

México, Distrito Federal, a 20 de noviembre de 2014

Lic. José Alberto Reyes Fernández
Titular de la Unidad de Enlace para la
Transparencia y Acceso a la Información.
Presente.

Me refiero a su correo electrónico de fecha 11 de noviembre de los corrientes, relativo al Recurso de Revisión RDA-1093/14 derivado de la Solicitud de Información Pública No. 900342/14, mediante la cual solicita:

“Proyecto Ejecutivo de los túneles I y II del “Libramiento Sur de Morelia”, en el Estado de Michoacán”.

Sobre el particular se anexan las 465 fojas solicitadas y puestas a disposición en versión pública, toda vez que el solicitante realizó el pago correspondiente.

Sin otro particular le envío un cordial saludo.

Atentamente

La Directora Jurídica



M en D. María del Carmen Lara Jiménez

SCT



SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES

SUBSECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA
DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS
DIRECCIÓN TÉCNICA
SUBDIRECCIÓN DE PROYECTO DE CARRETERAS

**PROYECTO EJECUTIVO DE LOS TÚNELES I Y II
DEL "LIBRAMIENTO SUR MORELIA"
UBICADOS ENTRE EL KM. 1+371 AL KM. 1+819.77
Y DEL KM. 3+471.26 AL KM. 4+204.40
TRAMO JESUS DEL MONTE – MORELIA
EN EL ESTADO DE MICHOACÁN**

INFORME FINAL



Consultec Ingenieros Asociados S.C.



Julio de 2011



1

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

1

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

1.1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es el desarrollo del proyecto ejecutivo de dos túneles carreteros en el Libramiento Sur Morelia, en el estado de Michoacán. Para tal efecto fue requisito indispensable contar con un modelo geológico-geotécnico de la zona de los túneles que hiciera posible: a) Realizar el diseño de las obras de emportalamiento. b) Definir la geometría de las excavaciones. c) Diseñar los sistemas de sostenimiento, el soporte temporal y el revestimiento. d) Indicar los procedimientos constructivos más convenientes.

1.2. Localización y Características Generales de la región

La zona de los túneles se localiza en la porción sureste de la ciudad de Morelia en el estado de Michoacán (figura 1.1). Se puede acceder al sitio tomando la autopista México-Guadalajara vía corta, en el tramo Maravatio-Zapotlanejo, desviándose en el entronque en dirección a la ciudad de Morelia con una distancia aproximada de recorrido en línea recta de 21 km; a partir de este sitio se toma la avenida Camelinas con dirección al Club Campestre de Morelia ubicado aproximadamente a una distancia de 3.5 km y desde este punto el recorrido a pie se realiza por caminos de terracería y veredas para llegar a las zonas donde se ubica el eje de trazo de los túneles carreteros.

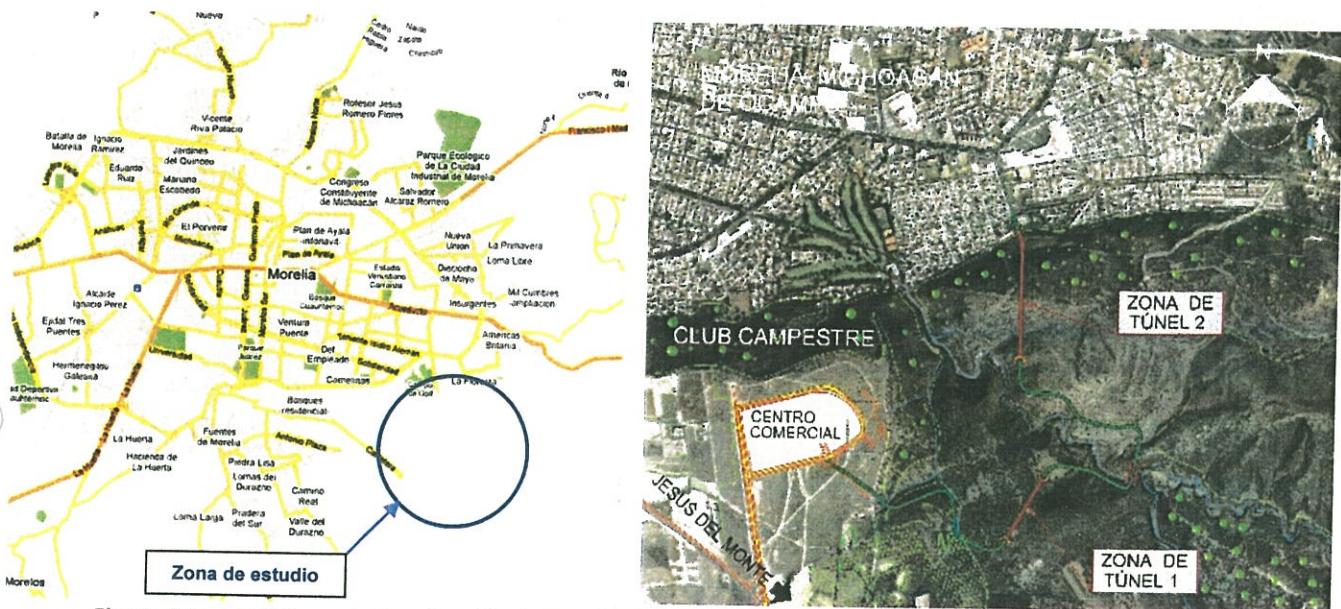


Figura 1.1. y 1.2 Plano de localización de los túneles en la ciudad de Morelia y detalle de la zona de estudio.

1.2.1 Vías de Comunicación

En su porción oriental entran dos caminos provenientes de la ciudad de México, el federal número 15 y el 120. El primero llega a Toluca y de ahí se adentra en territorio michoacano, en donde pasa por Zitácuaro y Ciudad Hidalgo y arriba a la capital estatal Morelia. El segundo entra al estado por Zinapécuaro, se dirige hacia el suroeste hasta converger con la No. 37 y en su recorrido une las poblaciones de Morelia, Pátzcuaro, Villa Escalante, Ario de Rosales y La Huacana.

El eje No. 37 recorre a la entidad de norte a sur y atraviesa las dos grandes provincias fisiográficas que la conforman -Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur-. Toca ciudades asentadas en las mismas, como La Piedad Cabadas, Purépero, Uruapan, Nueva Italia, Arteaga y Playa Azul.

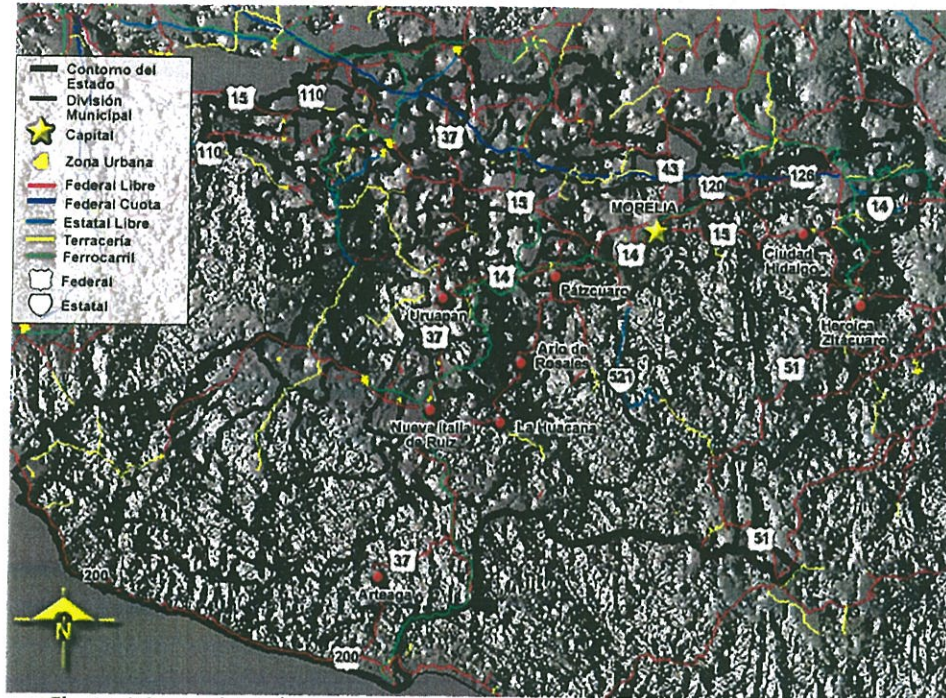


Figura 1.3. Localización de las principales vías de comunicación al sitio de estudio

1.2.2 División política

El estado de Michoacán se ubica en el centro-oeste del territorio mexicano. Limita al norte con los estados de Guanajuato y Querétaro, al este con el estado de México, al sur con Guerrero al suroeste con el Océano Pacífico y el noroeste con Colima y Jalisco. Cubre una superficie de 58,585 km², que representa el 3% de la superficie total del país, ocupando el lugar número 16 en extensión entre las 32 entidades federativas de México. Se encuentra ubicado entre las coordenadas 17° 55' y 20° 24' de latitud norte, y las coordenadas 100° 04' y 103° 44' de longitud oeste.

1.2.3 Orografía

La orografía de Michoacán es una de las más accidentadas de México y contiene numerosos volcanes que forman parte del Eje Volcánico Transversal (44,98 % de su superficie) y de la Sierra Madre del Sur (55,02 % de la superficie). La altitud del estado oscila entre los 0 y 3840 msnm, teniendo como principales elevaciones las siguientes:

- Volcán Tancítaro: 3.840 msnm
- Cerro de las cuevas: 3.640 msnm
- Cerro de San Andrés: 3.600 msnm
- Cerro Patambán: 3.500 msnm
- Cerro de las Papas: 3.400 msnm
- Cerro Zirate: 3.340 msnm

1.2.4 Hidrografía

El estado de Michoacán cuenta con 228 km de costas. Los principales lagos del estado son: el lago Cuitzeo, el lago de Pátzcuaro, el lago de Zirahuén, una parte del lago de Chapala, y la Presa Infiernillo. Su río más importante es el río Lerma, el cual nace en el Estado de México y abastece a la presa de Tepuxtepec para regar las tierras del valle de Maravatío y producir energía hidroeléctrica. Le siguen en importancia el río Balsas con numerosos afluentes, como el río Cupatitzio el cual alimenta las caídas de agua de La Tzaráracua y el río Tepalcatepec.

1.2.5 Climas

En Michoacán se tiene una precipitación media anual de 806 mm, lo cual constituye a la entidad como la decimosexta más lluviosa del país. Por otra parte, la temperatura promedio anual es de 22.2 °C, teniendo como extremos temperaturas mínimas anuales de 14.7 °C y de 29.6 °C, lo cual la constituye como la décimo tercer entidad federativa más cálida del país.

Los climas que predominan en la entidad son:

Cálido sub-húmedo con lluvias en verano:
34.7 % de la superficie estatal.

Templado sub-húmedo con lluvias en verano:
27.9 % de la superficie estatal.

Semicálido sub-húmedo con lluvias en verano:
20.3 % de la superficie estatal.

Semiseco muy cálido y cálido:
10.6 % de la superficie estatal.



Figura 1.4. Climas en el estado de Michoacán

1.3. Topografía y Trabajos Preliminares

Al inicio de los trabajos se realizó una visita de inspección y reconocimiento al sitio del proyecto en la cual participaron el gerente del proyecto, el geólogo y el supervisor de los trabajos de campo de la empresa.

Tanto en el sitio del proyecto como en las oficinas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT); Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM) se recopiló toda la información disponible. Esto es: planos topográficos, fotografías aéreas, plantas y perfiles, bancos de nivel, referencias de estudios y todo lo necesario que pudiera ser útil para el proyecto. Con esta información y una localización preliminar de las obras de emportalamiento, se fijaron en campo los sitios para llevar los trabajos topográficos, geológicos y geofísicos.

Se procedió a iniciar el replanteo del eje del trazo de ambos túneles. Posteriormente se realizó la nivelación de dicho trazo, después se efectuaron los levantamientos topográficos de las zonas de los portales. Estos levantamientos se efectuaron con distanciómetro electrónico tipo: Estación total TSR 405. Empleando una brigada de topografía.

Se levantaron 5.8 hectáreas (58,000 m²) en el túnel I y 10 hectáreas (100,000 m²) en el túnel II, que abarcan la zona de portales y prácticamente todas las laderas del cerro. En la zona de portales se realizaron secciones transversales a cada metro y con la información topográfica recabada se dibujaron las curvas de nivel a cada metro debidamente referenciadas a la topografía.

La brigada topográfica de esta empresa brindó el apoyo necesario para realizar los trabajos geofísicos y las perforaciones exploratorias directas, dando el posicionamiento de los puntos donde se hicieron los estudios y se realizaron los sondeos.

Todos estos trabajos fueron supervisados y controlados por ingenieros de la empresa, quienes permanecieron en el sitio durante el tiempo que duraron los trabajos de campo.

1.4. Estudios Geológicos

El estudio geológico de los túneles se desarrolló en tres etapas. En la primera etapa se obtuvo un conocimiento preliminar de la geología tanto regional como local, a partir de la bibliografía existente en las bibliotecas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y de la Universidad Nacional Autónoma de México; se consultó el Atlas de Riesgo Geológico de Morelia y de las fotografías aéreas y de los planos topográficos disponibles. Se describieron cuidadosamente los principales accidentes y las estructuras geológicas que podrían tener importancia durante la construcción de los túneles, y se definieron en forma preliminar las unidades litoestratigráficas y la naturaleza del macizo rocoso.

La segunda etapa de los estudios consistió en recorridos de campo para definir las unidades litológicas e identificar las que fueron anticipadas. Esta etapa sirvió también para confirmar y ubicar los posibles accidentes geológicos (fallas, fracturas, estructuras singulares, etc.). Se determinó, asimismo, el grado de alteración, meteorización y fracturamiento de la roca en superficie, así como la orientación de los principales planos de debilidad. La información geológica fruto de la observación directa en campo

permitió disponer de un modelo geológico preliminar que, a su vez, sirvió de apoyo para realizar las perforaciones exploratorias directas.

La tercera etapa de reconocimiento geológico consistió en identificar las diferentes unidades litológicas y los datos estructurales de las principales discontinuidades, así como la existencia de estructuras mayores. Dicho reconocimiento se efectuó en cortes existentes y en afloramientos expuestos en las cañadas de los arroyos más próximas a los portales de los túneles. Se integró también la información procedente de los tendidos geofísicos realizados a lo largo de la traza de los nuevos túneles, así como la obtenida de los núcleos de roca recuperados en los barrenos realizados para el túnel I. De estos barrenos se determinaron la litología, condiciones y características del fracturamiento y los parámetros de recuperación (*REC*).

Una vez que se dispuso de la información de los estudios geológicos y de las perforaciones exploratorias, se procedió a la integración de la información geológica y geotécnica del macizo para la obtención del modelo geológico definitivo.

1.5 Estudios Geofísicos

Para verificar la distribución y composición de los materiales del subsuelo y la posible existencia de algunas estructuras geológicas en los sitios de interés, se decidió recurrir a la exploración indirecta. La exploración del subsuelo en la zona de los dos túneles carreteros se efectuó utilizando los métodos sísmico de refracción y geoeléctrico, este último en su modalidad de sondeos eléctricos verticales tipo Schlumberger.

1.5.1 Sísmica de Refracción

En la aplicación del método sísmico de refracción se busca conocer el tiempo mínimo que tardan las ondas sísmicas o elásticas en propagarse desde el punto en que se generan mediante una excitación en las partículas del terreno, hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo, y de estos hasta emerger en la superficie, en donde las vibraciones son detectadas por una serie de 12 geófonos cuya distribución en conjunto se conoce como tendido sísmico.

Las ondas sísmicas se generaron en lugares previamente definidos denominados puntos de tiro (PT). El efecto se logró con el impacto de un cuerpo pesado, que en este caso fue un marro de 12 libras de peso sobre una placa metálica colocada en la superficie del terreno; ambos elementos (marro y placa) al entrar en contacto disparan el tren de ondas en el terreno registrándose este instante en el sismógrafo y se activa el registro de la señal de los 12 geófonos detectores, que son los elementos transductores que convierten el movimiento vibratorio del terreno en una señal eléctrica que se envía al sismógrafo, el cual finalmente amplifica las señales y las presenta en forma gráfica como sismograma.

El equipo utilizado fue un sismógrafo 12 canales marca Geometrics, modelo ES-3000, acoplado con una lap-top que permite visualizar en pantalla la información registrada y poder analizar en forma inmediata el tiempo de viaje de los arribos de las ondas longitudinales o primarias.

Como fuente de energía se realizaron impactos de un marro de 12 libras sobre una placa metálica, utilizando un dispositivo apropiado para lograr la sincronía necesaria entre el inicio de la perturbación del terreno y el inicio de la grabación de tal perturbación. Se utilizó un carrete con cable especial para la conexión de 12 geófonos al sismógrafo, con espaciamiento máximo de 5 m entre geófonos. Todos los geófonos son de componente vertical de 14 Hz.

Una vez obtenidos los sismogramas en campo, el procesamiento de la información incluyó la lectura de los tiempos de los primeros arribos que con las ubicaciones tanto de los puntos de tiro como de los geófonos, permitió la elaboración de las gráficas tiempo-distancia (gráficas dromocrónicas) donde el eje de las ordenadas corresponde con los tiempos de arribo de las ondas longitudinales expresadas en milisegundos y el eje de las abscisas corresponde con las separaciones entre geófonos y puntos de tiro (metros). La interpretación se realizó a través de estas gráficas en donde se analizaron los contrastes de velocidad sísmica aparentes, los cuales corresponden con las condiciones naturales de los materiales del subsuelo, posteriormente se obtuvieron las velocidades reales y los espesores de cada una de las capas detectadas para formar un modelo geosísmico del sitio, el cual agrupa zonas con características similares de valores de velocidad.

En suma los estudios geofísicos tuvieron como finalidad principal:

- a) Conocer la distribución de los diferentes materiales existentes del subsuelo, e inferir algunas de sus características de fracturamiento, alteración y compacidad
- b) Determinar los espesores de los diferentes materiales que constituyen el macizo rocoso, así como sus implicaciones estructurales en las futuras zonas de excavación.

1.6 Perforaciones Exploratorias Directas

En el túnel I se realizaron cinco sondeos de exploración directa con recuperación de núcleos para su posterior ensayo en el laboratorio con objeto de determinar sus propiedades mecánicas y resistentes. En el túnel II no se permitió el acceso al personal para realizar la perforación de los sondeos, por lo que se recomienda ampliamente efectuar por lo menos 3 sondeos exploratorios antes del inicio de la excavación de los portales y del túnel, para verificar el tipo y la calidad del macizo rocoso.

Los barrenos se perforaron con equipo ligero tipo Winkie J.K., Smith utilizando barriles muestreadores (BQ). La localización de los sondeos se hizo de forma tal que se obtuviera el mayor conocimiento posible del macizo a la profundidad de los túneles y en su porción central, para poder apreciar la calidad de la roca a distintas profundidades. En esta misma etapa se determinó el Índice de Penetración Estándar (*IPE*) y el porcentaje de recuperación (*REC*).

1.7 Pruebas de Laboratorio

A partir de las muestras de roca recuperadas de los barrenos S-1 a S-4 del túnel I se realizaron ensayos de laboratorio. Se eligieron núcleos de roca representativos de las unidades litológicas ubicados en la zona más próxima que influirán en el comportamiento del túnel, por lo que se consideraron aquellos ubicados a una distancia hasta de dos diámetros del túnel sobre la clave, los que se encuentran a la misma profundidad del túnel y los que están bajo el piso del mismo.

Debido a que las muestras para cada prueba deben tener las dimensiones que establecen las normas de prueba de la Internacional Society of Rock Mechanics (ISRM) o de la ASTM, se eligieron las muestras que cumplieran con la relación de esbeltez (altura/diámetro) especificada.

Los núcleos seleccionados son representativos de los dos paquetes o unidades de roca principales existentes en la zona del túnel. Las tablas de resultados incluidas en el cuerpo de este informe, indican con detalle las dimensiones y profundidad de cada muestra.

Los núcleos seleccionados son de diámetro IAX (3.45 cm) y fueron cortados en las cabezas extremas perpendicularmente al eje axial para alcanzar una altura de muestra entre 2 y 2.5 veces el diámetro de la misma para el ensayo de compresión simple y módulo de deformabilidad y de 2 veces el diámetro para el ensayo de tensión indirecta con prueba brasileña. El corte perpendicular se realizó con una cortadora de disco sencillo diamantado en una de las caras y rotando 180° la muestra para efectuar el corte de la cara opuesta y lograr el mayor paralelismo posible de las caras extremas de cada muestra. Una vez hecho el corte, se procedió a terminar las caras utilizando polvo de esmeril grueso y mediano para el desbaste y polvo fino para el pulido y terminado final de las caras (fotografía 39) de tal forma de evitar fricción con las platinas de la prensa.

1.8. Integración de la Clasificación Geomecánica

Una vez recabada y procesada la información de campo, y con base en la litología, grado de alteración y fisuramiento, se caracterizaron las unidades en términos cualitativos empíricos según convino. De dicha clasificación se desprendieron las recomendaciones preliminares para soporte de la excavación de cada uno de los túneles, tiempo de auto soporte y tamaño máximo del claro que no requiere de soporte. De ésta, forma se elaboró un perfil geotécnico integrado, el cual muestra la distribución de las unidades geotécnicas e indica las clasificaciones geomecánicas a lo largo del eje del túnel.

La clasificación geomecánica se hizo definiendo las unidades que tuvieron propiedades de deformabilidad y resistencia similares, creando un modelo con el que se prepararon las bases teóricas y numéricas del comportamiento tenso-deformacional de la excavación en sus distintas etapas, y de la interacción de los elementos estructurales que se emplazarán dentro del túnel.

Con base en estos trabajos de clasificación se definieron:

- a) La ubicación conveniente de los portales.
- b) Las propiedades mecánicas de las distintas unidades geológicas mediante métodos empíricos.
- c) El probable estado tensional inicial (geoestático y/o tectónico).
- d) Los diferentes modelos geomecánicos a lo largo del túnel.
- e) Los modelos de análisis numérico.

1.9. Proyecto Ejecutivo

Con la información preliminar disponible se procedió inicialmente a desarrollar un anteproyecto puramente geométrico, con objeto de establecer los elementos básicos para el posicionamiento de los sitios de estudios y levantamientos, así como para definir en forma preliminar la ubicación de las estructuras de emportalamiento, túneles falsos y para obras de acceso.

Posteriormente, cuando se definió el modelo geológico y geomecánico preliminar y se contó con parte de la información geotécnica, se pudo iniciar el diseño geotécnico y el análisis preliminar de comportamiento de la excavación que sentaron las bases para la selección de las etapas de excavación más convenientes.

Simultáneamente, se realizaron los análisis de estabilidad de los taludes y de los tajos de acceso para determinar la geometría de los cortes, así como las soluciones de drenaje y las características de los elementos de refuerzo y tratamientos necesarios para garantizar la estabilidad.

Más adelante, una vez establecidos de forma definitiva el modelo geológico, geomecánico y valorados todos los aspectos geotécnicos, se procedió a llevar a cabo el análisis de comportamiento y el análisis de interacción terreno-soporte y terreno-revestimiento para cada situación establecida. Asimismo, se estudiaron los efectos estructurales de diversos sistemas de estabilización y el método constructivo más adecuado.

Los procedimientos constructivos en cada una de sus etapas, tomaron en cuenta, entre otros aspectos, los siguientes: forma de ataque de la excavación, sistemas de estabilización y/o soporte para la clave y paredes de la excavación, avances máximos permisibles, ciclos de construcción con tiempos que garanticen la estabilidad de la excavación y métodos para la colocación del revestimiento definitivo.

Con objeto de observar el comportamiento de las excavaciones con el tiempo, para fines de adecuar los avances, etapas y sistemas constructivos y para detectar oportunamente los movimientos que pudieran indicar algún riesgo durante la construcción, se preparó un proyecto para instrumentar y monitorear el comportamiento del túnel.

Se realizaron los planos ejecutivos de todos los aspectos y todas las etapas de la construcción. Éstos, junto con una memoria técnica de todas las actividades mencionadas en el estudio, los análisis y cálculos realizados y el Catálogo de Conceptos y Cantidades de Obra, constituyen el siguiente Informe Final.



2

GEOLOGÍA

2

GEOLOGÍA

2.1. INTRODUCCIÓN

En este informe se describen en forma general los trabajos efectuados y los resultados obtenidos de la exploración geológica efectuada a lo largo del trazo del eje de dos túneles localizados entre los kilómetros 1+390 al 1+795 y del 3+495 al 4+195, que forman parte del Libramiento Sur de la ciudad de Morelia, en el Estado de Michoacán.

El levantamiento geológico se efectuó a partir de recorridos físicos a lo largo del eje de trazo de los túneles y de las zonas aledañas, obteniendo datos estratigráficos, litológicos y estructurales a partir de los afloramientos superficiales observados en los cerros donde se excavarán dichos túneles; posteriormente se incorporó también la información litológica, estratigráfica, estructural y los valores de porcentaje de recuperación y de índice de calidad de la roca (RQD) recabados de cada sondeo directo perforado en el túnel I.

2.2. LOCALIZACIÓN Y ACCESO AL SITIO

La zona de estudio se localiza en la porción sureste de la ciudad de Morelia en el estado de Michoacán (figura 1). Se puede acceder al sitio tomando la autopista México-Guadalajara vía corta, en el tramo Maravatio-Zapotlanejo, desviándose en el entronque en dirección a la ciudad de Morelia con una distancia aproximada de recorrido en línea recta de 21 km; a partir de este sitio se toma la avenida Camelinas con dirección al Club Campestre de Morelia ubicado aproximadamente a una distancia de 3.5 km y desde este punto el recorrido a pie se realiza por caminos de terracería y veredas para llegar a las zonas donde se ubica el eje de trazo del proyecto del túnel carretero.

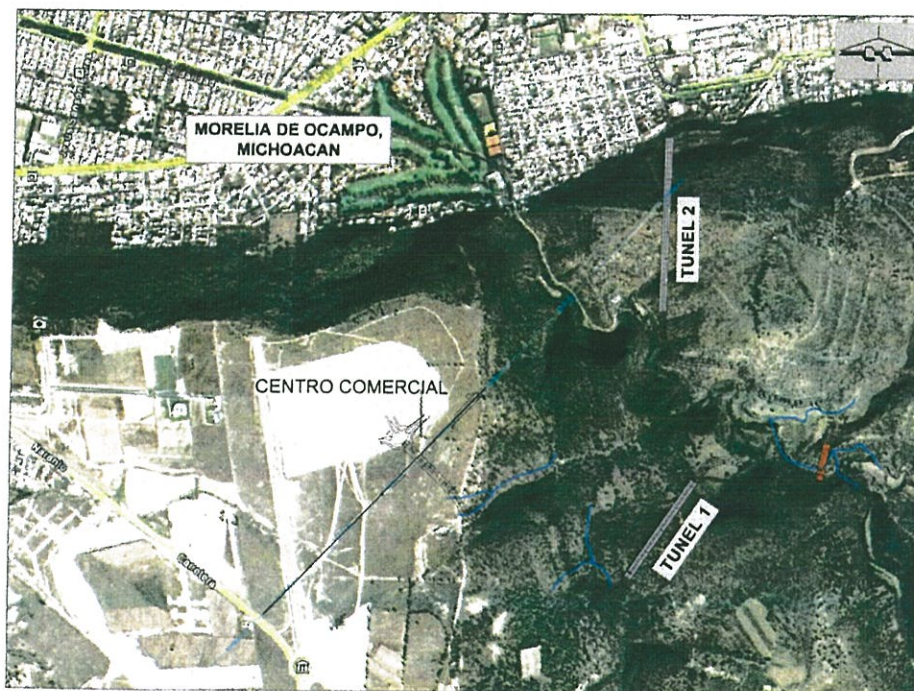


FIGURA 1

IMAGEN SATELITAL MOSTRANDO LA UBICACIÓN DEL TRAZO DE LOS TÚNELES CARRETEROS 1 Y 2 EN EL LIBRAMIENTO SUR DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICH.

Figura 1. Ubicación de los túneles I y II del Libramiento sur Morelia

2.3. EXPLORACIÓN GEOLÓGICA

2.3.1. Fisiografía y Geomorfología

El área de estudio queda comprendida en el centro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico. (E Raisz (1964) Referencia 2) y dentro de la subprovincia conocida como Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo del reciente, según M. Álvarez (1958) (referencia 6). La primera se caracteriza por una altiplanicie situada a más de 2,000 metros sobre el nivel del mar (msnm) de la que sobresalen numerosas montañas de varios cientos de metros de altura. La mayoría de estas, representan aparatos volcánicos con sus respectivas estructuras relacionadas con flujos lávicos, brechas y cenizas, cuya composición litológica va desde rocas basálticas a riolíticas. Las emisiones lávicas tienen edades que varían desde el plioceno tardío hasta el reciente; observándose gran variedad de estas en su estado de erosión. Entre los aparatos volcánicos se abren llanuras y cuencas que están formadas en gran parte por rellenos aluviales o lacustres que contienen gran diversidad de rocas mezcladas con cenizas volcánicas.

Los principales fenómenos en esta provincia están representados por fallas y fracturas que acompañan a las emisiones volcánicas. La dirección principal de estos sistemas de fracturamiento regional es aproximadamente E-W, correspondiendo en su conjunto con las regiones de fallas activas y potencialmente con evidencias de actividad reciente.

La región al este del estado de Jalisco, el sur de Guanajuato, el norte de Michoacán y el poniente del estado de México forma lo que se ha definido como la subprovincia Zona de Fosas Tectónicas descrita por Manuel Álvarez Jr. (referencia 6), la cual está caracterizada por numerosos volcanes con derrames basálticos y por lagos cuya morfología, orientación y distribución sugieren la idea de estar situados en fosas tectónicas, de donde toma su nombre.

Las unidades litológicas constituidas por riolitas, dacitas, andesitas y traquitas, situadas en esta sub-provincia, generalmente se encuentran cubiertas por basaltos, y estos a su vez forman la cima de las montañas; además, los valles que originalmente habían sido cuencas profundas, se han llenado con material fluvial y lacustre procedente de las montañas, y enormes masas de cenizas de los volcanes más recientes (depósitos vulcanosedimentarios).

Entre los lagos formados en estas estructuras (fosas tectónicas), el más sobresaliente es el lago de Chapala, cuyas márgenes más extensas son paralelas al sistema principal regional de fracturamiento y en las que se ha acumulado un enorme espesor de basalto.

Los lagos de Atotonilco y de Sayula posiblemente estén relacionados con el sistema Chapala; los lagos de Cuitzeo y Yuriria tienen la misma orientación que el de Chapala, por lo que podrían asociarse a este mismo sistema.

Numerosos aparatos volcánicos se encuentran en esta subprovincia desde el Iztaccíhuatl, que tiene una cresta alargada formada por una sucesión de mantos delgados de lava y brechas que fueron arrojadas por cráteres que actualmente han desaparecido, hasta el volcán Parícutín que duró nueve años en actividad, siendo el volcán más estudiado de México.

La zona de estudio se caracteriza por un sistema de montañas semialargadas con orientación preferencial NE-SW, separadas entre sí, por barrancas y pequeños valles intermontanos; en las cimas de estas montañas suelen formarse mesetas con tendencia a ampliarse hacia el sur de la ciudad; los cerros se encuentran constituidos principalmente por secuencias volcánicas de composición intermedia a básica, en las que predominan rocas piroclásticas intercaladas con coladas basálticas, andesíticas, tobas vitrolíticas e ignimbritas coronando a estas unidades. Estas rocas presentan un proceso de erosión

incipiente y diferencial, labrando un relieve con diferencias topográficas que varía de los 1,900 a los 2,200 msnm, representados por la zona de planicies y montañas de la ciudad de Morelia. La cuenca de Cuitzeo forma parte de la macro-cuenca del Lerma, cubre un área de 4,000 km² sobre una depresión de origen tectónico que ha sido rellenada por depósitos lacustres y vulcanosedimentarios; en la zona del proyecto los paisajes están conformados por lomeríos, aparatos volcánicos y mesetas volcánicas, así como depósitos de origen fluvio-lacustre.

El clima predominante es templado con humedad media a cálido, con régimen de precipitación que oscila entre los 700 y 1,000 mm de precipitación anual y lluvias invernales máximas de 5 mm. La temperatura media anual oscila entre los 16 y 19° C. Los vientos dominantes proceden del suroeste y noroeste, variables en Julio y Agosto con intensidades de 2 a 14.5 km/h. El desarrollo principal en la región es de tipo agrícola constituido por cultivos de maíz, flor de temporada como el cempazuchitl, ganado y pesca, entre otros.

2.3.2. Geología Regional

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra comprendida dentro de la provincia geológica denominada Eje Neovolcánico Transmexicano, de origen volcánico, edad Cenozoico y ambiente de arco continental.

a) Eje Neovolcánico Transmexicano

La Faja Volcánica Transmexicana atraviesa el centro de la República Mexicana con rumbo WNW-ESE; es una cadena volcánica activa con elevaciones comprendidas entre los 3,000 y los 5,700 metros sobre el nivel del mar. Está compuesta por una serie de centros volcánicos predominantemente cálcico-alcalinos. La mayoría de estos centros son de edad Cuaternaria y algunos de ellos se encuentran todavía activos; también existen numerosos centros de edad Pliocénica. La Faja Volcánica Transmexicana cubre discordantemente las unidades orogénicas del sur de México que supuestamente forman un complejo de terrenos alóctonos acrecionados. Según Pasquaré y coautores (1986) la Faja Volcánica Transmexicana se puede subdividir en tres unidades morfoestructurales que son:

Porción occidental: comprende las fosas de Tepic-Guadalajara y Colima, controladas por fallas orientadas NW-SE que localmente son cortadas por fallas de dirección N-S y E-W. La fosa de Chapala está controlada por fallas orientadas E-W.

Depresión central: es una depresión tectónica que se extiende desde el lago de Chapala hasta Querétaro. Su límite oriental es el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende; además de regiones de bloques fallados situados al norte y al sur de la depresión central; las fallas tienen orientación NE-SW y a lo largo de ellas se han formado numerosos centros volcánicos.

Porción oriental: se extiende desde la falla Taxco-San Miguel de Allende hasta los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba al este. Consiste de un altiplano caracterizado por extensas llanuras situadas entre crestas volcánicas recientes y remanentes de antiguos volcanes Oligocénicos -Miocénicos.

2.3.3. Geología Histórica

La historia geológica se encuentra ligada con el vulcanismo Plioceno-Holoceno asociado con los procesos de subducción de la Placa Cocos, principal responsable del vulcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano. En el estado de Morelia se concentró la mayor actividad volcánica de edad Pliocénica-Cuaternaria. Los volcanes de Michoacán, han tenido una sola fase de esta actividad volcánica; los aparatos volcánicos allí reconocidos y las rocas producto de esta actividad están distribuidas ampliamente en el área ya que durante este periodo el vulcanismo fue extremadamente abundante en la región. En general, las estructuras grandes (estratovolcanes) son asignadas al Plioceno y los pequeños

volcanes monogénicos y conos cineríticos al Cuaternario. El Plioceno está representado por enormes apilamientos de lavas de naturaleza andesítica generalmente, aunque puede ser basáltica y dacítica localmente y riolítica en algunas ocasiones. Las ignimbritas dacíticas de la región también han sido atribuidas a esta época, así como los productos sedimentarios lacustres acumulados en depresiones tectónicas originados por fallamiento tensional a finales del Terciario sobre la región; estas fallas al final del Terciario (finiterciarias) han sido en la mayoría de los casos conductos del volcanismo del periodo Cuaternario.

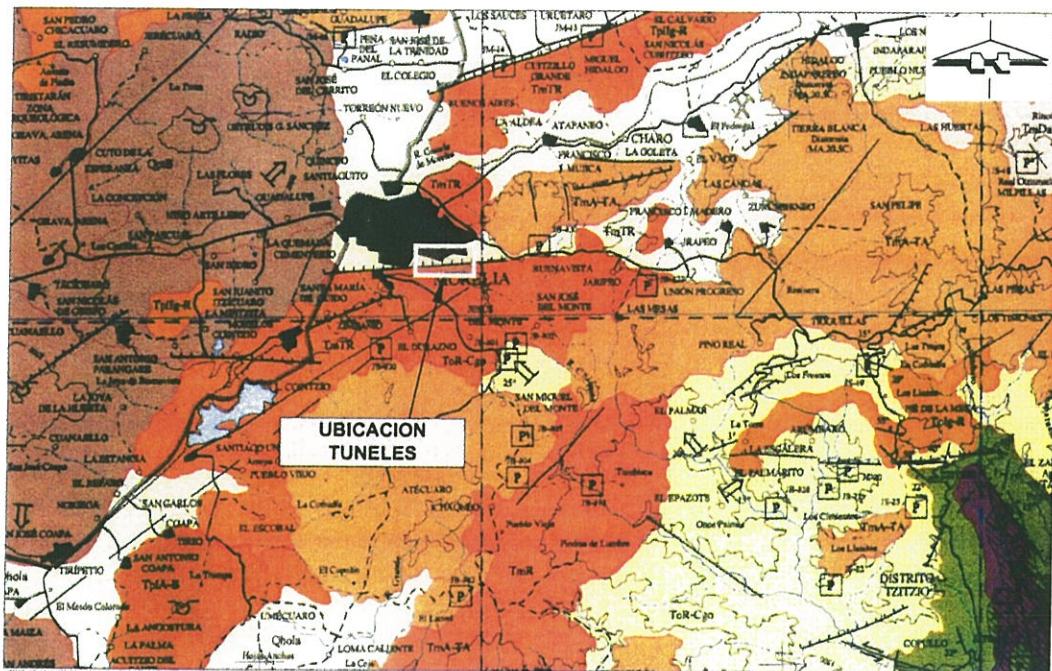


FIGURA 2
GEOLOGIA REGIONAL EN LA ZONA DE MORELIA, MICH.

Figura 2. Geología Regional

2.3.4. Geología Local

La zona explorada forma parte de un conjunto de depresiones lacustres que se encuentran a lo largo de una franja con rumbo E-W localizada en el centro del Eje Neovolcánico Transmexicano y que está cubierta por las sucesiones Terciarias del Oligoceno-Mioceno producidas por el desarrollo de la sierra de Mil Cumbres, posteriormente cubierta por eventos volcánicos.

En la zona se observan estructuras alineadas, asociándose a un sistema regional de fallas con dirección preferencial E-W y NE-SW. Las secuencias más antiguas se conforman por lavas fracturadas de composición andesítica correspondientes con el vulcanismo de edad Oligoceno-Mioceno. Estas rocas se encuentran cubiertas por brechas volcánicas, tobas vitrolíticas color gris tenue e ignimbritas de composición vítrea hacia las cimas de los cerros, como es el caso de los cerros Coronilla Chica y Coronilla Grande ubicados al sureste del sitio donde se emplazarán los túneles, muy próximos a los mismos.

La zona de estudio se encuentra enmarcada por una secuencia de rocas volcánicas extrusivas de composición básica a intermedia con edades que van del Terciario hasta el Cuaternario representadas por andesitas, brechas volcánicas, tobas vitrolíticas e ignimbritas las cuales se encuentran intercaladas de forma irregular y/o pseudoestratificadas, cubiertas de materiales aluviales en las partes bajas y de suelos residuales en las laderas y partes altas. Estas rocas se aprecian poco intemperizadas y muestran erosión diferencial y fracturamiento incipiente.

Estructuralmente el área se encuentra afectada por un sistema de fallas semiparalelas de tipo normal, con orientaciones E-W y NE-SW y con longitudes que se extienden entre los 3 y 6 kilómetros. Las fallas del sistema de Cuitzeo se inclinan con gran ángulo, definiendo estructuras en pilares y fosas tectónicas, como la fosa tectónica de Cuitzillo, localizada al noreste de la ciudad de Morelia, la fosa tectónica de Iramuco, ocupada por la parte oriental del lago de Cuitzeo y el pilar tectónico de Santa Ana Maya, ubicado inmediatamente al oriente de esa población. Este último se levanta hasta una altitud de 2,640 msnm y 780 m sobre el lago de Cuitzeo.

El límite meridional del sistema de fallas de Cuitzeo en la región lo constituyen las fallas de Morelia, conocidas localmente como falla Santa María, Morelos y Cointzio. Estas son fallas normales escalonadas con rumbo NE-SW que junto con las de Queréndaro comparten las mismas características estructurales. **En la zona de estudio por donde atravesarán los túneles carreteros no se detectaron estructuras asociadas a este sistema de fallas.**

En los estudios realizados para el proyecto ejecutivo de los túneles I y II, no se detectó ninguna falla, sólo sistemas de fracturamiento en el macizo rocoso; por lo que el trazo de los túneles no se verá afectado directamente por las fallas regionales, quedando la Falla regional La Paloma, fuera de la zona de influencia del portal de salida del Túnel II.

La existencia de éstas fallas geológicas y de los sistemas de fracturamiento, no pone en riesgo al libramiento Sur de Morelia. En los proyectos de los túneles, se han tomado las previsiones geotécnicas necesarias, diseñando las fases de excavación y sostenimiento con la más alta tecnología de construcción de soporte existente en el mundo, como lo es el sistema de enfilaje o paraguas de micropilotes, que se presentan en el apartado de geotecnia y que fueron plasmados en los planos constructivos.

La sucesión vulcanosedimentaria Cenozoica, donde se desarrollará la construcción de los túneles se caracteriza por su buena exposición desde la base hasta la cima debido a la profunda erosión de la zona en forma de cañadas y amplios valles. Estas características topográficas aunados a la tendencia horizontal de los estratos, facilita su cartografía y control estratigráfico y estructural. De hecho, la persistente continuidad lateral de los estratos en superficie facilita la zonificación geológica y geotécnica de las masas rocosas donde se construirán ambos túneles.

La actual geomorfología de la región de Morelia está regulada por importantes episodios de tectonismo, magmatismo y vulcanismo cortical del Mioceno Superior y del Reciente, que han desarrollado sus características litoestratigráficas y estructurales que pueden ser diferenciadas en espacio y tiempo.

En este sentido, las grandes fallas regionales de dirección general este-oeste, como la de La Paloma se encuentran actualmente en un estado avanzado de madurez en su morfología. Han dejado de influir los esfuerzos tectónicos que le dieron origen, siendo los procesos erosivos dominantes que colmatan de sedimentos las depresiones estructurales que formaron. De esta forma, la traza de la falla de la Paloma, se encuentra obliterada por eventos tectónico-magmáticos y volcánicos posteriores; entre

estos las asociadas con el Eje Neovolcánico Mexicano Y las estructuras de dirección general NNW-SSE que la truncan y desplazan lateralmente la Falla La Paloma, como la falla del Río Chiquito.

Debido a lo anterior las grandes fallas regionales del Mioceno, de dirección general este-oeste, como la Falla de La Paloma han perdido su continuidad estructural. Su reactivación puede ocurrir en forma local o en forma puntual por procesos naturales o inducidos. Sin embargo, en la topografía de la región aún prevalecen las estructuras desarrolladas por estas fallas de carácter cortical, que quedan como depresiones estructural alargadas (Graben) como la del Valle de la Ciudad de Morelia y altos estructurales (Horst) representada por la Sierra de Santa María y de la Loma, actualmente muy erosionada.

Originalmente, la falla tectónica La Paloma, quedó enmarcada por una importante discontinuidad de tendencia vertical que trunca y desplaza verticalmente a una potente secuencia vulcanosedimentaria del Mioceno Inferior (Figura 3). A partir de entonces, se ha modificado el campo de esfuerzos que le dieron origen y el trazo de los planos de falla se ha destruido en gran parte por procesos erosivos. No obstante el fraccionamiento, desfase y erosión de su traza, es posible identificar en superficie relictos de los espejos de falla con estrías que indican la dirección del movimiento de desplazamiento. Estos espejos de falla han quedado expuestos en superficie precisamente por eventos de erosión remontante que se desarrolla en la actualidad.



Figura 3. Imagen satelital de la Ciudad de Morelia, indicando la traza de la falla la Paloma como uno de los rasgos estructurales de la zona que controla su relieve. Al norte de la falla se presenta el bloque hundido (Graben) y al sur de la falla un pilar o alto estructural (horst).

Debido a los procesos de erosión remontante de las laderas de la Sierra de Santa María y del Cerro de la Loma, la traza de estas fallas se encuentra prácticamente en su totalidad cubierta por gruesos depósitos de materiales aluviales del Valle de la Ciudad de Morelia.

En efecto, la intensa erosión remontante que se observa a lo largo de la ladera La Paloma, propicia la formación de una sucesión sobrepuesta de depósitos de talud, coluviales, aluviales y lacustres; todo su material clástico proviene de la erosión del la zona montañosa levantada de la Sierra de Santa María y Cerro de La Loma. Como se observa en la Figura 4, el nivel de avance erosivo de esta ladera es progresivo en el tiempo y espacio; la fuerte intensidad de la pendiente del terreno disminuye como avanza la erosión. En un principio se forma un terreno fuertemente escarpado acompañado de

gruesos depósitos aluviales que van colmatando de sedimentos las depresiones estructurales adyacentes.

Las serranías que se encuentran al sur de la falla de La Paloma se integran por potentes secuencias de rocas vulcanosedimentarias cenozoicas en estructura monoclinas. El nivel de continuidad lateral horizontal de los estratos de la zona es un indicativo de la estabilidad tectónica de la zona, con movimientos lentos de tendencia vertical.

La erosión diferencial, es el principal causante de los procesos de colapso de grandes masas de roca en las laderas de la Sierra de Santa María y de La Loma, accionados principalmente por procesos gravitatorios, isostáticos, sísmicos y climáticos

De esta forma, la sucesión vulcanosedimentaria de la zona de construcción de los túneles para el libramiento vehicular del sur de la Ciudad de Morelia, presenta diferentes resistencias a la erosión, que provoca el perfil escalonado de las laderas, al estar dominadas por unidad litológica de alta y baja resistencia a la erosión.



Figura 4. Perspectiva de la traza de la falla de Morelia con respecto al escarpe de erosión remontante en el bloque septentrional levantado, integrado por la Sierra de Santa María y el Cerro de La Loma.

Hacia la zona de los portales de salida del Túnel 1 y del Túnel 2, se presentan laderas con escalones y cornisas formadas por erosión diferencial. En la zona del portal de salida del túnel 2, el escalonamiento corresponde a un cuerpo de andesita duro, denso, compacto de distribución regional. Esta serie de cornisas o mesetas, que se observan en las laderas montañosas de la región ocurren parcialmente cubiertas por depósitos de talud mal consolidados. En el sitio de construcción del portal de salida del Túnel 2 el espesor de los referidos depósitos de talud es del orden de los 2 a 4 m, suprayaciendo a un macizo de rocas andesíticas duras, masivas y compactas. Esta unidad litológica, se encuentra cartografiada en el plano geológico de la zona como T (And), de gran importancia debido a que en este cuerpo volcánico se desarrollará casi toda la excavación subterránea del Túnel 2.

En efecto, el espolón o meseta de la zona del portal de entrada del Túnel 2, representa un estrato de andesítico de varias decenas de metro de espesor, al que sobreyacen, en posición casi horizontal, brechas andesíticas de menor resistencia a la erosión.

Los depósitos de talud, que ocurren en las laderas de la Sierra de Santa María y del Cerro de La Loma, incluyen grandes desprendimientos y desplomes de roca de tamaños muy variables, mal clasificados y mal consolidados. Los tamaños de los bloques de roca andesítica en el Cerro de La Loma y de rocas félsicas riolíticas en la Sierra de Santa María pueden alcanzar dimensiones métricas que de no estabilizarse representan un riesgo potencial. Los desplomes, volteos y deslizamientos son provocados por una marcada erosión diferencial principalmente por la erosión fluvial y sismicidad.

En los cortes del cauce del Río Chiquito, se puede apreciar que las andesitas basales TAnd, presentan mayor resistencia a la erosión y forman laderas de mayor pendiente que propician la formación de cascadas. En seguida, los estratos de brecha volcánica andesítica Tbv que le sobreyacen, en estratos subhorizontales, son menos resistentes a la erosión y forman laderas de menor pendiente.

Por tanto, la simple observación fotogeológica y la buena exposición de las unidades litológicas en superficie, facilitan la cartografía litológica de las unidades vulcanosedimentarias de la zona. Las rupturas de la pendiente de estas laderas se deben principalmente a causas litológicas, por alternancia de estratos de resistencia dura y blanda. Debido a ello, es frecuente observar formas tabulares en las laderas, como mesetas, terrazas, escalones y escarpes.

Las andesitas basales, representa en sí, el nivel base de la erosión del Río Chiquito, de tal forma que estas pueden ser observadas a lo largo del Río. De esta forma, en el sitio de construcción del Portal de salida del túnel 2, el mismo cuerpo andesítico aflora en forma de una pequeña terraza o escalón, actualmente cubierta por depósitos de talud de 2 a 4 m de espesor.

La zonificación de los niveles de riesgo de las laderas del Cerro de La Loma y de Santa María, deben considerar que su topografía, con perfiles escalonados y frecuentes rupturas de pendiente, son de origen litológico, enmarcados por erosión diferencial. De esta forma, los grandes desplomes y deslizamientos de estas laderas son provocados principalmente por la gravedad, las lluvias y los eventos sísmicos.

Por su alta resistencia a la erosión las ignimbritas riolíticas que coronan la cima de la Sierra de Santa María favorecen la formación de una amplia "mesa" delimitada por fuertes zonas escarpadas, conocidas en la literatura de la geomorfología como "glint".

En general, estas terrazas estructurales representan el nivel del lecho de un antiguo piso, que, como se observa en el sitio de los portales de salida del Túnel 1 y Túnel 2, actualmente se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos de talud, producto de los deslaves de las unidades litológicas de menor resistencia a la erosión. También, coronando el Cerro de La Loma se presenta un relicto de erosión de un estrato duro, un "butte", testigo o resto de erosión de una mesa similar a la que se observa en la Sierra de Santa María.

Las diferentes geoformas por erosión diferencial de la ladera de la Sierra de Santa María y de la Loma, no deben ser confundidas con procesos de supuestos tectonismo activo de la paleofalla la Paloma. Los desplomes, deslizamientos y volteos que forman los depósitos de talud de estas laderas se deben a procesos, gravitatorios, fluviales y sísmicos intensos que afectan a una sucesión de rocas vulcanosedimentarias que marcada erosión diferencial por su diferente capacidad de resistencia a la erosión.



Figura 5. Vista general de la localización de los ejes del trazo del túnel 1 y del túnel 2. La construcción de ambos túneles se desarrollará dentro de un pilar estructural integrado por una potente secuencia de rocas vulcanosedimentarias de naturaleza andesítica hacia la base y riolítica hacia la cima.

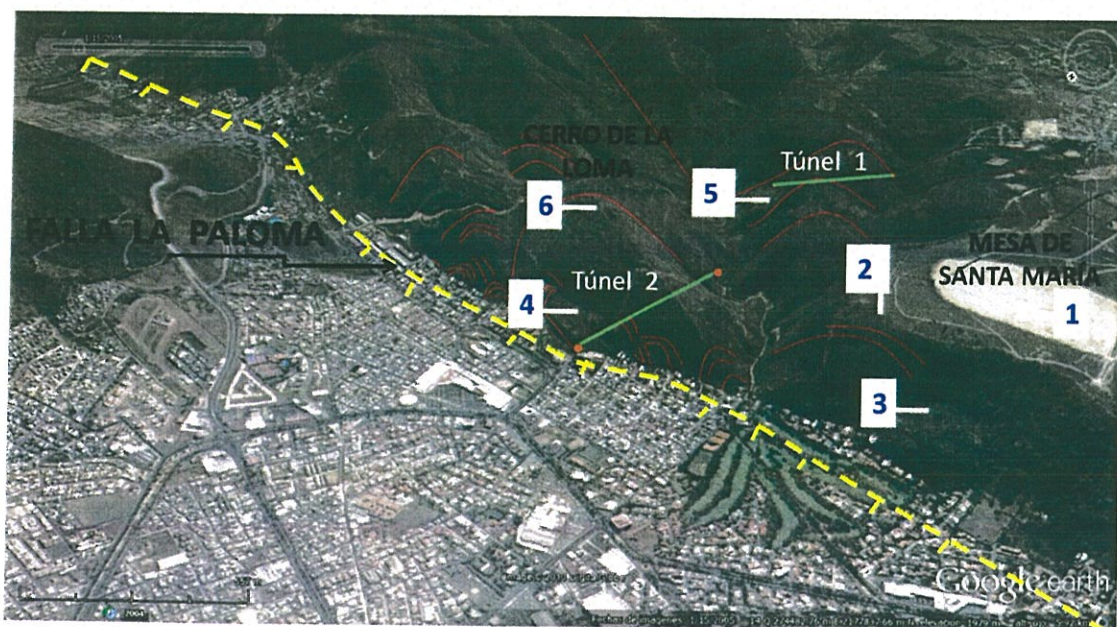


Figura 6. Imagen satelital indicando los ejes de los trazos del túnel 1 y túnel 2. Con números de color azul se indican las geofomas de estratos horizontales de rocas vulcanosedimentarias que resaltan por su mayor resistencia a la erosión, formando: 1 Mesa; 2: Acantilados ó Glints; 3, 4 y 5: Terrazas o Cornisas, y 6: Testigo o Butte.

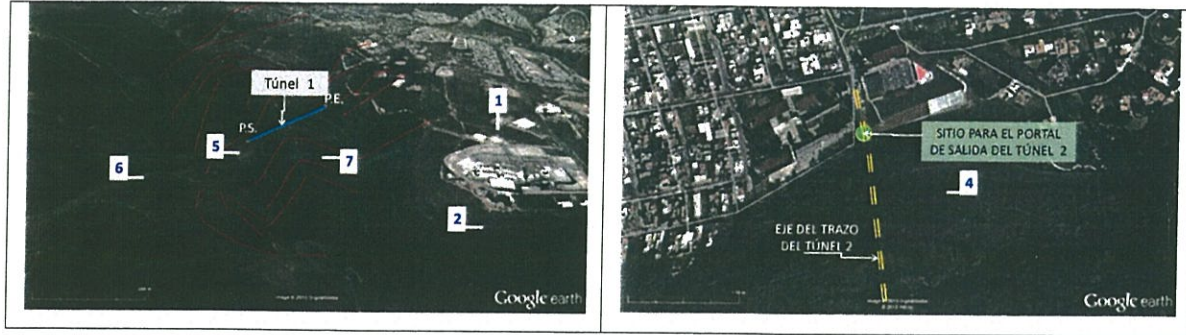


Figura 7. Imagen satelital donde se detalla de la zona de construcción de los túneles de Morelia. La relativa estabilidad tectónica de la zona, la estructura monoclinual de los estratos y relativa resistencia a la erosión propicia la formación de 1: Mesas; 2: Acantilados ó Glints; 4 y 5: Terrazas o Cornisas; 6: Testigos o Buttes y 7: Cuestas

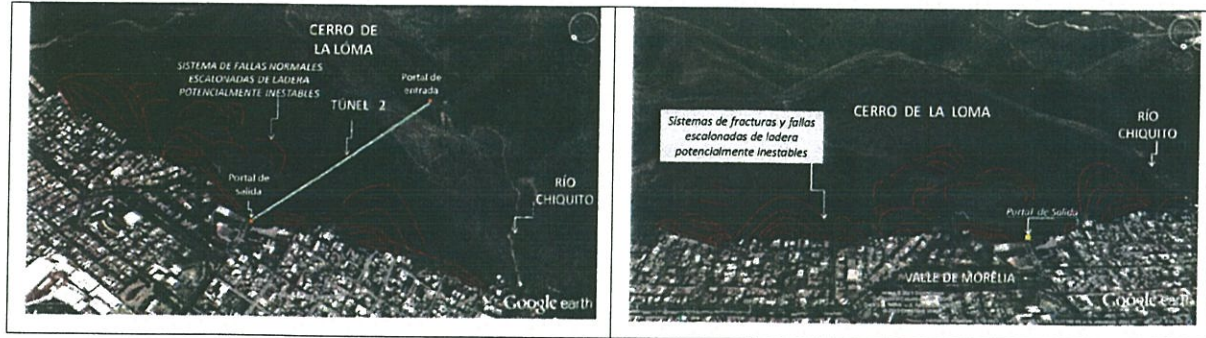


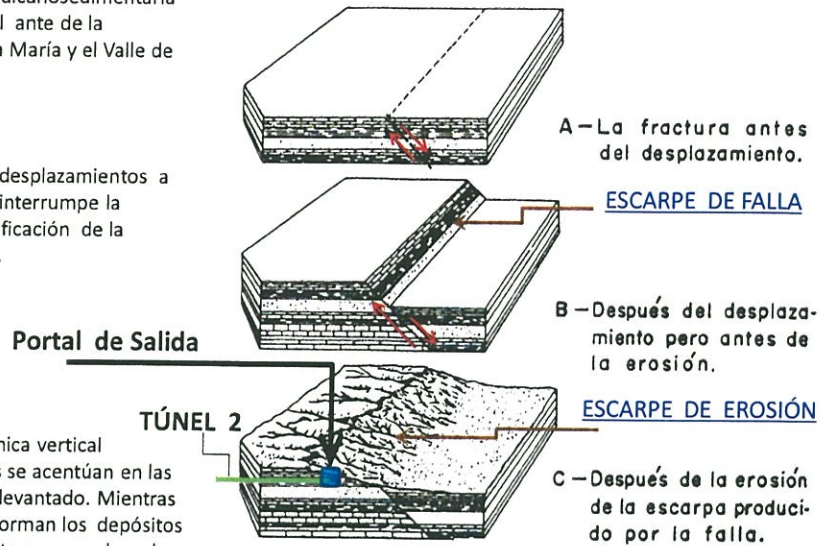
Figura 8. Perspectivas de la margen septentrional del Cerro de la Loma, donde se resaltan con líneas de color rojo los sistemas de fracturas y fallas de ladera de colapso por erosión diferencial.

DIAGRAMAS DE UNA FALLA QUE CORTA ESTRATOS HORIZONTALES

A- En esta etapa la secuencia vulcanosedimentaria conserva su continuidad lateral ante de la formación de la Sierra de Santa María y el Valle de Morelia

B- En esta etapa se forman los desplazamientos a través de un plano de falla que interrumpe la continuidad lateral de la estratificación de la secuencia vulcanosedimentaria.

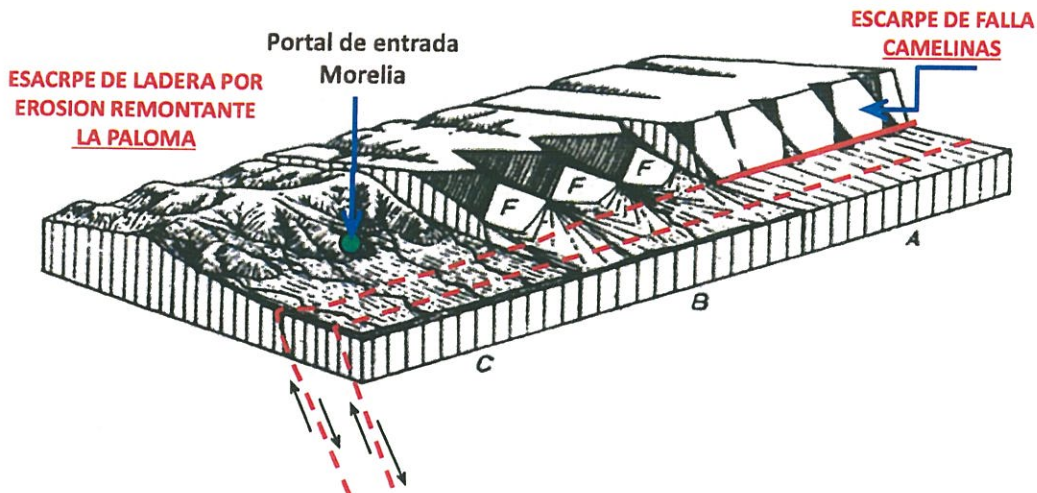
C- Al concluir la actividad tectónica vertical distensiva, los procesos erosivos se acentúan en las laderas montañosas del bloque levantado. Mientras tanto, en el bloque hundido se forman los depósitos clásticos de talud, aluvial y lacustres, que cubren la secuencias afectadas por fallamiento



(Tomado de GEOLOGY by Emmons, Thiel, Stauffer, Allison. Copyright 1955 by McGraw-Hill Book Company, Inc.)

Figura 9.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA FALLA MORELIA, MICHOACÁN



Etapas en la disección de un escarpe de falla: A, etapa inicial con la disección empezando con el escarpe de falla y en la vertiente opuesta al mismo; B, la disección progresa con la consiguiente formación de conos aluviales a lo largo del pie del escarpe y la permanencia de facetas (F) en el mismo; C, escarpe de falla en su madurez (Geology by Emmons, Thiel Stauffer, Allison, Copright, 1955 by McGraw-hill).

Figura 10.

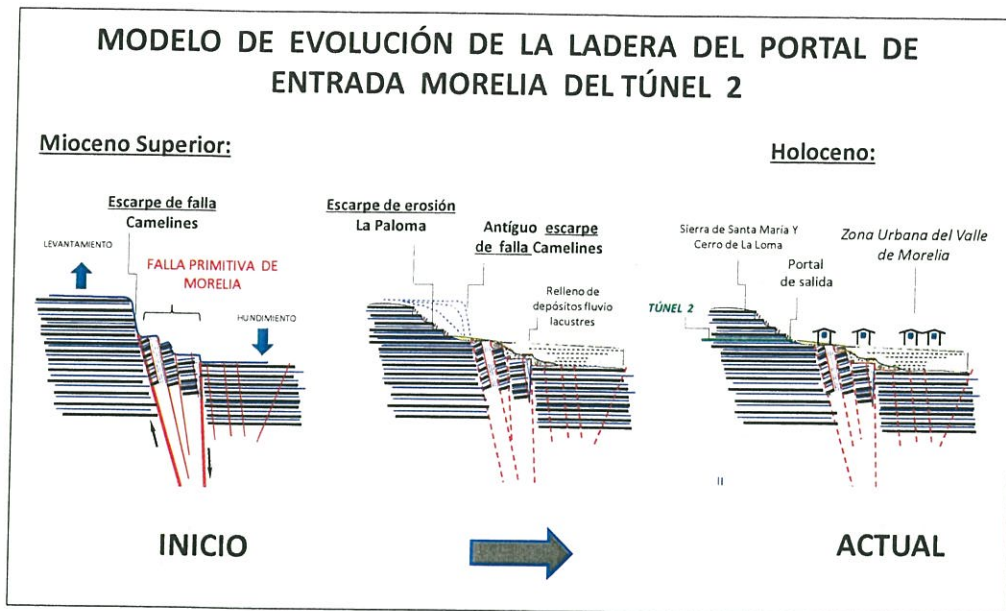


Figura 11.

2.3.5. Estratigrafía y Litología del Túnel I

En la zona del túnel I ubicado entre los cadenamientos 1+390 y 1+795 se lograron ver ventanas estructurales que facilitaron la identificación y definición de la distribución de las distintas unidades litológicas y su descripción macroscópica; adicionalmente se realizó un levantamiento estructural de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso apreciando sus características de espaciamento, apertura, alabeo, rugosidad, continuidad, existencia o no de relleno y condiciones de alteración.

A continuación se describen las unidades litológicas existentes en el sitio donde se ubicará este túnel, en el orden de la unidad más antigua a la más reciente. En los planos mostrados en las figuras 3 y 4, se muestra la distribución de las mismas, que fue mapeada en superficie a partir del recorrido geológico y a profundidad mediante la interpretación de los resultados obtenidos con las técnicas geofísicas y la clasificación de los núcleos recuperados de los cinco sondeos mecánicos directos perforados en el eje del túnel, los cuales se describen más adelante.

a) Brecha volcánica de composición andesítica (Tbv)

Esta roca es piroclástica, de origen volcánico extrusiva, de color pardo oscuro con tonalidad gris oscuro a la intemperie y pardo claro con tonalidades ocre al fresco. Se encuentra constituida por fragmentos angulosos a subredondeados de composición andesítica y de tamaños diversos; la unidad se aprecia muy sana y poco fracturada. A esta unidad le sobreyace la unidad más joven de ignimbrita y aflora también en ambos márgenes del río chiquito.

Se pronostica que esta unidad pueda tener un paleorelieve que hace que el contacto superior con la unidad ignimbrítica sea irregular como se muestra en los perfiles geológicos, por lo que esta unidad brechoide masiva se encontrará en la mayor parte de la superficie expuesta de los taludes del corte del portal Jesús del Monte y en el túnel mismo desde el cadenamientos 1+390 hasta el 1+520 y entre los cadenamientos 1+560 al 1+655. De ser así, el contacto con la ignimbrita se encontrará en el primer tramo aproximadamente a 8 m de la clave del túnel en el portal Jesús del Monte del mismo e ira descendiendo hasta aflorar en el cadenamiento 1+500 para desaparecer 20 m más adelante y reaparecer

entre los cadenamientos 1+560 a 1+580 y 1+640 a 1+655. En el tramo entre los cad. 1+580 y 1+640 el contacto estará muy cercano a la clave del túnel (2 a 3 m) y debe tomarse en cuenta su ubicación debido a que usualmente representa una zona discontinua y de debilidad donde la roca de ambas unidades puede estar alterada en un espesor de este mismo orden (2 a 3 m en cada unidad).

b) Ignimbrita (Tig)

Está también es una roca de origen ígneo, piroclástica, con matriz de composición vítrea y con fina textura eutaxítica, de color pardo oscuro a la intemperie y pardo claro con tonalidades rosáceas al fresco. Sobreyace a la unidad brechoide descrita anteriormente, y en superficie se aprecia con alto grado de intemperismo formando suelos residuales arcillo-limosos de color ocre oscuro, mejorando su calidad a profundidad, donde se aprecia sana, poco fracturada y bien litificada. Su estructura es pseudoestratificada y forma pequeñas mesetas de poca extensión y suave pendiente, ubicándose hacia las partes altas de los cerros.

Durante la perforación en las ignimbritas se tuvo pérdida total de agua en la mayor parte de la longitud de los cinco barrenos efectuados a lo largo del trazo y zonas de avance muy rápido con espesor variable de 15 a 50 cm a cada 1.5 a 3 m, en los cuales no hubo recuperación, por lo que posiblemente se trate de horizontes de arena pumicítica intercalados con la ignimbrita debido a secuencias intermitentes de emisión de piroclastos.

Esta unidad será excavada en el túnel entre los kms 1+500 y 1+588 y del km 1+640 hasta el portal Morelia del túnel. En superficie solo una pequeña parte del mismo portal Morelia en la porción inferior del corte se hará en esta unidad hasta el km 1+805.

c) Depósito aluvial (Qal)

Esta unidad de color pardo claro es de origen sedimentario aluvial, muy reciente. Está constituida por materiales granulares que integran fragmentos de rocas de composición tobácea con poco transporte, angulosas a sub-redondeadas, mezclados con materiales arcillo-limosos de consistencia blanda, distribuidos a lo largo de los arroyos, cañadas y al pie de las laderas del cerro donde se alojará el túnel I. Esta unidad aflora en la parte más baja de la cañada más cercana al portal Jesús del Monte del túnel ubicándose en el sitio donde se construirá el terraplén de acceso al portal.

d) Suelo Residual (Qsr)

Se observa en las partes altas y en las laderas del cerro desarrollándose sobre la superficie expuesta de la ignimbrita. Es preferentemente de composición arcillo-limosa, de color ocre oscuro con tonalidades blanquecinas y presenta gran contenido de materia orgánica. Los espesores de este material en la zona son delgados variando entre 10 y 50 cm. Este material será excavado en el despalme de los portales de acceso y salida del túnel.

e) Depósito de Talud (Qmt)

En la zona del portal Morelia del túnel I se encuentra una gruesa cobertura de este material, asociados con una probable zona de derrumbe. Este depósito granular está constituido por bloques angulosos ignimbríticos de diversos tamaños, cubiertos en las partes bajas por materiales aluviales arcillo-arenosos. Los materiales serán excavados a cielo abierto para el tajo de acceso al túnel.

2.3.6. Discontinuidades en la zona del Túnel I

Debido a la extensa cobertura de suelos residuales en la zona del túnel I solo se lograron censar con detalle un total de 58 discontinuidades en ignimbritas ubicadas en el sitio del proyecto cubriendo la zona del portal de Jesús del Monte y la cima del cerro sobre el eje del trazo del túnel, sin que se apreciaran estructuras mayores tales como fallas.

Las discontinuidades representadas únicamente por el fracturamiento son onduladas y rugosas, cerradas a ligeramente abiertas (entre 1 y 3 mm), con o sin relleno de suelo residual. Los planos de las fracturas expuestas en superficie presentan trazas de óxidos de hierro (Fe) y trazas de arcilla. A profundidad el fracturamiento se pronostica cerrado, sin relleno de material arcilloso y poco alterado.

En las Figura 12 y 13 se muestra la distribución espacial de las discontinuidades censadas en el túnel I de acuerdo a su densidad polar, representadas con arcos y polos, y las tablas 1 y 2 siguientes indican el número de familias con su rumbo azimutal de echado y ángulo de echado, así como la orientación del plano con respecto al trazo del túnel y sus características físicas.

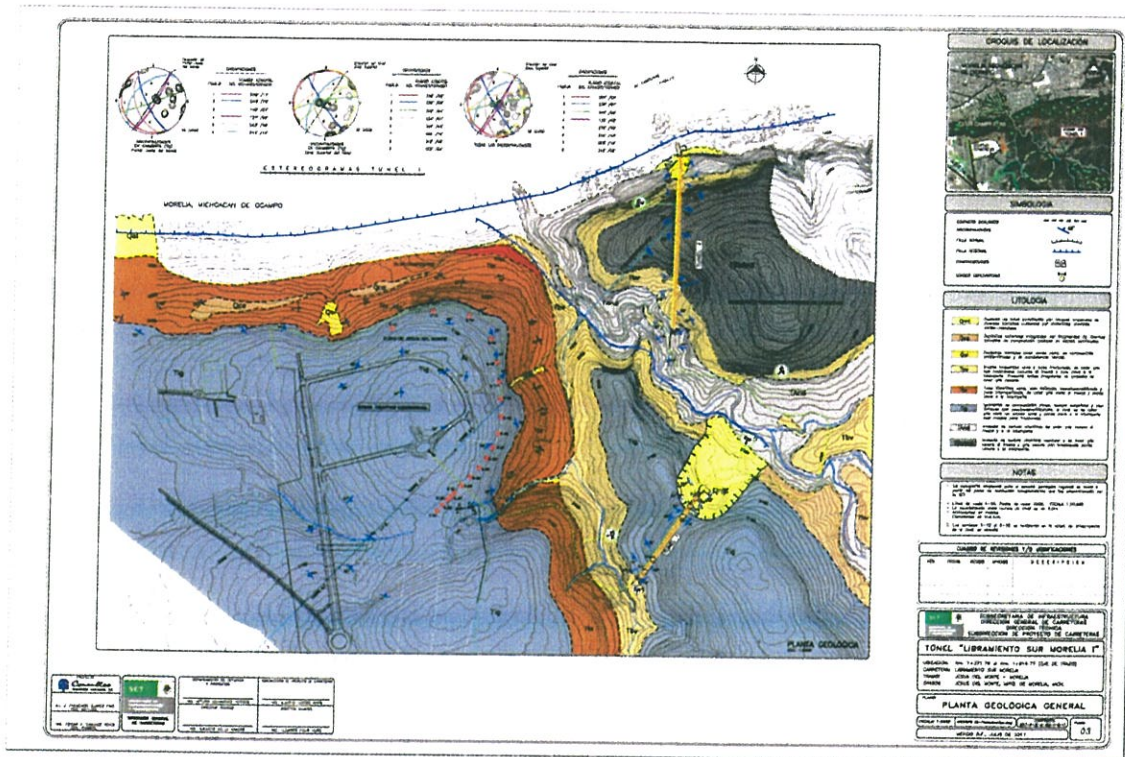


Figura 12. Planta Geología General del Túnel I

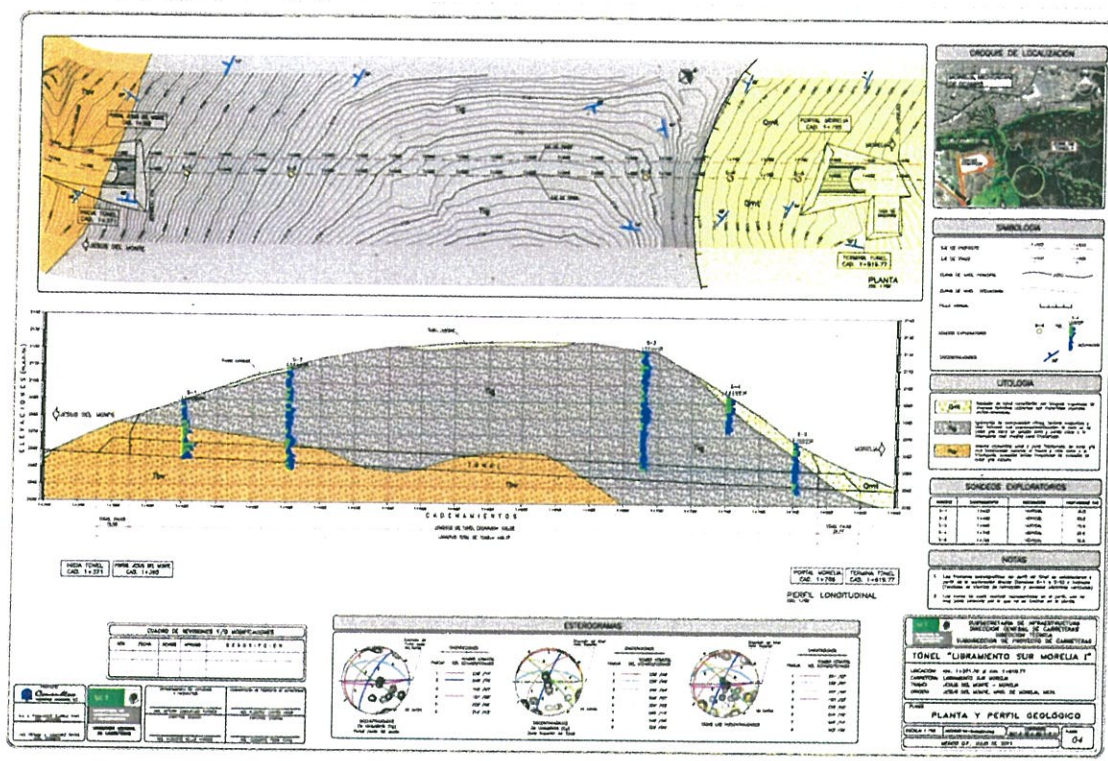


Figura 13. Planta y Perfil Geológico de Detalle del Túnel I

Familia	Rumbo Azimutal/ Echado	Orientación del plano con respecto al trazo del túnel	Características
1	239° / 11°	65°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (0.5 mm), sin presencia de agua y poco persistentes.
2	243° / 75°	60°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas sin presencia de agua
3	160° / 87°	37°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (1 mm), sin presencia de agua y moderadamente persistentes.
4	121° / 82°	2°	Fracturas onduladas y rugosas, abiertas (3mm máximo), cerrándose a pocos centímetros de profundidad, con relleno de suelo residual, sin presencia de agua.
5	253° / 48°	50°	Fracturas ligeramente planas y rugosas abiertas (< 3 mm) algunas con relleno de materia orgánica, sin presencia de agua
6	314° / 43°	11°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas sin presencia de agua

Tabla 1. Discontinuidades en el Portal Jesús del Monte del Túnel I.

Familia	Rumbo Azimutal/ Echado	Orientación del plano con respecto al trazo del túnel	Características
1	314° / 6°	11°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas a ligeramente abiertas (1.0 mm), sin presencia de agua y poco persistentes.
2	236° / 84°	67°	Fracturas onduladas y rugosas, ligeramente abiertas (3mm), cerrándose a pocos centímetros de profundidad, sin relleno de suelo residual y sin presencia de agua, moderadamente persistentes.
3	349° / 84°	46°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (3 mm) con suelo residual, sin presencia de agua y moderadamente persistentes.
5	254° / 61°	49°	Fracturas onduladas y rugosas ligeramente abiertas (2mm) ó cerradas, sin presencia de agua.
6	304° / 63°	1°	Fracturas onduladas y rugosas cerradas, sin presencia de agua.
7	96° / 14°	27°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas a ligeramente abiertas (0.5 mm), sin presencia de agua, moderadamente persistentes.
8	342° / 58°	39°	Fracturas onduladas y rugosas cerradas, sin presencia de agua; con 0.5 cm de abertura
9	323° / 84°	20°	Fracturas onduladas y rugosas cerradas, sin presencia de agua.

Tabla 2. Discontinuidades en la cima del cerro en el eje del Túnel I.

2.3.7. Exploración directa en el trazo del túnel I

Con el propósito de conocer la estratigrafía del subsuelo en la zona donde se excavará el túnel I se perforaron cinco sondeos verticales (S-1 a S-5) directos sobre el eje de trazo del túnel. Los sondeos alcanzaron profundidades de 30 a 70 m y mediante los mismos se recuperaron núcleos de roca, permitiendo conocer a profundidad el tipo de roca que conforma al macizo rocoso, sus características texturales, color, fracturamiento y alteración, así como evaluar su calidad a partir de los parámetros de recuperación (REC%) e Índice de Calidad de la Roca (RQD%). La tabla 3 indica la ubicación de cada sondeo y su profundidad.

No. Sondeo	Profundidad. (m)	Coordenadas UTM			Cad. en eje
		X	Y	Z	
S-1	35.00	274,295	2'176,185	2088.20	21+418.50
S-2	60.00	274,321	2'176,238	2106.80	21+477.00
S-3	70.00	274,425	2'176,387	2123.40	21+658.65
S-4	22.50	274,453	2'176,442	2111.40	21+719.88
S-5	30.00	274,494	2'176,486	2069.70	21+779.30

Tabla 3. Localización de Barrenos

El porcentaje de recuperación o índice de recuperación (REC%) obtenido de cada barreno es el resultado del cociente de la longitud de núcleos recuperada entre la longitud de avance. El Índice de Calidad de la Roca (Rock Quality Design) (RQD%) resulta de la suma acumulada de los núcleos mayores de 10 cm dividida entre la longitud de avance para cada tramo de avance.

Estos índices permiten calificar el trabajo de perforación e inferir la calidad y condiciones del fracturamiento del macizo rocoso. Recuperaciones muy bajas pueden deberse a la existencia de roca muy fracturada, alterada y/o roca suave o deleznable, mientras que los valores de RQD son una medida del grado de fracturamiento de la roca e indirectamente de la calidad en conjunto de la masa rocosa.

Los perfiles estratigráficos de cada sondeo mostrados en las figuras 5 a 9, describen con detalle las características litológicas de los núcleos recuperados definidas macroscópicamente y las características físicas de las discontinuidades y muestran las variaciones de los parámetros REC y RQD con respecto a la profundidad y a los intervalos de donde se presentan cambios estratigráficos.

a) Sondeo S-1

Sondeo vertical de 35 m de profundidad.

- De 0 a 1 m el barreno presenta una delgada cobertura de suelo residual color pardo oscuro arcillo-limoso poco compacto y con materia orgánica.
- De 1 a 14 m se atravesó roca identificada como ignimbrita color pardo claro con tonalidad rosácea, presenta fina textura eutaxítica y matriz de composición vítrea la unidad se encuentra ligeramente intemperizada y poco fracturada. Entre 6 y 7.5 m se presentó pérdida parcial de agua y a partir de 9 m pérdida total coincidente con la presencia de horizontes de cerca de 40 cm de espesor a cada 1.5 m donde la herramienta avanzó muy rápidamente y no se recuperó material, pudiendo tratarse de horizontes de arena pumicítica intercalados en la ignimbrita.
- De 14 a 16.50 m se cruzó un horizonte de toba microlítica de composición vítrea color pardo claro con tonalidades rosáceas y ocre.
- De 16.50 a 35 m se recuperó roca identificada como brecha volcánica de composición andesítica, de color pardo claro con tonalidades ocre, constituida por fragmentos de origen andesítico angulosos a subredondeados de tamaños diversos. La unidad se aprecia muy sana y poco fracturada. La roca ofreció poca resistencia a la perforación con avances rápidos y también se encontraron zonas de 15 a 20 cm con avance muy rápido que en este caso interpretamos como zonas sin fragmentos de roca o de muy pequeño tamaño, donde se atravesó la matriz arenosa alterada.

En la tabla 4 se enlistan las fracturas más representativas, indicando su profundidad y condiciones en las que se encuentra.

Profundidad (m)	Inclinación (grados)	Superficie		Abertura (mm)	Estado	Frec. (cm)	Otros
1.65	30°	ondulada	rugosa	<1	sana	-	traz. óx, fe
4.58	70°	ondulada	rugosa	cerrada	sana	-	-
4.73	45°	ondulada	rugosa	2	-	-	traz. óx. fe
7.40	80°	ondulada	rugosa	1	lig. alt	-	traz. óx, fe
7.60	75°	ondulada	rugosa	2	lig. alt	-	traz. arcilla
16.88	60°	ondulada	rugosa	1	sana	-	traz. Mg
19.64	45°	plana	rugosa	2	sana	-	traz. óx, fe
27.87	60°	ondulada	rugosa	3	alterada	-	traz. arcilla
28.60	45°	ondulada	rugosa	5	sana	-	traz. arc – óx
31.70	74°	ondulada	rugosa	2	sana	-	traz. arcilla

Tabla 4. Discontinuidades Sondeo S-1.

Para este barreno de 35 m de profundidad se obtuvieron porcentajes promedio de recuperación de 26.25% en ignimbrita, 35% en toba y 45.38% en brechas. El RQD promedio fue de 7% en ignimbrita, 18.67% en toba y 19.50% en brecha.

b) Sondeo S-2

Sondeo vertical de 60 m de profundidad.

- De 0 a 44 m. Ignimbrita color pardo claro con tonalidad rosácea, presenta fina textura eutaxítica y matriz de composición vítrea la unidad se encuentra ligeramente intemperizada y poco fracturada; esta unidad presenta intervalos con mayor grado de alteración.
- De 44 a 60 m. Roca identificada como brecha volcánica de composición andesítica presenta color pardo claro con tonalidades ocres; se encuentra constituida por fragmentos de origen andesítico angulosos a subredondeados de tamaños diversos, la unidad se aprecia en estado muy sano y poco fracturado.

Profundidad (m)	Inclinación (grados)	Superficie		Abertura (mm)	Estado	Frec. (cm)	Otros
4.50	45°	ondulada	rugosa	2	sana	-	-
6.00	30°	ondulada	rugosa	1	sana	-	-
10.60	40°	plana	rugosa	2	sana	-	-
13.88	35°	plana	rugosa	3	sana	-	-
15.10	45°	ondulada	rugosa	3	sana	-	-
16.50	65°	ondulada	rugosa	1	lig. alt	-	traz. óx, fe
22.80	65°	ondulada	rugosa	2	sana	-	traz. óx. Fe
25.50	65°	Plana	rugosa	3	sana	-	traz. óx, fe
30.25	70°	plana	rugosa	3	sana	-	-
39.00	50°	plana	rugosa	2	lig. alt	-	traz. arcilla
42.18	55°	ondulada	rugosa	3	sana	-	-
55.50	45°	ondulada	rugosa	2	lig. alt	-	traz. arcilla

Tabla 5. Discontinuidades Sondeo S-2.

Se obtuvieron porcentajes de recuperación promedio de 29% en ignimbrita y de 38% en brechas. El RQD promedio fue de 6.7% en ignimbrita y de 9.9% en brecha, indicando una roca de mala calidad, ligeramente alterada y fracturada.

c) Sondeo S-3

Sondeo vertical de 70 m de profundidad.

Constituido por roca ignimbrita de color pardo claro con tonalidad rosácea, presenta fina textura eutaxítica y matriz de composición vítrea. La unidad se encuentra sana y poco fracturada, así como ligeramente intemperizada, con intervalos de mayor grado de alteración. A partir de 6 m se tuvo pérdida parcial de agua y de 10.50 m en adelante, pérdida total; también de esta última profundidad y hasta 48

m se atravesaron horizontes de 30 a 50 cm de espesor a cada 3 m de posible arena pumicítica que no fue recuperada al no retornar el agua por lo que se infiere. Estos horizontes son más delgados (10 a 15 cm de espesor) y más frecuentes (a cada 1.5 m) a partir de 48 m de profundidad y hasta el fondo del barreno.

Profundidad (m)	Inclinación (grados)	Superficie		Abertura (mm)	Estado	Frec. (cm)	Otros
1.63	12°	plana	rugosa	2	lig. alt	-	traz. arcilla
2.90	12°	plana	rugosa	3	lig. alt	-	traz. arcilla
7.60	45°	ondulada	rugosa	4	sana	-	traz. óx, fe
15.02	45°	ondulada	rugosa	2	sana	-	traz. arcilla
16.60	9°	ondulada	rugosa	3	lig. alt	-	traz. óx, fe
19.70	9°	ondulada	rugosa	3	sana	-	traz. óx. fe
28.77	45°	ondulada	rugosa	3	sana	-	-
34.95	85°	plana	rugosa	3	sana	-	Pel, óx, fe
39.00	87°	ondulada	rugosa	4	sana	-	pel. óx, fe
40.33	60°	ondulada	rugosa	2	lig. alt	-	pel. óx, fe
41.90	78°	ondulada	rugosa	3	sana	-	traz. óx. fe
55.50	45°	ondulada	rugosa	2	lig. alt	-	traz. arcilla
49.55	6°	plana	rugosa	4	sana	-	traz. óx. fe
54.13	60°	ondulada	rugosa	3	sana	-	traz. óx. fe
58.70	12°	ondulada	rugosa	1	lig. alt	-	arcilla
60.00	65°	ondulada	rugosa	2	sana	-	pel. óx, fe
66.20	60°	plana	rugosa	3	lig. alt		pel. arc

Tabla 6. Discontinuidades Sondeo S-3.

Se obtuvo un 32% por ciento de recuperación promedio de RQD promedio de 5.5% en ignimbrita lo que la clasifica como roca de mala calidad, ligeramente alterada y fracturada.

d) Sondeo S-4

Sondeo vertical de 22.50 m de profundidad.

De 0 a 22.50 m. Roca ignimbrita de color pardo claro con tonalidad rosácea, textura eutaxítica y matriz de composición vítrea. La unidad se encuentra en general en estado sana poco fracturada y ligeramente intemperizada. A partir de 4.5 m se tuvieron zonas de avance muy rápido en posibles horizontes de arena pumicítica de 15 a 20 cm de espesor a cada 1.5 m, y a partir de 13.5 m estos horizontes son de 20 cm a cada 60 cm. Entre 6 y 7.5 m se presentó pérdida parcial de agua y desde 9 m hasta el fondo del barreno la pérdida de agua fue total.

Se obtuvo por ciento de recuperación promedio de 34% y RQD promedio de 12.2% en ignimbrita lo que la clasifica como roca de mala calidad, ligeramente alterada y fracturada.

Profundidad (m)	Inclinación (grados)	Superficie		Abertura (mm)	Estado	Frec. (cm)	Otros
1.50	40°	plana	rugosa	2	sana	-	traz. óx. fe
1.86	45°	ondulada	rugosa	2	sana	-	-
3.34	40°	ondulada	rugosa	3	sana	-	traz. óx, fe
4.50	45°	ondulada	rugosa	3	sana	-	traz. óx, fe
6.12	12°	ondulada	rugosa	3	lig. alt	-	pel. arc
6.50	80°	ondulada	rugosa	6	lig. alt	-	traz. óx. fe
8.00	45°	ondulada	rugosa	3	sana	-	pel. arc
8.93	12°	ondulada	rugosa	3	sana	-	pel. óx, fe
19.40	12°	ondulada	rugosa	2	sana	-	pel. óx, fe
22.40	30°	ondulada	rugosa	3	lig. alt		traz. óx, fe

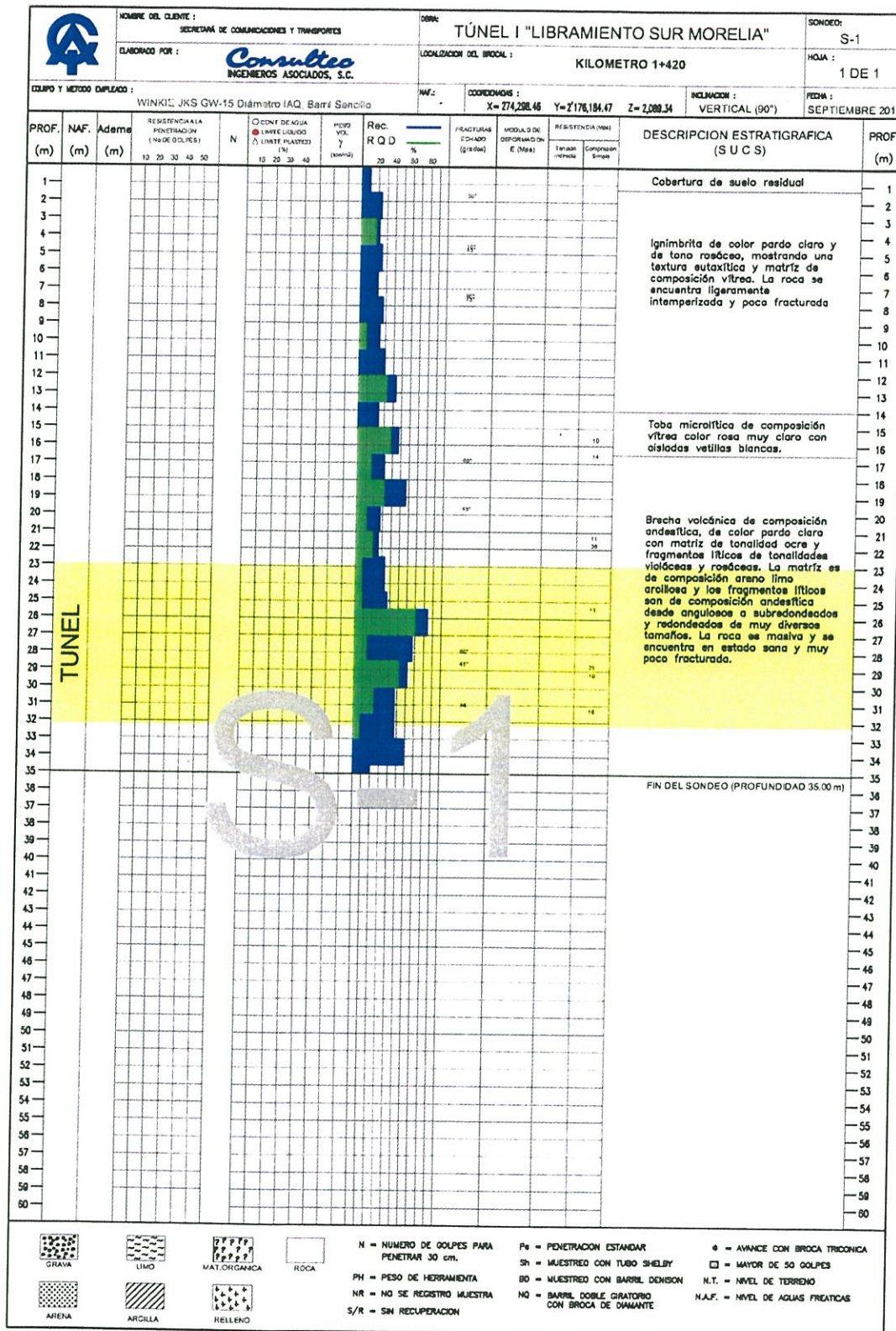
Tabla 7. Discontinuidades Sondeo S-4.

e) Sondeo S-5

Sondeo vertical de 30 m de profundidad

- De 0 a 2 m. Depósito de talud constituido por bloques de diversos tamaños cubiertos por materiales aluviales arcillo-arenosos.
- De 2 a 30 m. Roca ignimbrita color pardo claro con tonalidad rosácea, textura eutaxítica y matriz de composición vítrea. La unidad se encuentra en general en estado sana, fracturada y ligeramente intemperizada. De 4.5 a 6 m se tuvo pérdida parcial de agua y a partir de 6 m pérdida total. A los 9 m de profundidad inicia la intercalación de horizontes de posibles arenas pumicíticas de 10 a 20 cm de espesor a cada 1.5 m y a partir de 15 m el espesor de estos horizontes aumenta a 30 y 50 cm a cada 1.5 m, que fueron perforados hasta el fondo del barreno.

En este barreno se obtuvo una recuperación promedio del 26.6 % y RDQ casi nulo en ignimbrita, que corresponde con una roca de muy mala calidad.



PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO EXPLORATORIO S-1

Figura 14. Perfil estratigráfico S-1

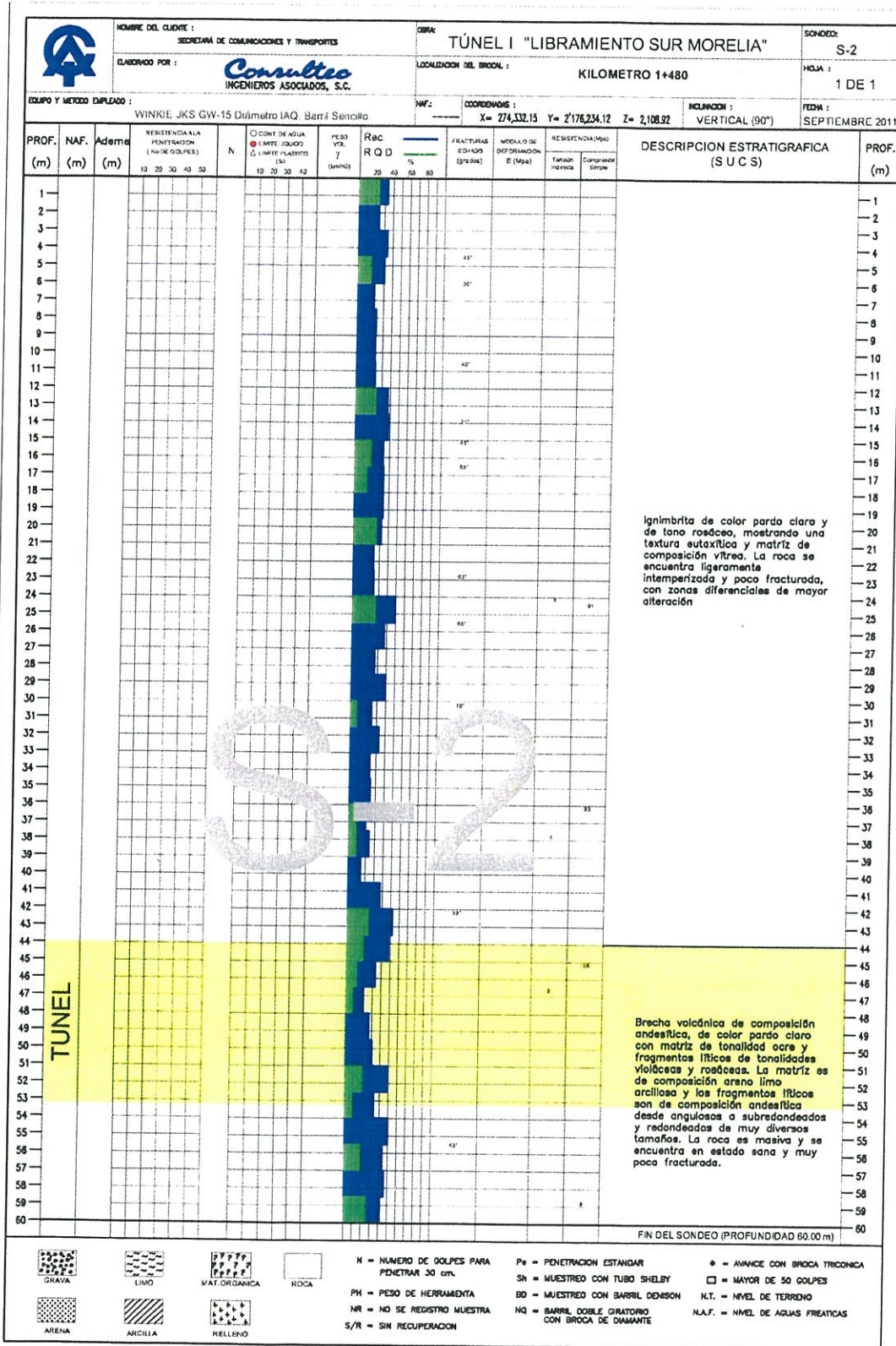
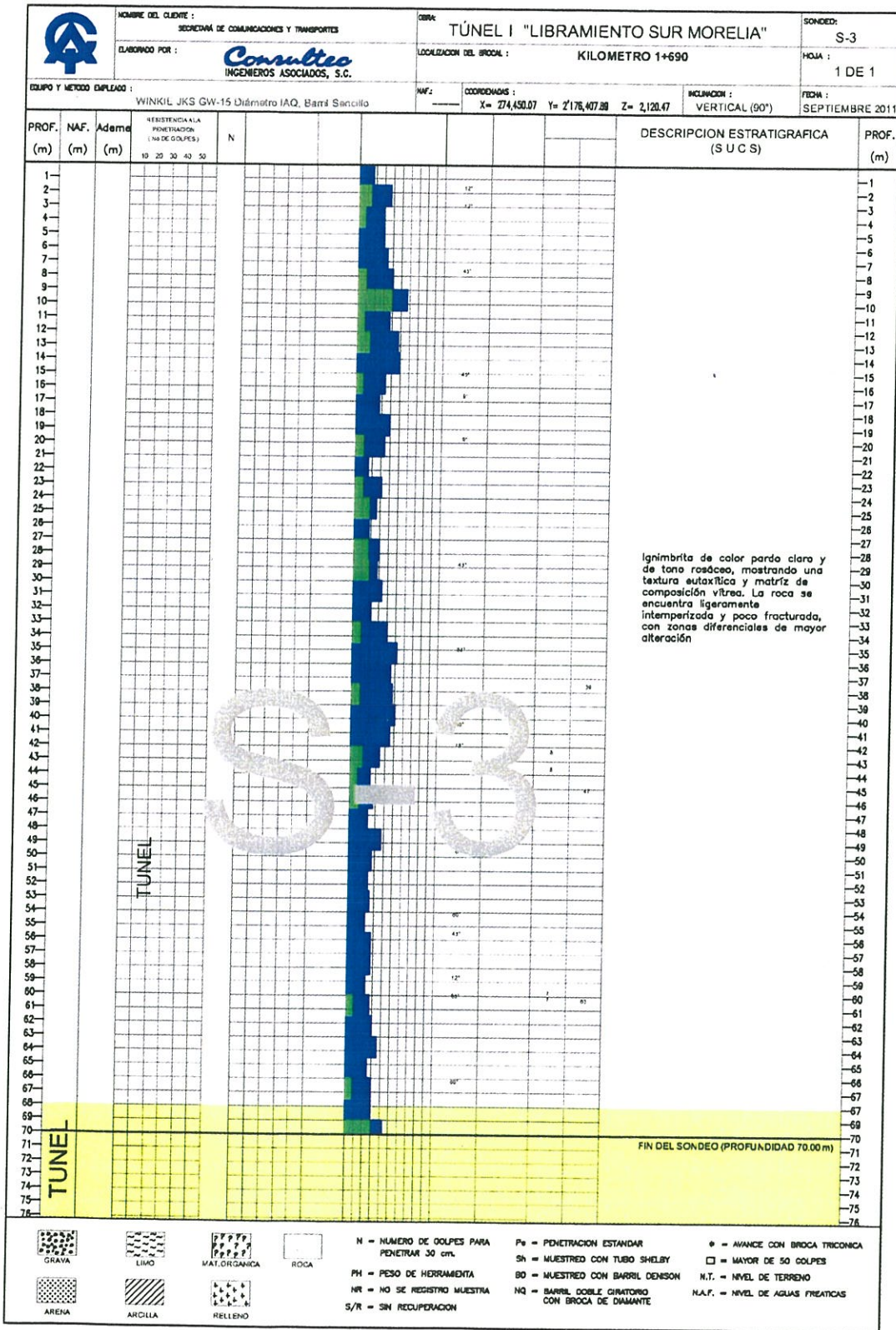
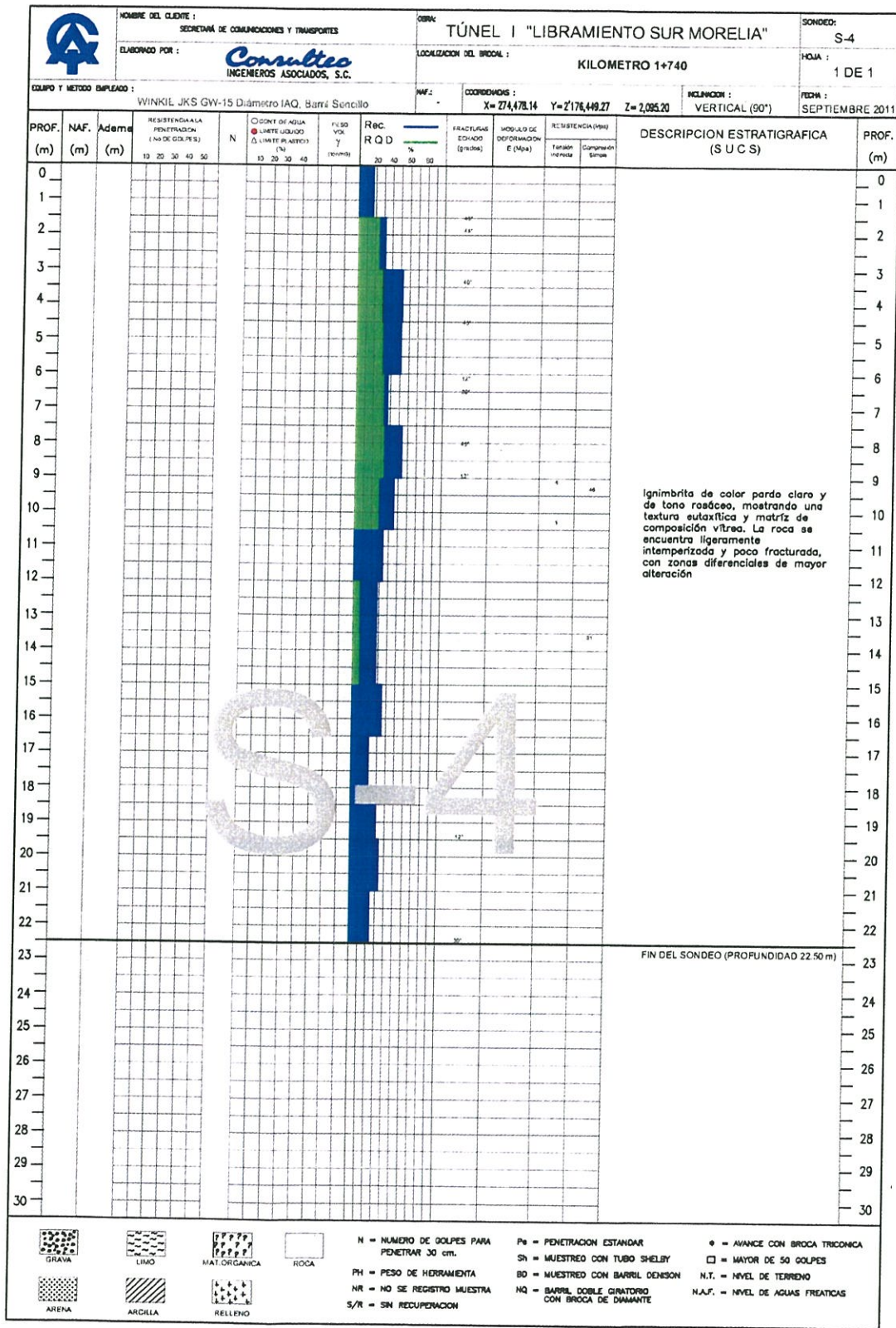


Figura 15. Perfil estratigráfico S-2



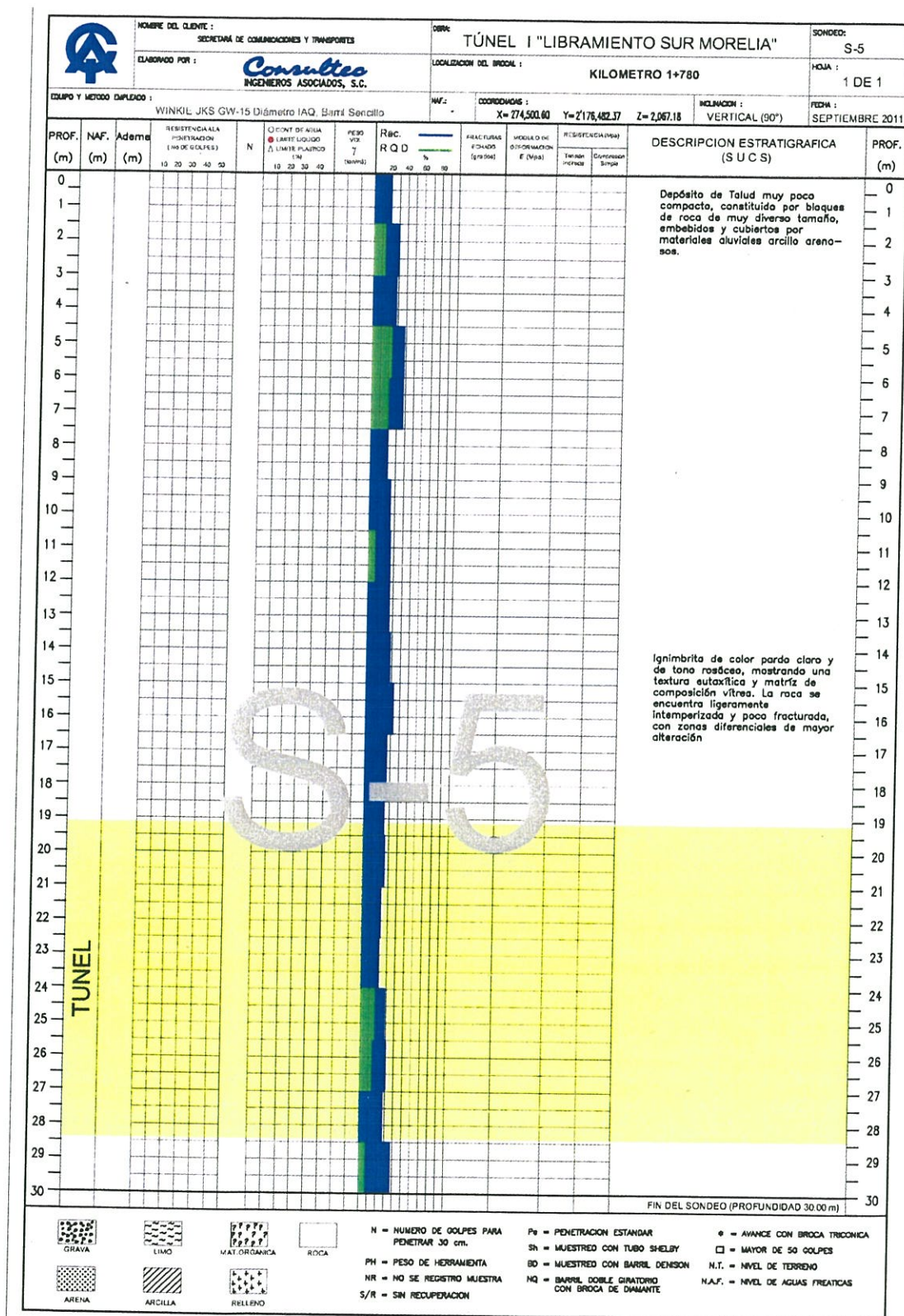
PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO EXPLORATORIO S-3

Figura 16. Perfil estratigráfico S-3



PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL SONDEO EXPLORATORIO S-4

Figura 17. Perfil estratigráfico S-4



PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL SONDEO EXPLORATORIO S-5

Figura 18. Perfil estratigráfico S-5

2.3.8. Conclusiones del túnel I

Como se aprecia en los planos de las figuras 12 y 13, este túnel y sus portales serán excavados fundamentalmente en las unidades litológicas conformadas por brechas volcánicas de composición andesítica y por Ignimbritas. Ambas unidades serán excavadas en el portal Jesús del Monte del túnel, mientras que en el portal Morelia se excavará predominantemente en la unidad ignimbrítica y en menor proporción en depósitos de talud. El 51.8% de la longitud del túnel se emplazará en las ignimbritas y el 48.2 % restante en la brecha. Ambas unidades son masivas y se encuentran fracturadas.

Durante la perforación de los barrenos de exploración no se encontró nivel freático. Se reportaron en la ignimbrita zonas intercaladas de 15 a 50 cm de espesor a cada 1.50 y a cada tres metros aproximadamente, en donde el avance fue muy rápido, sin recuperación de material alguno, en donde se tuvieron pérdidas totales de agua (por lo que no fue posible observar los materiales en muestras de canal); estas zonas posiblemente están asociadas con una secuencia intercalada de horizontes de arena pumicítica, los cuales se encuentran poco compactos, deleznable y permeables. En los escasos afloramientos observados en superficie no se apreció la presencia de estos horizontes.

La ignimbrita es masiva y fracturada, identificándose hasta 9 familias de fracturas que pueden reducirse a 4 familias principales y 2 de menor importancia, considerando en los diagramas estereográficos presentados en las figuras 3 y 4 que las familias 4 y 6, 8 y 9, 2 y 5 no sean pares de familias sino cada uno de estos pares sea en realidad una sola familia con orientación similar y echado sensiblemente diferente. La brecha es masiva y poco fracturada lográndose identificar tres familias de fracturas que pueden reducirse de igual forma a solo 2 familias principales.

En el diseño debe considerarse la posible presencia de los horizontes arenosos en la ignimbrita, zonas de alteración de la misma y el fracturamiento existente. En el caso de la brecha debe tenerse en cuenta que la matriz de la misma de composición areno-limo-arcillosa es deleznable en presencia de agua y falta de confinamiento; esto fue observado durante la preparación de las muestras de brecha en laboratorio. El contacto entre las brechas e ignimbritas se encuentra muy cercano a la clave del túnel y es irregular desde la entrada del túnel (km. 1+390) hasta el km 1+647.50. En el barreno S-1 se detectó en el contacto ignimbrita-brecha (ubicado a 15 m de profundidad) un horizonte de toba microlítica vítrea de casi 2 m de espesor, de mala calidad y se aprecia alteración en la brecha y en la ignimbrita. Este horizonte no fue detectado en el barreno S-2 que también cortó al contacto a mayor profundidad (44 m). Debe tenerse presente la cercanía de este contacto a la clave, debido a que se trata de una franja de debilidad que puede limitar en la frontera superior bloques de roca brechoide susceptibles de colapsar en la clave del túnel.

El promedio acumulado de recuperación en ignimbrita considerando a los 4 barrenos (S-1 a S-4) que perforaron esta roca fue de 30.9%, mientras que el de la brecha fue de 42% considerando los únicos dos barrenos que la perforaron (S-1 y S-2). El promedio de RQD de la ignimbrita fue de 6.89% y el de la brecha de 15.08%. En este último caso debe considerarse que los RQD reales de ambos tipos de roca deben ser ligeramente mayores ya que los núcleos recuperados son de diámetro IAX (3.5 cm) y no de NX (5.47 cm) para los cuales fue establecido el cálculo de RQD, por lo que en IAX en proporción debieran sumarse los tramos de 6.4 cm en lugar de 10 cm recomendados por el método. Los bajos porcentajes de recuperación y RQD de la ignimbrita son debidos a la presencia de los horizontes arenosos donde no hubo recuperación, y los de la brecha se deben más al lavado de la matriz que embebe a los fragmentos líticos.

2.3.9. Estratigrafía y Litología del Túnel II

Durante el reconocimiento realizado por el eje del trazo del túnel II y zonas aledañas, se lograron ver ventanas estructurales que facilitaron la identificación y distribución de las distintas unidades litológicas

existentes en la zona del túnel ubicado entre los cadenamientos 3+495 y 4+195 y hacer su descripción macroscópica; adicionalmente se realizó un levantamiento estructural de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso evaluando también sus características físicas y sus condiciones de alteración.

A continuación se describen estas unidades que afloran en el sitio en el orden de la más antigua a la más joven. En las figuras 10 y 11 se muestra su distribución, la cual fue establecida en superficie a partir del recorrido geológico y a profundidad mediante la interpretación de los resultados obtenidos con las técnicas geofísicas, los cuales se describen en el capítulo 3 del presente informe.

a) Andesita (TAnd)

En esta roca será excavado toda la longitud del túnel y sus portales. La roca es masiva y muy densa, de origen ígneo, extrusiva, de composición lávica, color gris oscuro al fresco y también a la intemperie; presenta textura afanítica y se encuentra en estado sano y fracturado. Forma estructuras alargadas y puede apreciarse con mayor distribución sobre las márgenes del río chiquito donde subyace de forma irregular a la brecha volcánica. En el túnel esta unidad queda cubierta por las unidades más jóvenes que se describen a continuación. El contacto con la unidad de brechas andesíticas se encuentra entre 33 y 37 m por arriba del techo o clave del túnel, por lo que no tendrá una relevante influencia en el comportamiento tenso deformacional del mismo, quedando este dominado solo por las características físicas, estructurales, mecánicas e hidráulicas de la unidad andesítica.

b) Brecha volcánica de composición andesítica (Tbv)

Esta roca es origen volcánico extrusiva, de composición piroclástica y de color pardo oscuro con tonalidad gris oscuro a la intemperie y pardo claro con tonalidades ocre al fresco. La unidad litológica se encuentra constituida por fragmentos de origen andesítico angulosos a subredondeados de tamaños diversos, integra lentes irregulares de andesita de color gris oscuro de aspecto masivo.

La brecha se aprecia en estado muy sana y poco fracturada sobreyace a la andesita y subyace al basalto andesítico. Esta unidad no será excavada en el túnel ni en los portales de acceso y de salida.

c) Basalto andesítico (TBaAnd)

Esta unidad corona a la secuencia litológica y es la más joven de las tres unidades principales existentes en el área del túnel. Es de origen ígneo extrusiva, de composición lávica y de color gris oscuro al fresco y gris oscuro con tonalidades pardo oscuro a la intemperie; su textura es afanítica aunque también presenta textura vesicular. Se encuentra sana y fracturada, masiva y densa. Forma como la andesita, estructuras alargadas alineadas con la dirección del flujo lávico y tiende a intercalarse de forma muy irregular con la unidad de brecha volcánica que le subyace. Se identifica claramente hacia la cima del cerro donde se alojara el túnel II y se encuentra en su mayor parte por suelos residuales y abundante vegetación. Esta unidad tampoco será excavada en el túnel ni en los portales de acceso y de salida.

d) Depósito aluvial (Qal)

Los depósitos aluviales que se encuentran próximos a los portales Morelia y Jesús del Monte del túnel son de origen sedimentario producto del acarreo fluvial de los ríos y se encuentran distribuidos a lo largo del río chiquito, al fondo de cañadas y al pie de las laderas del cerro donde se alojará el túnel. Se aprecian poco compactos, de color pardo claro, constituidos por fragmentos de rocas con poco transporte, angulosas a sub-redondeadas, de composición predominantemente tobácea y por arenas medias. Estos depósitos serán excavados en ambos portales en volúmenes reducidos.

e) Depósito de Talud (Qmt)

Muy cercano a la zona del portal Morelia del túnel se encuentra este material sedimentario, producto del depósito de materiales que se desprenden por erosión o por inestabilidad de las laderas y se

depositan en las laderas y partes de baja pendiente del cerro. Está constituido por materiales predominantemente granulares que incluyen bloques angulosos ignimbríticos de diversos tamaños, cubiertos en las partes bajas por materiales de menor tamaño y de composición diversa arcillosos, limosos y arenosos. Estos materiales posiblemente serán excavados en muy pequeña proporción en la porción superior de los taludes frontales del portal Morelia del túnel.

f) Suelo Residual (Qsr)

Se desarrolla sobre la superficie de las tres unidades litológicas expuestas y es predominantemente de composición arcillosa y arcillo-limosa, de color ocre oscuro con tonalidades ocres y rojizas, presentando gran contenido de materia orgánica. Los espesores de este material en la zona son delgados variando entre 30 y 60 cm y serán excavados mediante el despalme en los cortes de los portales del túnel.

2.3.10. Discontinuidades en la zona del Túnel II

En la zona del túnel II se lograron censar con detalle un total de 97 discontinuidades (todas correspondientes con fracturas) cubriendo la zona del portal Jesús del Monte, cima y portal Morelia, sobre el eje del trazo, apreciando la inexistencia de fallas que atraviesen el trazo.

Las discontinuidades representadas por el fracturamiento son onduladas y rugosas, cerradas a ligeramente abiertas (entre 0.3 y 1.3 cm), con o sin relleno de suelo residual y los planos de las fracturas expuestos presentan trazas de óxidos de hierro (Fe) y trazas de arcilla. A profundidad el fracturamiento en roca tiende a cerrarse, sin relleno de material arcilloso y poco alterado.

Las Figuras 19 y 20 muestran la distribución espacial de las discontinuidades censadas de acuerdo a su densidad polar representadas con arcos y polos y las tablas 8 a 11 siguientes indican el número de familias con su rumbo azimutal de echado y ángulo de echado, así como la orientación del plano con respecto al eje de trazo del túnel, así como sus características físicas y condiciones de alteración.

Familia	Rumbo Azimutal/ Echado	Orientación del plano con respecto al trazo del túnel	Características
1	63° / 10°	28°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (0.5 mm), sin presencia de agua y poco persistentes.
2	220° / 82°	51°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (1.3 mm), sin presencia de agua y moderadamente persistentes.
3	151° / 83°	59°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas sin presencia de agua
4	186° / 84°	85°	Fracturas onduladas y rugosas, abiertas (3mm máximo), cerrándose a pocos centímetros de profundidad, con relleno de suelo residual, sin presencia de agua.
5	265° / 84°	60°	Fracturas ligeramente planas y rugosas abiertas (< 3 mm) algunas con relleno de materia orgánica, sin presencia de agua
6	240° / 21°	31°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas sin presencia de agua
7	313° / 80°	42°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas sin presencia de agua

Tabla 8. Discontinuidades en el Portal de Entrada del Túnel II.

Familia	Rumbo Azimutal/ Echado	Orientación del plano con respecto al trazo del túnel	Características
1	216° / 75°	55°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas a ligeramente abiertas (1.0 mm), sin presencia de agua y poco persistentes.
2	135°/81°	44°	Fracturas onduladas y rugosas, ligeramente abiertas (3mm), cerrándose a pocos centímetros de profundidad, sin relleno y sin presencia de agua, moderadamente persistentes.
3	326°/69°	55°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (3 mm) con suelo residual, sin presencia de agua, poco persistentes.

Tabla 9. Discontinuidades en la cañada cercana al portal de entrada del Túnel II.

Familia	Rumbo Azimutal/ Echado	Orientación del plano con respecto al trazo del túnel	Características
1	28° / 11°	63°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (3 mm), sin presencia de agua y poco persistentes.
2	199° / 83°	72°	Fracturas onduladas y rugosas, ligeramente abiertas (2mm máximo), con o sin relleno de suelo residual, sin presencia de agua y poco persistentes.
3	158° / 87°	67°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (1 mm), sin presencia de agua y poco persistentes.
4	233° / 56°	38°	Fracturas planas y rugosas, cerradas, sin presencia de agua y moderadamente persistentes.
5	278° / 80°	70°	Sistema con características a las de la familia I
8	324° / 25°	53°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (1 cm), sin presencia de agua y poco persistentes.

Tabla 10. Discontinuidades en la porción superior del cerro sobre el eje de trazo del Túnel II

Familia	Rumbo Azimutal/ Echado	Orientación del plano con respecto al trazo del túnel	Características
1	57° / 42°	30°	Fracturas planas y rugosas cerradas, sin presencia de agua. Con 0.5 cm de abertura
3	126° / 87°	35°	Fracturas ligeramente planas y rugosas, cerradas, sin presencia de agua y persistentes.
4	200° / 70°	72°	Sistema con la mismas características a las de la familia I
5	253° / 79°	18°	Fracturas onduladas y rugosas, cerradas o ligeramente abiertas (1 mm), sin presencia de agua y poco persistentes.
6	255° / 10°	11°	Fracturas onduladas y rugosas ligeramente abiertas (1 mm) algunas con relleno de materia orgánica, sin presencia de agua
7	333° / 62°	62°	Fracturas ligeramente planas y onduladas cerradas
9	9° / 82°	82°	Fracturas onduladas y rugosas ligeramente abiertas (1.3 mm) algunas con relleno de materia orgánica, sin presencia de agua

Tabla 11. Discontinuidades en el Portal de Salida del Túnel II

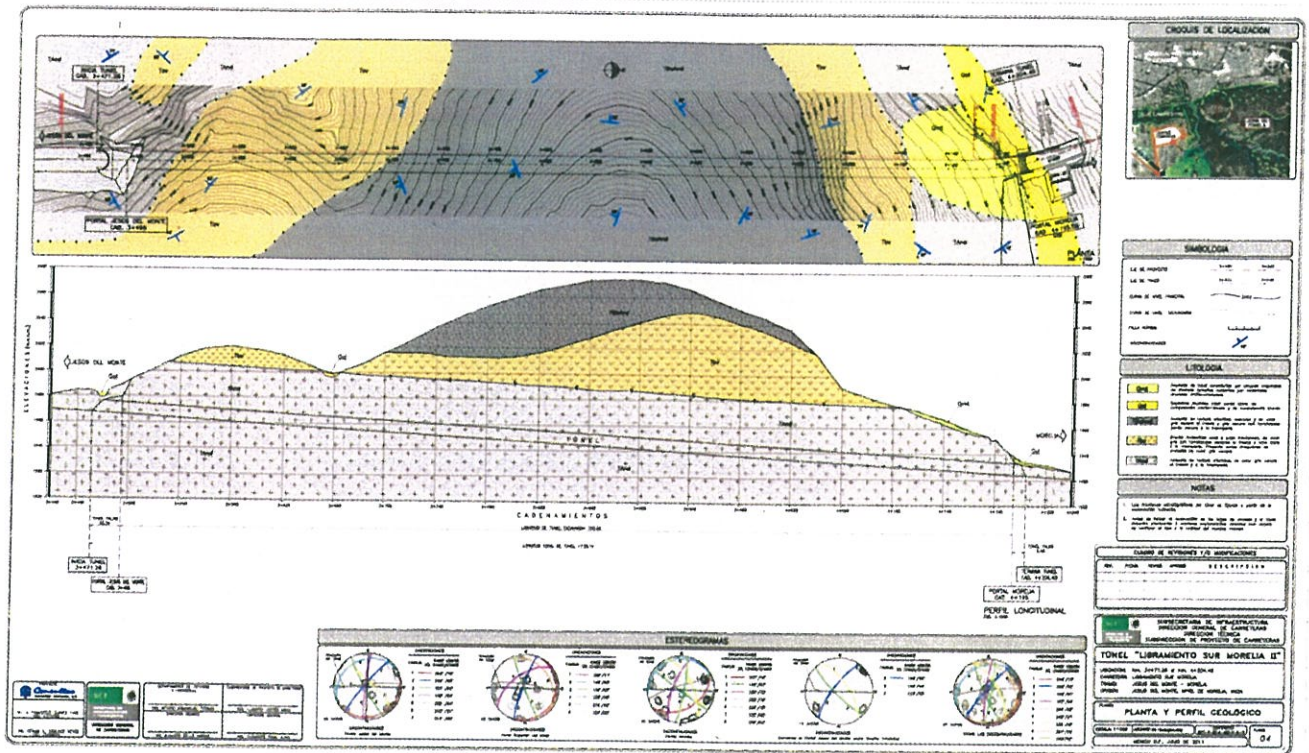


Figura 19. Planta Geológica General Túnel II.

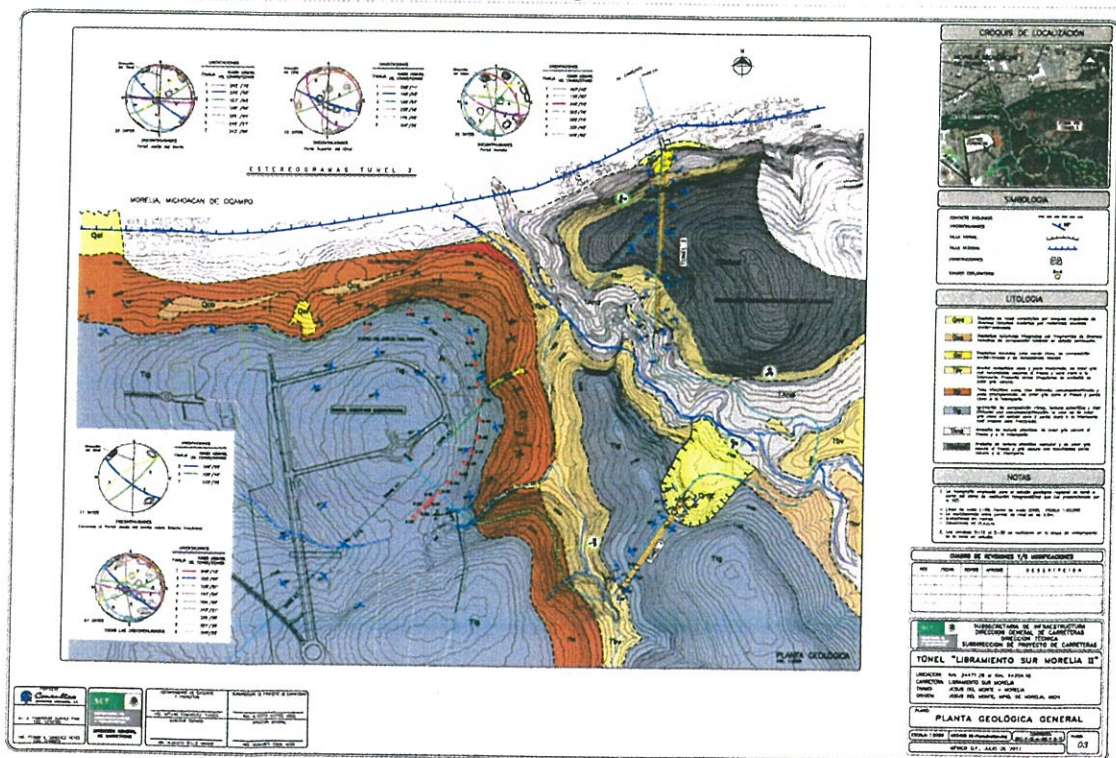


Figura 20. Planta y Perfil Geológico de Detalle del Túnel II.

2.3.11. Conclusiones del túnel II

Debido a la problemática social que representa la construcción del Libramiento Sur de Morelia, en este túnel no pudieron realizarse barrenos de exploración directa, ya que cuando se iniciaran los trabajos de perforación la población se opuso. Por lo anterior, lo que la distribución mostrada en los planos de las Figuras 19 y 20 de las tres unidades litológicas existentes, es inferida a partir del reconocimiento superficial y de la exploración geofísica y es posible que la forma de la frontera de contacto entre unidades pueda variar.

Al no contar con barrenación directa, no fue posible determinar la ubicación del nivel freático, los parámetros de recuperación y *RQD*, ni verificar la calidad de la roca y evaluar su resistencia y deformabilidad como roca intacta a partir de los núcleos recuperados.

Este túnel y sus portales serán excavados únicamente en la unidad litológica de Andesitas y las dos unidades superiores que la sobreyacen (brecha andesítica y basalto andesítico) no tendrán influencia alguna en el comportamiento del túnel, ya que el contacto con la unidad más próxima (toba andesítica) se encuentra casi a 30 m por arriba de la clave del túnel.

La unidad Andesítica donde se emplazará el túnel es masiva y está afectada por 9 familias de fracturas que pueden reducirse a solo 4 familias principales (una que agrupa a las familias 2, 9 y 4 subverticales, otra con las familias 3 y 7 también subverticales, otra con la familia 5 y una mas subhorizontal con las familias 6, 1 y 8). Estas familias de fracturas podrían dar lugar a mecanismos de falla de taludes en los portales y delimitarían bloques prismáticos en el túnel con tendencias de salida hacia la excavación.

Antes de iniciar la construcción de éste túnel, se recomienda realizar por lo menos tres sondeos para verificar los materiales que han sido definidos a partir de la geología superficial y del estudio geofísico, sobre todo en la zona de los emportalamientos.

De acuerdo con la regionalización sísmica de la República Mexicana, los túneles se ubicarán en la zona D, de peligrosidad sísmica alta, donde se han reportado grandes sismos históricos, la ocurrencia es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

El último sismo registrado en la zona en abril del año 2009, tuvo su epicentro a 4.3 km al suroeste del puerto de Lázaro Cárdenas, y presentó una magnitud en la escala Richter de 4.8 grados. En esta zona el coeficiente óptimo de diseño es de 0.34.

Es importante recalcar que un túnel, por su propia naturaleza queda encajado en el terreno y se vuelve parte integral de la masa de roca o de suelo. Al presentarse algún sismo se generan desplazamientos de toda la masa que el túnel acompañará al estar integrado a ella, sin sufrir desplazamientos independientes del medio que lo circunda.

Entre los expertos de túneles, se ha acuñado la siguiente sentencia:

“El día que un sismo llegara a dañar la integridad estructural de un túnel bien construido, ese día no quedará ninguna estructura de superficie en pie”.

No habrá de confundirse con el caso de fallas de laderas que afectan los emboquilles de los túneles o de otros grandes deslizamientos que ocurran en el medio que circunda al túnel y que nada tienen que ver con la construcción de éste.

Bibliografía

1. SCT. "México. Atlas de Comunicaciones y Transportes" 1995
2. Atlas de riesgo de La Ciudad de Morelia
3. Raisz, E. "Landforms of Mexico" (chart). Geography Branch of the Naval Research. 2º ed. Cambridge, Mass. USA. 1964.
4. CFE. "Manual de Diseño de Obras Civiles". Sección B. Geotecnia; Tema 1. Geología; Capítulo 3. Información Geológica Existente; Tomo I. Recomendaciones. Elaborado por: Mariano Ruiz Vázquez y Carmen Pedrazzini Nessi. México, 1996.
5. López Ramos E. "Geología de México". Tomos II y III. 2ª. Ed. México, 1979
6. Huang T. Walter. "Petrología". Primera edición en español. México, 1978.
7. Alvarez Manuel. "Provincias Fisiográficas de la República Mexicana". Primera Edición. Manuscrito elaborado en ocasión del XX Congreso Geológico Internacional.
8. Demant Alain "Interpretación Geodinámica del Volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano". UNAM. Inst. Geologia Revista. Vol. 5, No. 2. 1982. pp. 217-221.
9. SGM "Carta Geológico-Minera Morelia E14-1". esc. 1:250,000 1998
10. Demant A. "Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación". Revista del Instituto de Geología UNAM. Vol. 2. pp. 172-187. 1978.
11. Pasquare G. et al. "Structural behavior of a continental volcanic arc; the Mexican volcanic belt in the origin of arcs. Elsevier Sci. Pub. Amsterdam. pp. 509-527. 1986.
12. ISRM "Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods" Determining Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Pp 113-116. Editor E.T. Brown. Pergamon Press. 1981.
13. ASTM "Annual Book of ASTM Standards". Standard Test Method for Compressive Strength of Natural Building Stone. Pp. 16-19. Section 4. Construction. Vol 04.08. Soil and Rock; Building Stones; Geotextiles Ed. 1987.