



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

OBTENCIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO-  
GEOTÉCNICO EN CONGLOMERADOS DE  
LA FORMACIÓN ROSARIO, BAJA  
CALIFORNIA, MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O G E Ó L O G O

P R E S E N T A:

JUAN CARLOS ALVARADO SÁNCHEZ



DIRECTOR DE TESIS:  
ING. JAVIER MANCERA ALEJÁNDREZ  
MÉXICO, D.F. 2015

## Agradecimientos

### **A Carlos y Oricela, mis padres**

Por haberme dado la vida y ser el pilar fundamental en todo lo que soy. Por su incondicional respaldo perfectamente mantenido a través del tiempo. No lo habría logrado sin ustedes.

### **A Nayelli, mi hermana**

Porque a pesar de ser mi hermana menor has sido como una hermana mayor. Me llevaste de la mano a comenzar esta historia. Por estar conmigo y apoyarme siempre.

### **A Laura, la mujer de mi vida**

Por cuidar de mí y darme amor todos los días. Por permitirme ser parte de tu vida y compartir tu vida conmigo. Por darme consuelo y comprensión cuando todo va mal y reír conmigo en las alegrías. Te amo.

### **A Jorge, mi mejor amigo**

Porque me acompañaste desde el principio de esta aventura y estuviste conmigo en cada tropiezo y en cada acierto. Por aconsejarme y convertirme en un mentor.

### **A mis amigos**

Por compartir tantas experiencias, desveladas y triunfos. Gracias por dejarme entrar en su vida y compartir conmigo un poquito de cada uno de ustedes.

### **A mis profesores**

Por marcar cada etapa de mi camino universitario. Lo que soy es una mezcla de lo que ustedes son.

### **A los miembros del jurado**

Por su dirección y asesoría en mi regreso a la vida universitaria. Por brindarme su amistad, depositar su confianza en mí y permitirme trabajar a su lado.

Y a todas aquellas personas que creen en mí, los que no han tenido reparo en compartir su conocimiento y los que todos los días tienen a bien brindarme una sonrisa.

## Índice

Resumen .....	4
Abstract.....	4
1 Aspectos generales.....	5
1.1 Introducción .....	5
1.2 Objetivos .....	9
1.3 Justificación .....	9
1.4 Propiedades mecánicas de rocas y suelos .....	10
1.4.1 Rocas .....	10
1.4.2 Suelo .....	12
1.5 Ambigüedad mecánica .....	14
2 Marco físico .....	18
2.1 Localización del área de estudio .....	18
2.2 Fisiografía .....	19
2.3 Características geológicas y estratigrafía .....	20
2.3.1 Geología regional .....	20
2.3.2 Geología local.....	23
2.4 Geología estructural y tectónica .....	29
2.4.1 Estructuras regionales .....	30
2.4.2 Estructuras primarias.....	31
2.4.3 Estructuras secundarias.....	31
3 Descripción de los trabajos .....	33
3.1 Información existente .....	33
3.2 Geología local.....	36
3.3 Exploración del subsuelo.....	36
3.4 Geofísica .....	38
3.4.1 Tendido de Refracción Sísmica (TRS).....	39
3.4.2 Tomografía de resistividad eléctrica (TRE) .....	42
4 Análisis de resultados .....	45
4.1 Exploración directa.....	45
4.2 Exploración geofísica.....	47

4.3	Modelo Geológico.....	51
4.4	Modelo Geotécnico.....	54
4.4.1	Módulos elásticos dinámicos.....	55
4.4.2	Unidad Geotécnica UG1.....	56
4.4.3	Unidad Geotécnica UG2.....	57
4.4.4	Unidad Geotécnica UG3.....	57
4.4.5	Unidad Geotécnica UG4.....	58
5	Conclusiones.....	60
6	Bibliografía.....	63

## Resumen

Como parte de los trabajos de reconstrucción de un tramo carretero en la autopista Tijuana-Ensenada, la SCT propuso la construcción de un trazo alternativo. El proyecto incluye la construcción de un túnel en conglomerados de la Formación Rosario y la Formación San Diego. Estos materiales presentan un comportamiento mecánico que no se apega al esperado de un suelo ni al de una roca. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue encontrar un modelo geotécnico que sirva como base para recomendar elementos de diseño del túnel. Se utilizaron métodos geofísicos y su correlación con el ángulo de fricción interno para encontrar parámetros elásticos dinámicos. Como resultado se obtuvo una zonificación con base en la calidad del subsuelo y un plano que resume las recomendaciones para la construcción del túnel.

## Abstract

As part of the reconstruction of a stretch of highway in the Tijuana-Ensenada highway, SCT proposed the construction of an alternate path. The project includes the construction of a tunnel in Rosario Formation conglomerates and the San Diego Formation. These materials exhibit a mechanical behavior that does not conform to expected soil or that of a rock. Therefore, the objective of this work was to find a geotechnical model as a basis for recommending the tunnel design elements. Geophysical methods were used and their correlation with the angle of internal friction to find elastic parameters dynamic. As a result zoning based on groundwater quality and a plane summarizes recommendations for the construction of the tunnel was obtained.

# 1 Aspectos generales

## 1.1 Introducción

El Estado de Baja California cuenta en su infraestructura con la carretera Federal de cuota 1D, conocida como Carretera Escénica Tijuana-Ensenada, tiene aproximadamente 98 km de longitud. Es una vía concesionada por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) al Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN) y operada por Caminos y Puentes Federales (CAPUFE).

La carretera Escénica tiene atractivo turístico, una razón es que parte de su trazo está al pie de espectaculares acantilados que van bordeando la costa desde el poblado de Baja Mar hasta la ciudad Ensenada. En este lugar se encuentran depósitos de talud poco compactos y deleznales que son producto de la erosión y paleodeslizamientos de los acantilados locales. En esta obra la mayoría de los taludes en el sector de la Bahía de Salsipuedes fueron construidos en estos paleodeslizamientos y aunque algunos son estables, otros aún están activos o fueron reactivados durante la construcción de la autopista, otros están en zonas de riesgo de deslizamiento por la fuerte pendiente, por el nivel de fracturamiento y por fallas geológicas. En las zonas activas continúa el deslizamiento con movimientos que van desde milímetros al año hasta metros al día (Rico, 1969).

Desde que comenzó a operar la autopista en 1967 (Rico, 1969), ocurrieron afectaciones estructurales y roturas importantes de taludes en diversos puntos del trazo. Como los ocurridos en 1976 y 1995, que provocaron agrietamientos en muros de viviendas cercanas (Fig. 1-1), por lo que en 1997 se tuvo que reconstruir por completo un tramo de la Carretera Escénica. Las roturas de los taludes han obligado a cerrar la carretera para su reconstrucción en más de una ocasión (Manuel Cruz-Castillo, 2000).



Fig. 1-1 Casa afectada por deslizamientos de 1976 (Manuel Cruz-Castillo, 2000)

El último deslizamiento de considerable magnitud fue el 28 de diciembre de 2013, a la altura del km 93, dentro del tramo del poblado de Baja Mar a Ensenada. El movimiento de tierra afectó cerca de 300 metros a lo largo de la carretera y se midieron desplazamientos verticales de hasta 40 metros, dejando la vía inhabilitada por completo (Pedraza, 2013) (Fig. 1-2).

Esto forzó al cierre de este tramo en sus dos sentidos, obligando a los usuarios a circular por la carretera libre desde Baja Mar hasta Ensenada. El tramo carretero afectado fue reabierto a la circulación el día 16 de diciembre de 2014, lo que implicó un total de 353 días de cierre carretero (Pedraza, 2014), situación que provocó un duro golpe a los usuarios y a la economía dependiente de esta vía de acceso.



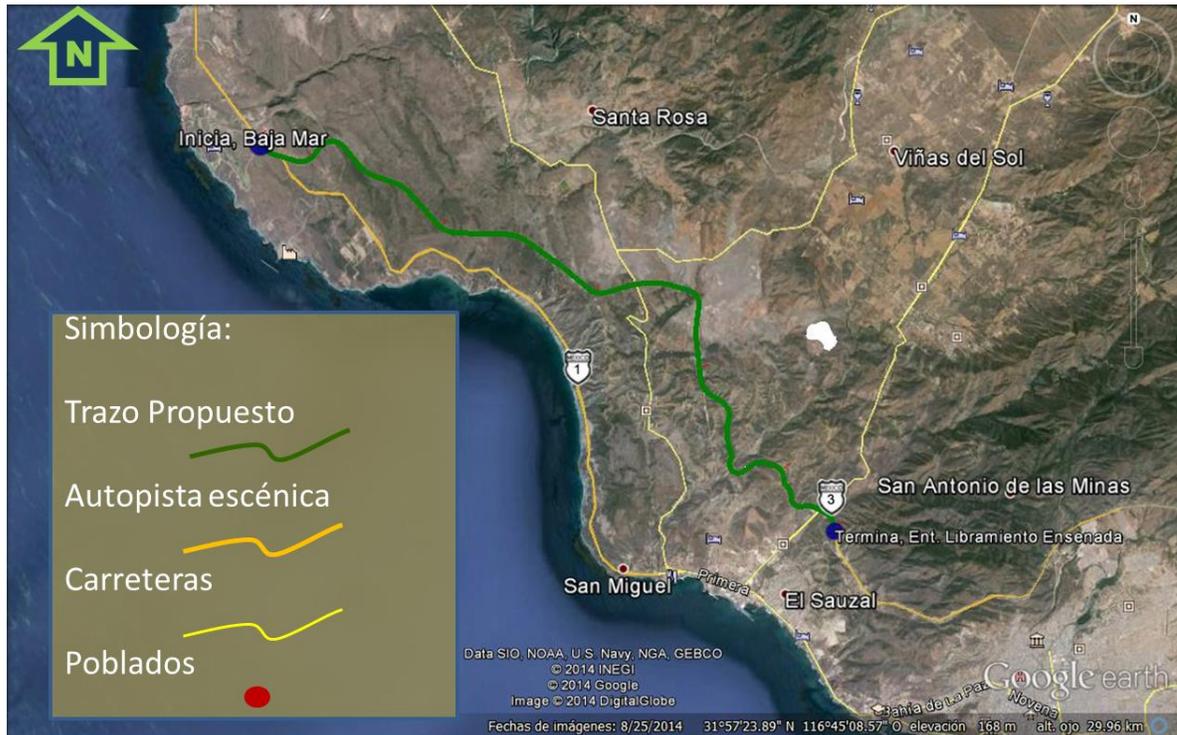
Fig. 1-2 Afectaciones a la Carretera Escénicas con el deslizamiento del 28 de diciembre de 2013  
(Pedraza, 2013)

La naturaleza inestable de los taludes ubicados en la Bahía de Salsipuedes (Rico, 1969) motivaron que la SCT elaborara un anteproyecto de Trazo Alterno, planteado desde el poblado de Baja Mar hasta Ensenada. Esta propuesta tiene el fin de mantener abierta una vía de comunicación de altas especificaciones en caso de que subsecuentes deslizamientos propicien un nuevo cierre de la Carretera Escénica.

El proyecto Trazo Alterno se localiza al noroeste de la ciudad de Ensenada. Inicia en las inmediaciones del poblado Baja Mar y finaliza en el entronque con el libramiento de Ensenada, al norte del poblado El Sauzal, a la altura del Rancho Barrera (Fig. 1-3). Cuenta con una longitud aproximada de 25 km y tiene un ancho de corona de 22 m con la finalidad de alojar cuatro carriles de circulación de 3.5 m cada uno. El Trazo Alterno considera la construcción de un túnel carretero llamado Túnel Olivares de 180 m de longitud y dos puentes de 140 y 330 m de longitud, además de 16 cortes carreteros mayores a 15 m a lo largo del trazo. El proyecto inicia en el cadenamiento km 578+000 y termina en el cadenamiento km 602+534.17.

A solicitud de la Dirección General de Desarrollo Carretero (DGDC) de la SCT, la División de Ciencias de la Tierra (DICT) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, realizó el Estudio Geológico del Tramo km 578+000 al 602+534.17 de la Modificación del Trazo de la Autopista Tijuana-Ensenada No. SCT-DGCD-CC-003-2014. Este trabajo fue el resultado de un convenio de colaboración entre la DICT y la SCT.

El desarrollo de este trabajo de tesis se centra en la elaboración de un modelo geotécnico para el Túnel Olivares. Esta obra perteneciente al Trazo Alterno es quizá la de mayor complejidad debido a la naturaleza de la litología donde está proyectada.



## 1.2 Objetivos

Este trabajo de tesis tiene por objetivos:

- Obtención del modelo geológico-geotécnico de los conglomerados en la zona dónde se proyecta la construcción del Túnel Olivares.
- Utilizar sondeos exploratorios en roca para calibrar litológicamente el modelado geológico-geotécnico.
- Zonificar resistivamente y por medio de la capacidad de propagación de ondas sísmicas el subsuelo con el fin de inferir y modelar la geología bajo la superficie.
- Integrar los puntos anteriores con el trabajo de campo para obtener un modelo geológico que será la de base para realizar un modelo geotécnico.
- Obtener el modelo geotécnico de la unidad conformada por sucesiones de rocas sedimentarias que se caracterizan por la imposibilidad de ser evaluadas geotécnicamente por medios estandarizados de clasificación geomecánica.
- Hacer una integración de los modelos y proporcionar elementos de diseño para la excavación del túnel y la realización de los taludes en los Portales de Entrada y Salida.

## 1.3 Justificación

Los eventos sucedidos en el invierno de 2013 en la Carretera Escénica, muestran la importancia de identificar las zonas inestables antes de construir un camino con especificaciones como las que la SCT ha propuesto para el Trazo Alternativo. Es necesario conocer las características geomecánicas del macizo rocoso en las que se harán los cortes para los taludes y se excavarán las obras subterráneas, además de la geometría de la obra proyectada.

Además, la seguridad y la estabilidad del túnel durante la construcción y operación, dependen fuertemente de un modelo geológico-geotécnico confiable.

La trascendencia de elaborar un modelo del comportamiento mecánico, junto con la complejidad de clasificar geomecánicamente la litología donde se proyecta la construcción del Túnel Olivares justifican ampliamente el desarrollo de este trabajo de tesis.

## 1.4 Propiedades mecánicas de rocas y suelos

### 1.4.1 Rocas

De acuerdo con Brady y Brown (2004), el material rocoso se diferencia de la mayoría de los materiales de ingeniería en que contiene fracturas inherentes a su formación, lo que hace que su estructura interna sea discontinua. Por lo tanto, es importante hacer una clara distinción entre el elemento roca y el macizo rocoso.

Roca es el término utilizado para describir la porción de roca intacta entre discontinuidades y puede ser representada por una muestra de mano. El macizo rocoso es el medio que contiene planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otras características estructurales. El macizo rocoso es discontinuo y con frecuencia tienen propiedades físicas heterogéneas y anisótropas (Fig. 1-4). La naturaleza de las discontinuidades corresponden a planos de origen mecánico o genético y pueden tener una resistencia a la tensión desde nula hasta muy buena (Singh & Goel, 2011). Por esta razón se genera un comportamiento no continuo y normalmente anisótropo en el macizo rocoso.

La caracterización geológica-geotécnica de un determinado macizo rocoso permite plasmar las condiciones imperantes, dando la oportunidad de conocer las propiedades cualitativas y cuantitativas de éste, las cuales sirven de base para generar un modelo que permita estimar el comportamiento que tendrá el macizo rocoso ante diferentes condiciones físicas y ambientales (Hoek y Brown, 1997).

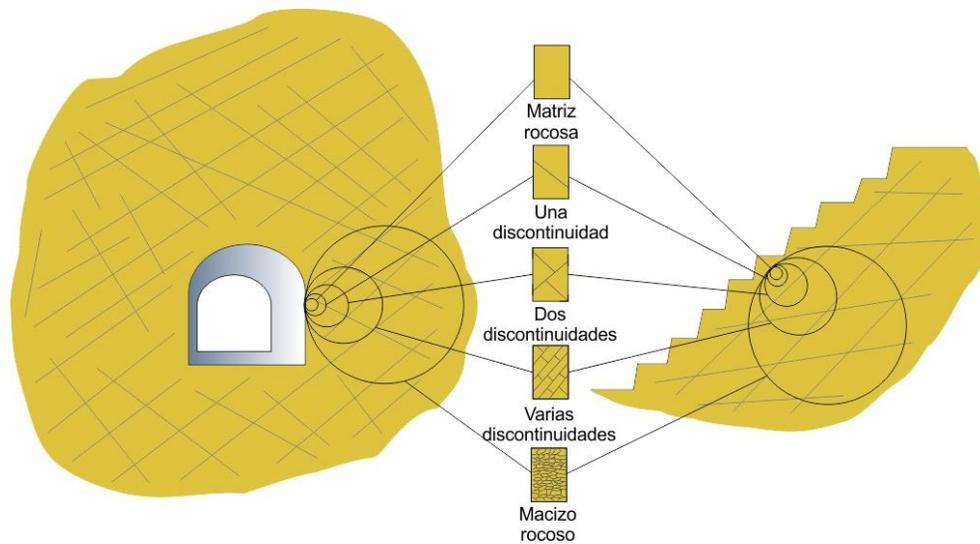


Fig. 1-4 Transición entre la roca intacta y el macizo rocoso, modificada de (Hoek & Brown, 1997)

El procedimiento general a seguir para obtener las propiedades mecánicas del macizo rocoso parte de la descripción general de los aspectos y características observables a simple vista, con las cuales se establece una zonificación litológica, tectónico-estructural, de alteración, etc. Posteriormente se describen y caracterizan a detalle los componentes de las diferentes zonas del macizo rocoso y sus propiedades; finalmente a partir de todos los datos obtenidos, se clasifica el macizo rocoso obteniendo así un modelo geológico-geotécnico (González de Vallejo, 2002). Cabe aclarar que este procedimiento es general y que está limitado por el tamaño de la obra.

Dentro de las propiedades del macizo rocoso que se pueden medir en laboratorio, están principalmente: Resistencia a la compresión simple, la relación esfuerzo-deformación, módulo de elasticidad y módulo de Poisson. Estas propiedades son complementadas con datos de campo como el estado de las discontinuidades, las condiciones del relleno en fracturas y fallas, el espaciamiento de las juntas, así como su apertura y persistencia, la rugosidad y la cantidad de agua presente. La base de datos recabada es utilizada para clasificar el macizo rocoso en estudio por medio de una clasificación geomecánica.

En la actualidad las clasificaciones geomecánicas son un método de uso generalizado para evaluar de forma rápida la calidad los macizos rocosos, gracias a ellas, es posible obtener una mejor interpretación y aplicación de los datos geológicos y geotécnicos. Asimismo, dichas clasificaciones son herramientas muy útiles que ayudan a la comprensión del comportamiento mecánico de los macizos rocosos, ya que permiten realizar una primera aproximación de los parámetros mecánicos de diseño.

Las clasificaciones geomecánicas más aceptadas en la geotecnia son las conocidas como Rock Mass Rating o sistema RMR (Bieniawski, 1976), la clasificación Geological Strength Index (GSI) (Hoek et al., 2005) y el Sistema Q (Barton, 1974). Estos sistemas fueron creados con una base de datos alimentada con información proveniente de la construcción de túneles.

#### 1.4.2 Suelo

A diferencia de las rocas, los suelos se originan a partir de la desintegración de macizos rocosos preexistentes que son sometidos a procesos de meteorización física y química. Lo anterior da lugar a fenómenos de desintegración y transformación de la roca, creándose el perfil de meteorización. En este perfil, las capas más superficiales son las que corresponden al suelo (Juárez-Badillo, 1963).

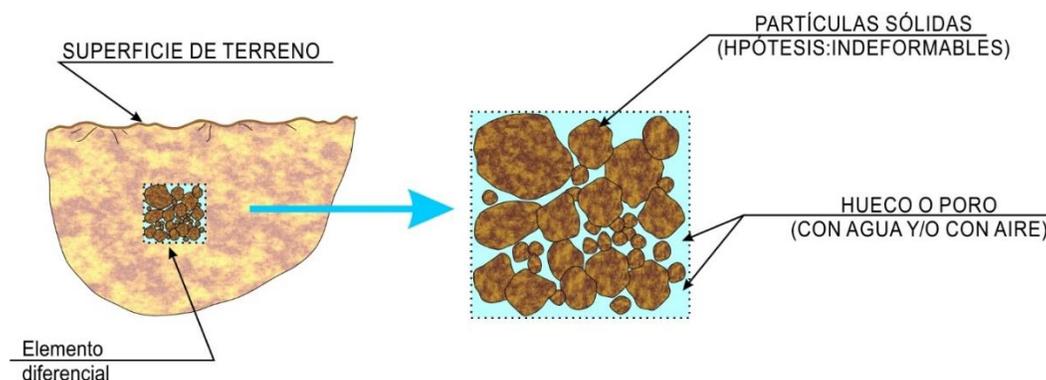


Fig. 1-5 Constitución de un suelo. Imagen modificada de González de Vallejo (2002)

Los suelos están formados por partículas pequeñas (que van desde arcillas hasta gravas) e individualizadas (Fig. 1-5), que desde el punto de vista de la mecánica de

suelos pueden considerarse indeformables. Entre esas partículas quedan huecos, cuyo volumen total puede llegar a ser igual o incluso superior al ocupado por las partículas mismas (porosidad). Esos huecos pueden estar o no ocupados por agua, lo que condiciona la respuesta mecánica en conjunto del material permitiendo definir tres comportamientos conocidos en función de su permeabilidad; drenado, no drenado y parcialmente saturado (Muni-Budhu, 2010).

En ingeniería, el suelo se puede definir como un agregado no cementado de granos minerales unidos por fuerzas débiles de contacto (cohesión y/o fricción), separables por medios mecánicos o hidráulicos (Braja, 2015). La respuesta del suelo frente a las cargas y modificación del estado de esfuerzos que introducen las obras de ingeniería, será un movimiento de esas partículas a través de deslizamientos y giros entre ellas (roturas y fallamientos).

Por lo anterior, desde un punto de vista geotécnico, en un suelo se tienen que estudiar los problemas de deformabilidad que introducen las modificaciones al estado de esfuerzos y las condiciones de flujo de agua a través del material (porosidad, permeabilidad, saturación, etc.).

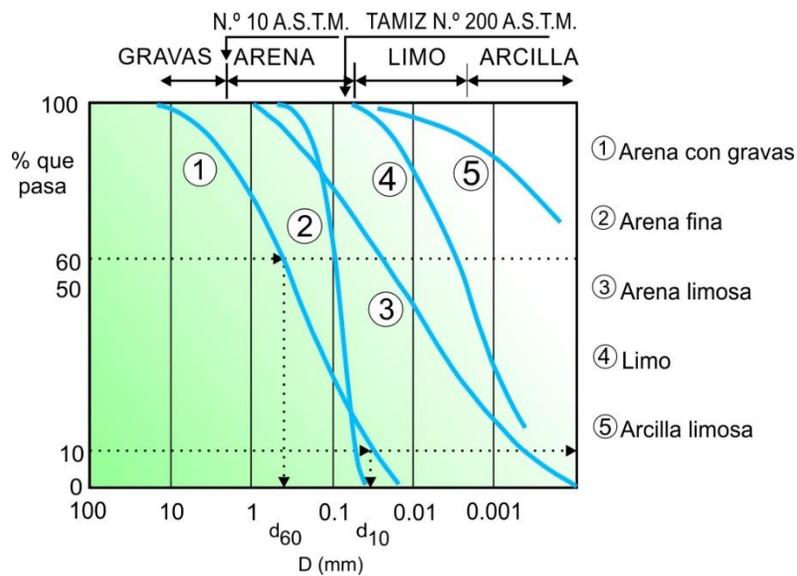


Fig. 1-6 Curva granulométrica. Imagen modificada de González de Vallejo (2002)

Según (Wentworth, 1922) y modificado por (Krumbein, 1937), para poder estudiar un material complejo como el suelo, se debe clasificar en función de su granulometría, como gravas (8 cm a 2 mm), arenas (<2 mm a 0.06 mm), limos (<0.06 mm a 2  $\mu$ m) y arcillas (<2  $\mu$ m) (Fig. 1-6). Se debe conocer la proporción de tamaños presente, para esto es necesario contar con una muestra representativa a la que se hará pasar por un conjunto de tamices; el peso de lo que queda en cada tamiz es comparado con el peso de la muestra inicial y con la información obtenida se elabora una curva granulométrica. Adicionalmente, se define la condición del suelo en función del contenido de agua, a través de la determinación de la humedad. Se consideran sus límites plástico y líquido para finalmente obtener su índice de plasticidad (ASTM-D2487-11, 2011). Los resultados son correlacionables con la respuesta geomecánica que un suelo tendrá ante cargas inducidas y cambios en el estado de esfuerzos.

### 1.5 Ambigüedad mecánica

La litología declarada en el sitio del túnel (Gastil et al., 1980) corresponde a conglomerados de matriz arenosa no cementada y deleznable al golpearla con la punta del martillo geológico. Sin embargo, en campo se observó que presenta ángulos de reposo de forma natural casi verticales. Por su génesis, esta litología es considerada como una roca, sin embargo, las observaciones *in-situ*, evidencian poca solidez general, además de un estado inconsistente y poco cohesivo de la matriz (Fig. 1-7), esto representa un problema en la labor de medir planos de discontinuidades e intentar determinar el grado de fracturamiento de bloques o la rugosidad de las juntas. La variedad de tamaño en los clastos imposibilita obtener del macizo rocoso una muestra representativa que pueda utilizarse en un laboratorio para hacer análisis convencionales de resistencia y que el resultado tenga un significado real (Kalender, Sonmez, Medleyb, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014). En la barrenación a diamante la recuperación de muestras se limita generalmente a los bloques de roca más fuertes y existe pérdida de la matriz al extraer los núcleos, lo que deja sin sentido tratar de calcular el índice RQD (Deere, 1967). Esta litología puede ser descrita también como

una mezcla compleja de bloques de roca embebidos en una matriz más fina de suelo o “bimsoil” (Medley, 1994). Por lo anteriormente expuesto para este caso, los sistemas de clasificación como el RMR o el GSI no pueden ser aplicados.

Una solución es realizar el estudio como si se tratase de un suelo. No obstante, un impedimento para esto es que la litología, genéticamente hablando, no se ajusta a la definición de suelo y el comportamiento observado sugiere que la calidad general es mayor que la que podría medirse en pruebas diseñadas para un suelo. Otra dificultad es que obtener la curva granulométrica (Krumbein, 1937) de una muestra de este material no tiene un significado porque la variación del tamaño de los clastos así como su relación con la cantidad de matriz es caótica y no es predecible. Los clastos van desde 1 mm hasta 5 m y la matriz va de ser predominante a ser inexistente. Estas condiciones dificultan la obtención de índices de plasticidad (ASTM-D2487-11, 2011) por medios tradicionales.

Por lo tanto, la litología donde se planea el Túnel Olivares no puede ser clasificada geomecánicamente como un macizo rocoso y tampoco como un suelo.



Fig. 1-7 Conglomerados mal clasificados y poco cohesivos en el área del Túnel Olivares

En este trabajo de tesis se propone utilizar los métodos geofísicos para interpretar el tipo y distribución de los materiales del subsuelo y superar el estado ambiguo de los conglomerados, métodos que no requieren de la obtención de muestras representativas, ya que inyectan señales y obtienen respuestas directamente del subsuelo en el sitio. Al inyectar señales eléctricas o producir movimiento al material bajo la superficie terrestre se toma un registro de las respuestas y se grafican (Fig. 1-8). La respuesta es interpretada y asociada a un comportamiento geomecánico. Posteriormente se compara con las observaciones en campo y se integra para conformar el modelo geotécnico.

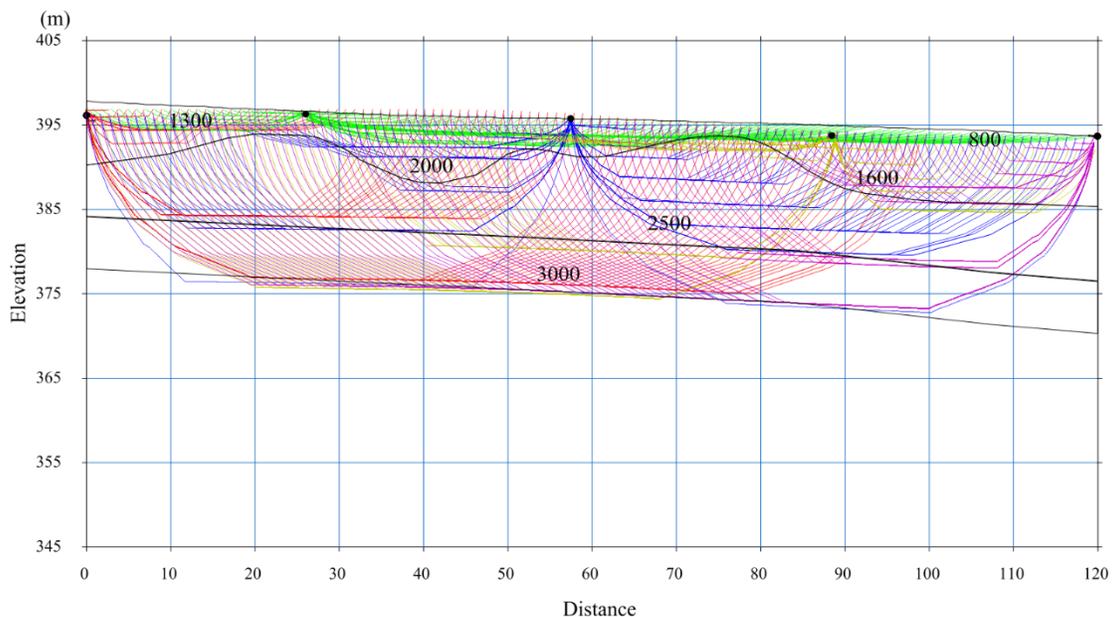


Fig. 1-8 Respuesta del subsuelo durante la inyección de señales de movimiento mediante el método sísmico. La velocidad de la señal de respuesta está en milisegundos.

Para este trabajo el modelo geofísico consiste en la agrupación en tres dimensiones de la resistividad del medio, utilizando la tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y de su capacidad de trasmisión de ondas de movimiento, por medio de Tendidos de Refracción Sísmica (TRS). La información obtenida mediante métodos indirectos es indispensable como respaldo al levantamiento geológico, sobre todo en las zonas

donde no hay evidencia superficial de las condiciones del subsuelo. Además, es decisivo en la obtención del modelo geotécnico por ser la principal fuente de información del estado del macizo rocoso bajo la superficie.

Para dar certidumbre y calibrar la modelación se utilizó un método directo, por lo que se integró la información obtenida de sondeos exploratorios con barrenación de diamante y recuperación de núcleo.

## 2 Marco físico

### 2.1 Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra en el extremo noroeste del territorio nacional, dentro del Estado de Baja California, a 11.42 km al NW de la ciudad de Ensenada (Fig. 2-1), dentro de la propiedad conocida como Rancho Barreda. Se encuentra limitada por el polígono formado por las coordenadas UTM R11 listadas en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Límites del área de estudio

Límite del área de estudio	
E	N
528,750.00	3,532,966.00
528,768.00	3,532,659.00
528,973.00	3,532,940.00
529,036.00	3,532,623.00



Fig. 2-1 Croquis de ubicación del área de estudio (Imagen obtenida de GoogleEarth® 2015)

El acceso al sitio a partir de Tijuana, B.C. es por la autopista Tijuana-Ensenada, 2 km después de pasar el entronque con la carretera federal, en las inmediaciones del Sauzal, se toma la desviación hacia Tecate, 2.2 km adelante se encuentra la entrada al Rancho Barreda, desde ahí se toma un camino de terracería en dirección Norte por aproximadamente 1,000 m (Fig. 2-2). Se continúa a pie en dirección NW por 700 m en línea recta hasta llegar al área de estudio.

## 2.2 Fisiografía

México es un país con una gran diversidad topográfica y geológica, esto influye en las características climáticas, tipo de suelo y la vida silvestre.

Fisiográficamente el territorio nacional se ha subdividido mediante la agrupación de extensiones territoriales que comparten un mismo origen geológico y geoformas similares llamadas provincias (Lugo-Hubp, 1990).



Fig. 2-2 Croquis de la ruta de acceso al área de estudio (Imagen obtenida de GoogleEarth® 2015)

El municipio de Ensenada se encuentra en su totalidad en la provincia fisiográfica llamada Península de Baja California, excepto en una pequeña franja en el límite NE

del municipio que colinda con Mexicali, la cual pertenece a las provincias Llanura Sonorense y subprovincia Desierto de Altar (Fig. 2-3). La Península de Baja California es una gran región continental bordeado por agua marina que se extiende con una orientación NW-SE, aproximadamente 1 200 - 1 300 km y su superficie total es de 170 000 km<sup>2</sup>. La anchura de la misma varía de 40 a 225 km y está delimitada por las aguas del Océano Pacífico y el Mar de Cortés (Golfo de California); tiene un litoral de 3 340 km de longitud.

Dentro de la provincia Península de Baja California, se localizan las subprovincias Sierras de Baja California, Desierto de San Sebastián Vizcaíno y Sierra de La Giganta. Cabe mencionar que las dos últimas ocupan una porción al sur de la Delegación Villa de Jesús María.

La subprovincia Sierras de Baja California es la de mayor extensión (78.90%), se caracteriza por la presencia de sierras, lomeríos, mesetas, llanuras y valles. Y es ésta donde se encuentra la zona de interés de este trabajo.

Posee una orientación general noroeste-sureste y limita al norte con los Estados Unidos de América, al Este con la provincia Llanura Sonorense y Golfo de California, al Poniente con el Océano Pacífico y al Sur con Desierto de San Sebastián Vizcaíno y la Subprovincia Sierra de La Giganta.

## 2.3 Características geológicas y estratigrafía

### 2.3.1 Geología regional

La geología de la región de Baja California está integrada por seis grandes conjuntos litoestratigráficos (Fig. 2-3):



Fig. 2-3 Ubicación en rojo de la subprovincia Sierras de Baja California (Cervantez-Zamora, 1990)

### 2.3.1.1 Unidad litoestratigráfica: Rocas Prebatolíticas

El primer conjunto es el más antiguo que se ha reconocido y se integra por cuerpos de roca denominados pre-batolíticos, los que están distribuidos predominantemente en el sector centro oriental, en los cuales se emplazó el cinturón de batolitos de edad Cretácica. Las rocas pre-batolíticas están constituidas por sucesiones de rocas metasedimentarias con un amplio rango de edad. Los protolitos de dichas rocas representan las rocas sedimentarias formadas en los mares de la ancestral Norteamérica, las cuales fueron metamorizadas en eventos tectónicos al inicio del Cretácico temprano (Gastil G. , 1992).

### 2.3.1.2 Unidad litoestratigráfica: Grupo Alisitos

El Grupo Alisitos integra el segundo conjunto litoestratigráfico, el cual se encuentra constituido por una sucesión de rocas volcánicas, volcanoclásticas y volcano-

sedimentarias que se depositaron en forma dominante en un ambiente de arco submarino a finales del Jurásico y Cretácico temprano (Busby, 2004).

#### *2.3.1.3 Unidad litoestratigráfica: Cinturón de batolitos*

El tercer conjunto está conformado por un cinturón de batolitos de composición predominantemente félsica e intermedia, que en su porción occidental tienen una edad del Cretácico inferior y que constituyen las raíces de un arco volcánico que se extendió a lo largo de la región central de lo que en la actualidad es la península de Baja California. El cinturón de batolitos muestra continuidad en superficie en el sector norte de la península de Baja California, mismo que se encuentra cubierto en la mayor parte del sur de la península por rocas volcánicas de la Sierra de la Giganta del Cenozoico, hasta nuevamente aflorar en la región de los Cabos. En la región norte del cinturón de batolitos se observan rasgos de procesos erosivos y de exhumación, así como una menor actividad volcánica durante el Cenozoico (Schmidt et al., 2014).

#### *2.3.1.4 Unidad litoestratigráfica: Rosario*

La Formación Rosario representa el cuarto conjunto, la cual está constituida por sucesiones de rocas sedimentarias predominantemente detríticas de edad Cretácico tardío. Los componentes de esta unidad son el resultado del levantamiento y erosión del cinturón batolítico, así como del Grupo Alisitos, que se ubican al oriente de la Formación Rosario, por lo que los constituyentes de la última proceden de dichos conjuntos.

#### *2.3.1.5 Unidad litoestratigráfica: Rosarito Beach*

El quinto conjunto es el más joven y está formado por derrames de rocas volcánicas principalmente de composición máfica, así como de depósitos piroclásticos que se encuentran intercalados en las secuencias. La unidad muestra poca continuidad en relación con los depósitos volcánicos de la misma edad que afloran en la porción sur de la península y son considerados remanescentes de los últimos eventos de subducción registrados durante el Cenozoico, previos al proceso de apertura del Golfo de California.

#### 2.3.1.6 *Unidad litoestratigráfica: Formación San Diego*

La sexta unidad se compone de areniscas fosilíferas y conglomerados del plioceno que descansan mediante una discordancia angular sobre las rocas de las formaciones Rosario y Rosarito Beach.

#### 2.3.2 Geología local

Las unidades geológicas que conforman la zona de interés de este trabajo están dominadas por sucesiones de rocas sedimentarias detríticas con una amplia variación tanto en la granulometría de sus clastos, como en el contenido de matriz; están constituidos por conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas, además de presentar algunas intercalaciones de depósitos piroclásticos teniendo como basamento de la secuencia un cuerpo de ignimbritas; pertenecientes a la unidad litológica más antigua correspondiente con el Grupo Alisitos, el cual está constituido por una variedad de rocas volcánicas, volcanoclásticas y volcano-sedimentarias.

En el área de estudio, el Grupo Alisitos se compone de dos tipos de depósitos, que se interpreta constituyeron el paleorelieve sobre el cual se depositaron las secuencias sedimentarias que le sobreyacen: el primero está formado por un paquete de ignimbritas con un mayor espesor de tonalidades pardo-morado constituida por fragmentos angulosos a subredondeados, con tamaños generalmente menores que 10 cm de líticos volcánicos incluidos en una matriz de grano fino. En la parte superior se reconoce un segundo conjunto de ignimbritas de menor espesor y de composición predominantemente félsica, de color verdoso al fresco y al intemperismo con una coloración amarillenta. En ambos casos es una roca muy compacta.

Sobreyaciendo a la ignimbrita se encuentra una unidad conglomerática perteneciente a la base de la Formación Rosario inferior. Se encuentra constituida por conglomerados polimícticos con fragmentos de rocas intrusivas y extrusivas de coloraciones que van de oscuras a rojizas. Los fragmentos de rocas volcánicas posiblemente sean de composiciones andesíticas hasta dacíticas. El conglomerado en

ocasiones es clasto-soportado y en otras es soportado por la matriz, pero domina la relación de clastos respecto a la matriz. El conglomerado se encuentra en términos generales con una compacidad densa a muy densa.

En este conjunto rocoso se observan también capas de areniscas y limolitas intercaladas, que en ocasiones se presentan continuas, pero en otras se observan como lentes. En general, el volumen de areniscas y limolitas es menor en relación a las sucesiones de conglomerados.

Coronando la secuencia se encuentra una unidad de conglomerados de la porción superior y aluvión La unidad está ampliamente distribuida y se encuentra cubriendo a la Formación Rosario. Aunque también es un conglomerado polimíctico, se distingue por presentar clastos de mayor tamaño con matriz de tonalidad rojiza y una mayor relación de matriz con respecto a los clastos. Morfológicamente se reconoce por presentarse en escarpes que ocupan las porciones superiores de toda la secuencia estratigráfica.

En campo se observó que, al erosionarse, forma extensas áreas de aluvión con espesores en promedio de 10 m, que cubre tanto a las unidades conglomeráticas de la Formación Rosario como a la porción fina de areniscas y lutitas de la misma formación.

A primera vista ambos conglomerados tienen la misma apariencia y es posible confundirlos, por lo que es importante tener un estricto control estratigráfico local, ya que las unidades además de diferenciarse genéticamente, también tienen reacciones geomecánicas diferentes.

#### *2.3.2.1 Formación Alisitos*

En el área de estudio afloran rocas volcánicas de color gris que intemperizan a rojizo-violeta de edad Aptiano-Albiano, que corresponden con ignimbritas compuestas por fragmentos de feldespatos, cuarzo, fragmentos líticos angulosos y vidrio. Los

fragmentos de roca varían de tamaño desde 2 mm hasta 5 cm, son angulosos, aunque de forma aislada se presentan algunos subredondeados. La roca es masiva compacta y forma bloques de hasta 3 x 3 m separados por fracturas; es muy compacta por lo que al realizar excavaciones presenta buena estabilidad para construcción de cortes carreteros, mismos que pueden tener taludes inclinados, tomando como referencia que en los arroyos donde se encuentra expuesta de forma natural presenta fuertes pendientes que varían desde 60° hasta 90° cuando la roca está sana y con pocas fracturas.



Fig. 2-4 Panorámica de los afloramientos de Ignimbrita de la Formación Alisitos

Las ignimbritas de la Formación Alisitos se formaron por varios eventos de flujos piroclásticos (Gastil, Morgan, & Krummenacher, 1980), que en el área de estudio tienen espesores superiores a 100 m. Corresponden con las rocas más antiguas que están expuestas, así que constituyen el basamento en la zona (Fig. 2-4 y Fig. 2-5)

#### 2.3.2.2 Formación Rosario inferior

Consiste en un conglomerado polimíctico de color gris claro que intemperiza a pardo rojizo; se caracteriza por presentar estratos irregulares en espesor, lenticulares y con

gradación normal, desarrollando en los arroyos paredes escarpadas con pendientes de 60° a 90°. Se compone de clastos de 0.5 a 20 cm predominando los clastos de 3 a 7 cm; con escasas intercalaciones de areniscas y areniscas tobáceas parcialmente compactas. Se trata de conglomerados que generalmente son clasto-soportados, bien redondeados y mal seleccionados.



Fig. 2-5 Afloramiento de ignimbrita de la Formación Alisitos

De manera ocasional son matriz-soportados. La matriz es arenosa, contiene principalmente cuarzo y de manera secundaria fragmentos de granito, ignimbrita, andesita en pórfidos, filitas, cuarzo metamórfico y líticos volcánicos de textura afanítica. Las intercalaciones de arenisca presentan estratos discontinuos, principalmente en forma ovalada y alargada que corresponden con rellenos de paleocanales (Fig. 2-6).

### 2.3.2.3 Formación San Diego

Se compone de conglomerados y areniscas conglomeráticas de color rojizo con muy baja resistencia. Se encuentra sobrepuesta discordantemente sobre las secuencias sedimentarias y volcánicas de las formaciones Alisitos y Rosario, presentándose como

cubierta en las partes altas de la zona montañosa. Se compone de clastos que van desde los 5 mm hasta los 70 cm de diámetro, predominando los de 10 a 20 cm y son de redondeados a subredondeados.



Fig. 2-6 Afloramiento de la Formación Rosario inferior

Los clastos están compuestos por basaltos, rocas metamórficas, ignimbritas, areniscas y cuarzo; su distribución es amplia considerando que muchos bloques de esta unidad cubren a las rocas más antiguas debido a deslizamientos locales por efecto de la gravedad y los espesores de esta unidad son variables, sin embargo, llegan a ser superiores a los 30 m (Fig. 2-7).



Fig. 2-7 Conglomerados de la Formación San Diego

#### 2.3.2.4 Aluvión y suelos

En campo se observó que el aluvión está compuesto principalmente de arenas y gravas con clastos redondeados a subredondeados de basaltos, areniscas, ignimbrita, granito y cuarzo, con tamaño de 2 a 10 cm y algunos con diámetro de hasta 1.5 m; se encuentra en los lechos de arroyos, como material suelto producto del transporte fluvial en temporada de lluvias, aunque su mayor desarrollo ha ocurrido en temporadas de tormentas y huracanes. En general su espesor es reducido, con espesores máximos de 10 m (Fig. 2-8).



Fig. 2-8 Capa de aluvión

Con referencia a los suelos, estos son delgados, con espesores máximos de 2.5 m, presentan mayor desarrollo sobre las areniscas y areniscas tobáceas de la Formación Rosario; son producto de la alteración *in-situ* de rocas ígneas y sedimentarias en una zona de clima árido, por lo que su desarrollo es escaso. Se diferencia de la aluvión en su génesis y particularmente en este caso porque el aluvión conserva las características de la roca que le dio origen.

## 2.4 Geología estructural y tectónica

Existen dos procesos principales que enmarcaron la evolución geológica de la Península de Baja California: el primero fue el choque gradual de los segmentos de dorsales oceánicas que separaron las placas Farallón y del Pacífico de la Placa de Norteamérica, que provocó la fragmentación en microplacas de la Placa Farallón. El segundo corresponde con la apertura del Golfo de California, asociado a la captura del borde occidental de la paleo península y el consecuente desarrollo de una dorsal oceánica que comenzó a romper el continente a partir de los último 10 millones de años (Atwater y Stock, 1998) y (Umhoefer, 2011). Este proceso es aún activo y es la causa del desarrollo de importantes sistemas de fallas regionales de desplazamiento lateral y de la sismicidad en la zona.

En la región de Tijuana-Ensenada la actividad tectónica representa un rasgo relevante en el que interactúa la sismicidad, con los sistemas de fallas activas. En forma particular, el sistema de las Fallas de San Miguel - Vallecitos que tiene una orientación NW-SE representa el rasgo neo-tectónico activo más relevante (Fig. 2-9).

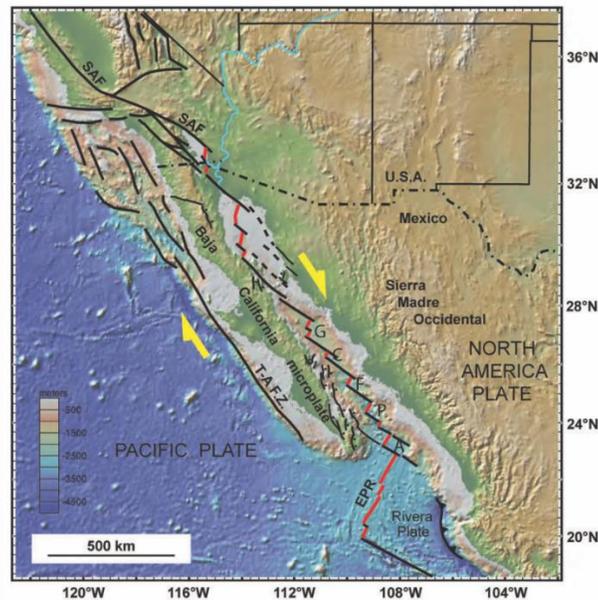


Fig. 2-9 Mapa Tectónica de las Placas Pacífico y Norteamericana en los alrededores de Baja California (Umhoefer, 2011).

### 2.4.1 Estructuras regionales

Los sistemas de fallas activas en el noroeste de Baja California muestran la intensa actividad tectónica que se registra en la región, resultado del proceso de apertura del Golfo de California, en el cual converge un sistema de dorsales oceánicas ortogonales asociadas a fallas transformes de gran magnitud que son el resultado de la alta velocidad relativa del movimiento de la Placa Pacífica con respecto a la de Norteamérica y que se mueve en promedio alrededor de ~50 mm por año (Cruz-Castillo, 2002). En forma paralela, la prolongación de las fallas transformes en la porción continental define un amplio sistema de fallas activas con desplazamiento lateral derecho y con una orientación preferencial NW-SE (Fig. 2-10).

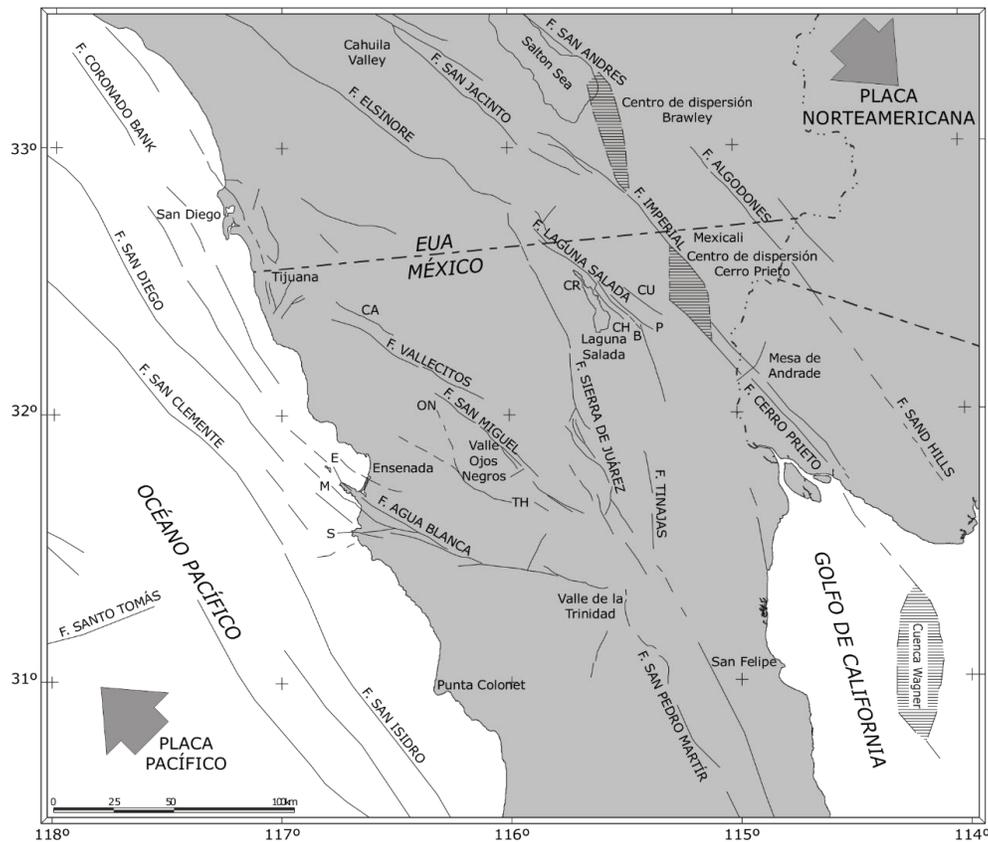


Fig. 2-10 Fallas regionales del norte de Baja California (Cruz-Castillo, 2002).

#### 2.4.2 Estructuras primarias

Las estructuras primarias corresponden con estratos tabulares y lenticulares de los miembros inferior y superior de la Formación Rosario. La unidad está constituida por conglomerados, predominan los estratos gruesos y lenticulares de superficies irregulares que se formaron en ambientes fluviales y de abanicos aluviales en las proximidades de la línea de costa. Presenta echados que varían de 6° a 17° al SW, con rumbos promedio al NW70°SE, lo que indica que se inclinan suavemente al occidente en dirección de ocurrencia del depósito sedimentario (Fig. 2-11).



Fig. 2-11 Estructuras primarias en los miembros de la Formación Rosario.

La inclinación se incrementa localmente como producto del basculamiento producido por las fallas identificadas, llegando a tener echados de 17° al oeste.

#### 2.4.3 Estructuras secundarias

La Falla Sauzal con longitud de 4.5 km permitió el desarrollo de un valle amplio, mismo que culmina en la población de Sauzal de Rodríguez. Es una falla lateral izquierda con rumbo NE40°SW y echado vertical que presenta de forma subordinada una componente normal con bloque de techo al NW. En el bloque de piso (al SE) afloran

las ignimbritas de la Formación Alisitos y los conglomerados de la Formación Rosario mientras que en el bloque de techo se tiene expuesta la secuencia conglomerática de la Formación Rosario y los conglomerados poco cohesivos de la Formación San Diego. No se encontró evidencia de que la falla sea activa. Estos datos estructurales fueron incorporados en el plano geológico regional que se presenta en el capítulo 3 como parte de los trabajos preliminares (Fig. 3-2).

### 3 Descripción de los trabajos

La parte del trazo que se estudió con mayor detalle en este trabajo es donde se tiene programada la construcción del túnel se encuentra entre los cadenamientos 599+960 al 600+140 con una longitud de 180 m. En la Figura Fig. 3-1 se muestra la planta y el perfil topográficos del sitio de construcción.

A continuación, se presenta una lista de los trabajos ejecutados en gabinete y campo como parte del estudio geotécnico del trazo carretero en el área del Túnel Olivares, posteriormente se hará una breve descripción.

1. Análisis de información existente.
2. Cartografía Geológica local.
3. Exploración del subsuelo.
4. Exploración Geofísica.
  - a. Tendidos de Refracción Sísmica.
  - b. Tomografía de Resistividad Eléctrica.

#### 3.1 Información existente

Las publicaciones consultadas incluyen la cartografía regional disponible, como cartas topográficas, morfológicas y geológico-estructurales. Se tuvo especial cuidado donde hay evidencia de deslizamientos de laderas, en las lineaciones estructurales y en los sistemas de fallas.

Con la interpretación de la información bibliográfica y con ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de uso libre, se elaboró la cartografía geológica regional preliminar y se planearon los trabajos de campo (Fig. 3-2).



## NOTAS

- 1.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE 2m
- 2.- LAS ACOTACIONES ESTAN EN METROS
- 3.- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS (m.s.n.m.)

## SIMBOLOGIA

EJE DE TRAZO	---
CURVA DE NIVEL PRINCIPAL	— 190 —
CURVA DE NIVEL SECUNDARIA	— — —

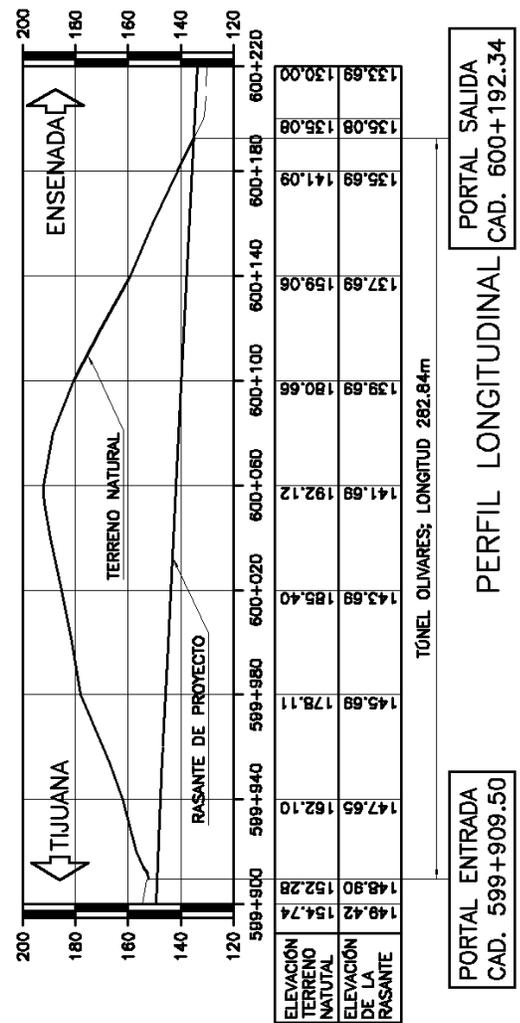
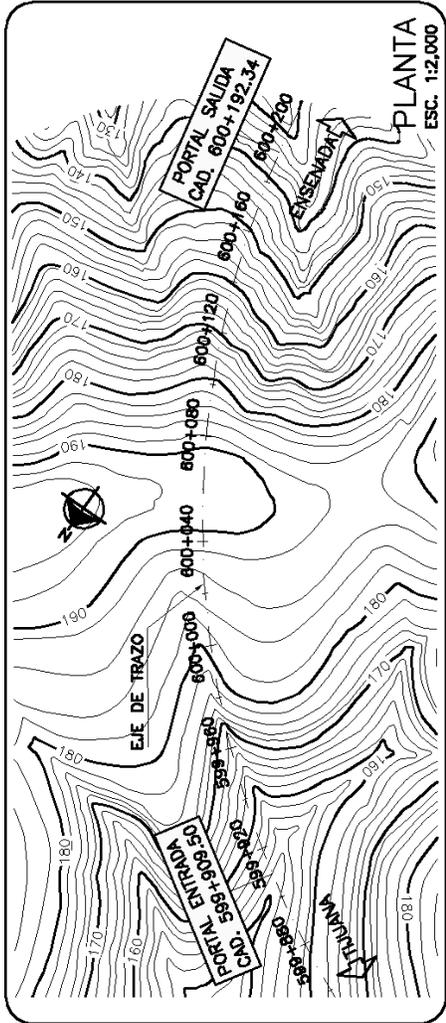


Fig. 3-1 Planta topográfica y perfil del área contemplada para la excavación del Túnel Olivares.

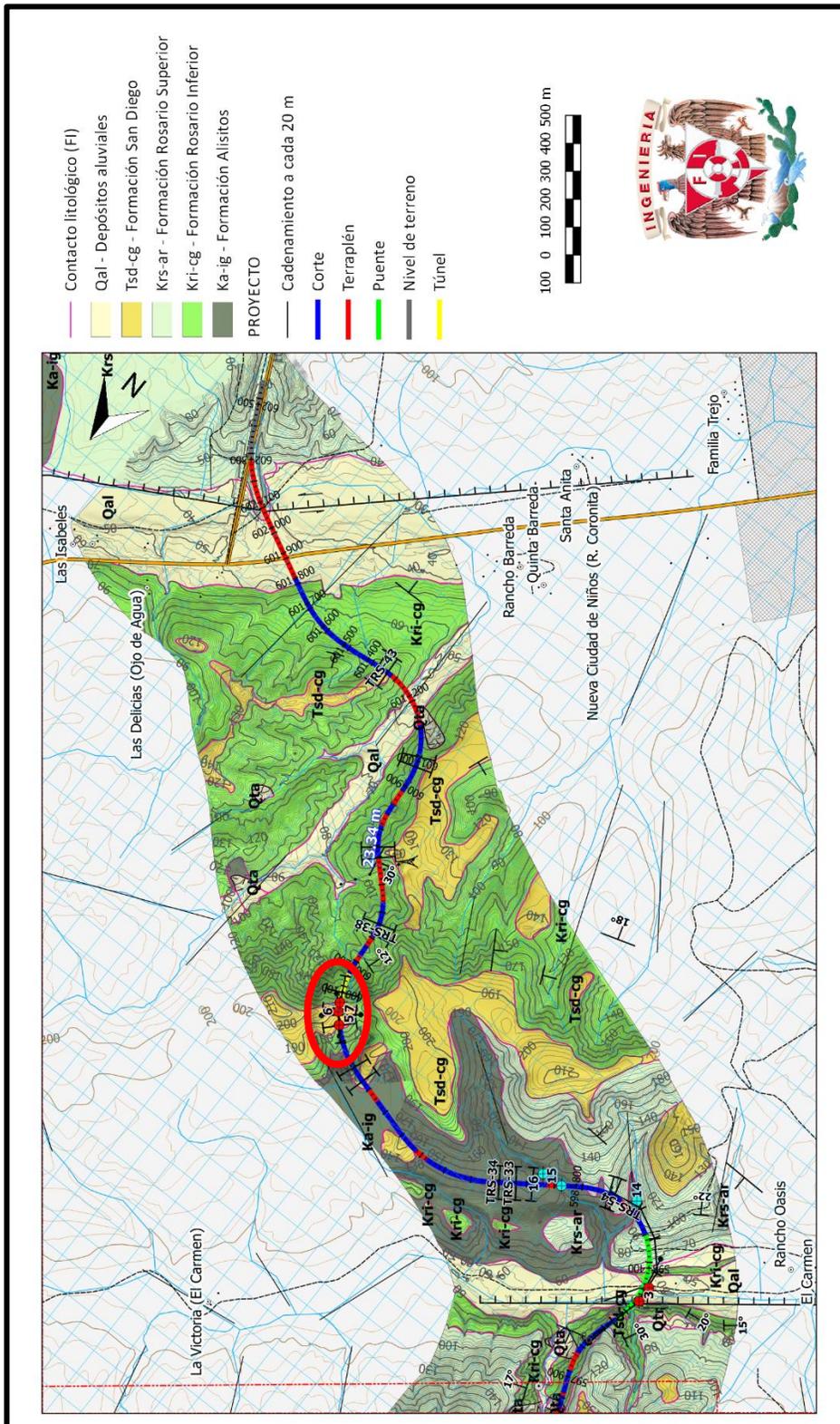


Fig. 3-2 Plano Geológico Regional con la ubicación del Túnel proyectado.

### 3.2 Geología local

Con apoyo en la cartografía preliminar se detectaron los caminos de acceso y se hicieron recorridos sobre el Trazo Alterno y sus alrededores. Existen sobre el mencionado trazo algunas cubiertas de vegetación y/o suelo donde las observaciones geológicas deben ser en afloramientos próximos que estén mejor expuestos.

Se observó el tipo de rocas presentes, las relaciones estratigráficas-estructurales, así como ángulos de reposo y dureza al golpe del martillo. En cada afloramiento se realizó una clasificación litológica, tomando como referencia la génesis, la composición mineralógica, la textura y las características morfológicas. Se midieron algunos ángulos de reposos en laderas y donde se tienen cortes naturales producidos por la erosión, principalmente en los arroyos. Estos datos fueron utilizados para la zonificación geotécnica.

Como se mencionó en el capítulo 1, la litología existente no permite levantar datos estructurales como planos de fallas, familias de fracturas o rellenos.

Con el fin de identificar las variaciones en la composición de las unidades litológicas encontradas a lo largo del Trazo Alterno en el Túnel Olivares, se realizó un muestreo de rocas que incluyera al menos un espécimen de cada unidad y de cada variedad de la misma.

Estas muestras se enviaron al laboratorio donde se realizó el estudio petrográfico. Con los resultados se hicieron correlaciones regionales con lo que se puede definir la secuencia de los eventos geológicos para entender y predecir la distribución de las unidades litológicas en el tramo carretero.

### 3.3 Exploración del subsuelo

Con el fin de conocer de una manera directa la distribución y los espesores de las unidades geológicas y geotécnicas se realizaron sondeos exploratorios en los lugares donde se planea la construcción de los portales de entrada y salida además de un

sondeo en el punto de mayor distancia entre el relieve y la proyección del trazo del Túnel Olivares (Fig. 3-3).



Fig. 3-3 Equipo de perforación Longyear para barrenación y extracción de núcleo

Como se explicó previamente, los conglomerados que afloran en el área del túnel, son materiales que por su naturaleza pueden presentar un comportamiento ambiguo entre macizo rocoso y suelo. Esto también dificulta la extracción de núcleos para ensayos en laboratorio por lo que no fue posible realizarlos, sin embargo, el material recuperado se utilizó para generar la columna estratigráfica que confirmó la existencia de conglomerados desde la superficie hasta el nivel del trazo.

En la Tabla 3-1 se muestra la ubicación y profundidad de los sondeos.

Tabla 3-1 Tabla de ubicación y profundidad de los sondeos exploratorios realizados para el Túnel Olivares.

Sondeo	Cadenamiento	UTM Z11		Referencia	Profundidad (m)
		E	N		
SR 01	600+000	528,830	3,532,840	Túnel	40
SR 02	600+050	528,862	3,532,804	Túnel	50
SR 03	600+090	528,878	3,532,775	Túnel	50
				<b>Total</b>	<b>140</b>

### 3.4 Geofísica

Al trabajar con métodos geofísicos es necesario calibrar siempre los resultados obtenidos comparándolos con los de un sondeo convencional en roca, con obtención de núcleo, para ofrecer mayor confiabilidad; no es recomendable su implementación sin un reconocimiento geológico previo, no obstante, en algunas ocasiones resulta imposible obtener muestras como es el caso de los trabajos que aborda este trabajo.

En este trabajo los métodos de exploración geofísica aplicados a la geotecnia se basan en la medición de la variación de la velocidad de propagación de ondas sísmicas o de la resistividad eléctrica del material en el subsuelo. Mediante la interpretación adecuada y fundamentada se deducen las características estratigráficas, posición del nivel freático y posibles tipos de propiedades dinámicas de los suelos y rocas. Estos métodos se utilizan con el fin obtener información preliminar que complemente la información geológica y reducir el número de sondeos.

Paralelo al levantamiento geológico del área del Túnel Olivares, se realizó un Estudio Geofísico de exploración aplicando el Método Tendido de Refracción Sísmica (TRS) complementado con el Método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) para poder evaluar las características litológicas de distribución y de compacidad de los materiales del subsuelo.

### 3.4.1 Tendido de Refracción Sísmica (TRS)

Consiste en determinar el tiempo de arribo de las ondas longitudinales sísmicas, generadas por una pequeña explosión o impacto, a geófonos captadores que envían su señal a un sismógrafo receptor; con esta información se calcula la velocidad de propagación de ondas del medio en el que se están induciendo.

El estudio sísmico se ejecutó mediante la técnica de Tendidos de Refracción Sísmica, que se basa en la teoría de “tiempo mínimo” que siguen las ondas elásticas al propagarse desde un lugar en la superficie (punto de tiro PT), generado por un impulso, en este caso el golpe de un marro contra una placa metálica, hasta alcanzar horizontes del subsuelo de mayor velocidad de transmisión, desde éstos regresar hasta la superficie del terreno, ser detectados por los geófonos colocados y alineados con el punto de tiro, tal como se ilustra en la Fig. 3-4.

Mediante Estudios de Refracción Sísmica, es factible reconocer los tramos con espesores de los materiales fácilmente removibles, de aquellos que requieren de una maquinaria especial o que deben fragmentarse previamente con el uso de explosivos. La característica del material que permite definir estas condiciones, es la velocidad de transmisión de las ondas.

El trabajo de campo consistió en realizar una serie de Tendidos Sísmicos de Refracción (TRS), distribuidos de forma estratégica en las diversas zonas de estudio utilizando como fuente de energía la fuerza de una persona con marro y una placa metálica (Fig. 3-5).

Los Tendidos de 180 m de longitud se efectuaron para obtener información más detallada, por lo que se colocaron 24 geófonos o puntos de detección sísmica, separados a cada 5 m sobre la horizontal, realizándose tres puntos de tiro por tendido, ubicando uno al centro y dos en ambos extremos.

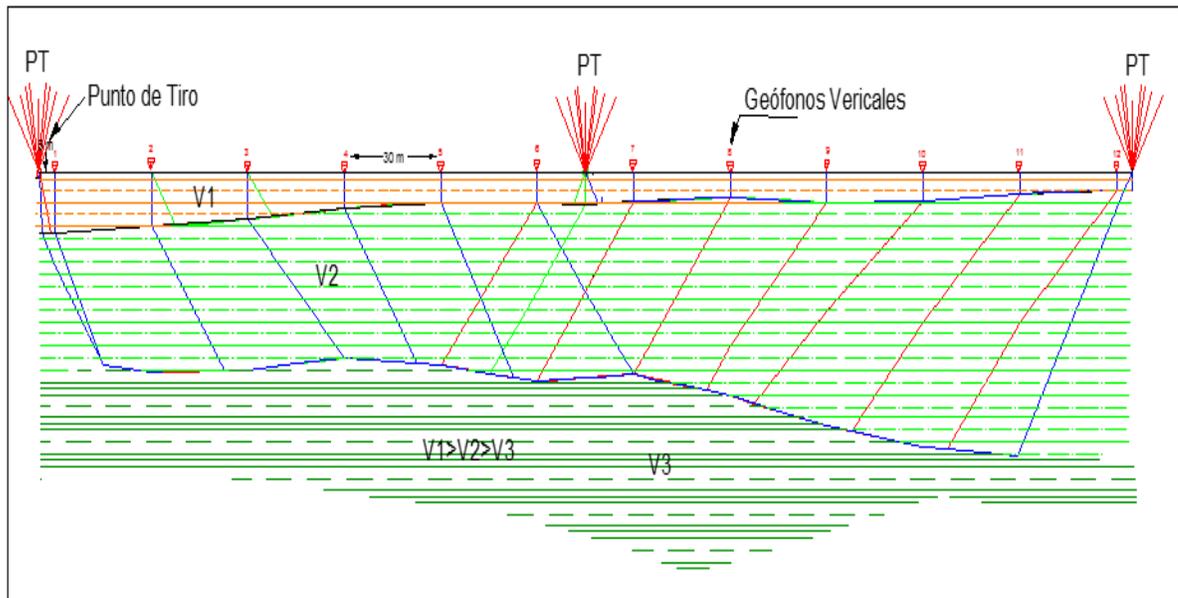


Fig. 3-4 Esquema del funcionamiento de un TRS

El procesamiento de la información se llevó a cabo con programas especializados de interpretación sísmica. El primer paso del procesado tuvo como objetivo determinar, con los sismogramas obtenidos en campo, los valores de velocidad de onda "Vp" de cada Tendido Sísmico. Una vez se obtuvieron las velocidades, se incorporaron sobre un perfil topográfico uniendo la información de los tendidos realizados sobre una misma línea de investigación, elaborando de esta manera cada uno de los Perfiles Sísmicos. Posteriormente los perfiles fueron interpretados y se obtuvo una zonificación con base en los valores de velocidad. El siguiente paso consistió en correlacionar la zonificación con el modelo geológico del sitio, con lo que se tomaron en consideración una serie de Unidades Geosísmicas, poniendo atención en las características litológicas de cada unidad.



Fig. 3-5 Brigada realizando un TRS en el cadenamiento 600+000 utilizando un marro de 20 lbs como fuente de energía

La interpretación de esta prueba siempre debe correlacionarse con la información de sondeos convencionales que involucra la extracción de muestras, porque tiene la limitación básica de no detectar la presencia de estratos blandos que subyacen a estratos duros, debido a las condiciones de refracción que se desarrollan. Es necesario también efectuar para cada línea de registro dos pruebas, una con un impacto en un extremo de la línea y la otra con un impacto en el otro extremo.

En la Fig. 3-5 se observa el momento del golpe que inyecta la señal sísmica al subsuelo, también se observa el equipo de cómputo con el que realiza el cálculo e interpretación de las ondas.

### 3.4.2 Tomografía de resistividad eléctrica (TRE)

La tomografía tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de exploración, utilizando los valores de resistividad aparente, obtenidos mediante mediciones realizadas por métodos convencionales de corriente continua (Fig. 3-6), de tal manera que se puedan interpretar los cambios debidos a la presencia del agua subterránea y/o al contenido mineralógico que presentan las formaciones de roca.

En el Túnel Olivares esta técnica geofísica se utilizó para determinar la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo e inferir las condiciones en cuanto al grado de fracturamiento y alteración del macizo rocoso; así como para encontrar posibles zonas saturadas con agua.

La penetración del método fue de al menos 50m y la información obtenida se procesó por medio de programas de cómputo especializados para determinar en cada tendido diferentes zonas resistivas. Los resultados interpretados se utilizaron para corregir el modelo geológico.

El perfil resistivo se generó con un arreglo multielectrónico, sincronizado de manera inteligente con el Sistema de Resistividad ARES G4 (Fabricado por GF Instruments), con el cual se obtienen datos de resistividad del subsuelo mediante el arreglo dipolo-dipolo, los cuales son acotados de acuerdo a parámetros de campo establecidos, lo que permite de manera automática eliminar y repetir el dato en caso de exceder las tolerancias permisibles. La potencia del transmisor del sistema ARES es de 300 W, con un receptor muy sensible (Fig. 3-7).

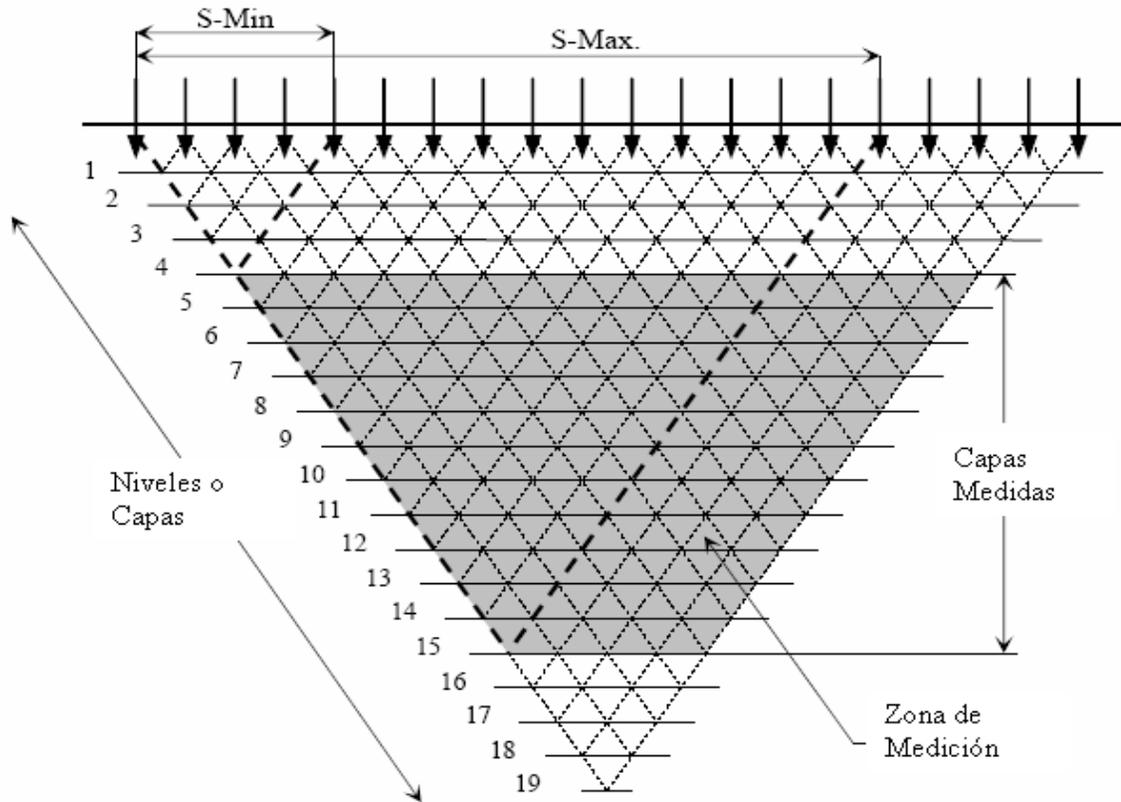


Fig. 3-6 Patrón de medición de los Perfiles Resistivos, mediante tomografía eléctrica

La longitud del dipolo utilizado en este estudio fue de 5 m con arreglos de hasta 32 electrodos, conectados de manera simultánea, con profundidades de investigación del orden de los 50 m.

Con la finalidad de observar la distribución de la resistividad de los materiales en el subsuelo, se elaboraron perfiles de isorresistividad, donde fue posible observar el comportamiento de las líneas de igual resistividad en el sentido lateral y a profundidad.



Fig. 3-7 Equipo de Tomografía de Resistividad Eléctrica en el cadenamiento 600+000

Los perfiles de isorresistividad permiten identificar zonas que, de acuerdo a la distribución de los valores de resistividad, se asocian con los diferentes materiales del subsuelo.

La presencia de los vacíos o aire; en los materiales incrementa notablemente los valores de resistividad; esta característica permite correlacionar los valores altos con posibles grietas; asimismo, una roca compacta, o materiales heterogéneos como los materiales de relleno pueden producir resistividades altas.

## 4 Análisis de resultados

### 4.1 Exploración directa

Durante el levantamiento geológico se observó una cubierta de material no cohesivo que corona las partes altas, está formada por una roca de color rojizo cuya matriz arenosa con bajo nivel de compactación; esta roca se compone por clastos redondeados a subredondeados y un tamaño que va desde los 5 mm hasta los 70 cm de diámetro, predominando los de 10 a 20 cm. Los clastos incluyen basaltos, rocas metamórficas, ignimbritas, areniscas y cuarzo. La descripción se relaciona con la descripción del estudio geológico regional del capítulo 2 de este trabajo respecto al conglomerado de la Formación San Diego, por lo que se deduce que se trata de la misma unidad estratigráfica.

También se determinó que, subyaciendo de forma discordante a los conglomerados de la Formación San Diego, se encuentra un conglomerado polimíctico de color gris claro que intemperiza a pardo rojizo caracterizado por presentar estratos de espesores irregulares, algunos con forma lenticular y con gradación normal. Esta roca desarrolla en los arroyos escarpes con pendientes que llegan de 60° a 90°, está compuesta por clastos de tamaño desde 0.5 hasta 20 cm, predominando los clastos de 3 a 7 cm; con escasas intercalaciones de areniscas y areniscas tobáceas parcialmente compactas. El conglomerado es clasto-soportado. La matriz arenosa contiene principalmente cuarzo y de manera secundaria fragmentos de granito, ignimbrita, andesita en pórfidos, filitas, cuarzo metamórfico y líticos volcánicos de textura afanítica. Con base en el estudio geológico regional se deduce que la unidad subyacente pertenece a la Formación Rosario inferior.

En la Fig. 4-1 se observa una panorámica que muestra la ubicación del contacto litológico con respecto al trazo y al portal de salida del Túnel.



Fig. 4-1 Imagen panorámica que muestra el contacto geológico entre la Formación San Diego y Rosario Inferior con respecto al portal de salida del Túnel Olivares

Como parte de los trabajos exploratorios se realizó en el cadenamiento 600+000 un sondeo en roca. En el núcleo recuperado se aprecia un cambio de tonalidad en el material arenoso que se da de forma transicional, yendo del rojizo al pardo, este cambio comienza a 14 m de profundidad y se completa a los 17 m, también es visible una disminución en la redondez de los clastos (Fig. 4-2).

La información aportada por el sondeo en roca apoya a las deducciones realizadas con base en las observaciones en campo, evidenciando la presencia de dos litologías claramente diferenciadas.

Durante el levantamiento geológico no se detectó la evidencia de fracturamiento, fallamiento o estructuras mayores que afecten la construcción del túnel.



Fig. 4-2 Núcleo recuperado del sondeo en roca en el cadenamiento 600+000

## 4.2 Exploración geofísica

Se eligieron los métodos Tendido de Refracción Sísmica (TRS) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) para la exploración indirecta. Los resultados de estos métodos fueron procesados por software y equipo de cómputo especializado para posteriormente ser analizados.

Una vez obtenidas las velocidades se incorporan sobre un perfil topográfico los valores de velocidad “Vp” bajo cada línea de tendido, elaborando de esta manera los perfiles sísmicos.

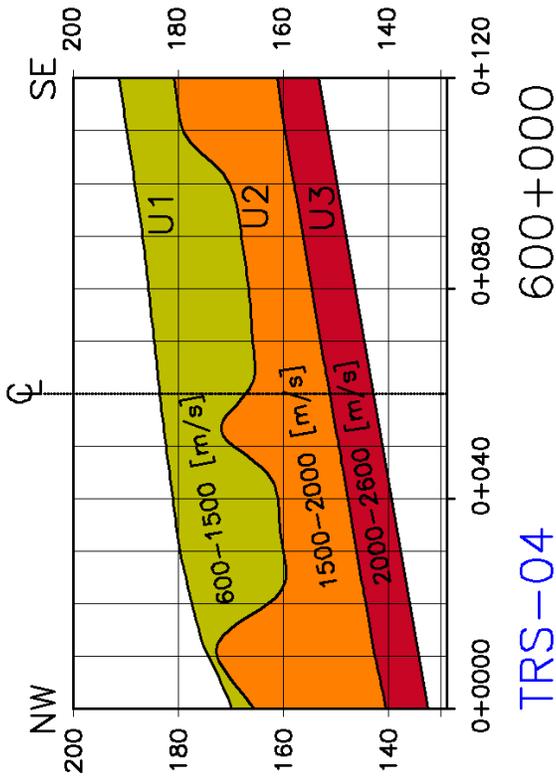
Posteriormente los perfiles son interpretados y se hace una zonificación sísmica del terreno, basada únicamente en los valores de velocidad (Fig. 4-3). Finalmente se integra la zonificación sísmica con la información geológica obtenida durante la exploración directa, con lo que se definen unidades geosísmicas a las que se les correlacionan características litológicas y se asocia a un tipo de roca.

Para el caso de la Tomografía de Resistividad Eléctrica el perfil resistivo se generó con un arreglo multielectrónico. La longitud del dipolo utilizado en este estudio fue de 5m con arreglos de hasta 32 electrodos, conectados de manera simultánea, con profundidades de investigación del orden de los 50 m.



**NOTAS**

1.- LAS ACOTACIONES ESTAN EN METROS  
 2.- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS (m.s.n.m.)



TRS-04

**TABLA DE UNIDADES SISMICAS**

UNIDAD	VEL. ONDA P (m/s)	ESPOSOR (m)	MATERIAL ASOCIADO	UNIDAD LITOLÓGICA	MATERIAL TIPO	EXCAVABILIDAD	DENSIDAD g/cm <sup>3</sup>	PESO UNITARIO kn/m <sup>3</sup>
U1	600-1000	1-7	CONGLOMERADOS CON BAJA COMPACTAD	Kg-cg Tsd-cg	B	TRACTOR D8 y/o D10	1.7	18.66
U2	1000-1800	5-10	CONGLOMERADOS MODERADAMENTE ALTERADOS CON MEDIA A ALTA COMPACTAD	Kg-cg	B	TRACTOR D8 y/o D10	2	19.6
U3	1800-2400	<25	CONGLOMERADOS CON LENTES DE ARENA CON BUENA COMPACTAD	Kg-cg	C	EXPLOSIVO	2.5	24.5

Fig. 4-3 Perfil geosísmico del Túnel Olivares en el cadenamiento 600+000 con la tabla de unidades sísmicas. Los datos volumétricos son asociados con base en las velocidades de onda.

Con la finalidad de observar la distribución de la resistividad de los materiales en el subsuelo, se elabora un perfil de isorresistividad, donde es posible observar el comportamiento de las líneas de igual resistividad en el sentido lateral y a profundidad.

Los perfiles de isorresistividad permiten identificar zonas que, de acuerdo a la distribución de los valores de resistividad, se asocian con los diferentes materiales del subsuelo.

La presencia de vacíos o aire (porosidad) en los materiales incrementa notablemente los valores de resistividad, esta característica permite correlacionar los valores altos con posibles grietas; de igual forma, los materiales heterogéneos como los de relleno pueden producir resistividades altas.

En el Túnel Olivares el perfil presenta una longitud de exploración lineal de 115 m. La capa de cobertura, identificada como la unidad U1, presenta una profundidad que va desde 5 a 30 m con valores resistivos entre 1 y 80  $\text{ohm}\cdot\text{m}$  que se relacionan con materiales aluviales. Subyaciendo a la cobertura se presenta la Unidad U2, con un espesor de 5 a 10 m con valores resistivos de 80 a 500  $\text{ohm}\cdot\text{m}$  asociados con arenas compactas. En la base del perfil se presenta la Unidad U3 con valores resistivos de 1000 a 5000  $\text{ohm}\cdot\text{m}$  asociado a materiales altamente consolidados. La disposición de la línea TRE 2 fue a lo largo del eje carretero (Fig. 4-4).

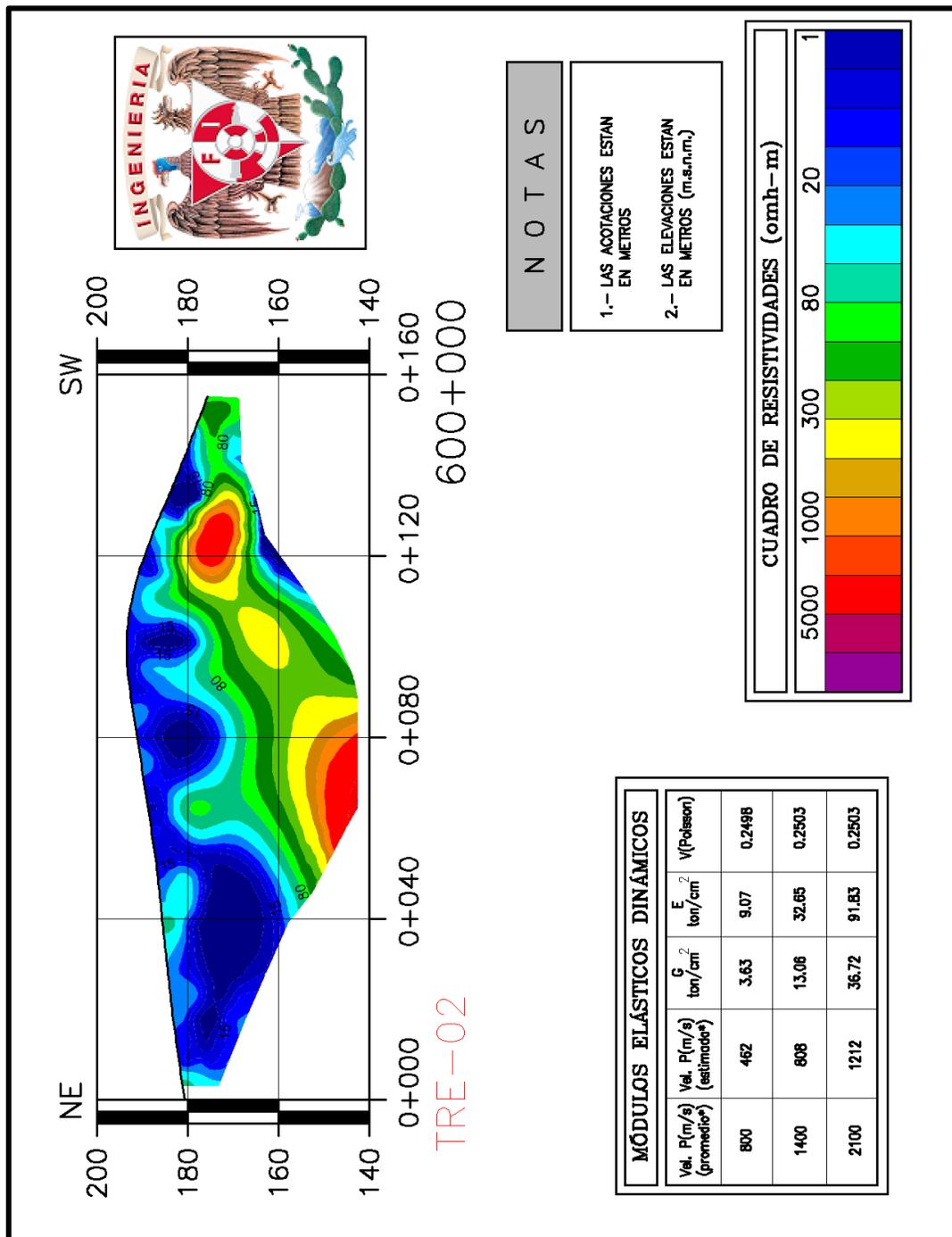


Fig. 4-4 Sección Geoeléctrica transversal al trazo TRE 2

### 4.3 Modelo Geológico

Los resultados de la exploración indirecta dan certidumbre a las interpretaciones hechas durante la exploración directa, por lo que se puede afirmar que la zona del Túnel Olivares está conformada por una cubierta aluvial superficial formada por intemperización de rocas de la Formación San Diego, subyaciendo se encuentra una unidad conglomerática que pertenece a la Formación San Diego; el espesor de estas rocas es de hasta 20 m en las zonas altas, adelgazándose conforme baja la topografía. Subyaciendo a las rocas de la Formación San Diego se encuentra discordante una secuencia sedimentaria que pertenece a la Formación Rosario inferior.

Durante el levantamiento geológico se observó en el cadenamiento 599+920 que afloran ignimbritas compuestas por fragmentos de feldespatos, cuarzo, fragmentos líticos angulosos y vidrio, que por medio del estudio geológico regional se relacionó con la Formación Alisitos. Aunque la exploración realizada, tanto directa como indirecta, no encontró evidencia de la presencia de la Formación Alisitos en la zona que alojará al Túnel, el análisis de las observaciones hechas en el cadenamiento 599+920 durante el levantamiento y estudio regional dieron pauta para colocar a la Formación Alisitos en la base de la columna estratigráfica (Fig. 4-5).

## COLUMNA ESTRATIGRAFICA LOCAL

ERA	PERIODO	EPOCA	FORMACIÓN GEOLÓGICA	UNIDAD LITOLÓGICA	TIPO DE MATERIAL
CENOZOICO	NEOGENO	Plioceno	Formación San Diego	Tsd-cg	Conglomerado polimíctico de bloques entre 3 a 50 cm. Presenta una coloración rojiza y está matriz-soportado, se observa coronando las partes altas.
			Formación Rosario	Kri-cg	Conglomerados polimícticos con fragmentos con texturas faneríticas y afaníticas. Como característica general está clasto-soportado por lo que tiene una buena compacidad.
MESOZOICO	CRETÁCICO	Superior	Formación Alisitos	Ka-ig	Unidad compuesta de una variedad amplia de rocas volcánicas, volcanoclásticas y volcanosedimentarias. Localmente afloran ignimbritas de coloración pardo-morada, la matriz es fina con líticas que van de angulosos a subredondeados con y tamaño variable.
		Inferior			

Fig. 4-5 Columna estratigráfica del Modelo Geológico

El estudio realizado tiene un alcance de hasta 50 m de profundidad, esta distancia es suficiente para alcanzar el nivel del trazo en el subsuelo, con lo que podemos afirmar que la roca que alojará al Túnel Olivares corresponde a la secuencia de la Formación Rosario inferior (Kri-cg), mientras que la Formación San Diego (Tsd-cg), aunque no profundiza hasta el nivel del trazo y no será excavada. Sin embargo, sí formará parte de los taludes en los portales de entrada y salida (Fig. 4-6).

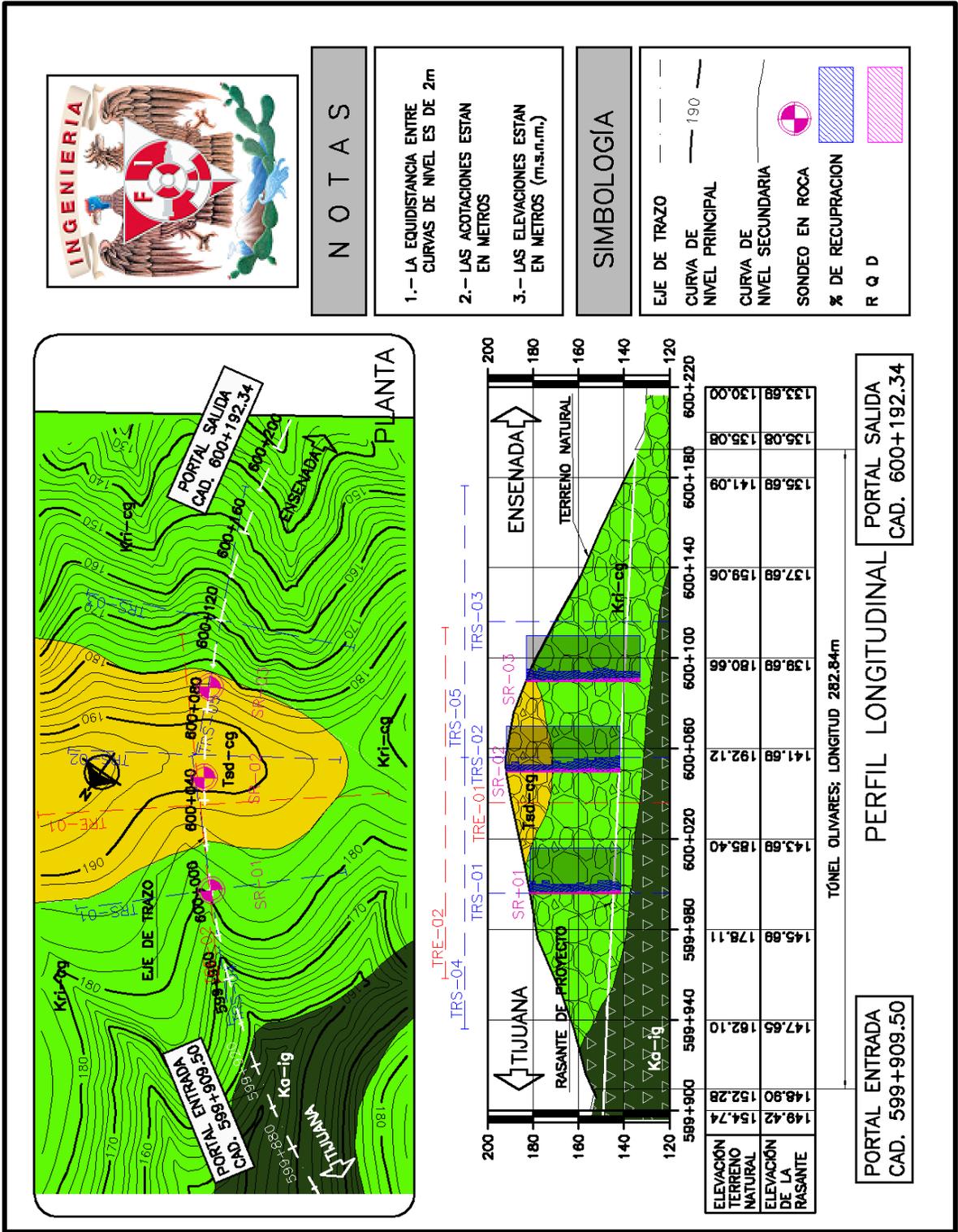


Fig. 4-6 Planta y perfil del modelo geológico. Incluye un esquema de los resultados de la barrenación a diamante.

#### 4.4 Modelo Geotécnico

El modelo geotécnico es la base fundamental para los diseños de construcción en geomateriales e incluye el estado de alteración, orientación y distribución espacial de esfuerzos y discontinuidades, resistencia del macizo rocoso, módulos elásticos y las condiciones de agua (Read y Stacey, 2009).

La interpretación de los estudios de Tendido de Refracción Sísmica (TRS) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) permite diferenciar zonas descomprimidas o de menor densidad de las zonas alteradas y de las zonas sanas. De esta manera se identificaron tres unidades geofísicas, las que se indican en la Tabla 4-1.

El resultado del Tendido de Refracción Sísmica brinda la posibilidad de asociar las velocidades de arriba con módulos elásticos dinámicos, dado que la onda sísmica induce una pequeña deformación en las rocas que atraviesa y la velocidad de propagación es correlacionable con su resistencia a la compresión. A su vez estos módulos elásticos dinámicos son asociables con las características geomecánicas del subsuelo. De esta manera se logra modelar el comportamiento del material ante cambios en el estado de esfuerzos.

Tabla 4-1 Velocidad de las ondas P y resistividad obtenidas en los levantamientos de campo.

Unidad	Velocidad de onda P (m/s)	Resistividad ohm-m	ESPESOR	MATERIAL ASOCIADO
U1	600-1000	1--80	1 A 10	Conglomerados con baja compacidad
U2	1000-1800	80-500	5 A 10	Conglomerados moderadamente alterados con media a alta compacidad/ Areniscas con lentes de conglomerado con moderada a alta compacidad
U3	1800-2400	500-5000	<18	Conglomerados con lentes de arena con buena compacidad / ignimbritas con moderada a alta compacidad

#### 4.4.1 Módulos elásticos dinámicos

Los módulos elásticos dinámicos asociados a los materiales geológicos se evalúan “*in situ*”, se asocian a la razón  $V_p/V_s$  mediante la relación de Poisson y los parámetros de resistencia, a su vez tienen relación con la maleabilidad o deformabilidad de las rocas o suelos, la cohesión y el ángulo de fricción interna.

La estimación de los parámetros elásticos dinámicos se realiza enviando de manera artificial desde la superficie señales de movimiento; las ondas de compresión “P” y las de corte “S”. Sus nombres se deben a la naturaleza de la deformación que provocan en el medio de propagación durante su paso. El paso de las ondas induce una deformación en el subsuelo proporcional al esfuerzo según lo establecido por Hooke y está dado por:  $\epsilon = E\sigma$

La onda “P” provoca un cambio de volumen, pero no de forma en respuesta al esfuerzo de compresión y tensión; mientras que la onda “S” produce un cambio de forma, pero no de volumen.

De acuerdo con la teoría de elasticidad, es posible relacionar las velocidades de propagación de ondas P ( $V_p$ ) y de ondas S ( $V_s$ ) con los módulos elásticos del material a través de las siguientes fórmulas (Sheriff, 1973).

$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}$	Relación de Poisson
$G = \rho V_s^2$	Módulo cortante
$E = \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}$	Módulo de Young
$K = \rho \left( V_p^2 - \frac{4V_s^2}{3} \right)$	Módulo de compresibilidad
$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2)$	Constante de Lamé

Generalmente, la medición de propiedades dinámicas in situ en el medio geológico da una evaluación del sitio respecto a los materiales del subsuelo, que conforman la respuesta de suelo y material rocoso (Dobecki, 1979).

En la Tabla 4-2 se muestran los valores de los módulos elásticos dinámicos que se obtuvieron a partir de las velocidades de propagación de los TRS. En la Tabla 4-3 se hace una descripción general de cada unidad geotécnica diferenciada.

Tabla 4-2 Módulos elásticos dinámicos para el túnel Olivares.

Unidad Geotécnica	Vel. P (m/s) (promedio*)	Vel. P (m/s) (estimada*)	<b>G</b> [ton/cm2]	<b>E<sub>d</sub></b> [ton/cm2]	<b>V<sub>d</sub></b> (Poisson)
UG1	650	375	2.39	5.98	0.2506
UG2	1250	722	10.43	26.06	0.2497
UG3	1800	1039	26.99	67.48	0.2502
UG4	2000	1155	36.02	90.03	0.2498

Tabla 4-3 Asociación litológica de la unidades geotécnicas

Unidad geotécnica	Descripción de las unidades geotécnicas
UG1	Conglomerados polimíctico y/o areniscas con baja compacidad.
UG2	Conglomerados polimíctico y/o areniscas con compacidad media.
UG3	Conglomerados polimíctico y/o areniscas con buena compacidad
UG4	Ignimbritas masivas poco fracturadas, las fracturas están cerradas. Presenta leve infiltración en época de lluvias. GSI de campo 75

#### 4.4.2 Unidad Geotécnica UG1

Se trata de Conglomerados y areniscas de baja compacidad por estar alterados e intemperizados por la infiltración de agua en época de lluvias. De manera general son materiales casi sueltos que presentan ángulos de fricción bajos entre 28 y 35° estimados a partir de las laderas naturales en donde se observa esta unidad.

#### 4.4.3 Unidad Geotécnica UG2

Son conglomerados y areniscas con moderada compacidad que presenta buenas condiciones, presentan una resistencia a la compresión simple equivalente estimada de 25 a 50 MPa, es decir moderadamente dura según la ISRM. Cuando se trata de conglomerados estos son clasto-soportados, lo cual hace que haya trabazón entre clastos lo cual le da muy buenas propiedades. Cuando son areniscas intercaladas con limolitas, los estratos de areniscas presentan buena compacidad cuando no están alteradas a profundidad y aunque presentan discontinuidades al no tener hacia donde salir los planos, presentan también buenas condiciones. En campo se observaron laderas erosionadas con pendientes de hasta 70° que se mantienen en buen estado de manera natural, aunque presentan graneos de arena y bloques hacia el pie del mismo y roturas tipo desconchamiento asociadas a infiltración de agua.

#### 4.4.4 Unidad Geotécnica UG3

La unidad está conformada por conglomerados de buena compacidad clasto-soportados. De la misma manera que la Unidad UG2 presenta trabazón entre clastos lo cual le da muy buenas propiedades, además el contenido de granos finos de arenas y limos se encuentran poco alterados lo que mejora su calidad. Presenta una resistencia a la compresión simple equivalente estimada de 50 a 90 MPa. En campo se observan laderas con pendiente de hasta 90°, que se mantienen con un graneos moderado, sin embargo, en algunos sitios se observaron roturas tipo desconchamiento provocados por el relajamiento y la infiltración de agua en época de lluvias. Cabe aclarar que utilizando el método propuesto por Kalender et al., (2014), la resistencia estimada es de 2.4 MPa (Fig. 4-7), el ángulo de fricción es de 65.9° y la cohesión de 0.25 MPa. Este procedimiento considera parámetros elásticos estáticos.

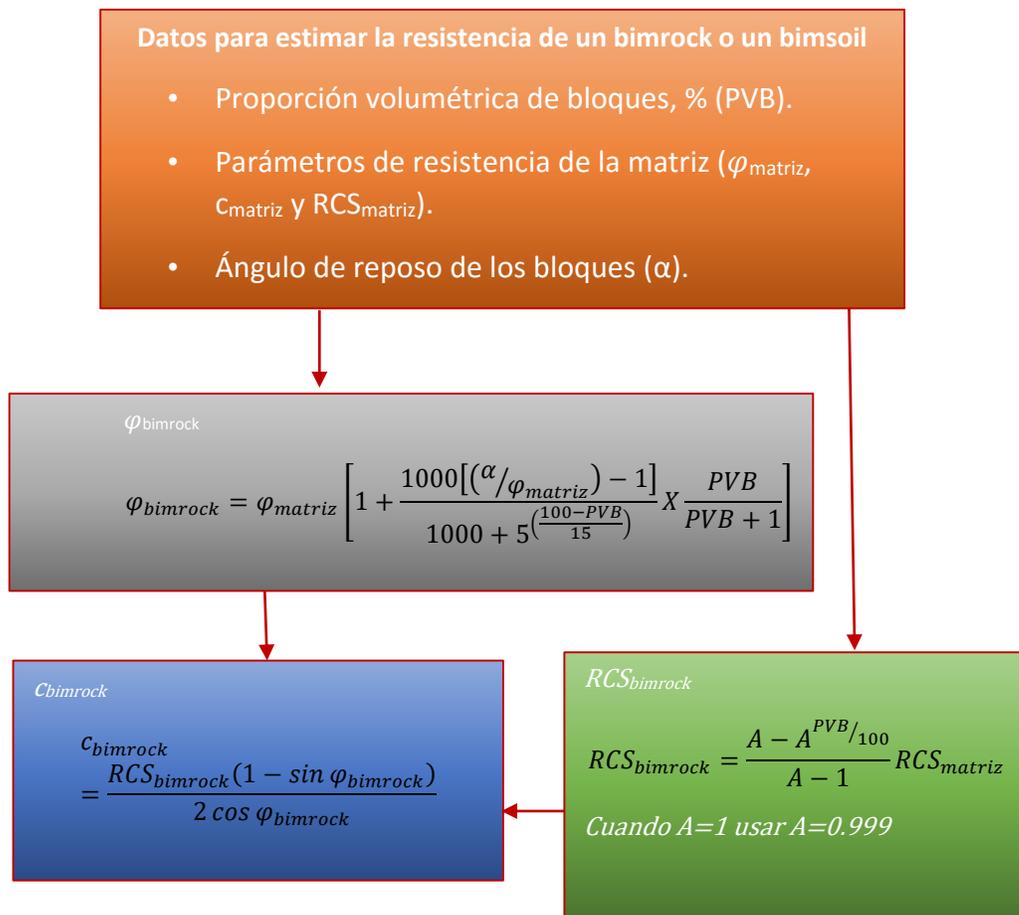


Fig. 4-7 Diagrama de flujo para obtener parámetros de resistencia en bimrocks o bimsoils (Kalender et al., 2014). El parámetro “A” es una relación entre la textura de los bloques y la resistencia a la compresión de la matriz.

#### 4.4.5 Unidad Geotécnica UG4

Son ignimbritas con fracturas hasta en 3 direcciones preferenciales que se encuentran cerradas, presentan buena compacidad y una resistencia a la compresión simple muy dura. Esta roca fue ensayada en laboratorio con la prensa de carga puntual obteniéndose entre puntas de 130 a 150 MPa. Según la tabla de índices de campo de la ISRM (Ulusay y Hudson, 2007) está en el rango de 100 a 250 MPa.

La integración de todas las unidades geotécnicas se puede ver en el modelo geotécnico (Fig. 4-8).

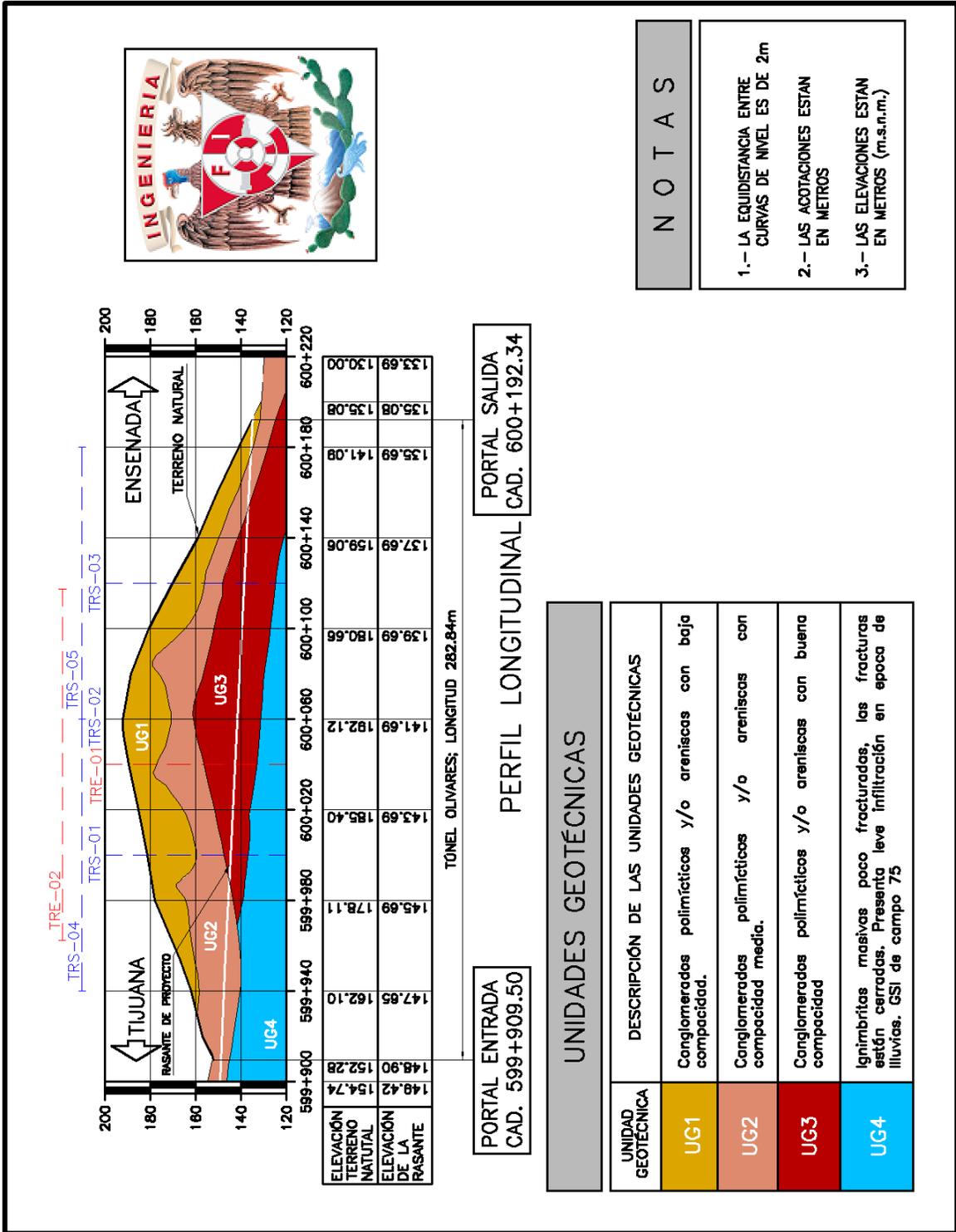


Fig. 4-8 Modelo Geotécnico longitudinal al trazo

## 5 Conclusiones

- Con las observaciones de campo se determinó que localmente existen 3 litologías. Ignimbritas de la Formación Alisitos y conglomerados de las Formaciones Rosario y San Diego.
- Como resultado de la barrenación se obtuvo que el conglomerado de la Formación San Diego tiene un espesor que en las partes altas no supera los 20 m y que tiende a adelgazarse hacia las partes bajas.
- Subyaciendo de forma discordante se encuentra el conglomerado de la Formación Rosario. En los tres barrenos se detectó que el espesor de esta unidad llega hasta el nivel del trazo.
- Utilizando la exploración geofísica el subsuelo se zonificó en 4 zonas geotécnicas utilizando como base las velocidades de propagación de ondas sísmicas y su asociación con propiedades físicas y de calidad de las rocas. Al integrar esta zonificación con la geología se obtuvo un modelo geotécnico que predice un comportamiento del macizo rocoso y proporciona bases para proponer formas de excavación.
- Con base en las observaciones en campo y apoyados de los métodos geofísicos no se encontraron evidencias de estructuras mayores que deban considerarse durante la construcción del túnel.
- Con base en los modelos realizados sabemos que el túnel Olivares se excavará principalmente en conglomerados polimícticos de la Formación Rosario que corresponden a la unidad geotécnica UG2. Asimismo, los primeros 10 metros del lado Norte del túnel se excavarán en Ignimbritas de la Formación Alisitos correspondiente a la unidad geotécnica UG4.
- Con base en el modelo geotécnico se proponen algunos elementos de construcción para el túnel, como una sección en herradura con ancho de 12 m y altura de 7 m que permita un gálibo de 5.5 m. Estos datos el proyectista deberá calcularlos de manera precisa.

- Se recomienda también hacer un tajo del cadenamiento 599+910 al 599+970, cuya geometría mantenga una relación de corte para el talud frontal de 0.5H:1.0V y para los taludes laterales se recomienda iniciar con una relación de corte hasta los 14m con 0.75H:1.0V y el restante inferior con relación de 1.2H:1.0V.
- En el portal de salida se ha planteado un tajo del cadenamiento 600+130 al 600+192.34 con las mismas relaciones de corte 0.5H:1.0V para el talud frontal y para los taludes laterales con relación de corte que inicie los primeros 14m con 1.2H:1.0V y el restante inferior con relación de 0.75H:1.0V.
- Se recomienda que en los portales de entrada y salida se tenga una cobertura al menos 2 veces la altura del túnel, por lo que en ambos portales se propone un túnel falso de 19 m.
- Las recomendaciones de diseño de los puntos anteriores se incorporaron en un plano del túnel que se puede ver en la Fig. 5-1. El plano se ve planta y perfil de la zona de construcción del túnel, el diseño de los taludes en los portales de entrada y salida, las dimensiones del túnel falso y un relleno que lo cubre.
- La resistencia obtenida con parámetros elásticos dinámicos suele ser distinta a la obtenida utilizando las contrapartes estáticas, no obstante, en este trabajo se presenta como una solución ante la imposibilidad de realizar pruebas de laboratorio y la aplicación se sistemas de clasificación del macizo rocoso en materiales que presentan comportamientos mecánicos que no se apegan a los conceptos de roca o suelo. Queda pendiente para trabajos futuros explorar la correlación existente entre la información obtenida por medios dinámicos y estáticos.



## NOTAS

- 1.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE 2m
- 2.- LAS ACOTACIONES ESTAN EN METROS
- 3.- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS (m.s.n.m.)

## SIMBOLOGÍA

	EJE DE TRAZO
	CURVA DE NIVEL PRINCIPAL
	CURVA DE NIVEL SECUNDARIA
	MATERIAL DE RELLENO
	PENDIENTE DE TALUD

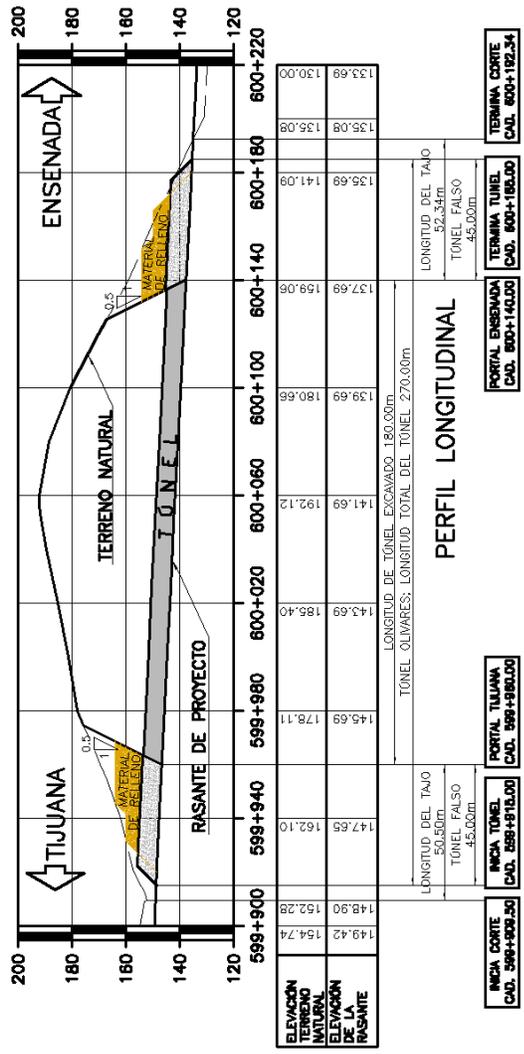
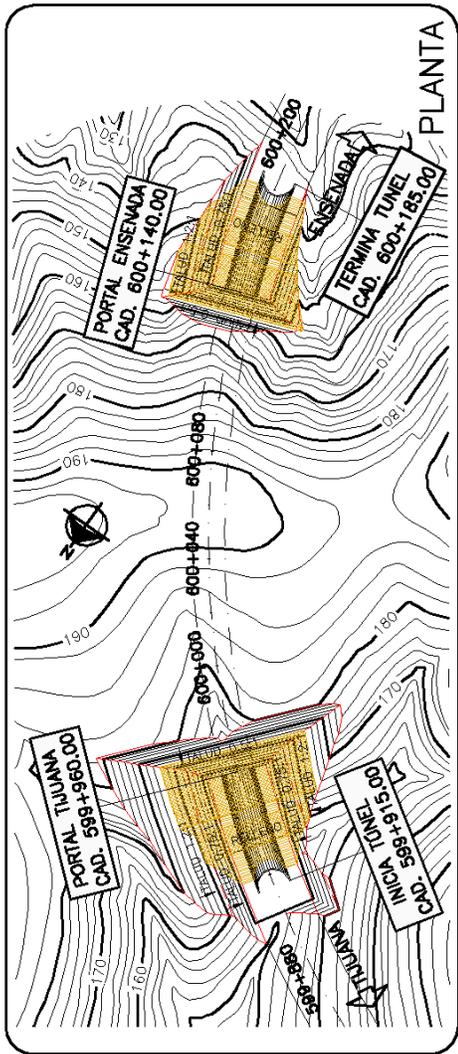


Fig. 5-1 Planta y perfil del diseño del túnel con base en las recomendaciones para la construcción del Túnel Olivares.

## 6 Bibliografía

- ASTM-D2487-11. (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*.
- Atwater, T., & Stock, J. (1998). Pacific-North America plate tectonics of the neogene southwestern United State an update. *International Geology Review*.
- Barton, N. (1974). Engineering classification of rock masses for the desing of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6.
- Bieniawski, Z. (1976). Rock mass classification in rock engineering. *In Exploration for rock engineering*, 97-106.
- Brady, B., & Brown, E. (2004). *Rock Mechanics for underground mining*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Braja, D. (2015). *Fundamentos de Ingeniría Geotécnica*. Cengage Learning.
- Busby, C. (2004). Continental growth at convergent margins facing large ocean basins: a case study from Mesozoic convergent-margin basins of Baja California, Mexico. *Tectonophysics*, 241–277.
- Cervantez-Zamora. (1990). Provincias fisiográficas de México. En CONABIO, *Clasificación de regiones naturales de México* (Vol. II). México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C.*, 37-42.
- Deere, D. (1967). Design of surface and near surface constructions in rock. *Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mechanics*, 237-302.
- Dobecki, T. L. (1979). Measurement of in Situ Dynamic Properties in Relation to Geologic Conditions. Reviews in Engineering Geology. *The Geological Society of America*, 201-214.
- Gastil, G. (1992). The tectonic history of the southwestern United States and Sonora, Mexico during the past 100 million years. *Tectonics*, 327–341.
- Gastil, R., Morgan, G., & Krummenacher, D. (1980). Tectonic History of Peninsular California and Adjacent Mexico. *The Tectonic Development of California*, 284-306.
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

- Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 1165–1186.
- Hoek, E., Marinos, P., & Marinos, V. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 55-65.
- Juárez-Badillo, E. (1963). *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- Kalender, A., Sonmez, H., Medleyb, E., Tunusluoglu, C., & Kasapoglu, K. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology*, 65-79.
- Krumbein, W. (1937). Sediments and exponential curves. *The Journal of Geology*, 577-601.
- Lugo-Hubp, J. (1990). El relieve de la república mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 82-111.
- Manuel Cruz-Castillo, L. A.-A. (2000). LOS DESLIZAMIENTOS DE LA CARRETERA DE CUOTA TIJUANA-ENSENADA, BAJA CALIFORNIA. *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C.*, 418-432.
- Medley, E. (1994). *The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (BIMRock's)*. (Ph.D. Thesis) University of California, Berkeley.
- Muni-Budhu. (2010). *Soil Mechanics and Foundations*. Wiley.
- Pedraza, I. (29 de diciembre de 2013). Colapsa tramo en ruta de Ensenada a Tijuana. *El Universal*.
- Pedraza, I. (17 de diciembre de 2014). Reabren carretera Tijuana-Ensenada. *El Universal*.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Open pit slope design*. CSIRO Publishing.
- Rico, A. S. (1969). *Deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada*. Contribución de la Secretaría de Obras Públicas al VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos y Cimentaciones.
- Schmidt, K. L., Wetmore, P. H., Alsleben, H., & Paterson, S. R. (2014). Mesozoic tectonic evolution of the southern Peninsular Ranges batholith, Baja California, Mexico: Long-lived history of a collisional segment in the Mesozoic Cordilleran arc. *The Geological Society of America*.

- Sheriff, R. E. (1973). Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. *Society Exploration Geophysicist SEG.*, 69-70.
- Singh, B., & Goel, R. (2011). *Engineering Rock Mass Classification*. Oxford, UK: Elsevier Inc.
- Sonmez, H., Kasapoglu, K. E., Coskun, A., Tunusluoglu, C., Medley, E. W., & Zimmerman, R. W. (2009). A Conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks. *ISRM The Regional Symposium "Rock Engineering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst"*.
- Ulusay, R., & Hudson, J. (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006*. Springer.
- Umhoefer, P. J. (2011). Why did the Southern Gulf of California rupture so rapidly? Oblique divergence across hot, weak lithosphere along a tectonically active margin. *GSA Today*, 4-10.
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 377-392.