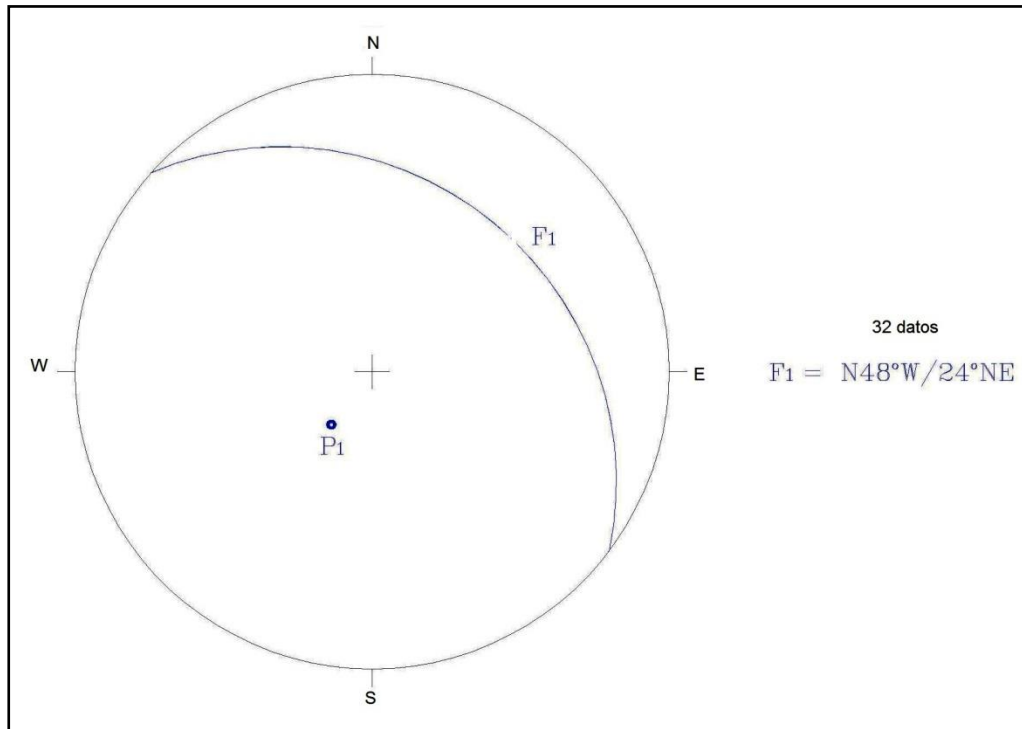


**Figura 2.6 Estereograma de fracturas de margen izquierda**

### **Seudoestratificación**

Es característica de la Unidad Corapan, donde los horizontes son más delgados, de 0,5 a 3 m, predominando esta característica en los horizontes tobáceos; en la unidad Las Cruces se presenta en el miembro Tm-ic1, una seudoestratificación delgada a gruesa que varía de 0,15 a 3 m de espesor.

Cabe notar que en la margen izquierda se nota un arqueamiento en los paquetes del miembro Tm-ic3 de la unidad Las Cruces. Hacia aguas arriba se va clavando hasta desaparecer a la altura de la falla Los Bueyes, al nivel del río, mientras que hacia aguas abajo su inclinación es menor al interrumpirse con la depresión ocasionada por el arroyo El Tigre. A nivel local todos los seudoestratos siguen la tendencia de dicho arqueamiento, originado posiblemente por los cuerpos intrusivos cercanos. Se levantaron en campo 32 datos de rumbo y echado, donde se define el sistema preferencial, el cual tiene una actitud N 48° W/24° NE, figura 2.7.



**Figura 2.7 Estereograma de la pseudoestratificación en la zona de la boquilla**

### **C) Perforación con Diamante**

La perforación con recuperación de núcleos da a conocer con mayor detalle las características del subsuelo y de algunas estructuras, así como determina la permeabilidad y calidad del macizo rocoso. Se realizaron 7 perforaciones en diámetro NQ, dos en el cauce del río y cinco en margen izquierda.

De los 543,20 m perforados, 522,05 m se perforaron en roca y 21,15 m en material aluvial. De los barrenados en roca 424,65 m fueron en la margen izquierda y 97,40 m en el cauce del río. Los barrenos perforados en la margen izquierda son: PHC-1, PHC-2, PHC-3, CR-2 y CRI-3, en donde se recuperaron 383,21 m de muestra, lo que equivale a un 90,24%; mientras que en el cauce los 97,40 m de perforados fueron por medio de los barrenos PHC-4 y CR-1, con los que se obtuvieron 87,13 m de roca para dar una recuperación de 89,46%, como se puede ver, el promedio de recuperación de todos los barrenos es de 90,09%, siendo esto muy representativo para el macizo rocoso existente en la zona de la boquilla.

BARRENO	RECUPERACIÓN %	RQD %	PROFUNDIDAD m	CALIDAD DE ROCA
PHC-1	98	71	136,35	Regular
PHC-2	92	68	101,5	Regular
PHC-3	95	72	80,2	Regular
PHC-4 cauce	97	68	52,2	Regular
CR-1 cauce	83	38	37,5	Mala
CR-2	77	25	66,15	Muy mala
CR-3	86	62	69,1	Regular

**Tabla 2.2 Promedio general de la recuperación y RQD obtenidos en cada barreno**

### Calidad de Roca (RQD)

La calidad de roca está basada en la recuperación de núcleos obtenidos con la perforación y fue determinada de acuerdo al criterio de Deere (1964), conocido como Rock Quality Designation (RQD) o índice de calidad de roca de Deere y cuya definición involucra el porcentaje de núcleos que se recuperan en piezas enteras iguales o mayores a 100 mm.

$RQD \% = 100 \times (\text{Suma total de la longitud de los núcleos mayores de 100 mm} / \text{Longitud total del tramo perforado})$ .

RQD	CALIDAD DE ROCA
0 a 25%	Muy mala
>25 a 50%	Mala
>50 a 75%	Regular
>75 a 90%	Buena
>90 a 100%	Muy buena

**Tabla 2.3 Criterio de Deere, entre el valor obtenido y su correspondiente valor en calidad de roca.**

En la margen izquierda la calidad de roca alcanzó un porcentaje de RQD del 64,58%, de los 424,65 m perforados; en el cauce del río los 97,40 m perforados equivalen a 50,85%

de RQD. Promediando los siete barrenos ejecutados en la zona del proyecto se obtuvo un porcentaje del 62,02% de RQD.

De acuerdo con estos datos y tomando en cuenta el criterio establecido, el macizo rocoso de la margen izquierda y cauce del río se clasifica como de regular calidad. Cabe aclarar que el RQD disminuyó en gran medida, debido a que algunos de los barrenos atravesaron fallas o se fueron cortando fracturas, ocasionando con esto que en esos intervalos el RQD alcanzara un porcentaje de cero (ver tabla 2.4).

Ubicación	Roca Perforada	Roca Recuperada	Roca > 10 cm (m)	Recuperación promedio (%)	RQD Promedio %
Margen izquierda	424,65	383,21	274,23	90,24	64,58
Cauce del río	97,4	87,13	49,53	89,46	50,85
TOTAL	522,05	470,34	323,76	90,09	62,02

**Tabla 2.4 Resumen de la Recuperación y RQD**

#### **Pruebas de permeabilidad.**

Se realizaron pruebas de permeabilidad tipo Lugeon a cinco barrenos y se hicieron 84 pruebas; 75 de ellas fueron realizadas en la margen izquierda y 9 en el cauce del río. La metodología de las pruebas consistió en ir probando cada 3 ó 5 m a medida que avanzaba la perforación; para ello se emplearon como sello obturadores neumáticos activados con nitrógeno y estableciendo presiones ascendentes y descendentes sucesivas.

Con los datos obtenidos, se calculan los valores mediante gráficas gasto/presión, se asignó una clasificación cualitativa de permeabilidad en función al valor obtenido en unidades Lugeon, de la forma siguiente:



U.L.	Clasificación
0-3	Impermeable
>3-11	Poco permeable
>11-25	Permeable
>25-40	Muy permeable
>40	Altamente permeable

**Tabla 2.5 Tabal de clasificación cualitativa de permeabilidad**

Los resultados obtenidos de las pruebas Lugeon arrojan valores que oscilan entre 0 y 25,60 U.L., de los cuales el 60% varía entre 0 y 11 U.L. y el 40% entre 11 y 25,60 U.L., siendo el promedio global para todos los barrenos de 9 a 10 U.L., lo que equivale a una roca poco permeable.

En la margen izquierda se efectuaron un total de 75 pruebas Lugeon, por medio de las cuales se observó que el macizo rocoso es impermeable a permeable, en general, los primeros 30 m se comportan permeables; sin embargo, después de esta zona varía de poco permeable a impermeable. En algunos horizontes probados resultaron ser permeables, debido a que el fracturamiento es abierto.

En el cauce del río se determinó la permeabilidad mediante 9 pruebas realizadas en el barreno PHC-4, en donde igualmente la mayor permeabilidad aparece en la zona de descompresión, para después pasar a ser impermeable y poco permeable. En las zonas fracturadas y en el contacto entre la ignimbrita riolítica (Tm-ic2) y el dique diabásico (Tm-dd) se conserva poco permeable, lo que indica que las fracturas están selladas. Se pudo observar que la permeabilidad se comporta de manera homogénea tanto en la unidad Corapan como en Las Cruces, pues ambas unidades cuando están cerca de la superficie tienden a ser permeables y cuando se encuentran a cierta profundidad son poco permeables a impermeables.

También es importante mencionar que tanto en las zonas de contacto litológico como en las zonas de falla la tendencia es poco permeable.

Barreno	Profundidad (m)	Tipo de Roca	Tramo de prueba (m)	U.L.	Gasto (l/min/m)	Presión Máxima en MPa kg/cm <sup>2</sup> )	
PHC-1	136,35	Ignimbrita riolítica (Tm-ci1)	2,00 – 7,00	25,6	-	0,9810 (10,00)	Muy permeable
			7,00 – 12,00	TNP	-	-	-
			12,00 – 17,00	18,64	-	0,9810 (10,00)	Permeable
		Toba riolítica (Tm-ct1)	17,00 – 22,00	16,28	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			22,00 – 27,00	17,20	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			27,00 – 32,00	9,40	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
		Ignimbrita riolítica (Tm-ic3)	32,00 – 37,05	8,92	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
			37,05 – 42,10	5,28	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
			42,10 – 47,15	0,12	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			47,15 – 52,25	0,28	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			52,25 – 57,30	1,24	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			57,30 – 62,35	1,50	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			62,35 – 67,50	6,88	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
			67,50 – 72,60	19,40	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			72,60 – 77,60	11,12	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			77,60 – 82,60	3,52	-	0,9810 (10,00)	Poco Permeable
			82,60 – 87,60	0,00	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			87,60 – 92,65	0,32	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			92,65 – 97,65	11,24	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			97,65 – 102,65	1,00	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
102,65 – 107,65	-	12,8	1,2262 (12,50)	-			
107,65 – 112,65	-	9,28	1,3733 (14,00)	-			
112,65 – 117,65	-	2,24	1,4714 (15,00)	-			

			117,65 – 122,65	-	6,08	1,5175 (15,50)	-
			122,65 – 127,80	-	17,44	1,5695 (16,00)	-
			127,80 – 132,90	-	16,10	1,6676 (17,00)	-

**Tabla 2.6 Resumen de los valores de permeabilidad de cada barreno**

\* TNP = Tramo no probado

Barreno	Profundidad (m)	Tipo de Roca	Tramo de prueba (m)	U.L.	Gasto (l/min/m)	Presión Máxima en MPa kg/cm <sup>2</sup>	
PHC-2	101,50	Ignimbrita riolítica (Tm-ic3)	7,45 – 12,45	13,9 2	-	0.9810 (10,00)	Permeable
			12,45 – 17,45	19,0 0	-	0.9810 (10,00)	Permeable
			17,45 – 22,45	TNP	-	0.9810 (10,00)	-
		Dique diabásico (Tmp-dd)	22,45 – 27,45	12,6 0	-	0.9810 (10,00)	Permeable
		Ignimbrita riolítica (Tm-ic3)	27,45 – 32,45	18,2 0	-	0.9810 (10,00)	Permeable
			32,45 – 37,45	18,9 0	-	0.9810 (10,00)	Permeable
			37,45 – 42,45	20,8 0	-	0.9810 (10,00)	Permeable
			42,45 – 47,45	20,0 0	-	0.9810 (10,00)	Permeable
			47,45 – 52,45	7,68	-	0.9810 (10,00)	Poco permeable
			52,45 – 57,45	5,48	-	0.9810 (10,00)	Poco permeable
			57,45 – 62,45	6,00	-	0.9810 (10,00)	Poco permeable
			62,45 – 67,45	1,00	-	0.9810 (10,00)	Impermeable
			67,45 – 72,45	0,60	-	0.9810 (10,00)	Impermeable
			72,45 – 77,45	0,00	-	0.9810 (10,00)	Impermeable
			77,45 – 82,45	0,88	-	0.9810 (10,00)	Impermeable
82,45 – 87,45	1,54		-	0.9810 (10,00)	Impermeable		
87,45 – 92,45	5,45	-	0.9810 (10,00)	Poco permeable			

			92,45 – 97,45	4,12	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
			97,45 – 101,50	3,80	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
PHC-3	80,20	Ignimbrita riolítica (Tm-ci1)	3,00 – 8,00	1,64	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			3,00 – 13,00	24,00	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			13,00 – 18,00	20,00	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			18,00 – 23,00	24,00	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			23,00 – 28,00	24,00	-	0,9810 (10,00)	Permeable
			28,00 – 33,00	23,68	-	0,9810 (10,00)	-
			33,00 – 38,00	-	12,44	0,5886 (6,00)	-
			38,00 – 43,00	-	5,68	0,7848 (8,00)	Impermeable
		Dique diabásico (Tm-p-dd)	43,00 – 48,00	1,60	-	0,9810 ((10,00)	Impermeable
			48,00 – 53,00	0,66	-	0,9810 (10,00)	-
		Toba riolítica (Tm-ct1)	53,00 – 58,00	-	3,44	0,7848 (8,00)	Impermeable
			58,00 – 63,00	0,00	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			63,00 – 68,00	0,00	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			68,00 – 73,00	0,00	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
		Ignimbrita riolítica (Tm-ic3)	73,00 – 78,00	0,00	-	0,9810 (10,00)	Impermeable

**Tabla 2.7 Resumen de los valores de permeabilidad de cada barreno**

Barreno	Profundidad (m)	Tipo de Roca	Tramo de prueba (m)	U.L.	Gasto (l/min/m)	Presión Máxima en MPa kg/cm <sup>2</sup>	
PHC-4	52,40	Ignimbrita riolítica (Tm-ic2)	10,40 – 15,40	-	16,40	0,8593 (8,76)	-
			15,40 – 18,80	-	16,47	0,5103 (5,20)	-
			18,80 – 23,90	-	10,20	0,6867 (7,00)	-
			23,90 – 28,85	1,86	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			28,85 – 33,00	0,67	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			33,00 – 38,05	0,00	-	0,9810 (10,00)	Impermeable
			38,05 – 43,00	9,49	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable

		Dique diabásico (T <sub>mp-dd</sub> )	43,00 – 48,00	10,00	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
			48,00 – 52,40	10,45	-	0,9810 (10,00)	Poco permeable
CRI-3	69,10	Igneímbrita riolítica (T <sub>m-ic3</sub> )	0,00 – 13,60	-	-	-	-
			13,60 – 19,90	-	20,72	1,1370 (11,59)	-
			19,90 – 22,60	-	TNP	-	-
			22,60 – 25,50	-	13,8	1,2007 (12,24)	-
			25,50 – 28,40	-	1	1,2302 (12,54)	-
			28,40 – 31,60	-	15,03	1,2596 (12,84)	-
		Dique diabásico (T <sub>mp-dd</sub> )	31,60 – 34,50	-	9,03	1,2890 (13,14)	-
			34,50 – 37,70	-	11,28	1,3185 (13,44)	-
		Igneímbrita riolítica (T <sub>m-ic3</sub> )	37,70 – 40,80	-	6,48	1,3479 (13,74)	-
			40,80 – 43,60	-	1	1,3773 (14,04)	-
			43,60 – 46,80	-	0,92	1,4362 (14,34)	-
			46,80 – 49,80	-	1	1,4362 (14,64)	-
			49,80 – 53,00	-	1	1,4656 (14,94)	-
			53,00 – 56,00	-	1	1,4950 (15,24)	-
56,00 – 58,60	-		1	1,5245 (15,54)	-		
58,60 – 62,00	-		7,95	1,5539 (15,84)	-		
62,00 – 65,40	-	7,86	1,5833 (16,14)	-			
65,40 – 69,10	-	4,53	1,6128 (16,44)	-			
<b>Tabla 2.8 Resumen de los valores de permeabilidad de cada barreno</b>							

### 2.3 Estudios Geofísicos

Los métodos geofísicos utilizados fueron de prospección sísmica y eléctrica se utilizaron con el propósito de evaluar las características geotécnicas del macizo rocoso, determinar espesores y distribución de roca descomprimida y materiales de cobertura, en la zona de la boquilla o zona de estudio, además de identificar las zonas más afectadas por estructuras geológicas.

Para la exploración geofísica se trazaron 23 líneas topográficas ubicadas de la siguiente manera: ocho transversales al cauce del río, nueve longitudinales al mismo (cinco en la margen izquierda y cuatro en la derecha) y seis en la margen izquierda, trazadas para la identificación de estructuras.

### **a) Prospección Sísmica**

Para el estudio se utilizó el método de refracción sísmica, que consiste en medir el tiempo que requieren las ondas elásticas para viajar desde una fuente (punto de tiro), hasta una serie de sismo detectores o geófonos, dispuestos en línea recta con el punto de tiro. Los datos de campo son los tiempos de viaje y las distancias de la fuente a los geófonos; las distancias se eligen en función de la profundidad y el detalle necesarios en la exploración. La energía resultante de la detonación es amplificada, grabada y mostrada mediante un sismógrafo digital.

### **b) Prospección Eléctrica**

Este método consiste en la medición de la resistividad al paso de la corriente eléctrica aplicada al terreno ( $I$ ), y la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) causada por ella mediante un par de electrodos plantados en la superficie del terreno con un arreglo determinado. Con las magnitudes anteriores se calcula la resistividad aparente a partir de la expresión:

$$\rho_a = k \Delta V / I$$

donde  $k$  es el factor geométrico del arreglo.

### **c) Sondeo eléctrico vertical (SEV)**

En la aplicación de este método se utilizó el arreglo Schlumberger, que consiste en la colocación simétrica de cuatro electrodos a lo largo de una línea recta, los de corriente A y B en los extremos y los de potencial M y N en la parte central, con la restricción  $AB \geq 5 MN$ . Para incrementar la profundidad de investigación, los electrodos A y B son alejados a partir del centro del arreglo (punto de atribución del SEV), y los electrodos M y N pueden conservar su posición mientras la diferencia de potencial sea lo suficientemente alta para su lectura.

Las observaciones de campo se presentan en forma de curvas, que relacionan la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) con la distancia ( $AB/2$ ) entre los puntos de atribución y los

electrodos de corriente. La primera variable se grafica en las ordenadas y la segunda en las abscisas, ambas a escala logarítmica.

Con el programa de computación Resixplus de Interpex se realiza la captura e inversión de las curvas de campo, para determinar los espesores y resistividades de un modelo estratificado en cada punto de atribución de SEV.

### **3 INTEGRACIÓN DE RESULTADOS**

#### **3.1 Geológico-Geofísica**

La interpretación de los resultados geoelectricos y sísmicos, integrados con la información geológica, permitió definir las propiedades físicas de las diferentes unidades geológicas.

**Unidad U1.** Está asociada a depósitos de aluvión (Qal) ubicados en el cauce del río, así como por materiales de talud (Qdt) y suelo residual (Qsr). Sus velocidades varían entre 0,3 y 0,7 km/s y por ser materiales alterados sus resistividades son muy variables (48 a 1198  $\Omega$ m). El mayor espesor de aluvión se detectó en la sección G-G', cercana al cauce del río, con 9 m, disminuyendo hacia aguas abajo; sin embargo, en sección CR-1 se determinó un espesor de 9,65 m con el barreno CR-1 y 8,50 m con el barreno PHC-4. En la margen izquierda la mayor parte del talud se encuentra en la base del cantil, alcanzando el espesor máximo de 7 m; el suelo residual se observa superficialmente, como se observa en la sección D-D'; en las secciones J-J' y C-C' los máximos espesores son 6 y 5 m, respectivamente. Por último, en la margen derecha los mayores espesores de depósitos de talud se infieren se encuentran entre sección B-B' y CR-1, con un espesor máximo de 8 m; los depósitos de suelo residual en esta margen son muy restringidos y por tanto no se observan en las secciones.

**Unidad U2.** Localizada en la parte alta de la margen izquierda; corresponde a la secuencia piroclástica de la unidad Corapan, constituida por paquetes de tobas (Tm-ct1-3) e ignimbritas riolíticas (Tm-ci1-3), de espesor irregular que buzcan hacia el NE. En el tercer miembro tobáceo se encuentra emplazado un pórfido andesítico (Tm-pa) en forma de manto (sill), ubicado en el inicio de las secciones CR-II y Eje las Cruces; éste presenta características similares a las de las tobas, por lo que se incluye en la misma unidad

geofísica. Por sus propiedades litológicas y respuesta geofísica ha sido dividida en tres subunidades: 2a, 2b y 2c.

### **Subunidad 2a.**

Su velocidad varía de 0,4 a 1,6 km/s y resistividades que por su naturaleza de roca alterada son muy variables (15-743  $\Omega$ m); valores que corresponden a la roca descomprimida por fracturamiento y alteración, observándose los mayores espesores en las zonas de fallas: 36 m cerca de la falla Las Cruces; 24, 22 m y 18 m en la falla El Cantil y 22 m en la falla Los Bueyes. En la línea C-C', en el cadenamiento 0+160 se tiene un espesor de 12 m. En la línea CR-I cadenamiento 0+440 se tiene un espesor de 10 m, que coincide con el corte del barreno PHC-1.

### **Subunidad 2b.**

Se distingue por sus valores de resistividad de 108 a 790  $\Omega$ m, presenta velocidades de onda sísmica de 2,5 a 3,3 km/s, por lo que se considera de calidad regular a moderadamente buena. Se relaciona con los paquetes ignimbríticos poco fracturados de la unidad Corapan. El mayor espesor de 50 m se detectó en el horizonte Tm-ci1, disminuyendo gradualmente hacia aguas arriba y aguas abajo, con 32 m en la sección A-A' y 36 m en la sección D-D'.

### **Subunidad 2c.**

Representa a los horizontes de tobas de la unidad Corapan, con valores de velocidad de 2,4 a 3,4 km/s y resistividades de 16 a 97  $\Omega$ m; los valores menores de resistividad pueden deberse a zonas arcillosas. Considerando únicamente a las tobas, los espesores máximos se observan en las secciones transversales A-A' y CR-I con 33 y 44 m, respectivamente; en el tercer miembro tobáceo (Tm-ct3), alcanza un espesor de 60 m en la sección Eje Las Cruces. Por sus velocidades de onda sísmica y resistividades, se considera de calidad regular a moderadamente buena.



**Unidad U3.** Se relaciona con el paquete de ignimbritas de la unidad Las Cruces, expuestas en toda la margen derecha y en parte de la margen izquierda; presenta un amplio rango de resistividades por variaciones notables en su soldamiento y textura, así como en su presentación pseudoestratificada o masiva. Por lo general se observa muy alterada en la parte superficial, formando suelo, aunque esporádicamente se puede observar fresca y compacta en la margen derecha. Esta unidad presenta una variación gradual en su textura, de grano fino a grueso, característica por la cual fue dividida en las dos subunidades siguientes:

**Subunidad 3a.** Corresponde a la roca descomprimida y alterada, con velocidades de onda sísmica de 0,6 a 1.6 km/s y resistividades variables (20 a 790  $\Omega$ m). En la margen izquierda los máximos espesores detectados en la sección CR-VI cadenamamiento 270 tienen 28 m, mientras que en la sección CR-III cadenamamiento 620 tiene 26 m. En la parte alta del cantil se detectaron 22 m en la sección H-H', y en el cruce de las secciones Eje Las Cruces y H-H' alcanza 12 m; el barrero PHC-2, ubicado a 14 m, reporta 7 m de este material. En la sección G-G', ubicada en el cauce, se detectaron 13 m, pero en el barrero CR-1 localizado a 20 m de la sección Eje Las Cruces, mostró un espesor de 32,5 m con valores de RQD promedio de 36,5%. En la margen derecha los máximos espesores detectados alcanzaron 28 m en la sección CR-II, y 24 m en la parte alta de las secciones CR-II y CR-III.

**Subunidad 3b.** Corresponde a la roca de mejor calidad del sitio en ambas márgenes, de acuerdo a las velocidades de 2,5 a 3,7 km/s y resistividades de 60 a 800  $\Omega$ m, características que permiten clasificarla como de regular a buena calidad. Esta subunidad muestra horizontes intercalados de menores resistividades (del orden de 60  $\Omega$ m), en las inmediaciones de las laderas hacia ambas márgenes, posiblemente por soldamiento de la roca y presencia de estructuras geológicas. El barrero CRI-3, sobre la sección del Eje Las Cruces, muestra valores de RQD promedio de 74,5 a 89,6 % en esta subunidad, hasta 69 m de profundidad, aunque presenta un tramo de 6 m de muy mala calidad, se debe a que el barrero cruza la falla Las Cruces.

Además a 14 m de la sección H-H' el barrero PHC-2 tiene un RQD de 60% en esta subunidad antes de la falla (44 a 55 m); sin embargo, después de ésta el RQD mejora hasta un 85%.

La tabla 3,1 Resume la interpretación de las unidades geofísicas.

UNIDAD GEOFÍSICA	VELOCIDAD (km/s)	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ m)	ESPESOR (m)	CALIDAD DE ROCA	OBSERVACIONES	
U1	0,3 – 0,7	48-1200	0- 9,65	-	Suelo residual, talud y aluvión	
U2	2a	0,4 – 1,6	15-743	0- 30	Mala	Roca intemperizada y fracturada
	2b	2,5 – 3,3	108 – 790	0- 50	Regular a buena	Paquete ignimbrítico poco fracturado
	2c	2,4 – 3,4	16 – 97	0 - 33 (60 con pórfido)	Regular a buena	Horizontes de tobas y pórfido andesítico poco fracturados
U3	3a	0,6 – 1,6	20-790	0 - 32,5	Mala	Porción con caolinización, intemperizada, y fracturada
	3b	2,5 – 3,7	60 – 800	No determinado	Regular a buena	Roca poco fracturada, con diferentes grados de soldamiento.

**Tabla 3,1 Unidades geofísicas y su interpretación**

En el área de estudio las tobas y zonas de falla presentan valores bajos de resistividad aparente, generados por zonas con minerales arcillosos.

### Módulos elásticos dinámicos

Se determinaron módulos elásticos dinámicos en 6 puntos de interés dentro de la zona de la boquilla, los resultados se muestran en la tabla 3.2:

No. de Prueba	Unidad Litológica	Velocidad Onda (p) <b>Vp (m/s)</b>	Velocidad Onda (s) <b>Vs (m/s)</b>	Densidad Volumétrica <b><math>\sigma</math> (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	Relación Poisson <b><math>\mu</math></b>	Módulo de Rígidez <b>G<sub>D</sub> (MPa)</b>	Módulo de Young <b>E<sub>D</sub> (MPa)</b>
M1	Tm-ic1	3 000	1 570	2,2	0,31	5 915	15 515
M2	Tm-ic2	3 000	1 570	2,2	0,31	5 915	15 515
M3	Tm-ic2	3 100	1 580	2,2	0,32	5 490	14 550
M4	Tm-ic3	2 700	1 330	2,2	0,34	3 890	10 427
M5	Tm-ci1	3 200	1 670	2,2	0,31	6 136	16 110
M6	Tm-ct2	2 200	1 070	2,2	0,35	2 518	6 776

**Tabla 3.2 Resultados de los Módulos Elásticos Dinámicos**

Nota: El valor de la densidad volumétrica 2,2 es una estimación aproximada.

## Plano de isopacas

El plano topográfico en escala 1: 2 000 de la zona de estudio, fue capturado en Autocad y se trasladó al paquete Surfer, mediante el programa en Fortran denominado Conv-dxf, utilizando curvas de la base topográfica cada 5 m. Después se tomaron datos cada 25 m de los espesores no consolidados y de roca de mala calidad, en cada secciones geológico-geofísica realizada en años pasados, para posteriormente restarle estos valores a la topografía original convertida a Surfer y obtener un plano de isopacas, observándose que en el cauce del río, se encuentra la zona con mayores espesores de roca.

Debe considerarse que los datos de los espesores se tomaron exclusivamente en las secciones con información geofísica; por tanto, los valores entre las mismas son producto de la interpolación realizada por el programa de cómputo utilizado y se deben tomar con reserva.

Con los datos de la topografía original se formó una figura de la boquilla en tres dimensiones, donde se ilustra con colores la distribución de los espesores de roca de mala calidad (Figura 3.1). En esta figura se pueden observar los mayores valores en la margen izquierda y en parte del cauce del río, aunque en éste predominan los espesores de 5 a 15 m.

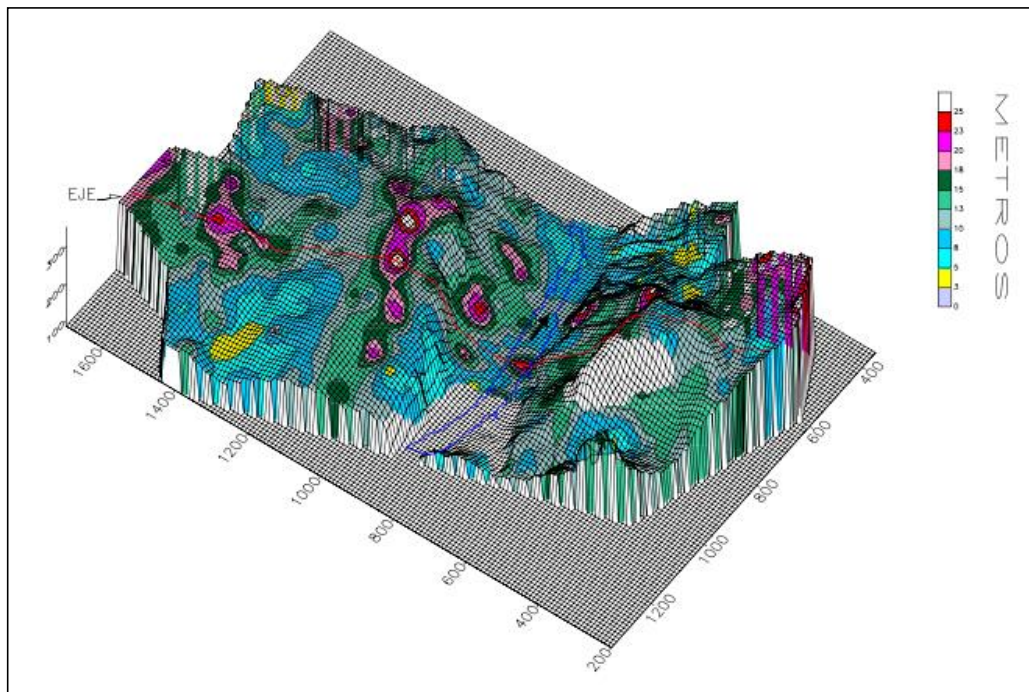


Figura 3.1 Configuración de espesores de roca P.H. Las Cruces

## **3.2 Sismotectónica**

Antecedentes.-

De acuerdo con la regionalización sísmica de México (Esteva, 1970, CFE 1993), la alternativa Las Cruces se localiza en una zona de actividad sísmica moderada, expuesta a sismos de carácter local y regional.

El estudio sismotectónico para la alternativa Las Cruces refleja el patrón estructural, el estado de esfuerzos a nivel de placas y la actividad sísmica regional y local, así como las aceleraciones teóricas máximas producto de un desplazamiento del suelo originado por las fallas de mayor importancia (Delgado et. al, 1996).

El presente estudio se realizó con la finalidad de proporcionar información sísmica local y para establecer el régimen de esfuerzos en torno al sitio Las Cruces, con base en el análisis del historial del llenado de embalse de la C.H. Aguamilpa y los epicentros localizados durante los meses de abril a mayo del 2001; además se estimó el periodo dominante de las unidades rocosas inferiores y el nivel de amplificación de las ondas sísmicas, utilizando técnicas experimentales de cocientes espectrales (Nakamura, 1989).

### **Marco Tectónico**

A nivel regional existen macro-estructuras geológicas que afectan a las series volcánicas que conforman a la Sierra Madre Occidental, lo que demuestra una génesis posterior o cuando menos sincrónica al apilamiento de la secuencia del Supergrupo Volcánico Superior. La región de la Sierra Madre Occidental se ha asignado a un dominio tectónico occidental (Córdoba et. al., 1980), que en su mayor parte se encuentra recubierto por volcanismo cenozoico y posee todas las características de la porción oeste de la Cordillera Norteamericana de la cual constituye su prolongación meridional.

Dentro de la región comprendida por los cauces de los ríos San Pedro y Jesús María, además de la planicie costera y franja denominada Sierras Sepultadas (Raisz, 1964), existen principalmente productos piroclásticos riolíticos a riolíticos emitidos en un lapso entre 34 y 23 m.a., denominados Supergrupo Volcánico Superior, que cubren discordantemente a otra secuencia volcánica de composición andesítica, en su mayor

parte, más antigua y nombrada Complejo Volcánico Inferior, cuyos materiales fueron acumulados entre 100 y 45 m.a. (McDowell y Clabaugh, 1979).

El fracturamiento se ha relacionado con una tectónica reciente mio-plio-cuaternaria, que ha dado lugar a emisiones basálticas (Córdoba, et al., 1980), además de originar la morfología de cuencas y sierras. Asimismo, se señala plegamiento de fondo miocénico de orientación NNW-SSE que afecta en particular la edificación volcánica de la Sierra Madre Occidental, a la que asignan como perteneciente a un dominio cordillerano.

Por otra parte, Tardy (1977) menciona un último episodio de deformación compresional durante el curso del Mioceno durante el cual ocurrieron los grandes pliegues de fondo, de orientación NNW-SSE, presentes en toda la parte norte de México, desde la Península de Baja California hasta la Planicie Costera del Golfo de México que, en particular, deforman la gruesa secuencia andesítica-ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental. Las deformaciones del Mioceno Superior fueron inmediatamente seguidas por la intrusión de plutones granodioríticos.

La fase tectónica más reciente, pliocuaternaria, se manifiesta de manera preponderante sobre la parte occidental de México y se caracteriza por un juego de fallas extensionales que ocupan el borde pacífico en grandes pilares tectónicos (Península de Baja California y Sierra Madre Occidental) y fosas, de las cuales la más importante es la del Golfo de California. A ese juego de fallas están asociadas emisiones esencialmente basálticas que forman grandes mesas y notables aparatos (Pinacate, Tres Vírgenes, etc.) en Baja California y mesas dispersas sobre el continente (Tardy, 1977). La tectónica pliocuaternaria es independiente de las paleogeografías y tectónicas anteriores pues es distensiva a diferencia de las fases compresivas mesozoicas y cenozoicas. Las fallas actuales no parecen tener historia geológica anterior al Plioceno.

A pesar de la relativa cercanía del Golfo de California, cuyo fondo se encuentra en proceso de oceanización y es tectónicamente activo (Tardy, 1977), en la región continental del sitio Las Cruces los sismos son raros y se ha considerado como zona de moderada actividad (Esteva, 1970), aspecto que sugiere mayor estabilidad tectónica en esta porción de la Placa Norteamericana; sin embargo, el patrón estructural de densidad moderada a intensa sugiere lo contrario.

El sistema de fallamiento NW 32-44° SE, paralelo a las costas del Golfo de California, consiste de una serie de franjas paralelas provocadas por fallamientos normales escalonados con lados (bloques) caídos hacia el SW y saltos estructurales no determinados, pero necesariamente considerables, que originaron que hacia la planicie costera se formara la denominada subprovincia de Sierras Sepultadas (Raisz, 1964). A este sistema pertenecen los fallamientos localizados en la zona del proyecto, denominados Las Cruces y Los Bueyes, expresados en ambas márgenes del río, el primero sellado con un dique diabásico que posteriormente se refracturó con la misma tendencia estructural, mientras que a nivel regional se tiene la falla Rosario Viejo y las zonas de falla El Mexicanero, Lajas-Huicholes, El Tullillo, Mazatán, etc.

El sistema de dirección dominante E-W es probable que sea un reflejo en continente de las grandes fallas transformes oceánicas. En la zona de influencia del proyecto este sistema está representado por las estructuras El Naranjo y la que establece el control sobre el flujo del arroyo Las Mojarras, entre otras de menor relevancia, en tanto que regionalmente destacan las zonas de falla La Guacamaya y Alica (Figura 3.2).

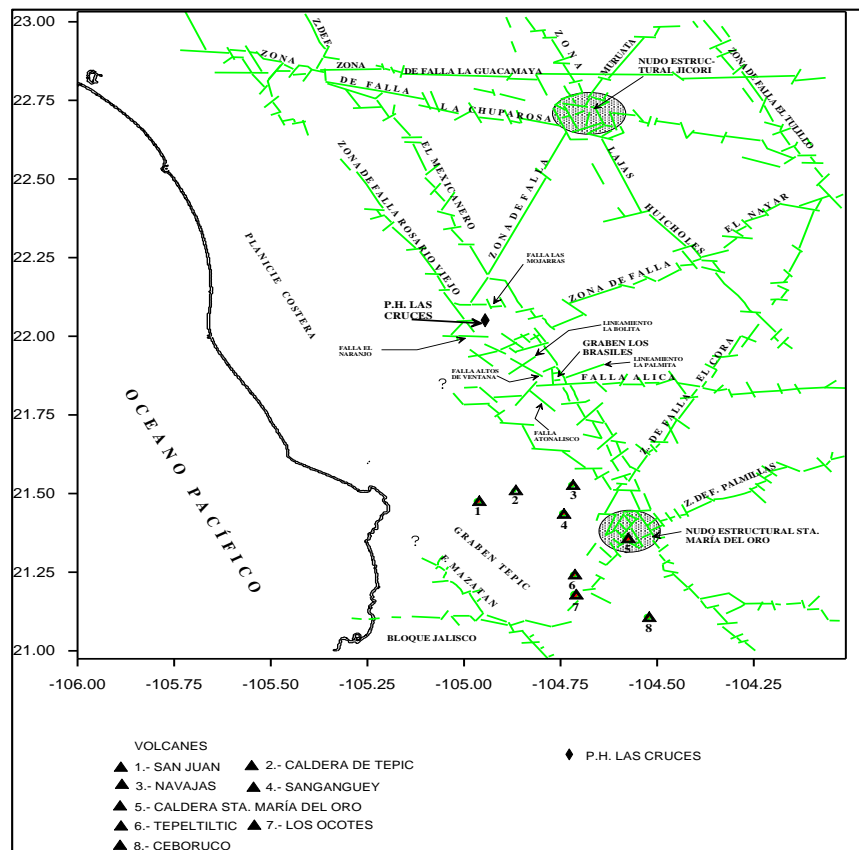


Figura 3.2 Marco tectónico regional

## **Sismicidad Local**

Con el objeto de conocer la distribución epicentral en el área de influencia del P.H. Las Cruces, se consultó el catalogo sísmico de la CFE en el periodo de 1990 al 2000, donde se reportan 1565 sismos dentro de un radio de 60 km, con centro en la cortina del proyecto, todos asociados a la fluctuación del nivel del embalse de la Central Hidroeléctrica Aguamilpa (Delgado et. al, 1999).

La historia sísmica en la zona es corta, porque fue sólo a partir de la operación de la red sismológica RESAG (Red Sismológica de Aguamilpa; Montufar, 1987), que se realizan estudios sismotectónicos (Delgado, et al, 1993, Delgado, et al, 1996, etc.), que permiten hacer un análisis de las implicaciones de la sismicidad y su correlación con las estructuras geológicas regionales y locales. Desde el punto de vista regional, esta zona se ubica dentro de la placa Norteamericana, en el límite NE de la fosa Tepic-Zacoalco, entre los cauces de los ríos San Pedro y Santiago; la tendencia estructural preferencial es NW-SE, como lo evidencian las zonas de falla El Mexicanero y Rosario Viejo; sin embargo, existen otras con tendencia NE-SW como la zona de falla La Muruata y El Nayar. Es de advertir que estas cuatro megaestructuras convergen en un área en la que se localiza el sitio Las Cruces.

En junio de 1993, se inició el llenado de la presa Aguamilpa y un mes después se empezó a registrar microsismicidad inducida, menor a un grado de magnitud Mc (Uribe, 1993). No fue posible su localización por ser registrada únicamente en una estación, lo que se pudo lograr en los meses siguientes, al incrementarse el número y magnitud de los sismos.

En los años siguientes se observa que el proceso de migración tiene una estrecha relación con la fluctuación del nivel del embalse y la dispersión se expande hasta el proyecto de Las Cruces como se aprecia en la figura 3.3, en la convergencia de las estructuras geológicas el Rosario Viejo, El Mexicanero y Muruata.

La mayor magnitud registrada hasta la fecha ocurrió en el mes de octubre de 1998, con una magnitud de 5.0°, alcanzando una intensidad de V grados en la escala de Mercalli modificada, en el área epicentral, aproximadamente a 50 km del proyecto.

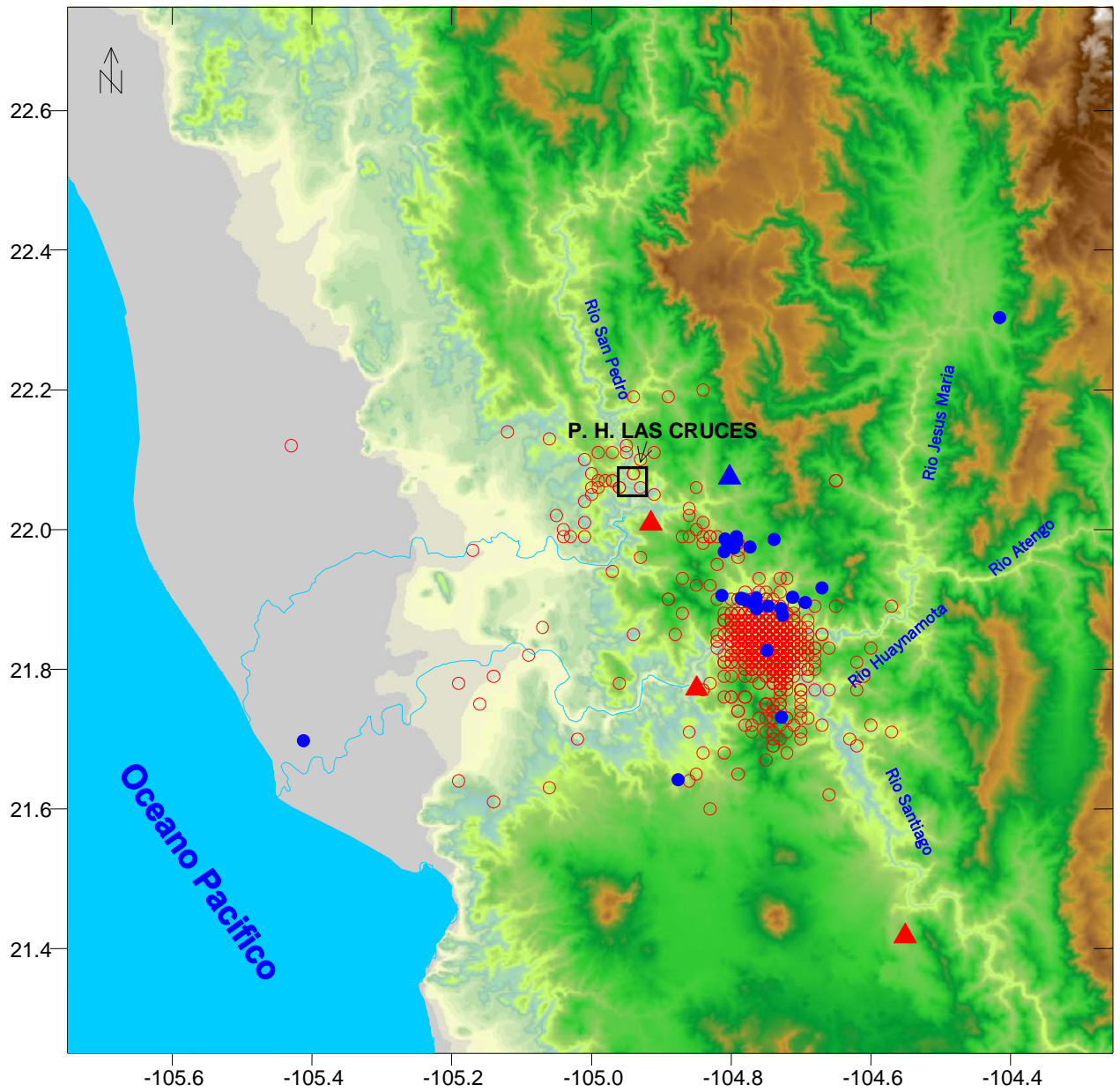
También se observa que los sismos en general obedecen a la tendencia estructural E-W. En los años siguientes el patrón de actividad continuó extendiéndose y desarrollando dos bandas sísmicas de más de 8 km de longitud con direcciones preferenciales NE-SW y NW-SE, las cuales confluyen a menos de 3 km al norte del proyecto.

En el mes de marzo del 2001, se instaló una estación sismológica en el poblado Santa Cruz de Guaybel, con el propósito de investigar la asociación de la actividad sísmica de estas dos concentraciones sísmicas con las estructuras locales.

La estación Guaybel funcionó de marzo a mayo de 2001, periodo durante el cual se localizaron 27 eventos que se ubican básicamente en dos zonas, una circunscrita al área del embalse de la C.H. Aguamilpa y la segunda en el límite norte del graben Los Brasiles.

Durante este periodo de monitoreo no se registró ningún evento asociado con la convergencia de las estructuras Rosario Viejo, El Mexicanero y Muruata, lo que puede indicar que esta actividad se presenta cuando el nivel de la C.H. Aguamilpa se incrementa en época lluvia.





- Epicentros localizados en el periodo 1994-1998
  - Epicentros localizados en marzo-mayo del 2001
- ▲ Estación sismológica de la red Aguamilpa 1990-2001
  - ▲ Estación sismológica Guaybel marzo-mayo del 2001

0 20 40 60 Km.

Figura 3.3 Distribución de epicentros en un radio de 60 Km con centro en la alternativa Las Cruces .

### **3.3 Bancos de Materiales**

#### **Bancos de arcillas**

Los trabajos encaminados a la localización y evaluación de bancos de préstamo se orientaron únicamente en este trabajo a la determinación de las características del material impermeable, para lo cual se delimitaron con apoyo topográfico 6 bancos de arcilla, de los cuales cuatro fueron explorados mediante pozos a cielo abierto, con dimensiones variables. A continuación se describen los 6 bancos de arcilla.

#### **a) Banco La Sanguijuela I**

Se localiza a 3 km en línea recta al SE de la alternativa Las Cruces y a escasos 200 m al este del rancho La Sanguijuela. Sus dimensiones son de aproximadamente 400 x 130 x 2,50 m de espesor promedio; su expresión topográfica es de formas suaves y onduladas. En algunas partes es utilizado como terreno de cultivo.

Este material tiene una coloración rojiza a pardo grisácea y proviene de la alteración in situ del pórfido andesítico y de tobas de composición riolítica; ambas rocas presentan intensa alteración hidrotermal, con avanzada argilización y oxidación. Se trata de arcillas plásticas, mezcladas con fragmentos de 0,5 a 2 cm de diámetro de roca semialterada. Se les encuentran cubiertas por arenas, gravas o material más grueso, con espesores variables de 0,30 a 2 m. Se determinó un espesor promedio de 2,5 m, fotografía 3.1.

#### **b) Banco La Sanguijuela II**

Este banco se localiza a 2,5 km al SE de la alternativa Las Cruces y a 300 m al oeste del rancho La Sanguijuela. Comprende parte de una pequeña loma con pendientes suaves y porciones planas (Fotografía III.2), con una superficie aproximada de 10,5 ha.

Al igual que el banco anterior está constituido por una arcilla muy plástica de color rojizo, producto de la alteración del pórfido andesítico, observándose poco contaminada por otros materiales. Superficialmente se encuentra cubierta por una delgada capa, de 5 a 20 cm de espesor, de fragmentos andesíticos hasta de 10 cm de diámetro.

En la zona del banco, se observaron espesores de 1 a 5 m, pero el promedio se calculó en 2,5 m (Fotografía 3.2).



**Fotografía 3.1** Pozo a cielo abierto ejecutados en el banco La Sanguijuela I.



**Fotografía 3.2** Imagen que muestra parte de la distribución del material arcilloso del banco La Sanguijuela II.

### **c) Banco El Limón**

Se localiza en la margen izquierda del río San Pedro a 4,5 km al SE del eje de boquilla y a 300 m al sur del rancho El Limón de Arriba.

Este banco está expuesto en una superficie irregular de aproximadamente 24 ha; forma parte de una pequeña loma de pendientes suaves y de zonas planas, que en su mayor parte es utilizada para el cultivo de maíz. Al igual que en los dos anteriores se efectuaron excavaciones para conocer con mayor detalle el material que lo constituye.

Se trata de un suelo arcilloso, en su mayor parte libre de impurezas y con elevada plasticidad (Fotografía 3.3). En algunas ocasiones se encuentra cubierto por material más grueso de hasta 10 cm de diámetro, con un espesor inferior a los 50 cm. Fue generado a partir de la alteración del pórfido andesítico, pues se encuentra cubriendo a éste con espesores de 1 a 5 m, pero en promedio predomina un espesor de 2,5 m.



**Fotografía 3.3 Material arcillo-limoso de color rojizo del banco El Limón.**

#### **d) Banco Presidio**

El banco Presidio se localiza en la margen izquierda del río San Pedro, a 5,5 km al SE de la alternativa Las Cruces y a 300 m al norte del poblado Presidio. Abarca una superficie aproximada de 12 ha, que se encuentra en una zona de lomeríos que es utilizada para el cultivo. La coloración del suelo es rojiza por la oxidación, estando superficialmente contaminado por una delgada capa de gravas y arenas de alrededor de 25 cm de espesor; por debajo de esta capa aparece la arcilla con características plásticas y un espesor máximo hasta de 3 m. Para este banco se consideró un espesor promedio de 1,5 m. fotografía 3.4



**Fotografía 3.4** Panorámica que muestra la distribución del material arcilloso expuesto en el banco Presidio.

#### **d) Banco Arroyo Hondo**

Está ubicado a 7,2 km al sur de la alternativa Las Cruces, sobre la margen izquierda del río San Pedro y 2,5 km al suroeste de San Pedro Ixcatán. Tiene una extensión muy pequeña, de 2,5 hectáreas aproximadamente, y se encuentra en la porción baja de un cerro de poca altura.

Esta arcilla es de color rojizo, plástica y en ocasiones se encuentra mezclada con material limo-arenoso, alcanzando espesores máximos de 5 m, como se puede ver en los cortes del camino de terracería que comunica a San Pedro Ixcatán con El Venado (Fotografía 3.5). Presenta una cobertura de material grueso con espesor no mayor a los 50 cm.



**Fotografía 3.5 Banco Arroyo Hondo, en donde se nota la coloración rojiza en el corte del camino, debido al material arcilloso.**

#### **e) Banco El Zopilote**

El Banco de arcilla El Zopilote se localiza a 14,5 km al SE de la alternativa Las Cruces, aproximadamente a 700 m al SW del rancho El Zopilote. Cubre una superficie de 8,8 hectáreas que actualmente se utilizan para el cultivo de café. Su acceso tiene lugar mediante la terracería El Venado-El Zopilote.

El depósito arcilloso consiste de un material que varía de color rojizo por oxidación a gris amarillento, su textura es de grano fino (limo-arcilloso), con un espesor promedio de 2 m, originado a partir de la alteración de una toba riolítica. Se encuentra cubierto por una delgada capa de material más grueso de 30 cm de espesor (Fotografía 3.6).



**Fotografía 3.6** Material arcilloso encontrado en uno de los pozos ejecutados en el banco El Zopilote.



En la tabla 3.3 se resumen las características individuales de cada banco de arcilla.

<b>Banco</b>	<b>Área Aproximada (ha)</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Distancia a la zona Las Cruces (km)</b>	<b>Características</b>
LA SANGUIJUELA I	5,2	2,5	130 000	3,0	Depósito arcilloso contaminado por fragmentos de roca suave
LA SANGUIJUELA II	10,5	2,5	262 500	2,5	Depósito arcilloso poco contaminado por otros materiales
EL LIMÓN	24	2,5	600 000	4,5	Depósito limo-arcilloso
EL PRESIDIO	12	1,5	180 000	5,5	Depósito arcilloso contaminado por gravas y arenas
ARROYO HONDO	2,5	1,75	43 750	7,2	Depósito arcillo-arenoso
EL ZOPILOTE	8,8	2	176 000	14,5	Depósito arcillo-limoso
<b>TOTAL</b>	<b>63</b>	<b>12,75</b>	<b>1 392 250</b>		

**Tabla 3.3 Características de los bancos de arcilla**

#### 4.- ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

De levantamientos geológicos y barrenos ejecutados en la zona de la boquilla Las Cruces, se determina que las rocas presenta un basculamiento en dirección al NE, relacionadas a la secuencia ignimbrítica del Nayar, representada por paquetes de rocas de ignimbritas riolíticas de la unidad las Cruces (Tm-ic 1-3) y tobas e ignimbritas de la unidad Corapan (Tm-c1-3), que se desarrollaron en el Mioceno con un rango de edades que van de los 23 Ma., afectadas por fallas de tipo normal con rumbo preferencial NW-SE y que ocasionalmente están siendo intrusionadas por diques de composición diabásicos (Tmp-dd) y pórfido andesíticos.

Estas rocas se encuentran cubiertas por depósitos no consolidados de suelo (Qsr) y talud (Qdt) y depósitos aluviales (Qal), mediante perforación y métodos geofísicos se definen que el mayor espesor en el cauce es de 9,65 m, sobre el eje estudiado, en margen izquierda el mayor espesor de talud de 7 m, está en la base del cantil y en margen derecha son de 8 m.

Las diferentes pruebas de permeabilidad indican que en margen izquierda el macizo rocoso en los primeros 30-35 m es permeable y posteriormente se comporta impermeable. Para el cauce la mayor permeabilidad se detecta en las zonas de descompresión siendo permeables, para después ser impermeable y poco permeable, en margen derecha no se realizó barrenación, por lo que no hay datos.

En zonas fracturadas y de falla así como en el contacto con la ignimbrita riolítica y diques diabásicos la roca tiende a comportarse como poco permeable, a excepción de la Falla el Cantil donde es permeable. Las estructuras consisten en fallas normales, que presentan materiales de relleno, aunque en algunos casos están emplazados intrusivos lo que hace que mejore la calidad de la roca a profundidad, pero aun así tendrán que ser recibir un tratamiento.

En general para ambas unidades la permeabilidad en la zonas superficiales tiende a ser permeable y cuando se profundiza en el macizo rocoso tiende a poco permeable a impermeable, con un promedio global para todos los barrenos de 9 a 10 U.L., lo que equivale a una roca poco permeable. Según el criterio de Deere, el macizo rocoso en margen izquierda y cauce de río se clasifica de regular calidad.

Las subunidades geofísicas denominadas 2a, y 3a, en los primeros 30 m, definen a la roca con una calidad mala, que se correlaciona a roca fracturada y alterada y zonas de fallas, donde los valores de resistividad bajan. Las unidades geofísicas denominadas 2b, 2c y 3b, definen al macizo rocoso como de regular a buena calidad, relacionado a roca poco fracturada y compacta. Siendo la subunidad 3b, a la que corresponde a la mejor calidad de roca del sitio, para ambos márgenes, con velocidades de 2,5 a 3,7 km/s y valores de resistividades que están entre 60 a 800  $\Omega m$ .

Con el análisis de la información obtenida, se plantea el modelo geológico en el cual presentan las características litológicas del macizo rocoso, así como la secuencia estratigráfica y marco estructural de la boquilla y se ubica el posible eje de cortina (Figura 4,1).

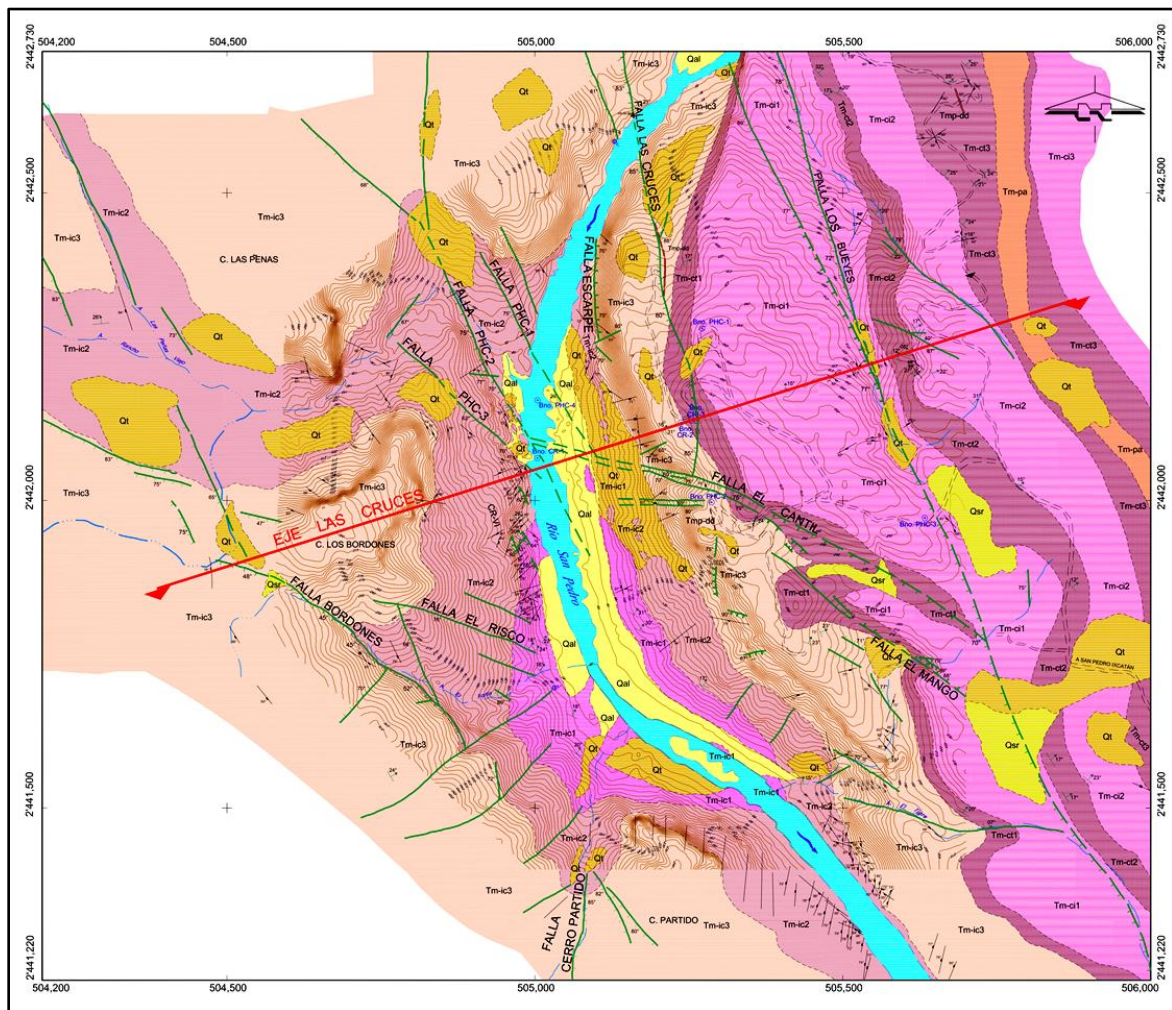


Figura 4.1 Modelo geológico Las Cruces, con eje de cortina.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

El marco geológico que comprende el estrechamiento de la alternativa Las Cruces está representado por una secuencia de rocas volcánicas extrusivas, conformado por un paquete de ignimbritas riolíticas de la unidad Las Cruces, expuestas de manera amplia en la margen derecha, mientras que en la izquierda sólo afloran en el borde acantilado de la misma, cubiertas por tobas e ignimbritas riolíticas de la unidad Corapan. Las rocas volcánicas están afectadas por cuerpos intrusivos diabásicos y pórfido andesíticos, que se presentan de manera aislada, de acuerdo con Clark et (1979), el emplazamiento de este tipo de rocas se registra en la región a partir del Mioceno Medio, pero dado que se han observado afectando a rocas de niveles superiores, se estima que algunas de esas estructuras fueron emplazadas probablemente en el Plioceno. Cubriendo parcialmente a las rocas antes mencionadas se encuentran los depósitos de materiales no consolidados.

En la zona predominan las fallas normales y lineamientos, cuya actitud está acorde con dos patrones principales, uno de rumbo N 28° W/78° SW y otro orientado al N 54° W/80° SW.

El fracturamiento en la zona de la boquilla es muy persistente, en la margen derecha se definieron dos sistemas principales: N 28° W/78° SW y N 69° W/80° SW, en tanto que en la izquierda los sistemas fueron N 04° W/86 SW y N 60° W/83° SW. Varían un poco entre ambas márgenes pero fue debido a que en la izquierda se involucró a las unidades Las Cruces y Corapan, mientras que en la derecha sólo a la primera de ellas

El fallamiento en el área de la boquilla está representado por fallas normales con rumbo preferencial NW-SE y buzamiento al SW con tendencia a la vertical. De estas estructuras sólo a las fallas El Cantil, Los Bueyes, Las Cruces, Bordones y la PHC-2, se les considera como importantes, por su continuidad, zona de influencia.

La pseudoestratificación es otra discontinuidad importante en la zona, siendo más notable en la unidad Corapan, debido a que sus horizontes son más delgados, de 0,5 a 3 m; en cambio la tendencia de la unidad Las Cruces es más masiva, a excepción del miembro

Tm-ic1, que presenta una seudoestratificación que varía de 0,15 a 3 m. el sistema preferencial en general tiene un rumbo N 48° W/24° NE.

La permeabilidad del macizo rocoso realizada en la unidad Corapan como en la unidad Las Cruces, dan resultados muy variables desde 0 a 25,60 U.L., aunque el promedio general es de 9 a 10 U.L., lo que clasifica a la masa rocosa como **poco permeable**. También se pudo determinar que en los contactos litológicos y en las zonas de falla la tendencia es poco permeable a permeable.

La aplicación de los métodos indirectos permitió identificar tres unidades geofísicas (U1, U2 y U3), que de acuerdo con sus características se correlacionan con las unidades litológicas expuestas en la zona de la boquilla. La unidad U1 se asocia con los depósitos no consolidados, cuyo mayor espesor de 9,65 m se detectó en el cauce del río. Las unidades U2 y U3 se relacionan con las unidades litológicas Corapan y Las Cruces, respectivamente. Destacan las subunidades U2a y U3a por representar espesores importantes de roca de mala calidad con velocidades máximas de 1,6 km/s.

Las subunidades U2b, U2c y U3b representan las mejores condiciones del macizo rocoso, ya que tienen velocidades que varían de 2,4 a 3,7 km/s, por lo que se clasifican como de regular a buena calidad; sin embargo, para los fines del proyecto se debe considerar posiblemente el tratamiento de la roca, en zonas alteradas

El temblor más cercano registrado a 50 km y de mayor magnitud en el proyecto es el ocurrido en el mes de octubre de 1998, con una magnitud de 5,0°, alcanzando una intensidad de V grados en la escala de Mercalli Modificada.

Respecto a los bancos de material impermeable, se estima que cercano al sitio se puede obtener un volumen aproximado de 1 400 000 m<sup>3</sup>, la calidad y espesores reales deberán ser reevaluados, con trabajos extras.

Con base en el análisis de los trabajos efectuados al momento y la relación estratigráfica y trabajos exploratorios del subsuelo, el sitio elegido presenta condiciones favorables para desarrollar un proyecto hidroeléctrico.

## **Recomendaciones**

Se requiere ejecutar los socavones de exploración en ambos márgenes del eje de cortina, para mayor conocimiento del macizo rocoso y con ramales orientados hacia la exploración de las principales estructuras a profundidad.

Para tener un conocimiento más amplio de los niveles freáticos en la zona de la boquilla, se requiere implementar pozos de monitoreo, en ambos márgenes.

Se requiere exploración adicional en algunas fallas, para evaluar a detalle la permeabilidad y su conductividad hidráulica y verificar el cierre hidráulico, para evitar riesgos de filtraciones.

Realizar el levantamiento a detalle de bloques en cauce y laderas, para conocer a detalle zonas potencialmente inestables en la boquilla.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**C.F.E. 1993.** Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo.

**Delgado, V., M. A., Sánchez, A. E., Vázquez, R. R., y López, G. G., 1996.** Informe sismotectónico regional del proyecto hidroeléctrico Las Cruces, Edo. de Nay., C.F.E. Inédito.

**Esteva, L. 1970.** Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería. Informe 246, Instituto de Ingeniería, UNAM.

**INEGI, 1999,** Síntesis De Información Geográfica del Estado de Nayarit.

**INEGI, 1999,** Síntesis De Información Geográfica del Estado de Nayarit, Anexo Cartográfico.

Köppen Wladimir Peter, Clasificación Climática, Rusia 1900, Wikipedia.

**McDowell, F. W. Keizer, R.,P., 1977.** Timing of Mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, México. Geological Society of America. Bulletin, vol. 88, p. 1479-1487.

**McDowell, F. W., Clabaugh, S. E., 1979.**The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of western México; UNAM, Instituto de Geología. Rev., vol. No. 2, p. 195-206.

**Montúfar, B. M. y Sánchez, L. M., 1987.** Riesgo sísmico en el P.H. Aguamilpa, Nay. C.F.E. Inédito.

**Comisión Federal de Electricidad., 1994,** Monografía Geológica Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, Nay.

**Nakamura, 1989.** A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtemor on the ground surface QR or RTRS, 30 No. 1, pp. 25-33.

**Orozco, G. V. M., Vázquez R. R., Martínez C. H., 1997.** P.H. Pozolillo, Nay., Informe de prefactibilidad geológica de la alternativa Las Cruces. C.F.E. Inédito.

**Ragan Donald, M., 1987.** Geología estructural, introducción a las técnicas geométricas. Ed. Omega, Barcelona.

**Raisz, E.**, 1964. Landforms of México. Geography branch of the Office of Naval Research. Cambridge, Mass.

**Residencia de Estudios Geológicos de los Ríos Baluarte y Presidio**, 1982. Geología regional de tercio inferior de la cuenca del río Mezquital-San Pedro, Durango-Nayarit. Inf. E2-07-17-04. SEZPN, CFE.

**Residencia de Estudios Geológicos de los Ríos Baluarte y Presidio**, 1982. Geología regional porción inferior del río San Pedro, Nay. SEZPN, CFE.

**Residencia de Estudios Geológicos de los Ríos Baluarte y Presidio**, 1983. Evaluación geológica-geotécnica de gran visión de los estrechamientos Platanares, Pozolillo, El Limón, Cruces y Tecarita. Río San Pedro, estado de Nayarit. SEZPN, CFE.

**Residencia de Estudios Geológicos de los Ríos Baluarte y Presidio**, 1983. Geología regional de las cuencas de los ríos San Pedro y Acaponeta, estados de Durango y Nayarit. SEZPN, CFE.

**Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos**, 1958, Carta Nacional de Regiones Hidrológicas de la SARH.

**Walter T. Huang**, 1986, Petrografía, edit Hutea, México.



# **ANEXOS**

## **ANEXOS**

**ANEXO A.-** Análisis petrográficos

**ANEXO B.-** Plano

<b>PLANO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>ESCALA</b>
1	GEOLOGÍA DE LA BOQUILLA. ....	1 : 2 000

**ANEXO C.-** Anexo de perforación

En este anexo se presenta la descripción del barreno CR-2