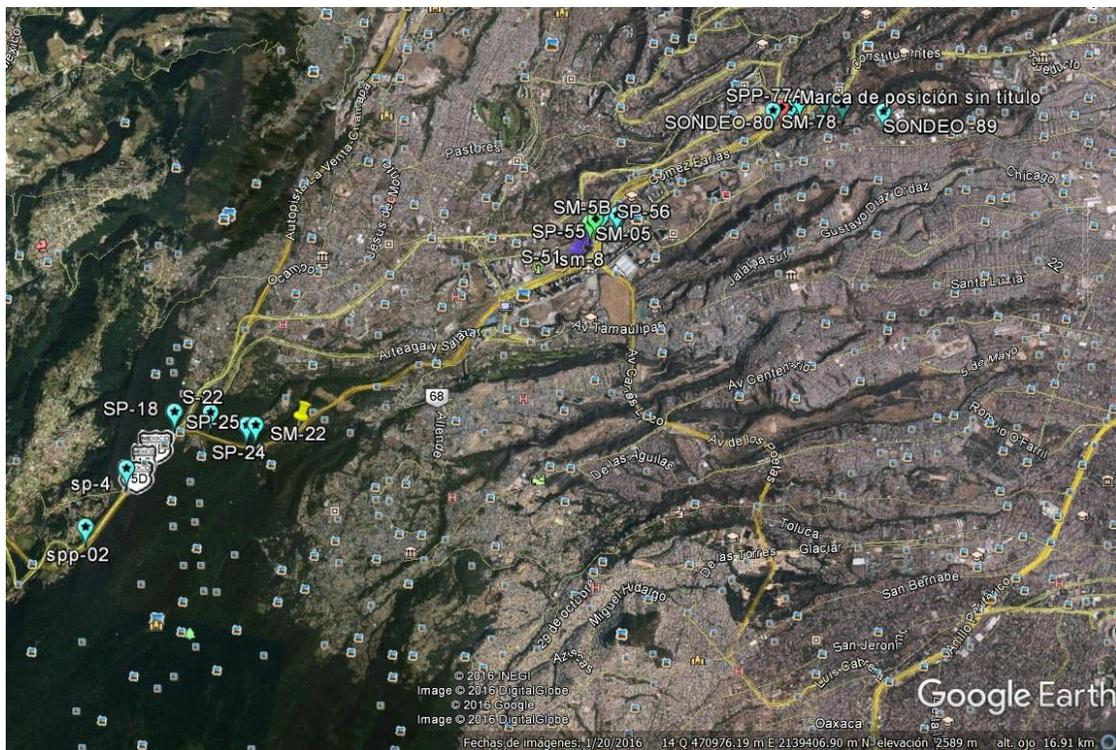


ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EVALUAR LAS CONDICIONES DEL SUBSUELO EN EL TRAZO DEL PROYECTO TREN INTERURBANO MÉXICO TOLUCA, TRAMO III,

ENTRE LOS CADENAMIENTOS KM 41+334 (PORTAL CRUCE) Y KM
57+494, (CALLERÍO TACUBAYA-ADOLFO RUÍZ CORTINES).



INFORME FINAL

Elaborado por:
CAABSA CONSTRUCTORA

Fecha de Emisión:
MARZO DE 2017



CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....
1.1	ANTECEDENTES.....
1.2	OBJETIVO Y ALCANCES.....
1.3	DESCRIPCION DEL PROYECTO.....
1.4	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARTICULAR. ESTUDIO GEOTÉCNICO.....
2.	MARCO GEOLOGICO REGIONAL.....
2.1	FAJA VOLCANICA TRANSMEXICANA.....
2.2	EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA.....
2.3	SIERRA DE LAS CRUCES.....
2.4	GEOLOGÍA SOBRE EL TRAZO DEL PROYECTO.....
2.5	ZONA DE CAMBIO DE TRAZO.....
2.6	DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA GENERAL DE LA ZONA.....
3.	TRABAJOS DE CAMPO.....
3.1	SONDEOS MIXTOS
3.2	SONDEOS DE AVANCE CONTROLADO (SAC)
3.3	PROSPECCION GEOFÍSICA
3.4	SONDEOS PRESIOMETRICOS
4.	TRABAJOS DE LABORATORIO.....
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LOS TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO.....
6.	CARACTERÍSTICAS GEOLOGICO-GEOTECNICAS A LO LARGO DEL TRAZO.....
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....

BIBLIOGRAFÍA

Anexos

ANEXO I.	Tabla de sondeos ejecutados.
ANEXO II.	Plano Geológico y de ubicación de sondeos.
ANEXO III.	Registros de sondeos mixtos.
ANEXO IV.	Registros de sondeos de avance controlado.
ANEXO V.	Registros de ensayos presiométricos de campo
ANEXO VI.	Perfiles de sondeos mixtos.
ANEXO VII.	Perfiles de sondeos de avance controlado.
ANEXO VIII.	Perfiles de ensayos presiométricos de campo
ANEXO IX.	Curvas Presiométricas
ANEXO X.	Ensayos de laboratorio.
ANEXO XI.	Prospección Geofísica.
ANEXO XII.	Planos con interpretación geológica del tramo en estudio
ANEXO XIII.	Memoria fotográfica
ANEXO XIV.	Síntesis de Resultados de Trabajos de Laboratorio.
ANEXO XV.	Especificación Técnica Particular. Estudio Geotécnico.
ANEXO XVI	Tabla de Riesgos Geológicos Potenciales Probables.

Tablas

1. Relación de tramos, frentes, apoyos y cadenamientos
 2. Ubicación de registros de vibración ambiental
 3. Frecuencia y periodos dominantes en registros de vibración ambiental (RVA)
 4. Resultados de Cross Hole. SM-21
 5. Resultados de Cross Hole. SM-41
 6. Distribución y resultados de las líneas de estudio. Presa Tacubaya
 7. Distribución y resultados de las líneas de estudio. Acueducto Lerma
 8. Módulos elásticos. Cruce trazo tren con autopista México La Marquesa (KM 45+722 a 46+764). Terraplén 1
 9. Módulos elásticos. Cruce trazo tren con autopista México La Marquesa (KM 45+722 a 46+764). Terraplén 2.
 10. Unidades Geológicas
 11. Parámetros presiométricos promedio por tramo y por unidad geológica
 12. Profundidad de muestras para ensayos químicos en suelos (sondeo SM-27 A)
 13. Unidades geológicas en la zona de estudio
 14. Criterio de Waltham
 15. Grados de meteorización ISRM
 16. Unidades Geológicas
-



1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes proyecta la construcción de la Obra denominada **TREN INTERURBANO MEXICO – TOLUCA**. Como parte de los trabajos correspondientes a este proyecto **CAABSA CONSTRUCTORA (CAABSA)** procedió a **la ejecución de la investigación geotécnica complementaria** para evaluar las características y condiciones del subsuelo en sitios de interés a lo largo de la traza del proyecto, Tramo III, entre los cadenamientos 41+334 (Portal Cruce) y 57+494, (Callerío Tacubaya-Adolfo Ruíz Cortines).

El tramo III corre paralelo a la Autopista México -Toluca, continúa por la Av. Vasco de Quiroga hasta la glorieta Televisa, sigue por la Hondonada Sagarpa, prosigue por los sitios denominados Casa del Agrónomo, Manantial Conagua, Industria Militar, Estado Mayor Presidencial, y la Presa Tacubaya. Finalmente arribará a la terminal de autobuses Observatorio.

El tramo III objeto de este estudio se ubica al poniente de la Ciudad de México. Conforme a la zonificación geotécnica marcada en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias, se localiza en la denominada Zona de Lomas, (**Figura 1**).

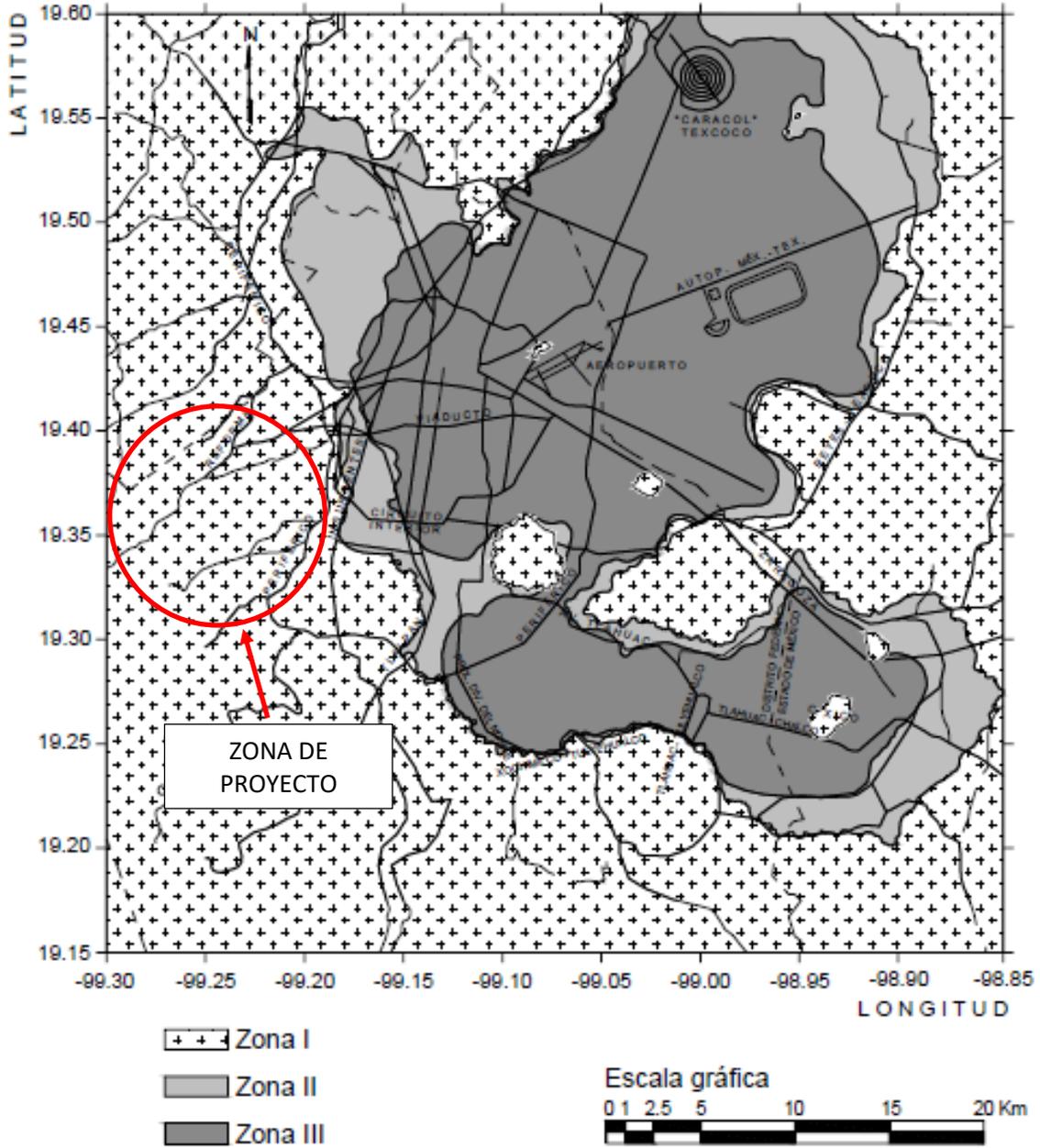
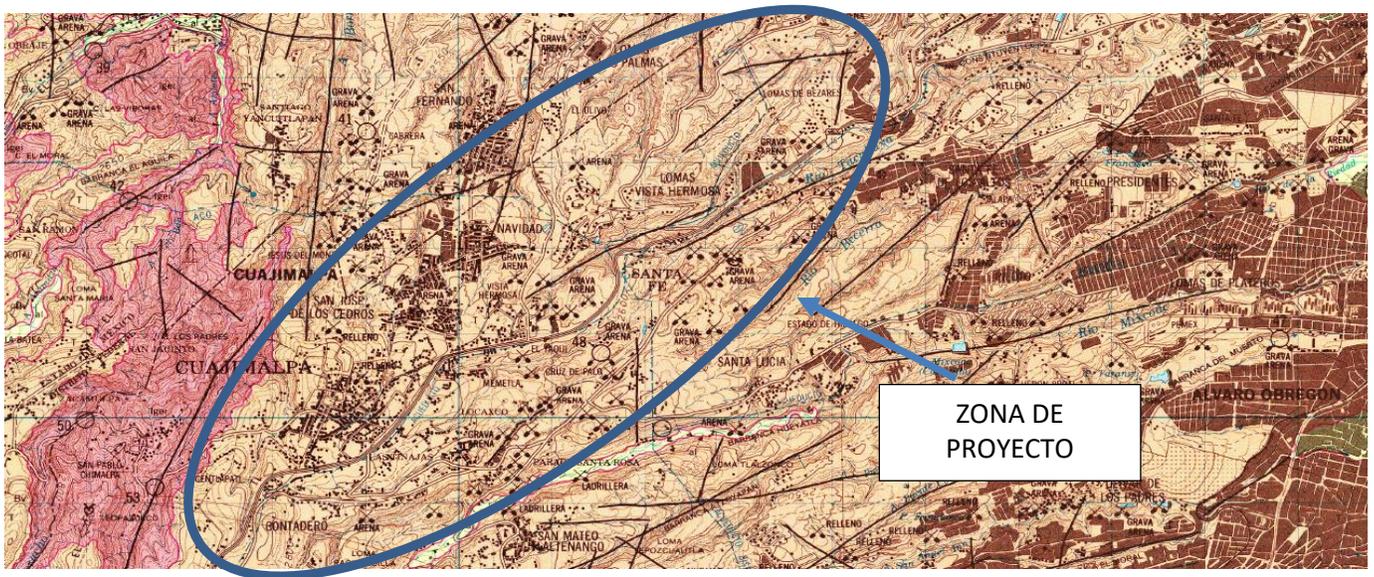


Figura 1 Zonificación Geotécnica. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.

En forma concordante con la zonificación geotécnica marcada en las Normas Técnicas Complementarias, la geología regional comprende esencialmente materiales de naturaleza ígnea, **Figura 2**, (INEGI).



ROCAS IGNEAS

Ig1a	INTRUSIVA ACIDA
Gr	GRANITO
Ig1i	INTRUSIVA INTERMEDIA
D	DIORITA
Ig1b	INTRUSIVA BASICA
Ga	GABRO
Igea	EXTRUSIVA ACIDA
R	RIOLITA
Igei	EXTRUSIVA INTERMEDIA
A	ANDESITA
Igeb	EXTRUSIVA BASICA
B	BASALTO
T	TOBA
Bv	BRECHA VOLCANICA
V	VITREA

Figura 2 Geología Regional. Fuente: INEGI.



1.2 OBJETIVO Y ALCANCES

El objetivo de este trabajo es la obtención de la información geotécnica complementaria para determinar las características y condiciones del subsuelo en los sitios de interés.

Para el logro de este objetivo y como se menciona más ampliamente en el cuerpo de este reporte, los trabajos se ejecutaron apegándose a los lineamientos marcados en el documento proporcionado a **CAABSA** denominado *“ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARTICULAR. ESTUDIO GEOTÉCNICO”*. Es conveniente mencionar que, debido a la geología de la zona y tomando en consideración la naturaleza fundamentalmente ígnea de los materiales detectados del subsuelo, resultó necesario incluir en los alcances del trabajo desarrollado la ejecución de un levantamiento geológico y la realización de ensayos “in-situ” de tipo presiométrico, los cuales fueron efectuados con el propósito de caracterizar más adecuadamente a los materiales detectados en el subsuelo.

Considerando lo anterior los alcances de la investigación geotécnica complementaria se establecieron como se indica enseguida:

- Reconocimiento geológico a lo largo del trazo.
- Ejecución de Sondeos Mixtos en los sitios de interés conciliados con la proyectista. Los sondeos permitieron la recuperación de muestras alteradas, inalteradas y núcleos de roca.
- Sondeos de Avance Controlado.
- Prospección geofísica.
- Ensayes presiométricos “in-situ”.
- Ensayes de laboratorio.
- Integración de los sondeos y ensayos efectuados.
- Elaboración de un Reporte Técnico Final del Estudio Geotécnico.

Con la información derivada de la investigación geotécnica complementaria, se elaboró el presente **informe Geotécnico Final** en el cual se plasma una descripción detallada de los resultados de los trabajos efectuados.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El tramo III objeto de estudio tiene una longitud total de 16.574 km. Contempla 402 apoyos con longitudes de claro promedio de 40 m. Cuenta con cuatro viaductos especiales -Santa Fe, Hondonada, Conagua y Tacubaya- así como un Túnel Falso en el Muro Santa Fe. Para fines de identificación fue dividido en los siguientes frentes:

FRENTE								
Viaducto	No. Frente	Nombre	Cadenamiento corregido de acuerdo a apoyos	Cad. Inicial	Cad. Final	Apoyos	Claros	longitud
1	1	PORTAL ORIENTE (1ER CRUCE AUTOPISTA)	41+150 al 41+604	41150	41604	T1-1 AL T1-9	T1-1 AL T1-9	454
2	2	CARRETERA FEDERAL (TOL - MEX)	41+604 al 42+364	41604	42364	T2-1 AL T2-19	T1-9 AL T2-19	760
2	3	EN DESUSO	42+364 al 42+596	42364	42596	T2-20 AL T2-25	T2-19 AL T2-25	232
2	4	CASSETAS (CARRETERA FEDERAL)	42+596 al 43+124	42596	43124	T2-26 AL T2-38	T2-25 AL T2-38	528
2	5	PF (SANBORNS)	43+124 al 43+404	43124	43404	T2-39 AL T2-44	T2-38 AL T2-45	280
2	6	CUNETAS	43+404 al 44+559	43404	44559	T2-45 AL T2-73	T2-45 AL T2-73	1155
2	7	HIPICO	44+559 al 45+274	44559	45274	T2-74 AL T2-91	T2-73 AL T2-91	715
2	8	AUTOPISTA (LOS PERROS)	45+274 al 46+526	45274	46526	T2-92 AL T2-123	T2-91 AL T2-123	1252
2	9	CAMELLON (MURO DE TIERRA ARMADA)	46+526 al 46+959	46526	46959	T2-124 AL T2-135	T2-123 AL T2-133	433
2	10	COLEGIO PINECREST	46+959 al 47+426	46959	47426	T2-136 AL T2-145	T2-133 AL T-155	467
FALSO TÚNEL	11	FALSO TUNEL (MURO SANTA FE)	47+426 al 47+531	47426	47531	T-155 AL T-156	T-155 AL T-156	105
3	12	ENCINO	47+531 al 48+002	47531	48002	T3-1 AL T3-13	T-156 AL T3-13	471
3	13	GLORIETA STA. FE - CC STA. FE	48+002 al 49+150	48002	49150	T3-14 AL T3-42	T3-13 AL C1	1148
EST. STA. FE	14	ESTACIÓN SANTA FE	49+150 al 49+349	49150	49349	C1 AL C8	C1 AL C8	199
VIADUCTO SANTA FE	15	VIADUCTO ESPECIAL SANTA FE (4TO CRUCE)	49+349 al 49+911	49349	49911	SF-1 AL SF-7	C8 AL T4-6	562
4	16	IBERO - TELEVISIA	49+911 al 51+665	49911	51665	T4-6 AL T4-51	T4-6 AL T4-51	1754
5	17	GLORIETA VASCO DE QUIROGA	51+665 al 52+141	51665	52141	T5-1 AL T5-13	T4-51 AL T5-13	476
5	18	VIADUCTO HONDONADA SAGARPA	52+141 al 52+446	52141	52446	T5-14 AL T5-19	T5-13 AL T5-19	305
5	19	CASA DEL AGRÓNOMO	52+446 al 52+690	52446	52690	T5-20 AL T5-25	T5-19 AL T5-25	244
5	20	VIADUCTO CONAGUA - MANANTIAL	52+690 al 53+346	52690	53346	T5-26 AL T5-32	T5-26 AL T5-32	656
5	21	INDUSTRIA MILITAR	53+346 al 55+271	53346	55271	T5-33 AL T5-76	T5-32 AL T5-76	1925
5	22	ESTADO MAYOR PRESIDENCIAL	55+271 al 55+981	55271	55981	T5-77 AL T5-93	T5-76 AL T5-93	710
VIADUCTO TACUBAYA	23	PRESA TACUBAYA	55+981 al 56+509	55981	56509	T5-94 AL TB-004	T5-93 AL TB-004	528
6	24	PRESA ADOLFO RUIZ CORTINEZ	56+509 al 57+629	56509	57629	T6-001 AL T6-028	TB-004 AL T6-28	1120
EST. OBSERVATORIO	25	ESTACIÓN OBSERVATORIO	57+629 al 57+792	57629	57792	1 AL 11	T6-28 AL 11	163

Tabla 1. Relación de Viaductos, frentes, y cadenamientos.

De acuerdo con la información proporcionada, el viaducto se resolverá mediante una estructura de concreto reforzado constituida principalmente por columnas y travesaños prefabricados, **Foto 1.**



Foto 1 Trabe y columna típicas del Tren Interurbano México – Toluca.

No se dispone de las descargas que la estructura transmitirá al terreno de apoyo, sin embargo, es previsible que se tendrán cargas de magnitud considerable por lo cual, de acuerdo con la información suministrada por la proyectista, la cimentación se resolverá mediante elementos de tipo profundo colados “in-situ”.

1.4 ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARTICULAR. ESTUDIO GEOTÉCNICO

Para la ejecución del Estudio Geotécnico se proporcionó a **CAABSA** un documento denominado “*ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARTICULAR. ESTUDIO GEOTÉCNICO*” (**ANEXO XV**). Este documento presenta lineamientos generales relativos a los objetivos de la investigación geotécnica, requisitos en cuanto a experiencia de la entidad que desarrolle tal investigación, disponibilidad y aptitud de equipo y personal para la ejecución de la misma, programas de trabajo, tipo de perforadoras mínimas deseables. Se solicita un número de sondeos verticales por ejecutar. La profundidad marcada para los sondeos es de 40 metros (media). Se indica que los sondeos serán verticales y de tipo mixto alternando barril muestreador con broca y rima de diamante con penetración estándar (**Norma ASTM D1586-99**). Se indica la realización de ensayos



“in-situ” tipo Phicometro a razón de 2-3 pruebas por sondeo. Se indica la realización de sondeos de avance controlado y de ensayos geofísicos. Se proporcionan recomendaciones generales para la ejecución de ensayos de laboratorio. Finalmente se muestra una sección relativa a Trabajos de Gabinete y Reporte Técnico del Estudio Geotécnico incluyendo normatividad a la cual deben apegarse los trabajos. Como se señaló anteriormente, en el **(ANEXO XV)** de este reporte se incluye la especificación completa a la que se hace referencia en este apartado.

Como es usual en este tipo de proyectos, la naturaleza de los materiales encontrados en el subsuelo (fundamentalmente de naturaleza ígnea), implicó que resultase necesario efectuar adecuaciones a los tipos de sondeos y ensayos “in-situ” contemplados en la Especificación. Efectivamente, como se indica más adelante en este informe, para la caracterización del subsuelo resultó necesaria la ejecución de ensayos “in-situ” de tipo presiómetro, inicialmente no contemplados en la especificación.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA

De acuerdo con la geología de México, gran parte del territorio nacional está ocupado por provincias volcánicas (Ortega-Gutiérrez et al. 2012), como resultado de una rotación anti-horario del arco volcánico de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 1999).

De acuerdo con los últimos estudios, el inicio del vulcanismo en la FVTM tuvo lugar entre 21.6 a 22.8 Ma (Lenhardt et al., 2010). En general la FVTM se define como un arco volcánico, con más de 8000 estructuras volcánicas, con una longitud de ~1200 km y se distribuye desde las costas del Pacífico, en San Blas, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco hasta las costas del Golfo de México, en Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978). Esta provincia tiene una orientación E-O en la parte central y oriental y una orientación NO-SE en la parte occidental (Gómez-Tuena et al., 2007a) formando un ángulo cercano de 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana.

El origen de la FVTM se debe principalmente al proceso de subducción que ocurre en el borde convergente entre la placa de Cocos y Rivera, las cuales están siendo subducidas por la placa norteamericana a una velocidad y ángulo de inclinación diferentes a lo largo de la Trinchera Mesoamericana, originando cambios en la dirección, intensidad y velocidad de subducción, haciendo de la FVTM una provincia geológica compleja.

Típicamente se ha dividido a la FVTM en tres sectores, debido a sus características geológicas y tectónicas (Demant, 1978; Pasquaré et al., 1988) y con el fin de facilitar su entendimiento. El sector occidental, comprende desde las costas de Nayarit y Jalisco hasta la junta triple de los rifts de Zacoalco, Colima y Chapala (Allan, 1986); mientras que el sector central abarca desde la junta triple antes mencionada, hasta el sistema de fallas Taxco – San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez y Nieto Samaniego, 2005); y el sector oriental abarca desde el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende, hasta las costas del Golfo de México.

Para tener un amplio entendimiento del movimiento de la placa Rivera y de Cocos, se han llevado a cabo varios estudios relacionados a la geometría, tectónica y sismicidad de las placas en subducción (Nixon, 1982, Pardo y Suárez, 1995). Mientras que estudios más recientes involucran a los experimentos MASE (Meso American Subduction Experiment) y MARS (Mapping the Rivera Subduction Zone) (Pérez-Campos et al, 2008) con el fin de definir la profundidad y la geometría de las placas que se encuentran en subducción por debajo de la FVTM, basados en imágenes de tomografía.

En estos experimentos se concluye que, en la parte occidental de la FVTM, está siendo subducida la placa de Rivera, a un ángulo inicial de 40° y posteriormente cambia a un ángulo de 70° por debajo del arco, hasta alcanzar una profundidad de 350 km (Yang et al., 2009) con una tasa de subducción entre 1.7 y 2.2 cm/año (DeMets et al., 1994).

Por otra parte, la placa de Cocos es subducida en la parte central y oriental de la faja, mostrando un ángulo de subducción cerca de la trinchera de 15° y posteriormente cambia a una subducción plana que ocurre

hasta los 300 km desde la trinchera, para posteriormente cambiar a un ángulo de 75° (por debajo de la Cuenca de México), ubicándose a una profundidad de ~450 km (Pérez-Campos et al., 2008), con una tasa de subducción de ~6 cm/año (DeMets et al., 1994). Las edades de las placas son variables, la de Rivera con edades de 9 a ~13 Ma y la de Cocos entre 12.7 y 16 Ma (Pardo y Suarez, 1995, DeMets et al., 1994).

La FVTM resalta por la presencia de grandes estratovolcanes activos, como el Pico de Orizaba, Popocatepetl, Nevado de Toluca y Colima, entre otros (Macías, 2005). Desde un punto de vista evolutivo, la historia geológica de la FVTM se ha dividido en cuatro episodios de vulcanismo (Ferrari et al., 2012).

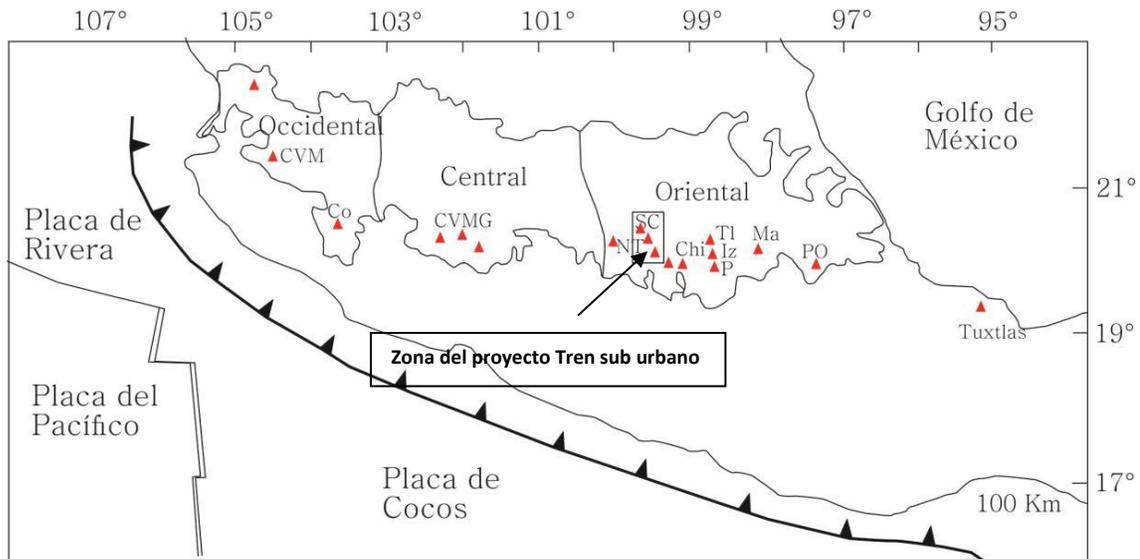


Figura.3. Mapa de la FVTM en donde se delimitan los tres sectores, así como la distribución de los campos volcánicos y estructuras volcánicas más representativas de México. CVM: Campo Volcánico Mascota, Co: volcán de Colima, CVMG: Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, SC: Sierra de las Cruces, NT: Nevado de Toluca, Chi: Campo volcánico Chichinautzin, SN: Sierra Nevada, PO: Pico de Orizaba.

2.2 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANS MEXICANA.

2.2.1 Arco del Mioceno temprano y medio

La actividad volcánica en la FVTM inició en el Mioceno temprano, con el emplazamiento de un arco volcánico con dirección preferencial este-oeste en el centro de México (Gómez-Tuena et al., 2005; Ferrari et al., 2012, Fig. 4a). En esta parte se encuentra conformada por secuencias de lavas basálticas y andesíticas en el área de Tenancingo y Malinalco, Estado de México en donde las edades más antiguas son de 19.5 y 21 Ma de acuerdo a lavas fechadas por el método de Ar-Ar (Ferrari et al., 2003; García Palomo et al., 2000). Sin embargo, estudios recientes han propuesto que la actividad inicial de la FVTM alcanza edades entre 21.6 y 22.8 Ma (Lenhardt et al., 2010). Posteriormente la actividad volcánica migra hacia el norte, alejándose de la trinchera, formando estratovolcanes y conos de lava como Palo Huérfano, La Joya y Zamorano en Querétaro-Guanajuato (Carrasco-Núñez et al., 1989; Pérez-Venzor et al., 1996; Valdez-

Moreno et al., 1998; Verma y Carrasco-Núñez, 2003), la Sierra de Guadalupe y varios centros volcánicos al noroeste de la Ciudad de México (Jacobo-Albarrán, 1986), campo volcánico Apán-Tezontepec (García-Palomo et al., 2002) entre otros.

2.2.2 Episodio máfico del Mioceno tardío

Durante este periodo, se presenta un importante episodio de vulcanismo máfico para el Mioceno tardío, el cual abarca desde las costas de Nayarit, hasta las costas de Veracruz (**Fig. 4b**) posicionándose hacia el norte del arco precedente con edades que se vuelven más jóvenes de oeste a este (Ferrari et al., 2000b). La actividad volcánica generó estructuras como mesetas basálticas, emplazadas generalmente a través de fisuras con edades entre 11 y 7 Ma (Richter et al., 1995; Ferrari et al., 2000a; Pasquaré et al., 1991). En el sector oeste las rocas máficas presentan características geoquímicas típicas de subducción (Ferrari et al., 2000b), mientras que el vulcanismo en la parte oriental de Hidalgo y al norte de Veracruz (Tlanchinol, Tantima, Álamo) presentan características de intraplaca (Orozco-Esquivel et al., 2003).

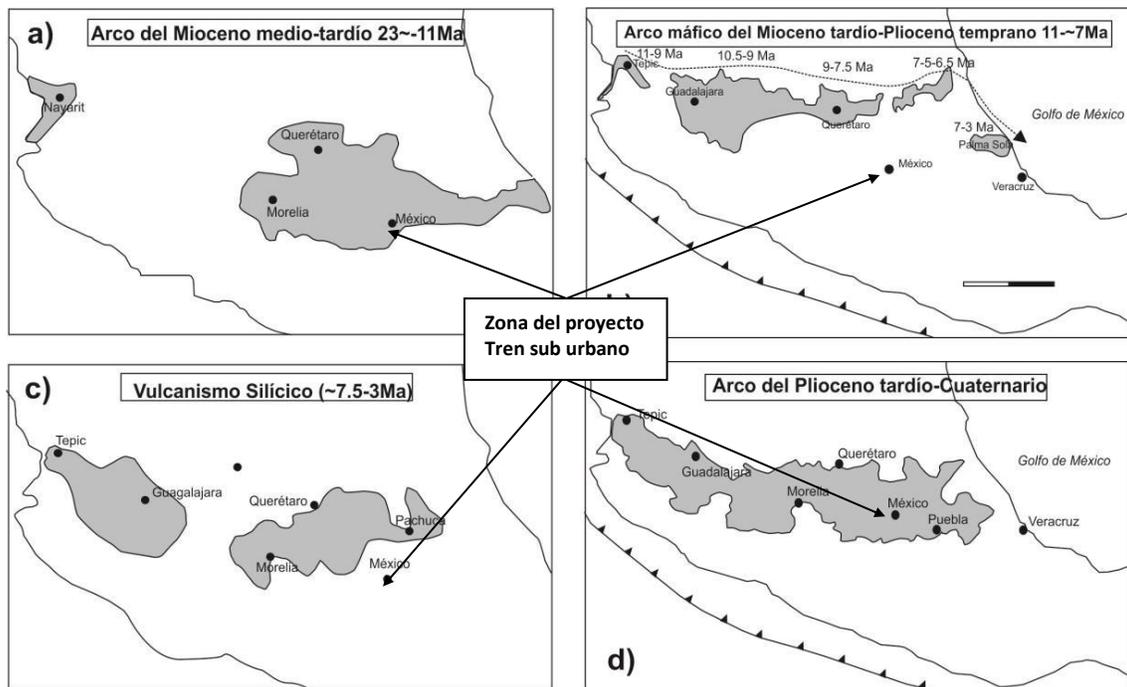


Figura.4. Principales episodios eruptivos que ha tenido la FVTM (Ferrari et al., 2009; 2012). a) Vulcanismo del Miocénico. b) Vulcanismo máfico. c) Vulcanismo silícico y bimodal. d) Arco del Plioceno-Cuaternario. Modificado de Ferrari et al., 2012.

2.2.3 Vulcanismo silícico bimodal del Mioceno tardío- Plioceno temprano.

Este episodio se caracteriza por la disminución de la actividad volcánica y además por cambios en la composición química de los productos, siendo éstos más diferenciados. Este episodio ocurre a finales del

Mioceno y principios del Plioceno, con el emplazamiento de magmas dacíticos y riolíticos, formando estructuras de domos y grandes volúmenes de ignimbritas, distribuidos en una franja al sur del arco máfico del episodio anterior.

En la parte oeste de la FVTM existe poca actividad de este episodio félsico, caracterizado por el emplazamiento de lavas riolíticas e ignimbritas entre Santa María del Oro y Plan de Barrancas (Ferrari et al., 2000a), así como domos de lava y flujos piroclásticos al norte de Guadalajara (Ferrari et al., 2000a; Rossotti et al., 2002), con edades de entre 7.5 y 3 Ma (Gilbert et al., 1985; Rossotti et al., 2002).

En la parte central de la FVTM, el episodio silíceo generó estructuras caldéricas, con depósitos de ignimbritas de gran volumen, como por ejemplo las calderas de Amazcala de 7.3-6.6 Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001), Amealco de 4.7 Ma (Aguirre-Díaz y McDowell, 2000), Los Azufres de ~6-3 Ma (Ferrari et al., 1991) entre otras.

En la porción oriental de la FVTM también se han reportado sucesiones piroclásticas del Plioceno temprano (4.9-4.5 Ma) que se encuentran intercaladas y cubiertas por lavas basálticas y que constituyen un arreglo petrológico bimodal (Cantagrel y Robin, 1979; Ochoa-Camarillo, 1997, **Fig. 4c**).

2.2.4 Arco del Plioceno tardío-Cuaternario

La cuarta y última etapa es de las que cubren mayor área, sobreponiéndose a los productos de las etapas anteriores (Fig. 2d). Esta etapa se caracteriza por un arco de composición dominante andesítico-basáltico, desarrollado en el límite del Plioceno temprano y Plioceno tardío (Righter et al., 1995; Ferrari et al., 2000a). En la parte occidental de la FVTM se reconocieron lavas típicas de subducción así como lavas con características de intraplaca, con edades de 3.6 Ma (Righter et al., 1996).

Este arco se caracteriza por la edificación de campos volcánicos monogenéticos (Michoacán-Guanajuato, Mascota, Chichinautzin, Apan-Tezontepec (Bloomfield, 1975; Hasenaka y Carmichael, 1985; Martín Del Pozzo, 1982; Márquez et al., 1999; Siebe et al., 2004; García-Palomo et al., 2002). También están considerados los estratovolcanes como el Pico de Orizaba, Volcán de Colima, Tequila, Cerobuco, Las Navajas. En sector oriental de la FVTM tiene lugar vulcanismo intermedio hace ~3.7 Ma con el emplazamiento de diferentes centros poligenético como la formación de la Sierra de las Cruces, ubicado al occidente de la Ciudad de México (Mora-Álvarez et al., 1991, Osete et al., 2000) mientras que en la parte sur de las Sierra de las Cruces es donde pertenece el área de estudio de este trabajo (**Fig. 4d**).

2.3 SIERRA DE LAS CRUCES

El proyecto del Tren Inter Urbano México-Toluca se desarrolla en su mayor proporción sobre la geografía de la Sierra de las Cruces. En las siguientes líneas se hará una descripción de la geología de la sierra y en particular del sector que nos ocupa, que va de la estación del metro Observatorio hasta las inmediaciones del túnel Km. 41+000.

Como parte del último episodio de vulcanismo de la FVTM, se desarrolló la Sierra de las Cruces, la cual tiene una longitud de 110 km, con una forma alargada, en la parte norte orientada NO-SE y de la parte central a su terminación sur cambia a una orientación N-S (**Fig. 5**).

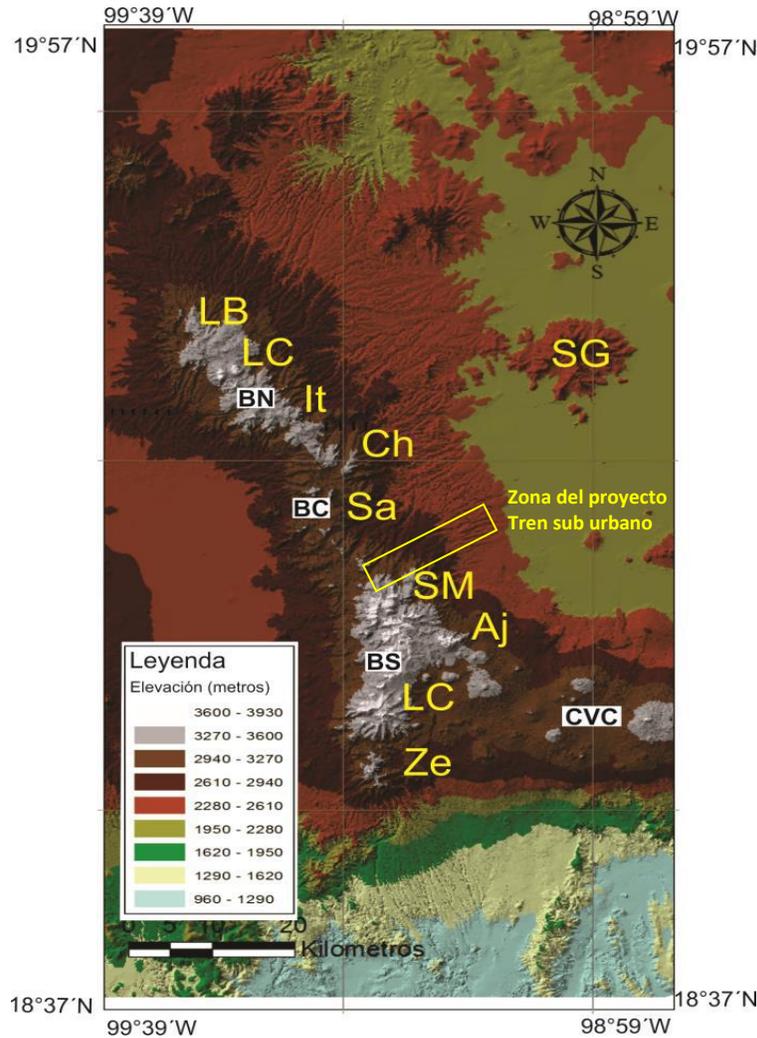


Figura 5. Mapa altimétrico con la ubicación de los ocho estratovolcanes que conforman la Sierra de las Cruces. Se aprecia una diferencia de altitud entre bloques: BN: Bloque Norte, BC: Bloque Central, BS: Bloque Sur. SG: Sierra de Guadalupe, CVC: Complejo Volcánico Chichinautzin, LB: La Bufa, LC: La Catedral, It: Iturbide, Ch: Chimalpa, Sa: Salazar, SM: San Miguel, Aj: Ajusco, LC: La Corona, Ze: Zempoala.

La composición de los productos volcánicos de esta sierra es similar en todas las estructuras que la componen, variando de andesita a dacita (Mora-Álvarez et al., 1991; Mooser et al., 1974; Gun y Mooser, 1970), y con edades desde 3.7 Ma para la parte norte (La Catedral; Aguirre-Díaz et al., 2006a), la parte central las edades son variables (de 4.14 ± 0.37 a 2.61 ± 0.52 Ma; Mejía et al, 2005) y la terminación sur presenta edades de 1.2 a 0.7 Ma (Arce et al., 2008).



El volcán San Miguel junto con los volcanes Ajusco, La Corona y Zempoala, conforman la terminación sur de la Sierra de las Cruces. Con base en las edades disponibles hasta la fecha, se ha propuesto que el vulcanismo migró de norte a sur (Mora-Álvarez et al., 1991).

2.3.1 Estratigrafía de la Sierra de las Cruces

La información estratigráfica disponible del área de estudio ha sido publicada en varios trabajos, como artículos, tesis, informes técnicos, entre otros. Los pozos profundos que se han perforado en la Cuenca de México, como Mixhuca-1, Copilco-1, Roma-1, Tulyehualco-1, Texcoco-1 y San Lorenzo Tezonco (De Cserna et al., 1988, Pérez-Cruz, 1988; Arce et al., 2013a) han aportado información valiosa del subsuelo. Además, los trabajos de geología superficial (De Cserna et al., 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; García-Palomo et al., 2002; Lenhardt et al., 2010) también proporcionan información geológica que puede ser utilizado en la construcción de la estratigrafía de la región de estudio.

2.3.2 Rocas del basamento

Las rocas más antiguas que se han descrito para esta región están conformadas por las formaciones Xochicalco, Morelos, Cuautla y Mexcala (Fries, 1960), con edades que van desde el Aptiano hasta el Coniaciano (Cretácico superior). En general estas formaciones están conformadas por interestratificaciones de calizas, dolomitas con variaciones de pedernal y anhidrita. La formación más joven (Mexcala) del Coniaciano (Fries, 1960) está compuesta por inter-estratificaciones de areniscas, lutitas y limolitas calcáreas con escasos lentes de pedernal (Fries, 1960).

La presencia de una o más de estas formaciones en superficie, se encuentran en la parte sur de Cuernavaca, así como en los pozos profundos de la Cuenca de México, como en los pozos Mixhuca y Tulyehualco aparecen calizas de la Formación Morelos a una profundidad de 1575 metros y 2041 metros respectivamente, que confirman la presencia de este basamento en el área de estudio.

Posteriormente, se encuentran rocas del Grupo Balsas, que representan a las rocas más antiguas del Paleógeno, y que descansan sobre formaciones cretácicas (Fries, 1960) El Grupo Balsas está compuesta por depósitos continentales de clastos calcáreos del Eoceno tardío-Oligoceno temprano. Estas rocas además están intercaladas con limos, arcillas, así como rocas piroclásticas y lavas de composición andesítica (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

De igual manera, estas rocas en superficie se han descrito en partes cercanas a Iguala y Taxco (Edward, 1955, Fries, 1960), en el distrito minero El oro-Tlalpujahua en el límite de los estados de México y Michoacan (Flores, 1946) así pozo profundo Texcoco-1, en la Cuenca de México (Schlaepfer, 1968) por tal motivo es muy probable que también se encuentre por debajo del complejo San Miguel.

2.3.3 Rocas volcánicas

Las rocas volcánicas más antiguas que se han descrito en la región de estudio, pertenecen a la denominada Formación Tilzapotla (Fries, 1960) con edades del Oligoceno, entre 30 y 25 Ma (Jaffe et al., 1959; Morán-Zenteno et al., 2004). Característicamente esta formación se conforma de derrames de lava y extensos depósitos de ignimbrita, ambos de composición riolítica y dacítica, con abundante biotita, con espesores de hasta 250 metros (Fries, 1960; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), reconocidos en los pozos Copilco-1, Mixhuca-1 y Roma-1 (De Cserna et al, 1988).

Otro paquete de rocas volcánicas son aquellas conformadas por la Formación Tepoztlán, la cual fue definida como detritos volcánicos andesíticos (Fries, 1960). En superficie se tienen dos afloramientos típicos, uno localizado en los alrededores de Tepoztlán, Morelos (de donde toma su nombre) y otro en los alrededores de Malinalco, estado de México (García-Palomo et al., 2000; García-Palomo et al., 2002; Lenhardt et al., 2010). En estos sitios se describieron depósitos de lahar, intercalados con lavas de distinta composición, así como depósitos piroclásticos, como parte de esta formación. Estos mismos autores llevaron a cabo fechamientos radiométricos en ambos sitios, que han permitido ubicar a esta formación en un intervalo de tiempo de 18.7 a 22.8 Ma.

En la cuenca de México, fue reconocida esta formación en el pozo San Lorenzo Tezonco, con un espesor considerable de 290 m, con edades que varían de 18 a 20.1 Ma (Arce et al., 2013a; 2014), constituida por una variedad de litologías, tanto lavas andesítico-basálticas, como andesitas, dacitas y riolitas. De acuerdo al orden cronológico, la Sierra de las Cruces de la que forma parte el complejo San Miguel, también forma parte de las rocas volcánicas del área de estudio. Esta sierra fue descrita inicialmente por Mooser et al (1974); Fries (1960) y De Cserna (1988), como Andesita Zempoala. Posteriormente se ha agrupado a las rocas de toda la sierra como parte de una misma unidad, pero con edades muy variables, desde 3.7 Ma en la parte norte (Aguirre-Díaz et al., 2006a) hasta 0.7 Ma para el volcán Zempoala, localizado al sur de la sierra (Arce et al., 2008). En general, estas rocas se caracterizan por tener una textura porfídica y una composición de andesitas y dacitas (Romero-Terán, 2001).

La columna estratigráfica finaliza con las rocas del Campo Volcánico Chichinautzin, las cuales presentan una variedad composicional muy grande, desde basaltos hasta dacitas, con variaciones químicas y mineralógicas importantes (Bloomfield, 1975; Márquez et al., 1999, Siebe et al., 2004, Siebe et al., 2005, Meriggi et al., 2008; Martín del Pozzo, 1982; Velazco-Tapia, 2003). Este campo está conformado por más de 220 volcanes, distribuidos a lo largo de una franja irregular, con orientación general este-oeste (Bloomfield, 1975). Las edades fueron constreñidas para el Pleistoceno tardío, de 40 mil años al Reciente (Bloomfield, 1975; Márquez et al., 1999; Wallace y Carmichael, 1999; Siebe et al., 2004; Siebe et al., 2005; Siebe et al., 2000), aunque recientemente se ha demostrado que los inicios del vulcanismo en este campo ocurrieron hace 1.2 ma (Arce et al., 2013b), es decir que en algún momento coexistió con vulcanismo de la Sierra de las Cruces.

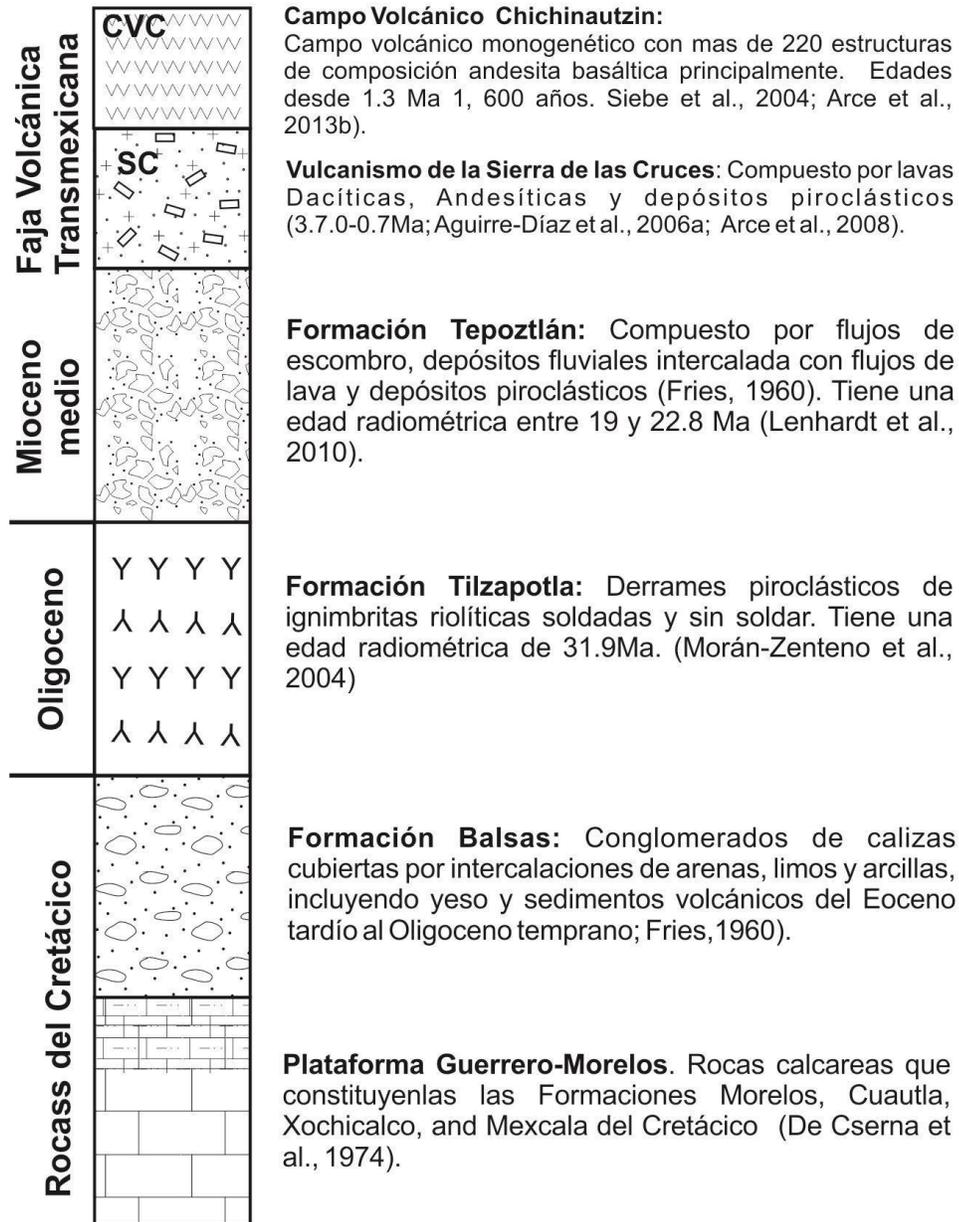


Figura 6 Columna estratigráfica de La Sierra de las Cruces.

2.3.4 Complejo Volcánico San Miguel

El volcán San Miguel forma parte del sector sur de la Sierra de las Cruces y debido a que está conformado

por una amalgama de estructuras como por ejemplo varios domos de lava, se le ha denominado como complejo volcánico San Miguel (Romero-Terán, 2001). Esta serie de estructuras volcánicas son de gran relevancia para el proyecto, ya que éstas son las que originaron en mayor medida el terreno por donde se proyecta el tren suburbano.

El CVSM se caracteriza por tener un vulcanismo efusivo y explosivo que dieron origen a depósitos piroclásticos, depósitos de lahares, emplazamiento de domos y flujos de lava. En la parte sur del CVSM, existe una intersección entre la Sierra de las Cruces y productos del Campo Volcánico Chichinautzin. Las edades radiométricas más antiguas para el complejo San Miguel es de aproximadamente 2.29 Ma (Mora-Álvarez et al, 1991), mientras que el Ajusco es de aproximadamente entre 0.73 – 0.3 Ma.

Los productos más antiguos del Campo Volcánico Chichinautzin han sido fechados en 1.2 Ma (Arce et al., 2013b) y los más recientes en 1600 años antes del presente (A.P.) (Siebe, 2000), de modo que existe un traslape en edades entre ambos tipos de vulcanismo.

La geología estructural del Complejo San Miguel ha sido establecida mediante la interpretación de fotos aéreas y con análisis morfológico (De Cserna et al., 1988; Romero-Terán, 2001; García-Palomo et al., 2008), en donde se han descrito distintas fallas, como por ejemplo en la parte NE de San Miguel se encuentran las fallas Río Hondo, Contadero, Hipódromo, Texcalatlaco, Puente Colorado y Contreras también conocido como “Enjambre de fallas las cruces” (Fig. 7) con dirección general N55°E (De Cserna et al., 1988).

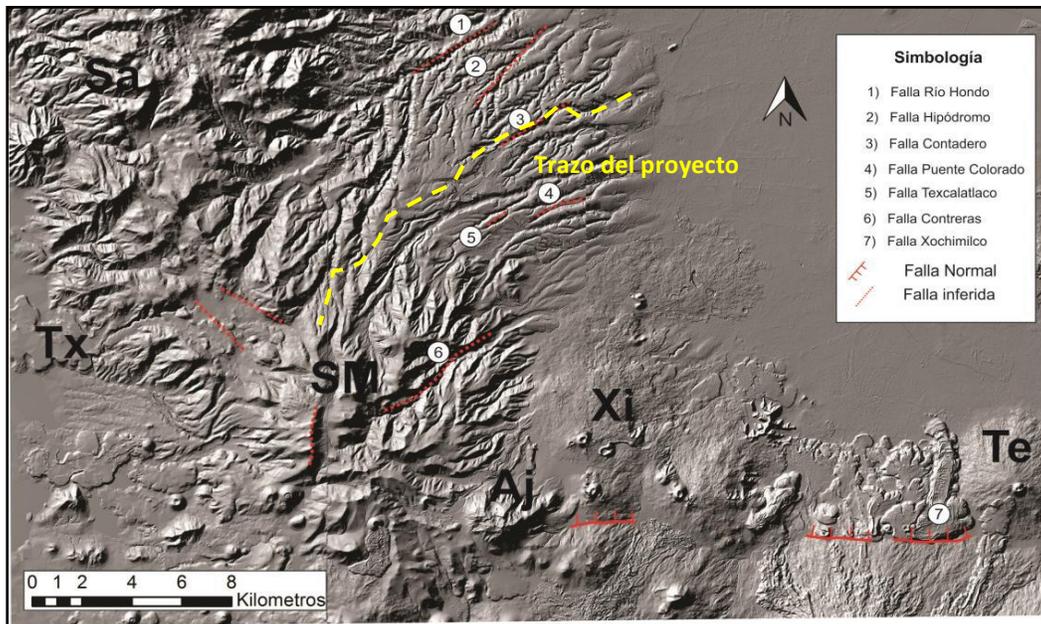


Figura.7. Modelo digital de elevación del área del complejo volcánico San Miguel, en el que se muestran las principales fallas que afectan a esta estructura. Se destaca la orientación de las fallas inferidas “Enjambre de fallas las cruces”, con una orientación NE-SO (De Cserna et al., 1988) y la falla Xochimilco al oeste del CVSM (Colín-Rodríguez, 2006). Tx: Texontepec, Sa: Salazar, SM: San Miguel, Aj: Ajusco, Xi: Xitle, Te: Tehutli.

Otra estructura notable es la falla Xochimilco (Colín-Rodríguez, 2006; García-Palomo et al., 2008), que se localiza en la parte este de la zona de estudio y se manifiesta como un lineamiento E-O con una longitud de 55 km, caracterizado por un rompimiento topográfico a la cual se asocian varios aparatos volcánicos y flujos de lava fisurales del Campo Volcánico Chichinautzin.

Según estos mismos autores, en los planos de falla se han encontrado algunos indicadores cinemáticos como brecha de falla y harina de falla, de forma sigmoidal, vertical lo que sugiere un desplazamiento normal hacia el norte.

2.4 GEOLOGÍA SOBRE EL TRAZO DEL PROYECTO.

Derivado del reconocimiento geológico en superficie, y apoyándose en la información obtenida de los sondeos exploratorios y de los ensayos presiométricos efectuados, fue posible definir las diferentes unidades litológicas principales que se presentan a lo largo del tramo del proyecto.

Formación	Litología		Edad
Formación Tarango	Depositos limo arenosos con gravas aisladas		Pleistoceno
	Toba limosa con horizontes pumíticos		
	Depósitos aluviales (lahares retrabajados)		
Formación Las Cruces	Lahares		Plioceno
	Brechas Volcánicas		Mioceno
	Dacitas		
	Andesitas		

Figura 8 Columna Estratigráfica del Proyecto

El Complejo Volcánico San Miguel se caracteriza por haber experimentado un vulcanismo efusivo y explosivo que dieron origen a depósitos piroclásticos, depósitos de lahares, emplazamiento de domos y flujos de lava. Posteriormente los agentes del intemperismo y erosión produjeron aluviones derivados de los depósitos volcánicos. Está conformado por diversas estructuras, dentro de las que destacan domos alineados norte-sur, domos en la parte central del complejo (Las Palmas) con un diámetro de 2.1 km de largo por 1.38 km de ancho aproximadamente. Alrededor de estos domos existen otras estructuras dispuestas en forma alineada en la misma dirección, constituidas principalmente por lavas en bloque, como son: cerro El muñeco que se encuentra del lado oeste, cerro El Caballete y San Miguel hacia el norte. Estas estructuras presentan visibles grados de erosión, generalmente de mayor intensidad a menor intensidad de norte a sur.

Los domos San Miguel y el Caballete, ubicados al norte de los domos Las Palmas, forman una pequeña

cadena con orientación norte-sur. La estructura del San Miguel tiene diámetros de 0.73 km por 0.70 km, formando una estructura dómica, conformada por lavas en bloque, con una familia de diaclasas orientadas E-O. Existen zonas en donde se aprecian direcciones del flujo de lava pero siempre con la misma familia de fracturas E-O. En muestra de mano, las rocas tienen una textura porfídica, compuestas por fenocristales de plagioclasas, de hasta 1 cm de diámetro, escaso piroxeno y cuarzo, embebidos en una matriz de grano fino de color gris claro. No se observaron fenocristales de anfíbol. El Cerro el Caballete tiene una forma elongada, con un ancho de 1.3 km y 3.15 km de longitud, en su terminación norte, se aprecia una estructura en herradura, probablemente producto de un colapso gravitacional.

De manera general, la mayoría de los productos del Complejo San Miguel son lavas de composición dacítica, sin embargo, estudios petrológicos realizados a estas rocas establece la existencia de dos grupos de dacitas, con base en su asociación mineralógica, un grupo con abundante anfíbol y el otro con importante presencia de biotita.

La mayor variedad litológica se presenta en la zona alta del proyecto justo en las faldas del complejo volcánico San Miguel. En el tramo comprendido entre los cadenamientos de proyecto Km 41+000 al Km 44+000. En este tramo se presentan expuestas de manera clara diferentes unidades litológicas asociadas a diferentes eventos eruptivos del complejo San Miguel.

En las inmediaciones del Túnel Km 41+000 se observan afloramientos de lavas de andesita de color gris oscuro a negro con vesículas. El macizo rocoso se observa moderadamente fracturado y poco intemperizado.



Foto 2. Afloramiento de andesita.

Sobre las andesitas se encuentra un depósito de brecha volcánica soladada con diferentes grados de intemperismo. En general muestra la presencia de fragmentos gruesos de más de 10 cm de diámetro de dacita, soportados por una matriz de arenosa a limosa. Se llegan a observar bloques de más de 50 cm de manera esporádica.

El contacto entre las unidades presenta un rumbo NW 75° SE/15° NE.



Foto 3. Brecha volcánica con presencia de bloques Km.41+540.

Hacia el cadenamiento 41+700 aproximadamente se presenta un afloramiento de dacitas de textura porfídica de color café rojizo medianamente intemperizada. El macizo rocoso se observa moderadamente fracturado.

Se observa un par de familias de fracturas de tendencia vertical con rumbos: NW 40° SE/80° SW y NE 80° SW/vertical. Las superficies de fracturamiento de estas familias presentan una continuidad > de 3.00m, onduladas y rugosas poco intemperizadas, sin relleno.



Fotografías 4 y 5 mostrando en el lado izquierdo el afloramiento y en el derecho un acercamiento de un ejemplar de mano de dacitas de textura porfídica Km. 41+700

Hacia el cadenamiento 42+320 se observa nuevamente la unidad de brecha volcánica. En este afloramiento se presentan fragmentos de tamaños de gravas de formas angulosas a sub angulosas empacadas en arena poco limosa. El depósito se observa intemperizado; no obstante, conserva una alta compacidad.

En el cadenamiento 42+500 se presenta nuevamente un afloramiento de dacitas de textura porfídica. En este caso la roca es de color gris claro al fresco. El macizo rocoso muestra diaclasas así como fracturamiento moderado



Fotografías 6 y 7 mostrando en el lado izquierdo el afloramiento con diaclasas sub horizontales y en el derecho, un acercamiento de un ejemplar de mano de dacitas de textura porfídica color gris m. 42+500.

Hacia el cadenamiento 42+620 frente a la caseta salida al Desierto de los Leones se observa nuevamente el contacto entre Dacitas y brecha volcánica. A partir de este cadenamiento y hasta la estación Observatorio la variedad litológica presente se reduce fundamentalmente a cuatro unidades. (Brechas volcánicas, Tobas limo arenosas y depósitos de escombros (Lahares) y depósitos aluviales.



Foto 8. Afloramiento típico de Brecha volcánica intemperizada Km. 42+620.

Los afloramientos de brechas volcánicas continúan presentes hasta algún punto hacia el cadenamiento 44+000 en donde se pierden bajo la vegetación y partir de esta locación, comienzan los afloramientos de tobas limosas y arenosas de color café claro. Los depósitos están compactos, pero no cementados. Esta unidad está reconocida en múltiples sondeos realizados en tramo.



Foto 9. Afloramiento típico de Toba limosa y arenosa compacta Km. 45+050.

Esta unidad de tobas se encuentra ampliamente distribuida en la zona y cubre a los depósitos de brecha volcánica y lahares. Esta unidad llega a presentar en algunas zonas intemperismo reduciendo la toba a depósitos de arcilla de poco espesor, generalmente inferior a los 2 metros.

Los estratos de toba presentan un rumbo: NW59°SE/13°NE.

Hacia el Km. 47+000 aproximadamente se presentan afloramientos ampliamente expuestos en los cortes de la autopista en donde se identifican hacia la base de la secuencia depósitos de Lahar formadas por fragmentos angulosos y sub angulosos de dacitas. Se observan fragmentos de más de 15 cm; incluso hay bloque aislados de más de 50 cm. Los bloques están soportados por una matriz de tipo arenoso principalmente. Sobre estos depósitos se observan depósitos de lahar formados por fragmentos de tamaños de gravas en una matriz arenosa.

El contacto entre unidades presenta un rumbo: NW48°SE/13°NE.



Foto 10. Afloramiento mostrando en la base lahares gruesos y más finos hacia la cima.

A partir de este cadenamiento del proyecto y hasta la estación de Observatorio, las unidades litológicas que predominan son los depósitos de lahar y depósitos aluviales de la formación Tarango.

Derivado del reconocimiento geológico de todo el tramo se pudo observar que hay varias unidades de lahar con características particulares. Dichas unidades muestran variaciones laterales en cuanto a su granulometría y predominancia de tamaños. En general las fracciones más gruesas se presentan cerca del domo, en tanto que las más finas tienden a ser las más distales observándose entre Santa Fe y Observatorio.

Se pudo reconocer que algunos depósitos de lahar presentaron un proceso de re movilización produciendo depósitos aluviales de estratificación burda y muy mal clasificados. Los clastos presentan formas sub angulosas a sub redondeados producto del transporte. Este tipo de depósitos se observan en los terrenos en donde se proyecta construir la estación Santa Fe, Km. 49+200.



Foto 11. Acercamiento mostrando los clastos que forman los depósitos aluviales.

En general estos depósitos se componen de mezclas heterogéneas de fragmentos líticos de tamaños de gravas con formas sub angulosas a sub redondeadas. Los fragmentos líticos están compuestos de dacitas de color gris y café claro a rojizo de textura porfídica y menor cantidad de fragmentos de andesitas. Los fragmentos se encuentran empacados en una matriz de composición arenosa. En general, esta unidad se presenta muy compacta.

Esta unidad cambia lateralmente a depósitos de lahar y parece en ocasiones estar envuelta por éstos. Dada su similitud en cuanto a granulometría y composición lítica estos depósitos pueden fácilmente confundirse con lahares.

Como se menciona en capítulos posteriores de este reporte, y en cumplimiento con lo establecido en la Especificación Particular. Estudio Geotécnico, se efectuó exploración directa del subsuelo mediante sondeos profundos, empleando fundamentalmente la técnica de penetración estándar y muestreo con barriles muestreadores con rima y corona de diamante. En uno de estos sondeos denominado **SM-05** se detectó la presencia de material discordante con la estratigrafía general detectada en la zona como se describe enseguida.

En el sitio donde se realizó el **SM-05** se presenta una zona anómala en términos litológicos ya que contrasta

con la secuencia geológica observada en superficie y determinada en los sondeos aledaños. Esta condición anómala se caracteriza por la presencia de un depósito de arcilla de consistencia blanda de más de 30 metros de espesor. Con la finalidad de tratar de comprender mejor la presencia de estos depósitos de arcillas se realizaron dos sondeos próximos denominados como **SM-05A y SM-05B**. En ambos sondeos no se detectó la presencia de material arcilloso en los primeros 20 a 25 metros. Estos depósitos son distintos a los detectados en el SM-05 ya que se trata de mezclas de arena con arcilla en general de compacidad alta.

Con base en las observaciones de campo, así como de las aportadas por los sondeos, esta zona de arcilla parece estar más asociada a una falla o fractura geológica que a un depósito de cuenca. Como se indicó líneas arriba esta es una zona anómala de unas decenas de metros de ancho la cual consideramos es necesario precisar con mayor detalle ya que varios apoyos quedarán alojados en este terreno.

Sobre la vialidad Vasco de Quiroga, en su lado sureste, se observan extensos afloramientos de depósitos de lahar mismos que son también reconocidos en el subsuelo de este tramo mediante los sondeos SM-1,2,3,4 y 9. El contacto entre lahar gris y otro de color café con menor contenido de líticos se observó en la barranca contigua, al sur de la avenida Vasco de Quiroga mostrando un rumbo: NW44°SE/11°NE.



**Foto 12. Contacto entre depósito aluvial gris y Lahar café.
(Foto tomada en barranca aledaña al trazo).**

También se reconoció en campo la presencia de mantos pumíticos conformados de grava y arena. Estas capas tienen un espesor variable del orden de 2 a 4 metros. Su continuidad lateral no es extensa y tienden a acuñarse entre los depósitos de lahar.



Foto 13. Acercamiento de Lahar gris foto tomada en Vasco de Quiroga Frente al Corporativo Banamex.

Los depósitos pumíticos se encuentran poco compactos y son fácilmente deleznable. Es importante mencionar que estos mantos pumíticos han sido explotados por décadas de manera desordenada, realizando una minería subterránea de la cual no hay registros ni levantamientos topográficos de dichas obras. Las capas de arena pumítica presentan un rumbo: $NW46^{\circ}SE/13^{\circ}NE$.



Foto 14. Manto de Pumicitas (Grava y arena) Afloramiento a espaldas de Carpa Santa Fe.

2.5 ZONA DE CAMBIO DE TRAZO.

El trazo original del proyecto del tren suburbano sufrió una modificación en su trazo en una zona de la vialidad Vasco de Quiroga, por lo que se optó por llevarlo por la zona federal de los arroyos Tacubaya y en parte de la zona de Industria militar y Estado Mayor Presidencial.

Debido a que existen grandes áreas sin construcción sobre el nuevo trazo, fue posible observar numerosos afloramientos que permitieron reconocer con relativa facilidad la secuencia estratigráfica presente en la zona. En las barrancas se pudo observar que la unidad litológica principal está compuesta por depósitos de lahar en sus fases distales, conformados por gruesos mantos de arenas limosas con pocas gravas de dacitas gris y rojiza y gravas de pómez; los depósitos se encuentran muy compactos.

Se pudo observar que se presentan de manera interestratificada algunos estratos de aluviones formados por gravas y bloques de dacitas de formas subredondeadas a redondeadas, empacados en una matriz muy densa de arena fina y limo muy compactos. El espesor y su continuidad lateral son variables. Por su geometría y extensión, suponen depósitos de canales que quedaron sepultados al paso del tiempo.

Asimismo se pudo observar la presencia de mantos de pumicita y toba limosa de unos 4 metros de espesor.

El estrato de arena pumítica presenta un rumbo: NW17°SE/12°NE.

Se observó una bocamina dentro de los terrenos del Estado Mayor Presidencial. Dicho estrato se ubica por encima del nivel de desplante de los apoyos del proyecto, no obstante, no se descarta la posibilidad de que puedan existir estratos de características similares bajo la superficie ya que en el SPT-06 hecho en el trazo antiguo y que en esta zona en particular se ubica próximo al trazo nuevo se encontró a una profundidad de entre 13.50 y 15.50 metros una oquedad asociada al minado de estos estratos pumíticos.



Foto 15. Boca mina en horizonte Pumítico (Estado Mayor Presidencial)



Foto 16. Depósitos de Lahar facies distales (arenas finas limosas con gravas aisladas muy compactas)

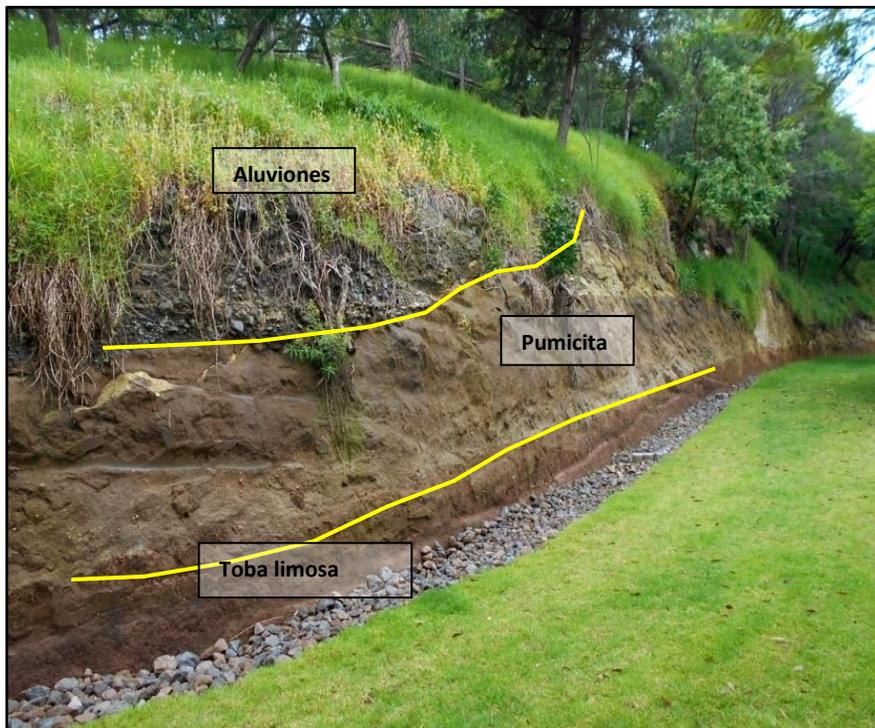


Foto 17. Afloramiento en terrenos de Estado Mayor Presidencial.



Entre los cadenamientos 53+100 al 53+500 el trazo nuevo cruza una zona donde interpretamos la posible presencia de la “falla Contadero” cuya existencia ha sido inferida por años; varios de los sondeos realizados en la zona parecen así confirmarlo.

La suposición se fundamenta en la falta de continuidad lateral de los horizontes entre sondeos cercanos aunado a la presencia del arroyo el cual se considera como la posible expresión superficial de la traza de la falla.

2.6 DESCRIPCIÓN HIDROLOGICA GENERAL DE LA ZONA

El proyecto se encuadra en la Región Hidrológica XII, Lerma-Santiago.

La red hidrográfica superficial en la zona se divide principalmente en:

La Región Hidrológica No. 26 Pánuco, Cuenca Río Moctezuma, Subcuenca Lago Texcoco-Zumpango y la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Santiago, Cuenca Río Lerma-Santiago, Subcuenca Río Almoloya-Otzolotepec.

Los escurrimientos en la zona de proyecto se deben fundamentalmente a la presencia de la Sierra de las Cruces donde los lomeríos formaron los siguientes ríos principales:

El Borracho con una extensión de 3.5 Km y una pendiente de 11%, (drena al Río Hondo). Santo Desierto con una longitud aproximada de 7 Km y una pendiente media del 9%, (drena al Río Mixcoac). Y Tacubaya el cual tiene una longitud aproximada de 2.8 Km. y una pendiente media del 7%.

La mayor parte de los ríos de la zona de estudio son de carácter torrencial, con avenidas de corta duración a veces peligrosas. Generalmente sus cauces permanecen secos durante la temporada de estiaje.

Existen afluentes como Corriente la Coyotera, Arroyo Agua de Leones, Río Atitla; tributario: Barranca Muculua, Cañada El Rancho; Cañada Corral Atlaco; Cañada Las Palomas; Cañada San Miguel Barranca Hueyatla; Atributario: Cañada Los Helechos Barranca Atzoyapan y Río Tacubaya.



3. TRABAJOS DE CAMPO

Para la ejecución de los trabajos de exploración en campo se siguieron fundamentalmente los criterios indicados en la Especificación Técnica Particular. Estudio Geotécnico.

Adicionalmente (previa solicitud de la proyectista) debido a la geología particular a lo largo del trazo, y con objeto de caracterizar más adecuadamente al subsuelo, se efectuaron ensayos de carga “in-situ”, tipo presiómetro cuyos resultados se describen más adelante.

En general esta fue la estrategia adoptada para la ejecución de los trabajos de campo. Seguir los criterios de la Especificación, obedeciendo en todo momento las indicaciones puntuales de la proyectista en cuanto a tipo, localización y profundidad de las exploraciones. Lo anterior implica que CAABSA solamente puede responsabilizarse de los resultados obtenidos con cada uno de los métodos exploratorios que se exponen a continuación, pero no de la interpretación de dichos resultados, ya que esta interpretación corresponde a la proyectista.

Considerando lo anterior se efectuaron los trabajos de campo descritos a continuación:

- Sondeos Mixtos. Mediante la recuperación de muestras alteradas representativas aplicando la técnica de penetración estándar (SPT), y muestras de tipo “inalteradas” mediante el muestreo con Tubo de Pared Delgada (Shelby). En las unidades donde se encontró fragmentos de roca o donde los materiales presentan una resistencia importante que no permitió el muestreo mediante la técnica SPT, se recurrió al empleo de barril muestreador NQ con broca con corona de diamante.
- Sondeos de avance controlado, (SAC).
- Prospección geofísica.
- Sondeos con ensayos de carga “in-situ” de tipo Presiométrico.

3.1 SONDEOS MIXTOS

Para la ejecución de los sondeos mixtos (SM) se utilizaron equipos de perforación tipo Longyear modelo 34, Acker modelo Montanier, SOILMEC modelo SM-8G, Mobile Dril B-32, entre otros. La ubicación de los sondeos se presenta tanto en la tabla del **Anexo I**, así como en el **plano** incluido en el **Anexo II**.

Estos sondeos se realizaron combinando la prueba de penetración estándar (SPT), con el muestreo de tipo inalterado mediante tubos de pared delgada tipo Shelby de 4 pulgadas en suelos de consistencia blanda a media.

En aquellos materiales no susceptibles de muestreo mediante la técnica SPT se recurrió al uso del barril muestreador con broca y rima de diamante en diámetro nominal N y H.



El espaciamiento entre sondeos es de 150 m en promedio. Las perforaciones alcanzaron las profundidades de exploración señaladas en la tabla del **Anexo I**.

Una vez terminado el sondeo se dejó instalado tubo de PVC ranurado con el objetivo de detectar la posible presencia de un nivel de aguas freáticas (NAF).

No obstante lo anterior, en la gran mayoría de los sondeos efectuados NO se detectó la presencia de agua en el subsuelo. Únicamente se detectó nivel de agua freática en los sondeos siguientes: SM-05 (13.2m), SM-05 selectivo (12.5m), SPT-07 (1.3 m), SPT-08 (1.2 m), S-56 (31.26 m), SP-57 (26.20 m), SP-65, y (31.26 m). Lo anterior es concordante con la geología de la zona, en la cual se reporta que los niveles freáticos se encuentran abatidos. Los niveles detectados muy probablemente corresponden a Mantos Colgados no permanentes.

En el **ANEXO III y ANEXO VI** se presentan los registros de campo y los perfiles estratigráficos de los sondeos ejecutados, respectivamente.

3.2 SONDEOS DE AVANCE CONTROLADO, (SAC).

Estos sondeos tuvieron como objetivo determinar la velocidad de avance sin muestreo, utilizando brocas tricónicas, drag, barril con broca de diamante o tungsteno, y aire o lodos de perforación para recuperación de detritos en superficie. Su principal aplicación consistió en identificar anomalías estratigráficas como grietas o cavidades subterráneas en los sitios designados. Su ubicación se presenta en el plano incluido en el **Anexo II**.

En el **Anexo IV Y Anexo VII** se presentan los registros de campo y los perfiles estratigráficos de los sondeos de avance controlado ejecutados, respectivamente.

3.3 PROSPECCIÓN GEOFISICA

Para realizar la investigación geofísica del subsuelo se utilizaron las siguientes técnicas:

- Sondeos de Vibración ambiental, (RVA).
 - Sondeos tipo Cross – Hole.
 - Refracción sísmica tipo REMI (Refraction Microtremor).
 - Georadar.
 - Tomografía eléctrica.
-

3.3.1 Sondeos de Vibración Ambiental (RVA)

El objetivo de los Sondeos de Vibración Ambiental fue determinar los niveles de vibración y la frecuencia de los pulsos dominantes en los 14 puntos situados estratégicamente a lo largo del primer tramo que considera el Proyecto del Tren Interurbano México – Toluca, con un desarrollo de aproximadamente 19 Km comprendido entre la Central de Autobuses México Poniente (Observatorio) y la Caseta de cobro de la carretera México - Toluca. A partir de las frecuencias dominantes se obtuvieron los períodos dominantes del subsuelo en los 14 sitios medidos.

Los trabajos de campo consistieron en realizar Registros de Vibración Ambiental (RVA) en 14 sitios seleccionados, distribuidos a todo lo largo del tramo en estudio, mediante registros de 5 a 25 minutos de duración, con el fin de determinar los períodos característicos en estos puntos representativos.

La **Tabla 2** siguiente muestra las coordenadas de cada **RVA** de acuerdo con el sistema UTM (DatumWGS-84 vigente desde 2014 en la República Mexicana):

TS	COORDENADA X (m)	COORDENADA Y (m)	ELEVACIÓN (msnm)
1	478 921	2144834	2302
2	478 388	2144757	2311
3	477 789	2144592	2322
4	477 322	2144199	2 339
5	476749	2143701	2 401
6	475373	2143274	2 426
7	471749	2141048	2 585
8	471062	2140544	2 633
9	469 057	2138670	2 750
10	468 465	2138028	2 789
11	467 968	2137834	2 844
12	466868	2137 853	2 879
13	466643	2136 907	2 914
14	466377	2136304	2 939

Tabla 2. Ubicación de registros de vibración ambiental (RVA)



La recolección de los registros de vibración ambiental se realizó con un sismógrafo modelo ETNA de la marca Kinematics, Número de Serie 2429, con alto rango dinámico (108 dB), con 18 bits de resolución, de 3 componentes, de 200 hasta 250 muestras/seg/canal, que por sus especificaciones es capaz de registrar valores pequeños de vibración.

Para la interpretación de los resultados se recurrió a los programas K2SAC y Geopsy, con las siguientes correcciones y procesos:

- Separación por canales de los archivos digitales de campo.
- Corrección de fondo o bias.
- Transformada de Fourier a cada una de las 3 componentes.
- Cociente espectral empleando la Técnica de Nakamura (H/V), con el fin de determinar las frecuencias dominantes (f_s) de los puntos medidos, cuyos resultados se muestran en las gráficas que constituyen el **Anexo XI**.

A partir de las frecuencias dominantes (f_s), fue posible determinar los períodos dominantes (T_s) de los sitios medidos mediante su recíproco:

$$T_s = 1 / f_s$$

Con base en los resultados obtenidos en las mediciones de vibración ambiental realizadas en el TRAMO COMPRENDIDO DEL KM. 41+150 AL 57+750 DEL PROYECTO PARA EL TREN SUBURBANO MÉXICO - TOLUCA, y los análisis de ellos, se resumen los siguientes resultados:

- Los cocientes espectrales determinados con la técnica de Nakamura en los primeros 8 puntos (TS-1 a TS-8) situados en la porción Oriente caracterizada por presentar depósitos de lahar y tobas andesíticas de la Formación Tarango, determinaron frecuencias de pulsos dominantes (f_s) para el primer modo de vibrar de 8.41 a 23.59 Hz, por lo que los períodos dominantes (T_s) varían de 0.04 a 0.12 segundos.
 - Los cocientes espectrales determinados con la técnica de Nakamura en los 6 puntos restantes (TS-9 a TS-14) situados en la porción Poniente caracterizada por presentar andesitas y dacitas de la Formación Las Cruces, determinaron frecuencias de pulsos dominantes (f_s) para el primer modo de vibrar de 11.16 a 26.35 Hz, por lo que consecuentemente los períodos dominantes (T_s) varían de 0.04 a 0.09 segundos.
 - Como se puede observar, los períodos dominantes en el primer modo de vibrar en los 14 puntos medidos son bajos (>0.15 segundos) e indirectamente indican que la roca competente e indeformable se encuentra a poca profundidad y consecuentemente el Tipo de Suelo de este primer tramo estudiado corresponde a Tipo I.
-

TS	Frecuencia del Pulso Dominante fs. (Hz)	Período Dominante Ts (segundos)
1	15.74	0.06
2	15.54	0.06
3	8.95	0.11
4	8.95	0.11
5	11.72	0.09
6	23.59	0.04
7	8.41	0.12
8	9.15	0.11
9	25.09	0.04
10	11.16	0.09
11	11.72	0.09
12	26.35	0.04
13	11.72	0.09
14	12.31	0.08

Tabla 3. Frecuencia y periodos dominantes en registros de vibración ambiental (RVA)

El reporte detallado de los sondeos RVA se presenta en el **Anexo XI** de este reporte.

3.3.2 Sondeos Cross Hole (CH), SM-21 y SM-41

Los sitios estudiados mediante estas técnicas geofísicas se ubicaron con coordenadas UTM como se indica en las siguientes fotografías:



Foto 18 SM-21: X=469,034 Y=2,134,680



Foto 19 SM-41: (X=478,326 Y=2,144,716).



Los trabajos de campo Cross Hole consistieron en utilizar el par de pozos verticales espaciados según la norma ASTM-D4428M de 4.05 m (SM-21) a 5.0 m (SM-41), y realizados expreso para tal fin a una profundidad de 40 m.

En ambos sitios (SM-21 y SM-41) se introdujo en el primer barreno (pozo de registro) un geófono de 3 componentes, el cual tuvo como función registrar las ondas sísmicas producidas a la misma profundidad en el barreno vecino (pozo de disparos) mediante impactos producidos por un dispositivo neumático.

De acuerdo con la norma ASTM-D4428M, para la realización de esta actividad en ambos pozos (de registro y disparos), y previo a la colocación del ademe de PVC, se realizó una limpieza previa con agua a fin de evitar azolves en el fondo de los mismos, relleno finalmente el espacio anular entre las paredes de los pozos y los tubos de PVC con lodos fraguantes (bentonita – cemento); esto permitió garantizar un perfecto acoplamiento entre la tubería y el macizo rocoso circundante logrando una adecuada propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo.

Los sismogramas se grabaron digitalmente, para su posterior análisis a través de una computadora portátil con que cuenta el mismo sismógrafo, para su posterior análisis a través de una computadora portátil y el empleo de los programas de cómputo SIPIK y TomTime.

Las mediciones se realizaron a cada metro de profundidad, a todo lo largo del sondeo, con el fin de determinar las velocidades de propagación y características elásticas de las diferentes capas que conforman el subsuelo del sitio estudiado.

Para la recolección de los registros sísmicos (sismogramas), se utilizó un sismógrafo digital marca Nimbus Geometrics y modelo Smart-seis de 12 canales, impresión en papel electrostático, grabación en disco y selectores de filtros, amplitudes y grado de sensibilidad (ganancias) para cada traza.

El geófono de pozo está constituido por 3 sismodetectores Mark Products de 28 Hz ensamblados ortogonalmente entre sí, los cuales captaron el arribo de las ondas sísmicas generadas por el dispositivo electro-neumático.

Las velocidades de propagación arrojadas por el ensayo de Cross Hole fueron determinadas mediante el cociente que resulta de dividir el espaciamiento que hay entre las perforaciones utilizadas (4.05 m para el SM21, y 5.0 m para el SM41) entre los tiempos de arribo anteriormente registrados en milisegundos.

Con los tiempos de arribo de los frentes de onda longitudinal " ΔT_p " y transversal " ΔT_s ", se obtuvieron las velocidades de propagación correspondientes a los estratos involucrados, mediante el empleo de las bien conocidas relaciones:

$$V_p = \Delta x / \Delta T_p$$



$$V_s = \Delta x / \Delta T_s$$

Donde Δx representa la distancia existente entre el pozo de disparos y el receptor correspondiente.

Al emplear estas ecuaciones es común que los valores difieran ligeramente de nivel a nivel debido a que la estratificación no es completamente horizontal, que los materiales del subsuelo no son perfectamente isótropos ni homogéneos.

Se determinaron los módulos elásticos dinámicos determinados a cada metro de profundidad en el Cross Hole, así como las fracciones de amortiguamiento (ξ) de los frentes de onda “ S ” determinados a partir de la ecuación:

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{A_i}{A_{i+n}} \right)$$

Donde:

- A_i = Amplitud de la ondícula mayor.
- n = número de ciclos después de la ondícula mayor en donde se presenta la ondícula de menor amplitud A_{i+n}.
- A_{i+n} = Amplitud de una ondícula menor situada uno, dos, tres o “n” ciclos después de la mayor, considerada como representativa de la disminución de la amplitud con respecto al tiempo.

A continuación, se determinaron los módulos elásticos dinámicos y fracciones de amortiguamiento de cada estrato del subsuelo, para lo cual se utilizaron las relaciones derivadas de la propagación de ondas en medios continuos como se muestra en la **Figura 8** siguiente:

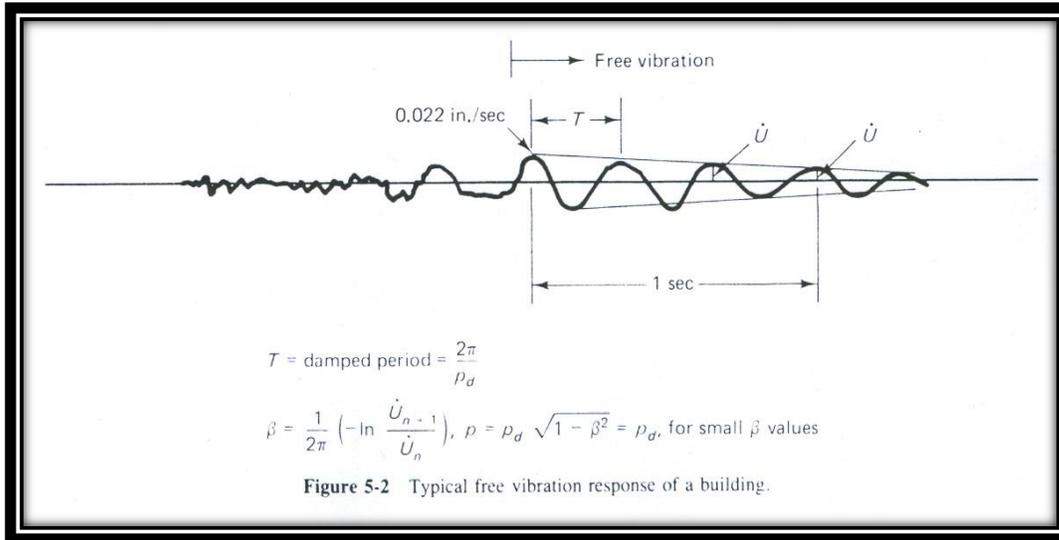


Figura 9. Propagación de Ondas en medios continuos

Estas relaciones establecen que los parámetros elásticos dinámicos de los materiales son función de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas longitudinal (V_p) y transversal (V_s) que viajan a través de él.

Con estos parámetros y los pesos volumétricos (γ) de los estratos involucrados en el sitio estudiado fue posible determinar los módulos elásticos dinámicos a partir de las siguientes ecuaciones:

Relación de Poisson

$$\nu = \frac{0.5 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

Módulo de Corte

$$G = \rho V_s^2$$

Módulo de Young

$$E = 2\rho V_s^2(1 + \nu)$$

Dónde: ρ = densidad del material = γ / g

$g = \text{aceleración de la gravedad} = 981 \text{ cm/s}^2$

Los resultados obtenidos se resumen de la siguiente manera:

PROYECTO: TREN MEXICO - TOLUCA. TIEMPOS DE ARRIBO, VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN Y MÓDULOS ELÁSTICOS DINÁMICOS ESTUDIO GEOFÍSICO DE CROSS - HOLE REALIZADO EN EL SM-21											
PROF. (m)	LITOLOGIA	OFF (m)	TAVP (ms)	TAVS (ms)	VP (m/s)	VS (m/s)	γ (Ton/m ³)	$(Vp/Vs)^2$	Poisson	Módulo de Cortante G (Ton/m ²)	Módulo de Elasticidad E (Ton/m ²)
1	LIMO Y ARCILLA	4.05	7.104411	38.094734	570	106	1.650	28.75	0.48	1,901	5,635
2	LIMO Y ARCILLA	4.05	6.828676	37.542103	593	108	1.650	30.22	0.48	1,957	5,805
3	LIMO Y ARCILLA	4.05	6.552941	36.989471	618	109	1.650	31.86	0.48	2,016	5,984
4	LIMO Y ARCILLA	4.05	6.277205	36.43684	645	111	1.650	33.69	0.48	2,078	6,170
5	LIMO Y ARCILLA	4.05	6.00147	35.884209	675	113	1.650	35.75	0.49	2,142	6,366
6	LIMO Y ARCILLA	4.05	5.725735	35.331577	707	115	1.650	38.08	0.49	2,210	6,570
7	LIMO Y ARCILLA	4.05	5.45	34.778946	743	116	1.650	40.72	0.49	2,281	6,785
8	LIMO Y ARCILLA	4.05	5.326252	32.033878	760	126	1.650	36.17	0.49	2,688	7,989
9	LIMO Y ARCILLA	4.05	5.09615	29.669174	795	137	1.650	33.89	0.48	3,134	9,307
10	LIMO Y ARCILLA	4.05	4.866049	25.932352	832	156	1.650	28.40	0.48	4,102	12,158
11	LIMO Y ARCILLA	4.05	4.635948	22.043697	874	184	1.650	22.61	0.48	5,677	16,770
12	LIMO Y ARCILLA	4.05	4.405847	18.155043	919	223	1.650	16.98	0.47	8,370	24,586
13	LIMO Y ARCILLA	4.05	4.175745	14.266386	970	284	1.650	11.67	0.45	13,555	39,395
14	LIMO Y ARCILLA	4.05	3.945644	12.888	1026	314	1.650	10.67	0.45	16,609	48,110
15	LIMO Y ARCILLA	4.05	3.715543	12.287999	1090	330	1.650	10.94	0.45	18,271	52,974
16	ARCILLA CON GRAVAS	4.05	3.485441	11.687999	1162	347	1.850	11.25	0.45	22,643	65,719
17	ARCILLA CON GRAVAS	4.05	3.25534	11.087999	1244	365	1.850	11.60	0.45	25,160	73,106
18	ARCILLA ARENOSA	4.05	3.467632	10.487999	1168	386	1.800	9.15	0.44	27,361	78,724
19	ARCILLA ARENOSA	4.05	3.502138	11.012415	1156	368	1.800	9.89	0.44	24,817	71,659
20	ARCILLA ARENOSA	4.05	3.536644	11.152971	1145	363	1.800	9.94	0.44	24,195	69,881
21	ARCILLA ARENOSA	4.05	3.57115	11.293528	1134	359	1.800	10.00	0.44	23,597	68,169
22	ARCILLA ARENOSA	4.05	3.605656	11.434084	1123	354	1.800	10.06	0.44	23,020	66,519
23	ARCILLA ARENOSA	4.05	3.640162	11.57464	1113	350	1.800	10.11	0.45	22,465	64,928
24	ARCILLA ARENOSA	4.05	3.674668	11.715197	1102	346	1.800	10.16	0.45	21,929	63,393
25	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.709174	11.855753	1092	342	1.900	10.22	0.45	22,601	65,352
26	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.74368	11.996309	1082	338	1.900	10.27	0.45	22,075	63,843
27	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.778187	12.136866	1072	334	1.900	10.32	0.45	21,567	62,386
28	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.812693	12.277422	1062	330	1.900	10.37	0.45	21,076	60,977
29	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.847199	12.417978	1053	326	1.900	10.42	0.45	20,601	59,616
30	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.881705	12.558535	1043	322	1.900	10.47	0.45	20,143	58,300
31	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.916211	12.699091	1034	319	1.900	10.52	0.45	19,699	57,027
32	ARENA MEDIA ARCILLOSA	4.05	3.950717	12.839647	1025	315	1.900	10.56	0.45	19,270	55,796
33	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA	4.05	3.985223	12.980204	1016	312	1.950	10.61	0.45	19,351	56,040
34	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA	4.05	4.019729	13.12076	1008	309	1.950	10.65	0.45	18,939	54,855
35	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA	4.05	4.054235	13.261316	999	305	1.950	10.70	0.45	18,540	53,708

Tabla 4. Resultados Cross Hole SM-21.

PROYECTO: TREN MEXICO - TOLUCA.
TIEMPOS DE ARRIBO, VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN Y MÓDULOS ELÁSTICOS DINÁMICOS
ESTUDIO GEOFÍSICO DE CROSS - HOLE REALIZADO EN EL SM-41

PROF. (m)	LITOLOGIA	OFF (m)	TAVP (ms)	TAVS (ms)	VP (m/s)	VS (m/s)	γ (Ton/m ³)	(Vp/Vs) ²	Poisson	Módulo de Cortante G (Ton/m ²)	Módulo de Elasticidad E (Ton/m ²)
1	LIMO CON ARENA FINA Y GRAVAS	3.00	3.039582	8.643929	987	347	1.750	8.09	0.43	21,488	61,431
2	LIMO CON ARENA FINA Y GRAVAS	3.00	1.563684	5.10685	1919	587	1.750	10.67	0.45	61,561	178,314
3	LIMO CON ARENA FINA Y GRAVAS	3.00	1.318726	4.641558	2275	646	1.750	12.39	0.46	74,522	217,022
4	GRAVAS EMPACADAS EN LIMO	3.00	1.293666	3.741673	2319	802	2.000	8.37	0.43	131,061	375,387
5	LIMO CON ARENA MEDIA Y GRAVILLAS	3.00	1.266805	3.944676	2368	761	2.000	9.70	0.44	117,918	340,195
6	LIMO CON ARENA MEDIA Y GRAVILLAS	3.00	1.209578	3.841754	2480	781	2.000	10.09	0.44	124,321	359,283
7	LIMO CON ARENA MEDIA Y GRAVILLAS	3.00	1.183565	3.682505	2535	815	2.000	9.68	0.44	135,306	390,331
8	TRAQUITA, ARENA CEMENTADA	3.00	1.169517	3.709333	2565	809	2.000	10.06	0.44	133,356	385,347
9	TRAQUITA, ARENA CEMENTADA	3.00	1.136743	3.682181	2639	815	2.000	10.49	0.45	135,330	391,733
10	TRAQUITA, ARENA CEMENTADA	3.00	0.863406	3.655029	3475	821	2.000	17.92	0.47	137,348	403,926
11	LIMO CON ARENA FINA	3.00	0.958817	2.588237	3129	1159	2.100	7.29	0.42	287,597	817,045
12	LIMO CON ARENA FINA	3.00	0.944808	2.791625	3175	1075	2.100	8.73	0.44	247,217	709,671
13	LIMO CON ARENA FINA Y GRAVILLAS	3.00	0.930798	2.855603	3223	1051	2.100	9.41	0.44	236,264	680,705
14	LIMO CON ARENA FINA Y GRAVILLAS	3.00	0.916789	2.919582	3272	1028	2.100	10.14	0.45	226,022	653,342
15	LIMO CON ARENA MEDIA Y GRAVILLAS	3.00	0.902779	2.559623	3323	1172	2.100	8.04	0.43	294,063	840,412
16	LIMO CON ARENA MEDIA Y GRAVILLAS	3.00	0.899627	2.577832	3335	1164	2.100	8.21	0.43	289,924	829,564
17	LIMO CON ARENA MEDIA Y GRAVILLAS	3.00	0.898198	2.577832	3340	1164	2.100	8.24	0.43	289,924	829,709
18	FRAGMENTOS DE BASALTO	3.00	0.89677	2.577832	3345	1164	2.150	8.26	0.43	296,827	849,612
19	ARENA MEDIA POCO LIMOSA	3.00	0.895342	2.740947	3351	1095	2.100	9.37	0.44	256,443	738,698
20	ARENA MEDIA POCO LIMOSA	3.00	0.893914	2.715439	3356	1105	2.100	9.23	0.44	261,284	752,095
21	ARENA MEDIA CON GRAVILLAS LIMOSAS	3.00	0.892485	2.689931	3361	1115	2.100	9.08	0.44	266,263	765,852
22	ARENA MEDIA	3.00	0.891057	2.502517	3367	1199	2.100	7.89	0.43	307,637	878,246
23	ARENA MEDIA	3.00	0.889629	2.564127	3372	1170	2.100	8.31	0.43	293,031	838,992
24	ARENA MEDIA	3.00	0.857207	2.601513	3500	1153	2.100	9.21	0.44	284,669	819,337
25	ARENA MEDIA	3.00	0.845621	2.638899	3548	1137	2.100	9.74	0.44	276,661	798,322
26	ARENA MEDIA	3.00	0.834036	2.425621	3597	1237	2.100	8.46	0.43	327,451	938,449
27	ARENA MEDIA CON GRAVAS	3.00	0.82245	2.713671	3648	1106	2.100	10.89	0.45	261,624	758,411
28	ARENA MEDIA CON GRAVAS	3.00	0.810865	2.690125	3700	1115	2.100	11.01	0.45	266,224	772,068
29	ARENA MEDIA CON GRAVAS	3.00	0.799279	2.558882	3753	1172	2.100	10.25	0.45	294,234	850,890
30	BOLEOS	3.00	0.809718	2.427639	3705	1236	2.150	8.99	0.44	334,691	962,177
31	ARENA MEDIA	3.00	0.85414	2.296395	3512	1306	2.200	7.23	0.42	382,739	1,086,766
32	ARENA MEDIA	3.00	0.886359	2.160823	3385	1388	2.200	5.94	0.40	432,273	1,209,370
33	ARENA MEDIA	3.00	0.87291	2.432162	3437	1233	2.200	7.76	0.43	341,202	973,156
34	ARENA MEDIA	3.00	0.774195	2.456722	3875	1221	2.200	10.07	0.44	334,414	966,369
35	LIMO CEMENTADO	3.00	0.783774	2.30354	3828	1302	2.200	8.64	0.43	380,369	1,091,306
36	LIMO CEMENTADO	3.00	0.793352	2.19898	3781	1364	2.200	7.68	0.43	417,401	1,189,743
37	LIMO CEMENTADO	3.00	0.802931	2.026368	3736	1480	2.200	6.37	0.41	491,541	1,383,073
38	LIMO CEMENTADO	3.00	0.81251	1.989861	3692	1508	2.200	6.00	0.40	509,742	1,427,233
39	LIMO ARENOSO	3.00	0.792214	2.107294	3787	1424	2.200	7.08	0.42	454,513	1,288,729

Tabla 5. Resultados Cross Hole SM-41.

Los resultados detallados de los sondeos Cross Hole se muestran en el **Anexo XI** de este informe.

3.3.3 Tendidos de Sísmica Pasiva, REMI

La técnica geofísica de Refracción por Microtremores (REMI) tuvo un desarrollo de 72 m y fue aplicada en el sitio ubicado entre los sondeos mixtos denominados SM-27 y SM-27A ejecutados a 40 m de profundidad. Entre ambos sondeos y de manera colineal a ellos, se realizó el tendido sísmico aplicando la técnica REMI (Refracción por Microtremores).

Este trabajo tuvo como objetivos específicos los siguientes:

- Determinar las velocidades de las ondas transversales "S", así como los espesores de los diferentes estratos presentes en el subsuelo en los primeros 20 a 30 m de profundidad.
- Determinar el Tipo de Suelo.
- Correlacionar los espesores, velocidades de propagación y los módulos elásticos dinámicos obtenidos con las características litológicas y geotécnicas de los diferentes paquetes de suelos y rocas que constituyen la estratigrafía del sitio.



Foto 20 Ubicación de Sísmica Pasiva REMI

Los Tendidos de Sísmica Pasiva utilizando las técnicas MASW (Multi-channel of Surface Wave) o REMI

(Refraction Microtremor), permiten determinar entre otros los espesores y velocidades de transversales o de cortante "Vs" de los diferentes paquetes litológicos que constituyen la estratigrafía somera desde superficie y hasta 15 a 30 m de profundidad, así como estimar su competencia mecánica. Su fundamento teórico se basa en que además de las ondas de cuerpo longitudinales (Vp) y transversales (Vs), existen otro tipo de ondas que se propagan de forma cilíndrica en el subsuelo somero cerca de la superficie, por lo que se conocen como ondas superficiales. Estas se presentan cuando existe un contraste muy grande entre las propiedades elásticas de dos medios, como puede ser el suelo y el aire que se encuentra sobre él, o el suelo marino y el espesor de agua que lo cubre.

Los trabajos de campo, tanto del MASW como del REMI, consisten en colocar en forma colineal puntos de excitación sísmica del terreno, conocidos como puntos de tiro (PT), y pequeños transductores con frecuencias de corte de 2 a 4.5 Hz, (geófonos), que registran las señales provenientes del subsuelo y las envían a un aparato que las amplifica y registra digitalmente denominado sismógrafo.



Foto 21 Geófono de 4.5 Hz.

Generalmente, los MASW y/o REMI se realizan con 15 PT (dos en cada uno de los extremos a distancias de aproximadamente 10 y 1 % de la longitud del tendido del geófono extremo más cercano y 11 intermedios ubicados en el punto medio entre los geófonos), así como 12 ó 24 geófonos detectores separados en intervalos de 2 a 8 m con el fin de grabar al menos 1 minuto con 1000 muestras/segundo/canal para alcanzar profundidades mínimas de investigación de 20 a 30 m, suficiente para caracterizar el subsuelo somero del sitio. El arreglo geométrico colineal desarrollado en campo se muestra en la siguiente fotografía.



Foto 22 Arreglo geométrico colineal

Dependiendo de los arreglos de geófonos y del número de fuentes empleadas, se pueden construir modelos en una o dos dimensiones. El software especializado (Seisimager, Geogiga, Geopsy, etc.) incluye módulos para el estudio de ondas superficiales con fuente activa en una y dos dimensiones.

En el caso de dos dimensiones, las trazas son ordenadas según el punto medio común que une una fuente con receptor, se construyen las curvas de dispersión correspondientes y se invierten para finalmente obtener un modelo en dos dimensiones con celdas de velocidad transversal constante.

Por último, cabe comentar que la presencia de estructuras en el subsuelo ocasiona distorsión o dispersión a los diferentes frentes de onda que lo atraviesan, propiciado con esto cambio sustancial en su forma y por consiguiente en su contenido de frecuencias, las cuales tienden a ser de menor frecuencia y amplitud por el filtrado que producen las discontinuidades.

Esta diferencia es significativa en presencia de oquedades importantes, tanto por su tamaño como por su profundidad, razón por la cual se realizará el análisis en frecuencia de todos los sismogramas recolectados. Los espectros de potencia, así obtenidos se grafican y configuran bidimensionalmente para los puntos extremos a fin visualizar desde diferentes fuentes y con otra perspectiva las zonas de debilidad en el subsuelo somero.

Los resultados confiables arrojados del procesamiento muestran que los valores de velocidad de propagación de onda transversal V_s se sitúan entre los 200 y 300 m/s.



El comportamiento de la velocidad V_s aumenta a partir de los 6 a 7 metros de profundidad provocado por la presencia de material más compacto, lo que favorece la propagación de las ondas.

Esta observación es consistente con los datos aportados por los sondeos SM-27 y 27-A ubicados próximos al tendido, ya que muestran la presencia de estratos conformados por mezclas de arenas y gravas con presencia de finos, con más de 50 golpes en el ensayo de penetración estándar para penetraciones de los primeros 5 a 15 cm del muestreador.

Por último, cabe comentar que la presencia de estructuras en el subsuelo ocasiona distorsión o dispersión a los diferentes frentes de onda que lo atraviesan, propiciando con esto cambio sustancial en su forma y por consiguiente en su contenido de frecuencias, las cuales tienden a ser de menor frecuencia y amplitud por el filtrado que producen las discontinuidades.

Los resultados detallados de los tendidos REMI se presentan en el **Anexo XI**.

3.3.4 Georadar y Tomografía eléctrica. Mapeo de anomalías zona avenida vasco de Quiroga y cruce con Autopista México-Marquesa

Con el objetivo de realizar un mapeo de posibles anomalías o interferencias por debajo de la superficie en una sección de la Avenida Vasco de Quiroga y cruce con la Autopista México-Marquesa, se realizaron prospecciones geofísicas aplicando el método electromagnético en su modalidad de Georadar y mediante el método eléctrico en su modalidad de tomografía eléctrica.

Los objetivos buscados al emplear estas técnicas de prospección fueron:

- Realizar un levantamiento electromagnético en un tramo de la carretera México-Marquesa, para la delimitación y ubicación de posibles estructuras que se encuentren por debajo de esta sección de la carretera.
 - Obtener radagramas del subsuelo para delimitar estructuras asociadas a tuberías o zapatas de cimentación.
 - Ubicar en planta los resultados obtenidos a partir del método del Georadar.
 - Determinar la distribución de resistividades en el medio mediante el Método de Resistividad Eléctrica.
 - Determinar estratos de igual resistividad y asociarlos con la saturación de fluidos, así como su permeabilidad.
-



- Calcular las profundidades y espesores de las capas permeables.

Las mediciones realizadas en el trabajo de campo generaron registros denominados radagramas. Estas líneas deben ser localizadas con la mayor exactitud posible de acuerdo a un mapeo de campo y con la ayuda de la localización de la cuadrícula trazada por la brigada de geofísica.

La interpretación de estos datos en la mayoría de las ocasiones es algo compleja debido a que existen múltiples parámetros que afectan la señal como:

- Efectos de reflexiones múltiples
- Ruido e interferencias en la señal
- Atenuaciones

El procesamiento de los datos regularmente se basa en el uso de filtros “pasa altos y pasa bajos”, dándole en algunos casos “ganancias” a la señal (reforzamiento para compensar la atenuación que se da en campo).

Los datos crudos de campo son visualizados y procesados con ayuda del software RAMAC para Windows, dentro de este programa se aplican una serie de filtros para tratar de eliminar la mayor cantidad de ruido posible en los radagramas y destacar los objetivos a alcanzar. También se aplicó una normalización y diferentes correcciones para poder determinar en mayor medida las profundidades de los reflectores, aplicando una paleta de colores a las diferentes amplitudes; cabe mencionar que como los datos son tomados en tiempo contra distancia horizontal, se les debe aplicar una inversión para así obtener una pseudo-profundidad.

La tomografía eléctrica con la metodología de “Dipolo - Dipolo”, consta de varios pasos para la adquisición de datos in situ. El primer paso, consiste en ubicar la línea eléctrica en el sitio de mayor interés, para poder observar bajo la superficie, los objetivos deseados. El segundo paso corresponde a la colocación del cable multicontacto o cable inteligente. El cual consta con conexiones espaciadas cada cinco metros. Posteriormente se colocan los electrodos (varillas de acero inoxidable de 35 centímetros de largo), que se entierran firmemente en el terreno natural, quedando aseguradas a las terminales del cable por medio de ligas de hule para lograr un adecuado contacto. El tercer paso, consiste en conectar el cable hacia la consola del Equipo Ares, realizando la resistencia eléctrica de los electrodos hacia el terreno natural; en caso de ser necesario se debe de verter agua con alto contenido de sal, para mejorar el contacto entre el electrodo y el terreno natural.

Los resultados obtenidos con estos métodos son los siguientes:

Línea Georadar 1.

Se observa un primer estrato a lo largo de la línea de Georadar asociable a una losa de asfalto de 0.3 m de espesor, con un comportamiento homogéneo. El segundo estrato que subyace hasta 0.50m de profundidad corresponde a material removido poco compacto. Conformando el tercer estrato hasta 0.9 m



de profundidad se muestra un material poco compacto. El cuarto estrato, que va de 0.90 a 2.60 m de profundidad, es un poco más compacto en relación al tercer estrato de terreno natural. Finalmente el quinto estrato se extiende hasta 9.0 m de profundidad y está formado por un material mucho más compacto a comparación de los tres estratos de terreno natural anteriores.

De 0+000 a 0+018 observamos anomalías. En efecto entre los cadenamientos 0+005 a 0+009 aparece delimitada una estructura anómala al medio que la rodea, que en los cadenamientos 0+008 y 0+009 se asocian a posibles tuberías de concreto (no se observa tan definida como las anomalías generadas por estructuras de acero). Este tipo de anomalía se vuelve a presentar entre el cadenamiento 0+016 y 0+017, solo que ésta se muestra más somera respecto a la anterior. En el cadenamiento 0+009 a 0+013 se observa una zona de con material saturado. De 0+028 a 0+062 se observa otra anomalía, que entre los cadenamientos 0+058 a 0+059 se asocia a posible tubería o alcantarillado. De 0+068 a 0+081 se observan tres anomalías; dos someras en el cadenamiento 0+069 a 0+070 y 0+080 a 0+081 que se asocian a posibles tuberías de concreto; la tercera anomalía está ubicada entre el cadenamiento 0+071 a 0+072 a una profundidad un poco mayor que las anteriores, asociada a una posible tubería.

Línea Georadar 2.

De 0+000 a 0+008 está compuesta por cinco capas o estratos. El primer estrato queda formado por la plancha de asfalto con una profundidad de 0.30m, seguido hasta 0.6 m de profundidad por una capa compuesta por terreno natural poco compacto. El tercer estrato queda formado por material más compacto al anterior alcanzando hasta 1.30m de profundidad sobre el perfil. El cuarto estrato queda formado por material relativamente compacto hasta 2.30m. Finalmente se identificó hasta los 9 m una quinta capa. Cabe mencionar que a partir del segundo estrato se observa que el material tiene un contenido de agua importante. Se observan discontinuidades del terreno a lo largo de todo el cadenamiento, posiblemente generadas por alguna remoción de material.

Línea Georadar 3.

De 0+000 a 0+010 se encuentra constituida por 5 capas o estratos. El primero lo constituye una losa asfáltica con 0.3m de espesor. El segundo estrato está formado por terreno natural poco compacto de 0.1 m de espesor. El tercer estrato queda formado por material más compacto y alcanza hasta 1.60 m de profundidad sobre el perfil. El cuarto estrato queda formado por material compacto hasta 2.3 m de profundidad. Finalmente se tiene un quinto estrato que finaliza hasta los 9 m de profundidad. Cabe mencionar que a partir del segundo estrato se observa una humedad significativa en el material. Se observan discontinuidades del terreno a lo largo de todo el cadenamiento, posiblemente generadas por alguna remoción de material.

Línea Georadar 4.

De 0+000 a 0+010, compuesta por 5 capas o estratos, igualmente con una losa asfáltica de 0.3m de espesor, seguida hasta 0.6 m por terreno natural poco compacto. De 0.6 a 1.3 m de profundidad se tiene el tercer



estrato que está formado por material más compacto al anterior. El cuarto estrato queda formado por material compacto y alcanza hasta 2.30 m. Finalmente se tiene el quinto estrato que alcanza hasta los 9 m de profundidad. Se observan discontinuidades del terreno a lo largo de todo el cadenamiento, posiblemente generadas por alguna remoción de material.

Línea Georadar 5.

De0+000 a 0+010. Compuesta por 5 capas o estratos, donde el primer estrato queda formado por la plancha de asfalto con una profundidad de 0.30 m. Seguido del segundo estrato formado por terreno natural y que va de la profundidad de 0.30 hasta 0.60 m observándose como un estrato poco compacto. El tercer estrato queda formado por material más compacto al anterior iniciando a la profundidad de 0.60 m y finalizando a 1.30 m de profundidad sobre el perfil. El cuarto estrato queda formado por material compacto con una profundidad de 1.20 m y hasta los 2.30 m. Finalmente el quinto estrato que inicia a la profundidad de 2.30 m y finaliza hasta los 9.00 m de profundidad. Cabe mencionar que a partir del segundo estrato se puede observar que es un material visiblemente húmedo.

Solo se alcanzan a observar discontinuidades del terreno a lo largo de todo el cadenamiento, posiblemente generadas por alguna remoción de material o a la poca compactación que presentaron los estratos del sitio y un posible valor alto de humedad en el cadenamiento de 0+000 a 0+001.

Línea Georadar 6.

De0+000 a 0+008. Compuesta por 5 capas o estratos, donde el primer estrato queda formado por la plancha de asfalto con una profundidad de 0.30 m, seguida hasta 0.6 m por terreno natural poco compacto. El tercer estrato queda formado por material más compacto al anterior alcanzando 1.10 m de profundidad sobre el perfil. El cuarto estrato queda formado por material compacto hasta 2.30m. Finalmente el quinto estrato alcanza hasta los 9 m de profundidad. Cabe mencionar que a partir del segundo estrato se puede observar que es un material visiblemente húmedo. Solo se alcanzan a observar discontinuidades del terreno a lo largo de todo el cadenamiento, posiblemente generadas por alguna remoción de material o a la poca compactación que presentaron los estratos del sitio.

Tomografías Eléctricas.

Tomografía 1. Observamos dos zonas de diferente resistividad (definidas como unidades geoeléctricas), la primera con valores de resistividad que van de los 90 a los 150 hm-m posiblemente representa un paquete de arenas-arcillosas. La siguiente unidad tiene valores que oscilan entre los 20 y 300 Ohm-m. Estas unidades no están distribuidas de manera uniforme, por tal motivo las podemos encontrar desde la superficie hasta lo profundo del perfil. A una profundidad comprendida entre 6 y 10 metros se observa una anomalía posiblemente asociada a un colector por el comportamiento continuo que presenta.



Tomografía 2. Observamos dos zonas de diferente resistividad, la primera con valores de resistividad que van de los 90 a los 1500 Ohm-m que posiblemente representa un paquete de arenas-arcillosas. La siguiente unidad tiene valores que oscilan entre los 20 y 60 Ohm-m. Estas unidades no están distribuidas de manera uniforme, por tal motivo las podemos encontrar desde la superficie hasta lo profundo del perfil. Se observa una anomalía entre 6 y 13 m de profundidad con valores altos de resistividad que podría asociarse a un colector.

Tomografía 3. Observamos dos zonas de diferente resistividad, la primera con valores de resistividad que van de los 90 a los 150 Ohm-m, que posiblemente representa un paquete de arenas-arcillosas. La siguiente unidad tiene valores que oscilan entre los 20 y 60 Ohm-m. Estas unidades no están distribuidas de manera uniforme, por tal motivo las podemos encontrar desde la superficie hasta lo profundo del perfil. Se alcanzan a observar anomalías representadas por valor altos de resistividad a lo largo del perfil de esta tomografía que pueden asociarse a material poco compacto y a algunas alcantarillas atravesadas por la línea de tomografía.

Es importante señalar que por tratarse de un método indirecto, y por las condiciones del medio, el porcentaje de certidumbre en la prospección es de un 85%. La ubicación de las anomalías asociadas a las estructuras de concreto, tiene una certidumbre del mismo orden. Por tratarse un método electromagnético, la exploración de ductos o tuberías de materiales de poco contraste electromagnético- No metálicos-está limitada.

En el **Anexo XI** se presentan los resultados detallados derivados de esta prospección geofísica.

3.3.5 Exploración Geofísica para determinar infraestructura hidráulica en el subsuelo de la presa Tacubaya.

Aplicando el método de Tomografía eléctrica, con el método Dipolo - Dipolo, se buscó distinguir o reconocer elementos geológicos que se encuentran a una cierta profundidad mediante el contraste de propiedades físicas de los materiales, buscando establecer dentro de la zona de la Presa Tacubaya zonas anómalas que permitieran caracterizar y determinar el límite de la cortina, dentro y fuera de vaso, así como la infraestructura asociada a la presa.

El sitio de estudio se encuentra en la calle de Artificios, en las inmediaciones de la Presa Tacubaya en la Delegación Álvaro Obregón cuya imagen panorámica se presentan en la siguiente imagen.



Foto 23 Presa Tacubaya. Lugar de estudio

Se realizaron cinco líneas de tomografía eléctrica dipolo-dipolo de diferente longitud, con espaciado eléctrico de 5m. La distribución de las líneas en el terreno se muestra en la imagen satelital siguiente.



Foto 24 Distribución de líneas de estudio en el terreno

Como resultado del análisis e interpretación de la información obtenida en el estudio geofísico de resistividad, se determinó que no existe evidencia de la presencia de las paredes de la cortina de la presa Tacubaya, ni infraestructura asociada a ella a la distancia donde se realizaron las líneas de tomografía eléctrica (**Tabla 6**).

LINEA DE TOMOGRAFÍA	DISTANCIA AL EJE DE LA CORTINA	INICIO	FIN	RESULTADO
DIPOLO 1	19.30 metros	477515.00 mE 2144545.00 mN	477570.00 mE 2144476.00 mN	No hay evidencia
DIPOLO 2	113.5 metros	477435.00 mE; 2144517.00 mN	477460.00 mE; 2144451.00 mN	No hay evidencia
DIPOLO 3	Sobre el eje	477531.00 mE; 2144556.00 mN	477614.00 mE; 2144450.00 mN	-----
DIPOLO 4	25 metros	477603.00 mE; 2144503.00 mN	477691.00 mE; 2144551.00 mN	No hay evidencia
DIPOLO 5	33 metros	477569.00 mE; 2144560.00 mN	477635.00 mE; 2144484.00 mN	No hay evidencia

Tabla 6. Distribución y resultados de líneas de estudio. Subsuelo de la Presa Tacubaya.

En los modelos que se muestran en el **ANEXO XI** se representa la distribución lineal de resistividad verdadera del subsuelo representada por una escala de colores, cada color refiere un valor, que interpolado, permite caracterizar su ubicación en el subsuelo. Se trata de gráficos de profundidad (m) vs longitud (m) con datos interpolados de resistividad (ohm*m) y corrección en la variación de altura del terreno con respecto al punto más bajo en superficie.

3.3.6 Exploración Geofísica. Tomografía Eléctrica en Acueducto Lerma.

Aplicando el método de Tomografía eléctrica, con el método Dipolo - Dipolo, se buscó distinguir o reconocer elementos geológicos que se encuentran a una cierta profundidad mediante el contraste de propiedades físicas de los materiales, buscando establecer en la Avenida Vasco de Quiroga zonas anómalas que permitieran caracterizar y determinar la existencia, profundidad y dirección del Acueducto Lerma.

El sitio de estudio se encuentra en la Avenida Vasco de Quiroga, Santa Fe Cuajimalpa, cuya imagen panorámica se presentan a continuación:



Foto 25 Avenida Vasco de Quiroga. Lugar de estudio

Se realizaron tres líneas de tomografía eléctrica dipolo-dipolo de diferente longitud, con espaciado eléctrico de 5m. La distribución de las líneas en el terreno se muestra en la imagen satelital siguiente.



Foto 26 Distribución de líneas de estudio en el terreno

Como resultado del análisis e interpretación de la información obtenida en el estudio geofísico de resistividad, se determinaron los puntos donde existe evidencia de la ubicación del Acueducto Lerma (**Tabla 7**).

LINEA DE TOMOGRAFIA	DISTANCIA AL INICIO DE LA LINEA	PROFUNDIDAD ESTIMADA
DIPOLO 1	-----	No hay evidencia
DIPOLO 2	Entre 63 y 65 metros	7 metros
DIPOLO 3	Entre 114 y 118 metros	6 metros

Tabla 7. Distribución y resultados de líneas de estudio. Acueducto Lerma.



Foto 27 Proyección en imagen satelital de la posible trayectoria del Acueducto Lerma.

Se recomienda corroborar los resultados con una inspección visual, así como la realización de por lo menos otra línea de tomografía eléctrica con la finalidad de verificar la trayectoria del acueducto, como se muestra en la foto siguiente.

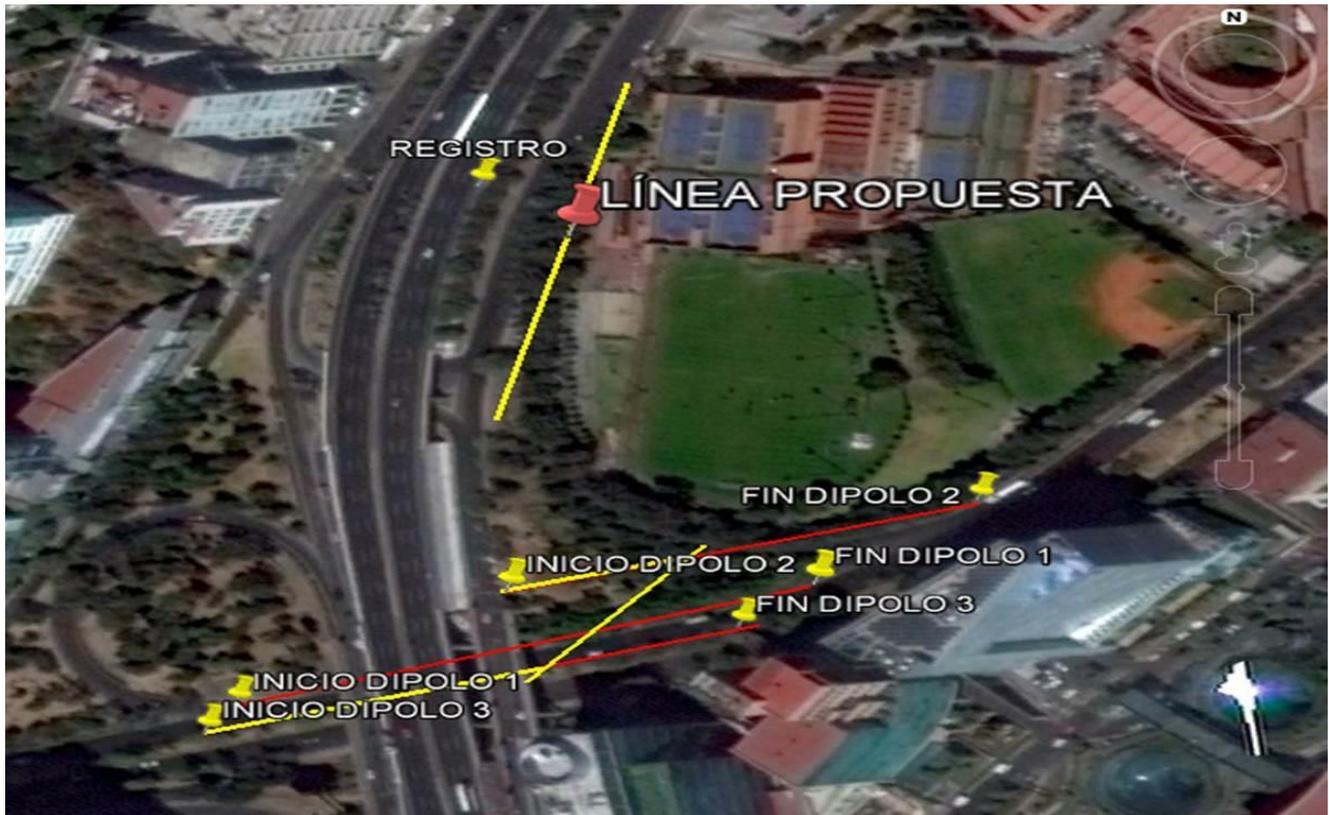


Foto 28 Línea adicional propuesta. Acueducto Lerma.

En los modelos que se muestran en el **ANEXO XI** se representa la distribución lineal de resistividad verdadera del subsuelo representada por una escala de colores, cada color refiere un valor, que interpolado, permite caracterizar su ubicación en el subsuelo. Se trata de gráficos de profundidad (m) vs longitud (m) con datos interpolados de resistividad ($\text{ohm}\cdot\text{m}$) y corrección en la variación de altura del terreno con respecto al punto más bajo en superficie.

3.3.7 Exploración Geofísica. Cruce del tren interurbano y la carretera México-La Marquesa (km 45+722 al 46+764).

En este sitio se realizaron 10 tendidos REMI (refraction microtremor) y 7 tendidos de sísmica refracción de 60 m de longitud (6 se realizaron de forma continua sobre el terraplén de mayor altura y uno sobre el terraplén de menor elevación).

El objetivo de estos trabajos fue determinar el espesor del cuerpo de terraplén, determinando la secuencia estratigráfica del sitio, midiendo la velocidad de onda sísmica primaria (o de compresión) y trasversal (o de

corte) de los materiales presentes en el subsuelo. Mediante la conjunción de los resultados obtenidos por ambos métodos se estimaron los módulos elásticos dinámicos de los materiales que conforman los terraplenes así como de sus rocas basales.

El sitio en estudio se localiza sobre el cuerpo "B" de la autopista México-La Marquesa, entre el km 45+722 y el km 46+764 del trazo del tren interurbano México Toluca (el origen del kilometraje se localiza en Toluca), como se muestra en la imagen siguiente donde se aprecia la autopista sobre la fotogrametría original; este último supuesto se corrobora en la imagen de la carta geológica de Inegi E14-A39 del año de 1978, la cual fue obtenida por un vuelo aerofotogrametrico del año de 1970.

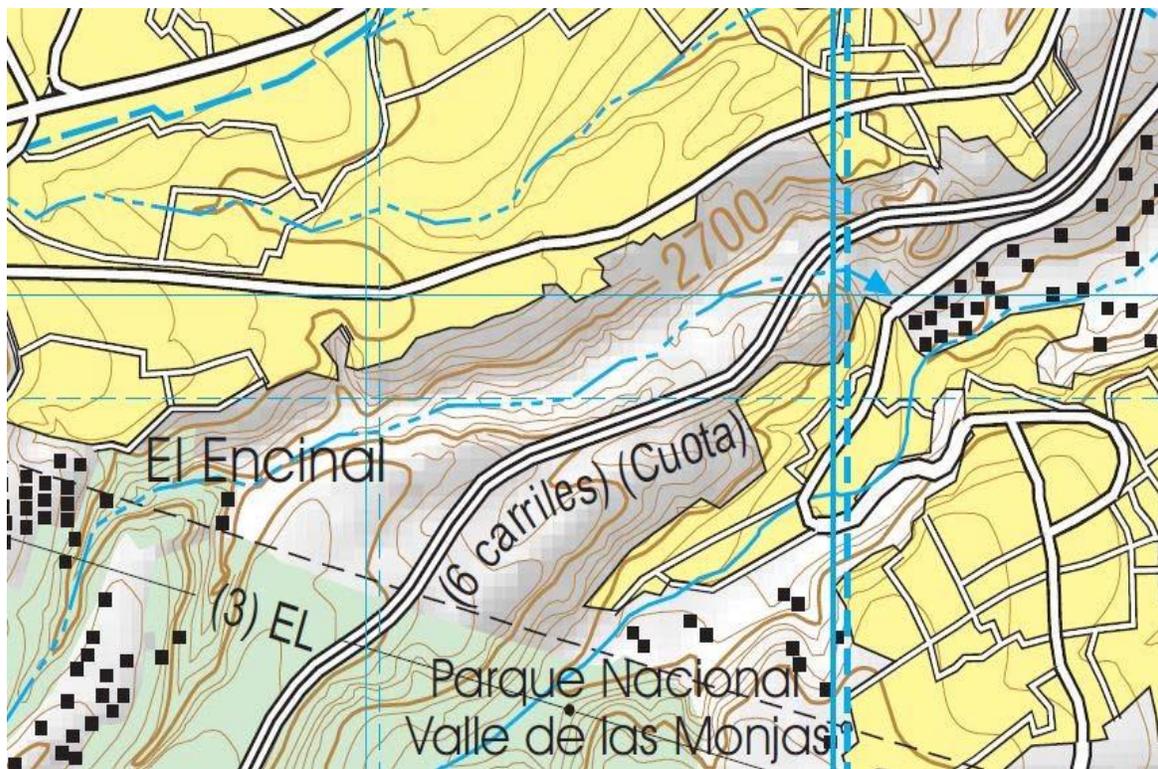


Figura 10. Sitio en estudio.

Como se puede observar en la geología de Inegi de 1978, en la zona se presenta básicamente depósitos volcánicos, predominando las rocas tobaceas y aglomeraticas de la Formación Tarango, aunque marginalmente se presentan andesitas terciarias al sur de la zona, como un afloramiento restringido.

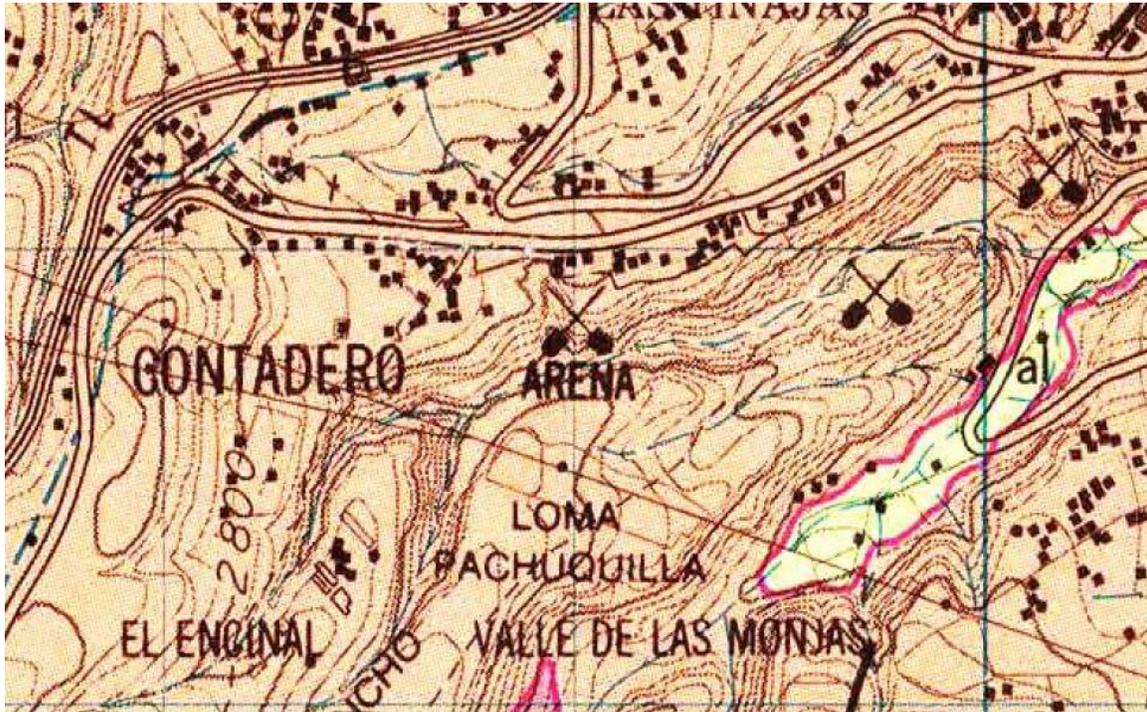


Figura 11. Acercamiento de la Geología del área en estudio, (INEGI).

Para evaluar los resultados de estos estudios debe considerarse que se obtuvieron sobre dos terraplenes, efectuándose un perfil continuo desde el km 45+722 al km 46+764, así como en un tramo intermedio de terreno natural con desarrollo de 80 a 100 m. La descripción de los resultados se realiza en el sentido del cadenamamiento del trazo de Tren Interurbano Toluca México, como se muestra en la imagen satelital siguiente:



Foto 29. Ubicación de los terraplenes estudiados

Los módulos elásticos determinados son los siguientes:

Para el terraplén 1:

TENDIDOS 1 - 6

CAPA	PROF. (m)	Velocidad longitudinal (m/s)	Velocidad trasversal (m/s)	Densidad (g/cm ³)	Relacion de Poisson	Módulos Dinámicos (Mpa)	
						de corte	de Young
1		410	233	1.6	0.26	86.8	219.1
2		1427	550	1.98	0.41	598.8	1691.8
3							
4							

Tabla 8. Módulos Elásticos. Cruce trazo tren con autopista México La Marquesa (KM 45+722 a 46+764)

Para el terraplén 2:

TENDIDOS 8 – 10

CAPA	PROF. (m)	Velocidad longitudinal (m/s)	Velocidad trasversal (m/s)	Densidad (g/cm ³)	Relacion de Poisson	Módulos Dinámicos (Mpa)	
						de corte	de Young
1		440	246	1.73	0.27	104.7	266.4
2		2190	791	1.96	0.42	1225.9	3493.9
3							
4							

MPa = Mega Pascales; 1 Pascal = 1 Newton/m²

Tabla 9. Módulos Elásticos. Cruce trazo tren con autopista México La Marquesa (KM 45+722 a 46+764).

Mediante estos trabajos se puede concluir lo siguiente:

- a) Para el terraplén 1 el espesor máximo del mismo es de 14 metros.
- b) Para el terraplén 2 el espesor máximo esperado es de 44 metros

En los valores de profundidad es posible que presenten una variación del orden del 15 al 20% debido a que en el tendido REMI tenemos un semiespacio no apegado a la teoría de dicho método y que para el tendido de refracción existe un alto nivel de ruido ambiental que impidió un marcado correcto de los tiempos de arribo para las zonas lejanas del punto de tiro.

- c) La fotogrametría anterior sirvió de guía para compensar los problemas generados por lo antes mencionado.
- d) Se estima que no se construyó el terraplén abriendo una caja previa al relleno del mismo.

En el **ANEXO XI** se presenta de manera detallada los perfiles obtenidos en cada uno de los trabajos efectuados.

3.3.8 Estudio Geofísico en la Glorieta Final del Centro Comercial Santa Fe, Ciudad de México.

Con la finalidad de determinar la forma y posición de una posible cavidad rellena sobre el trazo del tren suburbano Toluca México, así como la identificación de alguna otra estructura artificial que pudiera afectar la cimentación de las estructuras de soporte del tren, se realizó un estudio geofísico consistente en dos líneas de polo dipolo de alta densidad una de 144 metros y otra de 132 metros de longitud, la información obtenida permitió explorar 30 metros de profundidad, este levantamiento además de dar datos estratigráficos permite detectar estructuras disruptivas y cavidades en el subsuelo. En la foto 32 se muestra la ubicación de la zona en estudio.

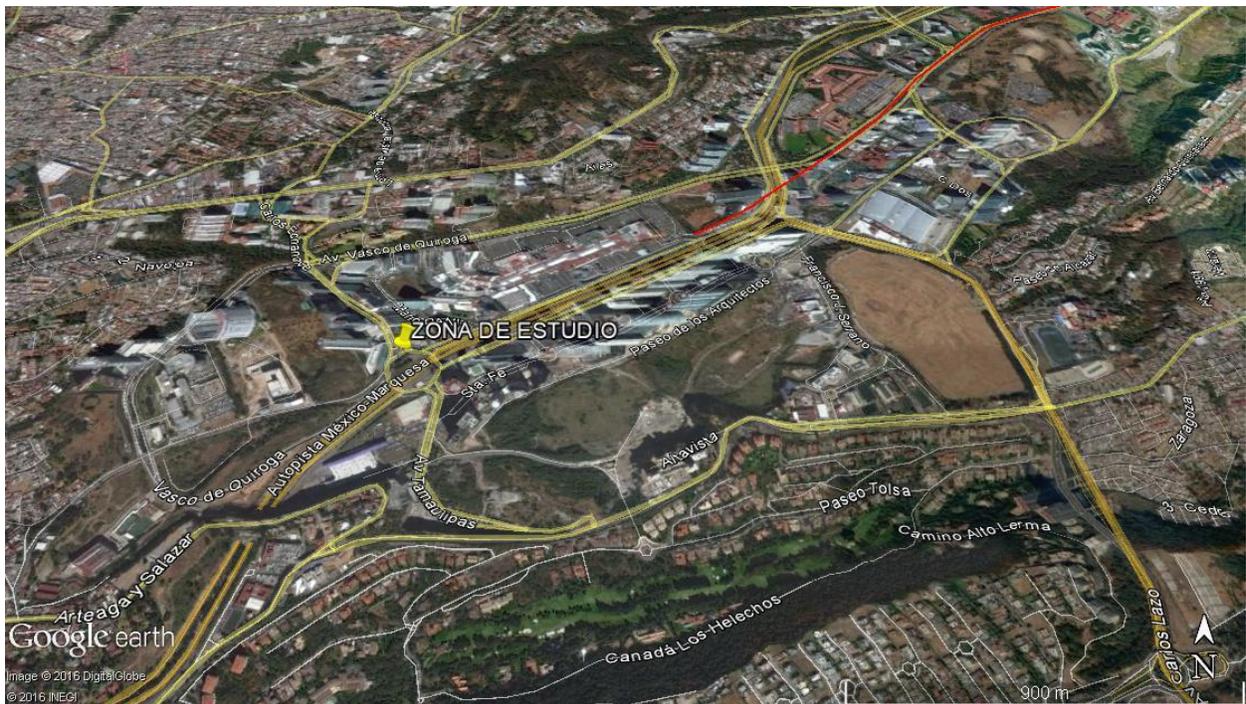


Foto 30. Estudio geofísico. Glorieta Final del Centro Comercial Santa Fe.

En la **figura 12** se presenta un acercamiento de la geología en la zona, (INEGI):

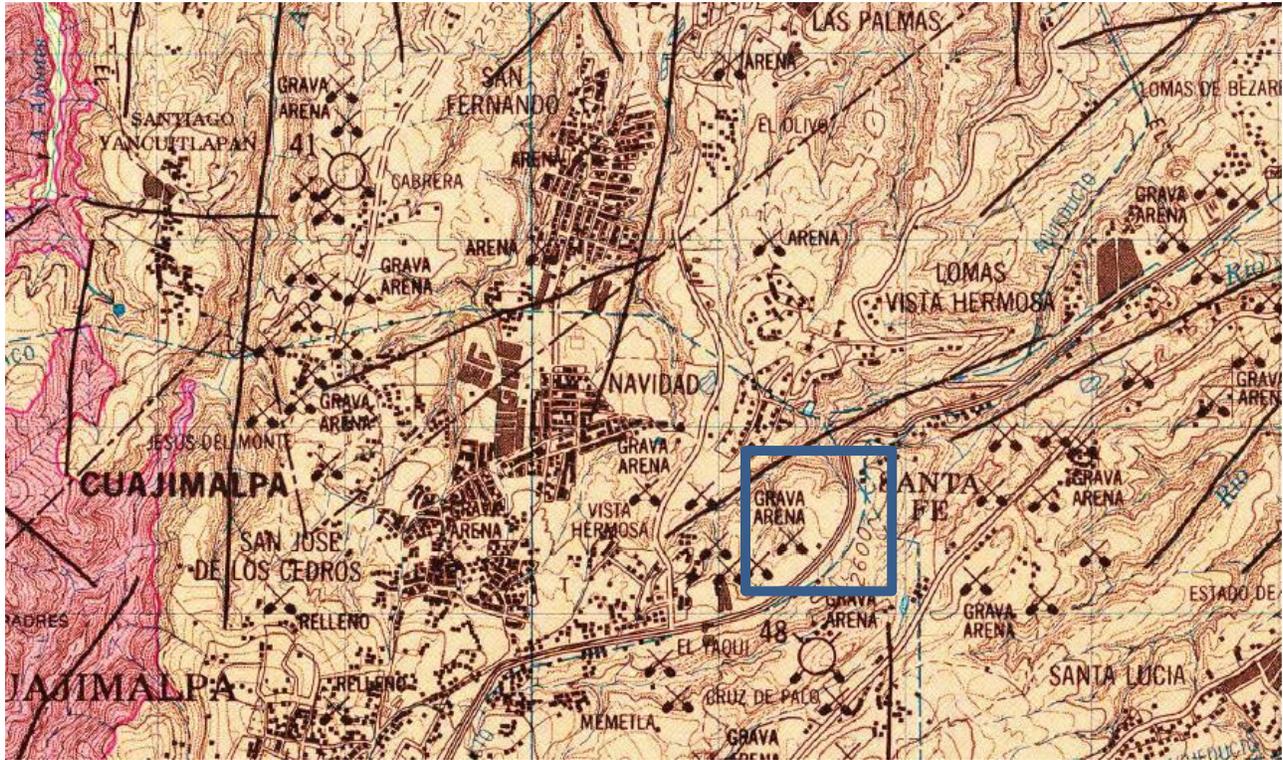


Figura 12 Acercamiento de la Geología de la zona en estudio, (INEGI).

A fin de detectar la estratigrafía, así como la presencia de estructuras disruptivas, y cavidades en el área, se realizó un estudio geofísico, que consistió en la realización de dos líneas una de 144 metros y otra de 132 metros utilizando el método de Perfiles de Resistividad de Alta Resolución llamada también Tomografía de Resistividad Eléctrica o también como líneas de Polo Dipolo de alta densidad, las líneas se realizaron sobre una glorieta que se localiza en la zona final del centro comercial Santa Fe, esta glorieta es atravesada por la zona superior por la autopista México-La Marquesa y por medio de dos puentes da paso al tráfico urbano por debajo de la misma, como se observa en la siguiente figura:

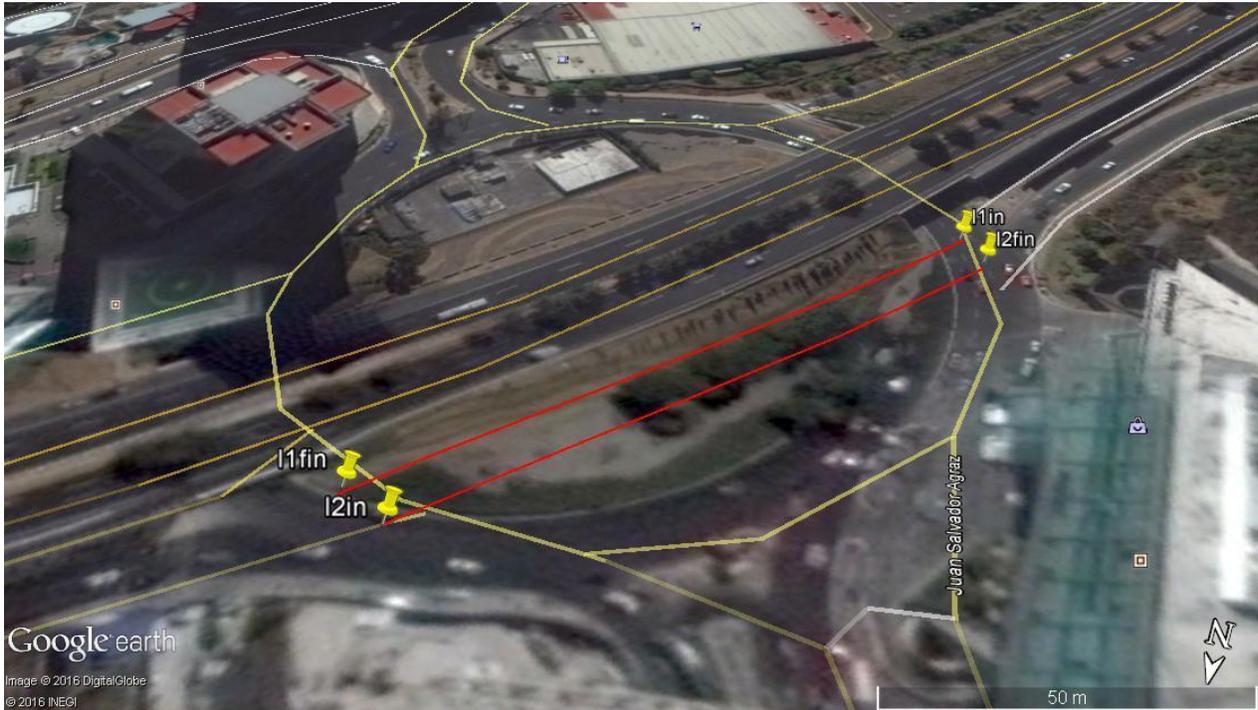


Foto 31 Ubicación de las líneas Polo-Dipolo.

En la zona Sur adyacente a la autopista se realizó una línea de Polo Dipolo denominada L1 con longitud es de 144 metros. Paralela a la L1 y localizada 12 metros aproximadamente al norte de la misma se realizó otra línea denominada L2 con una longitud de 132 m.

La profundidad de investigación alcanzada fue de 30 m, y la distancia entre estaciones y electrodos receptores "A" fue de 4.0 m.

Para realizar el trabajo geofísico en campo, se empleó un transmisor marca Yokohama, además se utilizó un motogenerador de 2.5 HP, un receptor marca National Instruments de 16 canales y los accesorios necesarios correspondientes.

Para el proceso en gabinete de los datos de campo se recurrió a los paquetes de computo Excel, Surfer, y Rockworks 14.

Los resultados obtenidos se presentan enseguida en las secciones longitudinales 1 y 2:

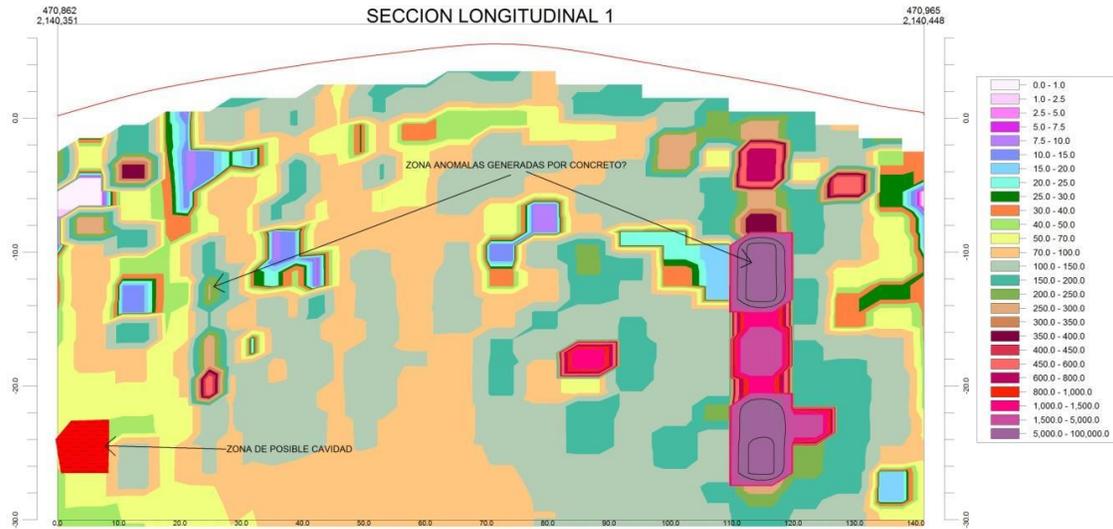


Figura 13 Sección Longitudinal 1

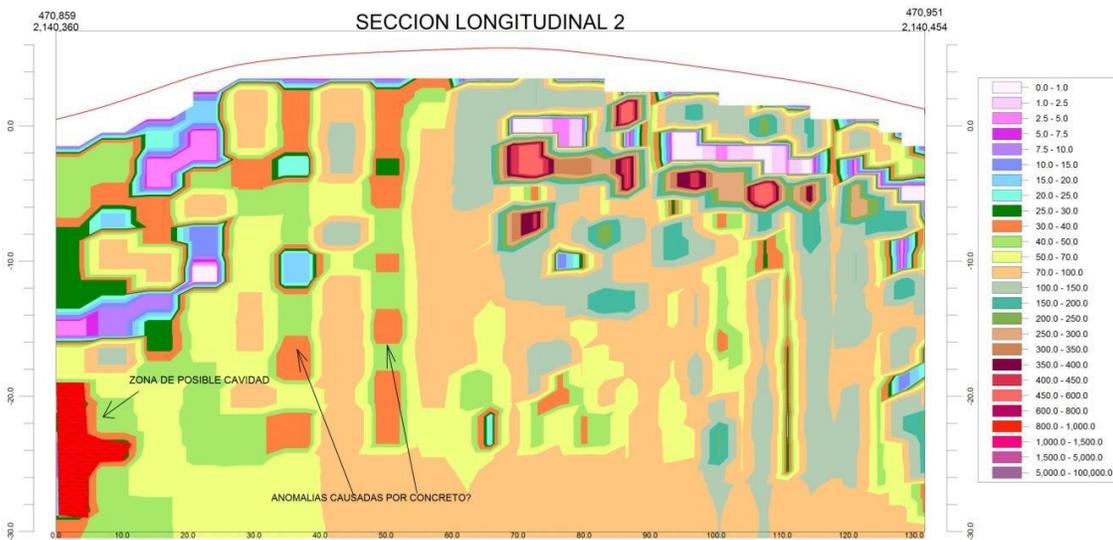


Figura 14 Sección Longitudinal 2

Como se aprecia en las secciones probablemente la cavidad se encuentre a 30 m de las pilas en proyecto por lo cual posiblemente no representen un problema para dichas estructuras.

3.3.9 Estudio Geofísico sobre la Avenida Vasco de Quiroga, a la altura del Centro Comercial Santa Fe, Ciudad de México.

Se realizó un estudio geofísico consistente en tres líneas de dipolo dipolo de alta densidad sobre la lateral de la autopista Santa Fe La Marquesa, iniciando sobre la zona este de la glorieta oeste de Vasco de Quiroga, y terminando en los límites este del centro comercial Santa Fe. Los objetivos del estudio fueron determinar cambios laterales estratigráficos, la posible presencia de cavidades y estructuras disruptivas, y la identificación de estructuras artificiales que pudiera afectar la cimentación de subestructura del viaducto de soporte del tren.

Las líneas se encuentran traslapadas y presentan una longitud total de 940 metros. La línea 3 presenta una interrupción de 16 metros debido a las obras en proceso de la construcción de pilas de cimentación del viaducto ferroviario. la información obtenida se estima alcanza los 30 metros de profundidad.

La zona en estudio se ubica al oeste de la ciudad de México, en el límite de la zona comercial de Santa Fe, como se puede observar en la siguiente imagen.

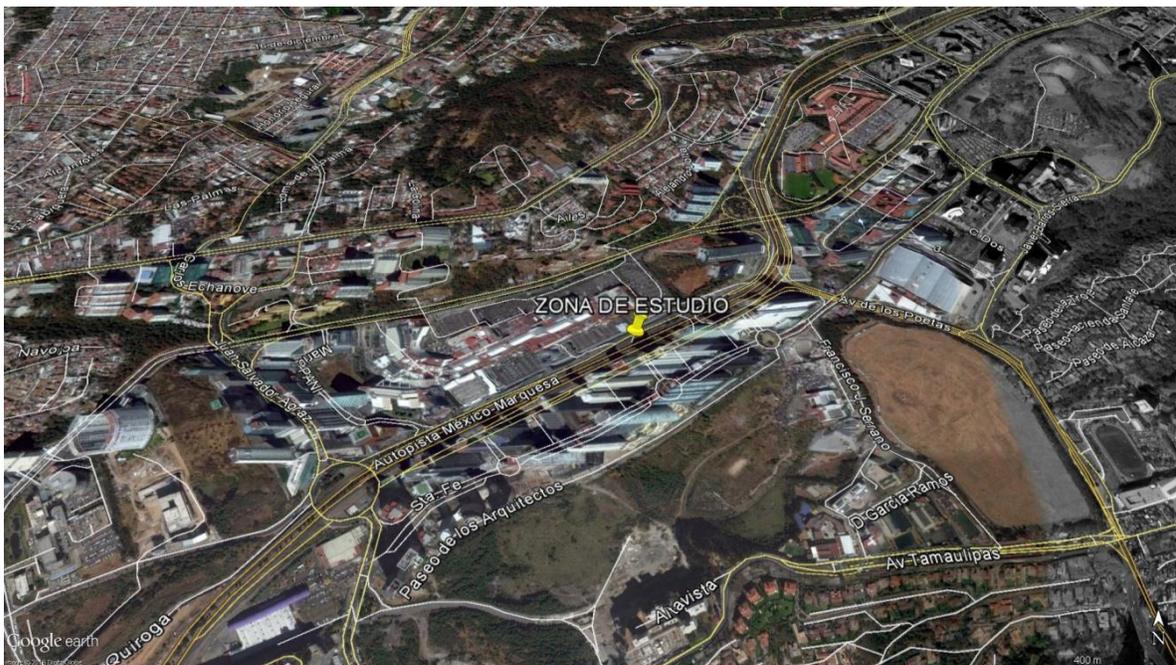


Foto 32 Zona estudiada.

Como se aprecia en las imágenes siguientes, la zona se localiza fuera de la zona lacustre del valle de México, en un área que se conoce como Zona de Lomas, la cual está constituida fundamentalmente por depósitos de tobas arenosas y limoarenosas.

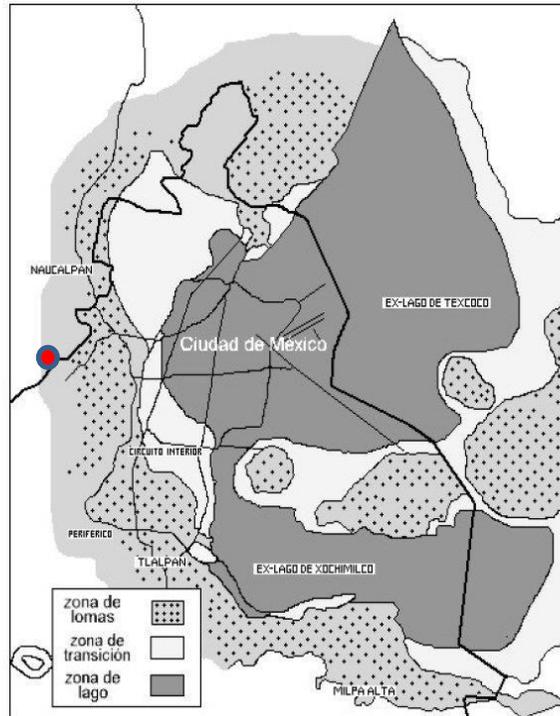


Figura 15 Localización geotécnica del sitio.



Figura 16 Acercamiento de la Geología local, (INEGI).

Los materiales en la zona fueron explotados comercialmente para la obtención de sillar y arena para la construcción. Derivado de estas explotaciones, existen como remanentes, grandes excavaciones a cielo abierto, galerías y túneles no todos cartografiados e identificados. Lo anterior constituye un problema para la construcción de nuevas obras en la zona poniente de la ciudad, ya que la zona puede presentar la presencia de oquedades artificiales, siendo este probablemente el principal riesgo geológico que puede presentarse en el área en estudio.

Con los objetivos mencionados anteriormente se realizó el estudio geofísico el cual consistió en la realización de tres líneas casi colineales. Sobre la lateral norte estas líneas se denominaron: línea 3 con una longitud de 424 metros, línea 3A con una longitud de 148 metros y un traslape con la línea 3 de 16 metros, y línea 3AA, con una longitud de 364 metros y un traslape de aproximadamente 8 metros con la línea 3A. Los traslapes resultaron necesarios debido a accesos vehiculares a la autopista y a un cambio en el trayecto de las obras del viaducto ferroviario en un área próxima a la zona central del centro comercial “Santa Fe”. El método utilizado para la realización de las líneas de perfil continuo de resistividad, es el método de Perfiles de Resistividad de Alta Resolución llamada también Tomografía de Resistividad Eléctrica o también como líneas de Polo Dipolo de alta densidad. A continuación, se presentan las imágenes de cada tramo estudiado por las líneas 3, 3 A, 3 AA. Cabe hacer notar que existe un tramo de 16 metros que no pudo hacerse el levantamiento de polo dipolo, este tramo inicia en el cadenamiento de la línea 0+212, y termina en el 0+228.



Foto 33 Línea 3



Foto 34 Línea 3A



Foto 35 Línea 3AA

Para realizar el trabajo geofísico en campo, se empleó un transmisor marca Yokohama, un motogenerador de 2.5 HP, un receptor marca National Instruments de 16 canales y los accesorios necesarios para llevar a cabo el estudio.

Se procesaron los datos de resistividad obtenidos en el trabajo geofísico ejecutado en el campo, empleando los paquetes Excel, Surfer y Rockworks 14. Al tener los resultados se procedió a la interpretación de la sección obtenida.

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

LÍNEA 3

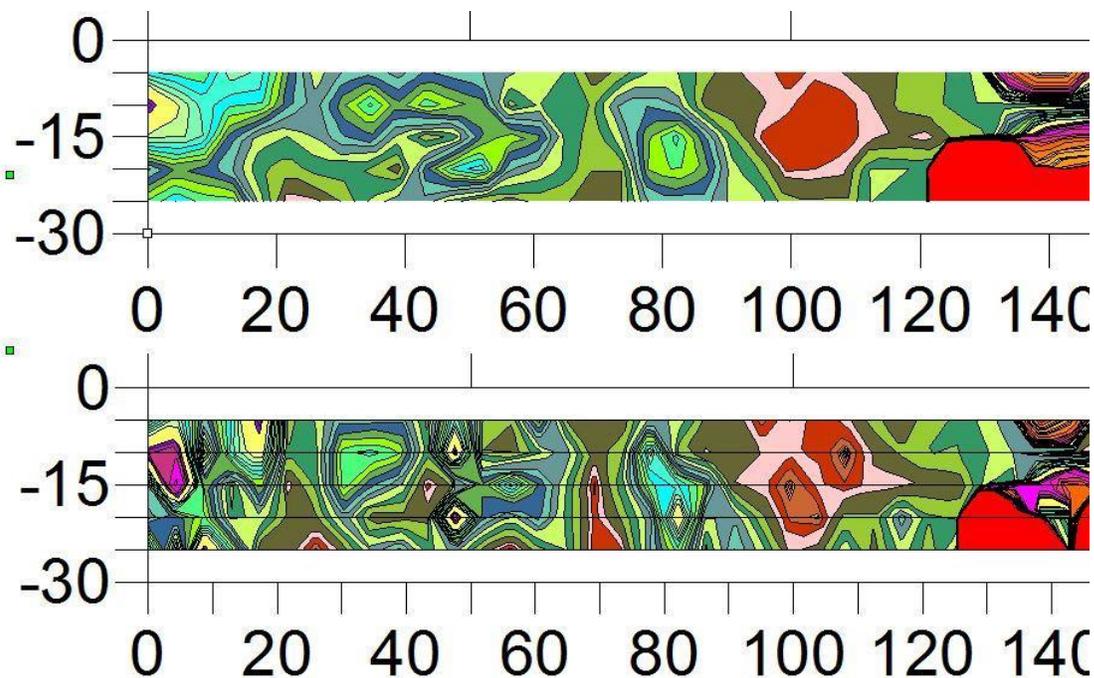


Figura 17 Línea 3.

En este tramo se observa una zona anómala al inicio de la sección, que puede ser correlacionada con la excavación para la construcción del puente y la colocación de la zapata o subestructura del puente. En la zona final se tiene una anomalía de alta resistividad que se relaciona con las perforaciones de las pilas de cimentación del futuro viaducto ferroviario.

Entre los 95 a los 110 metros se observa una zona de baja resistividad que se puede relacionar con la presencia de tobas arcillosas, condición que se observa de forma menor a los 28 metros del origen en la zona profunda de la sección y a los 70 metros del origen, donde se detecta una anomalía cuasi lineal que pudiera indicar una fractura por la que ha circulado agua lo que generaría una alteración de las tobas areno limosas o aglomerados de matriz arcillo limosas a arcillas.

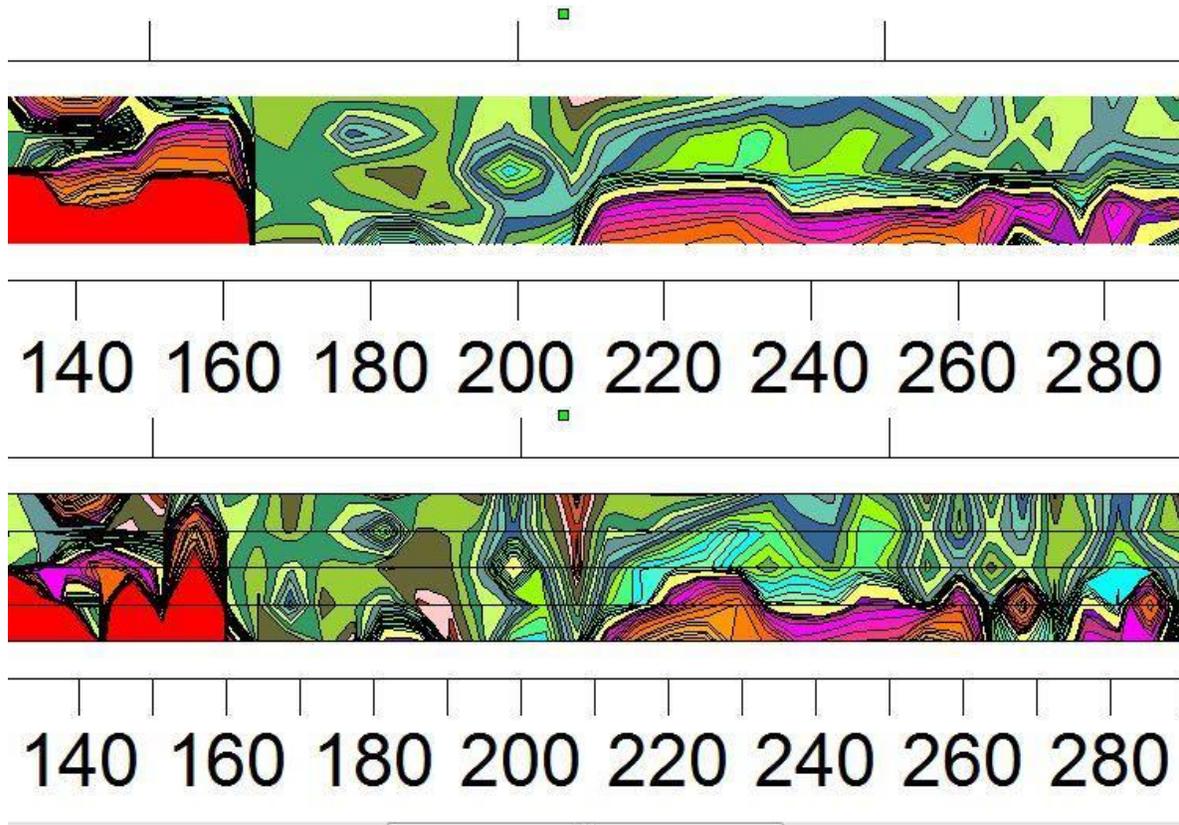


Figura 18 Línea 3.

En este tramo se observa la zona anómala generada por la implantación de las pilas de cimentación en el tramo entre 130 a 160 metros de este segmento de la sección, a los 208 metros del origen de la línea se observa una anomalía subvertical, de baja resistividad, la que puede ser inducida por la presencia de pilas recién coladas que aún no terminan su fraguado completamente, así como la presencia de una zona de alta resistividad en la parte profunda de la sección entre los 210 a los 260 metros de la sección, lo que pudiera indicar la presencia de aglomerados parcialmente cementados con fragmentos gruesos.

En la zona superficial a entre los 260 a los 270 metros se observa una anomalía generada por las excavaciones para la implantación de la red de drenaje aparentemente.

Entre los 212 a los 228 se tienen datos extrapolados por el programa, por lo que lo observado en dicho tramo deberá de tomarse con precaución.

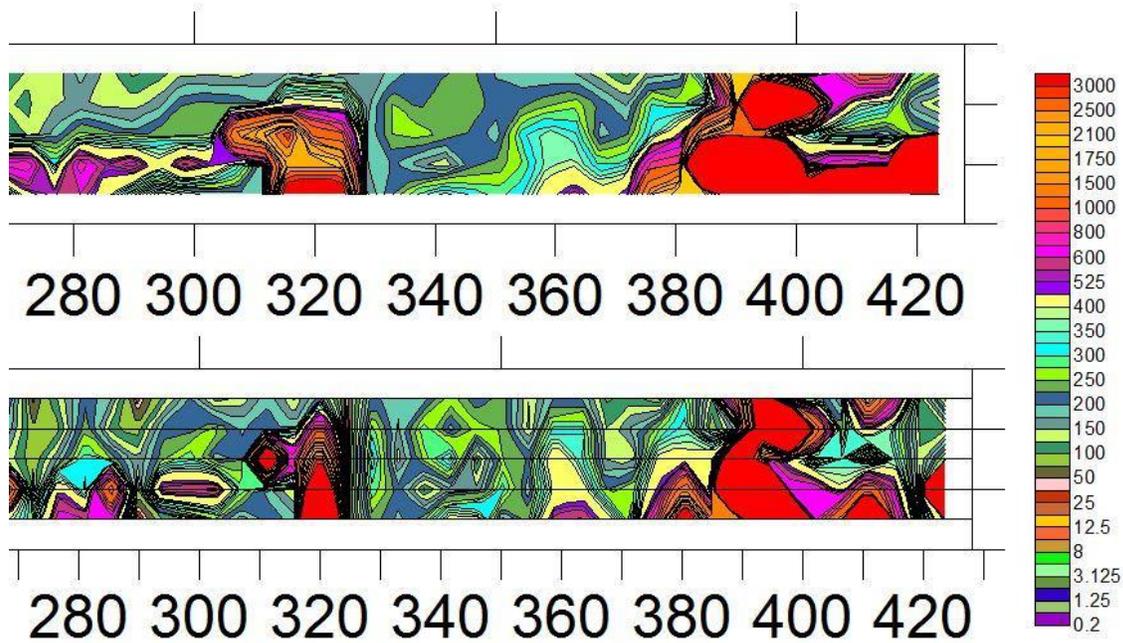


Figura 19 Línea 3.

En este tramo se observa en la zona profunda una continuación de la anomalía de alta resistividad que se estima ha sido inducida por la presencia de un aglomerado andesítico con fragmentos grandes, parcialmente cementado. A los 320 y entre los 380 y 410 metros del origen de la sección se tienen anomalías de alta resistividad se desconoce su origen.

LÍNEA 3 A

Esta línea tiene una longitud de 148 metros presenta un traslape al inicio con línea 3 de 16 metros, y en la zona final de un 8 metro con la línea 3 AA. Dada su longitud se maneja en un solo segmento el cual se presenta a continuación.

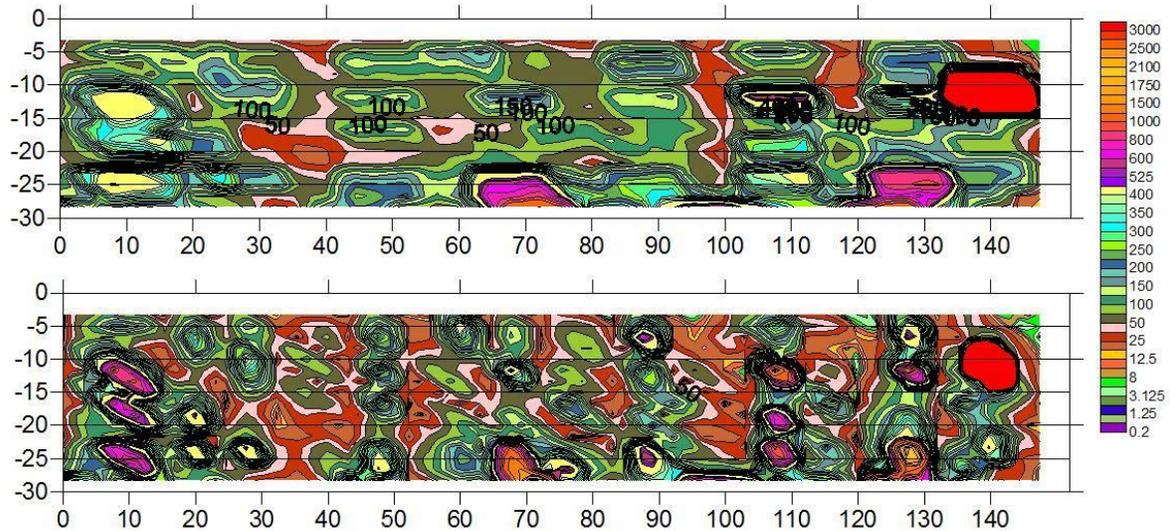


Figura 20 Línea 3.

Al inicio de la línea, se observa una anomalía de alta resistividad, así mismo da la impresión que a partir del origen y hasta los 105 metros se tiene un relleno hecho con material de características similares al sustrato de la zona esto es realizado con arenas y material de desperdicio de las minas del área, existentes en la zona de “Santa Fe” antes de haber sido urbanizado; de los 105 hasta el final de la sección se observa que el relleno es menor probablemente del orden de los 7 metros y se observa una zona anómala casi superficial, a los 140 metros que probablemente coincida con algún drenaje.

LINEA 3 AA

Esta línea se localiza en la banqueta norte de la lateral de la autopista, tiene una longitud de 360 metros, y presenta en su lado norte (centro comercial Santa Fe) una excavación da alrededor de 6 metros de profundidad, se desconoce si esta excavación se realizó durante la época del minado del área, o se hizo para emparejar el nivel de construcción con el nivel de la avenida Vasco de Quiroga Noroeste, es posible que el material extraído se utilizara para la construcción del terraplén de la autopista, aunque esto se desconoce.

La línea 3 AA, presenta un traslape de alrededor de 8 metros con la línea 3 A, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

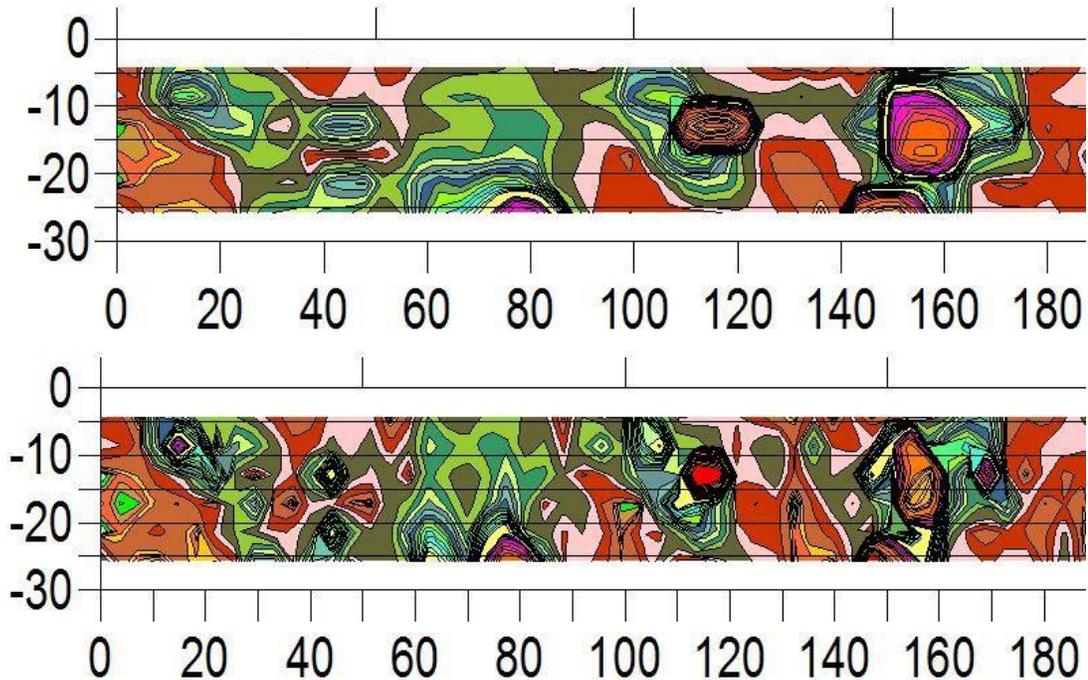


Figura 21 Línea 3 A.

En este segmento se observa que el inicio presenta valores de intermedios a bajos de resistividad, los que cambian lateralmente a valores altos a partir de los 15 metros, estos valores se mantienen hasta los 170 metros, aunque se observan tres zonas de bajas resistividades en este tramo, la primera entre los 30 y los 45 metros del origen, la segunda entre los 90 y los 110 metros en la zona profunda, la tercera entre los 120 y los 145 metros de distancia al origen, se estima esto se trate de variaciones en la litología del aglomerado que se encuentra en esta área, esto es son cambios entre aglomerado con matriz areno limosa a aglomerado con matriz limoarcillosa. Esta situación se estima fue derivada del intemperismo o el fracturamiento menor existente en las rocas de la F. Tarango así como la forma de depósito en sí.

De los 163 hasta el fin del segmento se tiene rocas de baja resistividad, por lo que es posible se trate de un aglomerado empacado en una matriz limo arcillosa. Se observa una anomalía de alta resistividad entre los 115 y 118 metros del origen y a una profundidad de 10 metros, se desconoce su origen pero puede estar relacionada con los drenajes o cimentación del centro comercial, situación que se deberá de verificar con una visita al estacionamiento del mismo.

En la zona profunda del segmento a los 79 metros se detecta una anomalía pequeña de alta resistividad, de la que se desconoce su origen, puede ser un cambio litológico o una cavidad, aunque esto último se estima poco probable dado el historial de la zona, y que la explotación a cielo abierto final de la zona, prácticamente llegó al nivel de los afluentes del río Tacubaya, que sería el límite de que permitiría un minado con galerías, por lo que el minado a cielo abierto debería haber eliminado cualquier galería en esta zona.

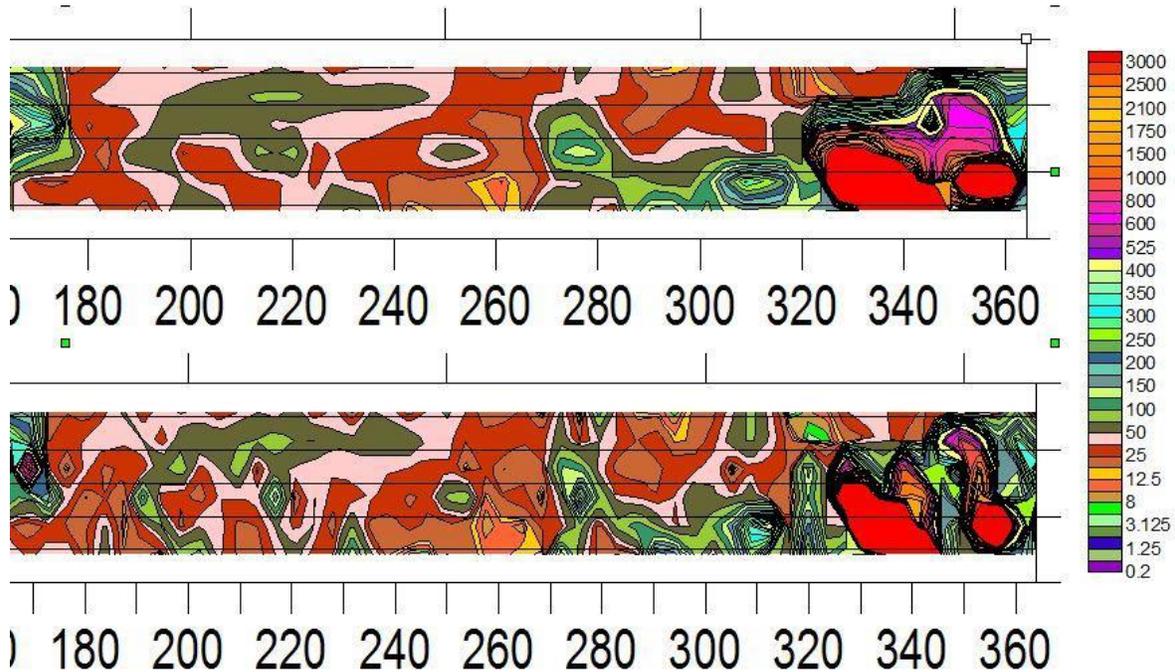


Figura 22 Línea 3 A.

En el segmento de 180 a los 360, se observa que la zona de bajas resistividades a intermedias, se mantiene hasta los 346 metros donde termina el acuñamiento de estos materiales, el acuñamiento inicia en la zona profunda a los 270 metros y sube suavemente hasta culminar en la distancia ya mencionada de 346 metros, la zona final de la sección presenta valores de intermedios a muy altos de resistividad.

Entre los 330 hasta los 350 metros del origen se detectan altos resistivos, los que se presume están asociados a la cimentación de un puente que da acceso al centro comercial, presente en esa zona de la sección y posiblemente a drenajes de gran diámetro provenientes de la zona sur del centro comercial que conduciría el drenaje pluvial a la presa reguladora que se localiza al este del centro comercial.

Se estima que las galerías de extracción tuvieron como piso base las cañadas presentes antes de la explotación a cielo abierto por lo que por debajo del nivel de erosión de estas es difícil la presencia de túneles o galerías para la extracción de arena o sillar.

Partiendo de esto se considera que cualquier anomalía por debajo del nivel de la presa reguladora no es probable se trate de una cavidad en la zona en estudio. Por lo que cualquier anomalía por debajo de los 15 metros de profundidad se deberá posiblemente a la presencia de cuerpos de aglomerado arenoso cementado.

Por lo anterior, se estima que las únicas anomalías que pudieran estar relacionadas con alguna cavidad o sistema de drenaje grande son las localizadas en las siguientes áreas:



En la línea 3 entre los 310 a los 320 metros del origen, así como la localizada entre los 380 y los 400 metros del origen de la línea 3.

En la línea 3 A, es la anomalía localizada a 140 metros del origen, aunque no se observa su continuidad en el inicio de la línea 3 AA, debido a lo anterior esa anomalía es únicamente de tipo local en apariencia.

En la línea 3 AA, tenemos tres zonas que presentan las condiciones mencionadas, una se localiza a entre los 115 y los 120 metros de la línea, otra se localiza entre los 150 a los 160 metros del origen de la línea y la última a los 340 a 360 metros del origen de la línea.

Por su posición la anomalía detectada a entre los 115 y los 120 metros pudiera tratarse de la cimentación de un acceso al estacionamiento del centro comercial.

La localizada entre los 150 a los 160 metros deberá de verificarse por dentro del estacionamiento del centro comercial para verificar que no se trate de una zona inyectada o bien anclada del talud de dicho estacionamiento o bien de una de las pilas de cimentación del estacionamiento.

La última que se localiza entre los 340 a los 360 metros es posible se trate de la cimentación del puente que da acceso al centro comercial.

Con base en lo anterior se puede recomendar lo siguiente:

Las anomalías detectadas que no se encuentren en área próxima a las futuras pilas de cimentación no se recomienda verificar dado que en caso de tratarse de cavidades producto de un antiguo minado o de la introducción de un drenaje pluvial construido al mismo tiempo que la autopista, se considera no afectaran a la nueva obra.

Las anomalías detectadas por debajo de los 15 metros en algunos casos de acuerdo a la mecánica de suelos coinciden con zonas de aumento de resistencia del material, lo que sería congruente con el supuesto de un aumento en el tamaño de los fragmentos, así como el grado de cementación del material.

Las anomalías que se localizan próximas a la acera norte y que se encuentren próximas al talud del estacionamiento del centro comercial se deberá de verificar que no consistan en anclaje del muro para evitar dañar dicho anclaje.



3.4 SONDEOS PRESIOMETRICOS.

La geotecnia dispone actualmente de diferentes modelos para describir el comportamiento de los suelos, sin embargo, el problema más importante que se enfrenta consiste en determinar adecuadamente los parámetros mecánicos requeridos en dichos modelos. Tradicionalmente los parámetros mecánicos son obtenidos en el laboratorio sobre muestras llamadas “inalteradas”, sin embargo, es bien conocido que salvo en el caso de suelos cohesivos de consistencia blanda a media, la extracción de las mismas es difícil y en muchos casos imposible.

Los materiales de la zona poniente del Valle de México son particularmente difíciles de muestrear y la obtención de especímenes de tipo “inalterado” que puedan ser ensayadas en el laboratorio son dudosamente representativas de las unidades geotécnicas que ahí se presentan.

De esta forma y con el objeto de obtener los parámetros mecánicos requeridos para el diseño geotécnico en este proyecto, **CAABSA** procedió a realizar ensayos “In-Situ” de tipo presiométrico. La prueba consiste en expandir las paredes de una perforación mediante una sonda previamente colocada en el sondeo inyectando agua y nitrógeno, registrando tanto las variaciones de volumen como la presión aplicada.

Cabe señalar que en el Reglamento de Construcciones del D.F. y sus Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, oct. 2004, pp 16 y 17 (**Referencia XV**), en la sección 2.3 “Exploraciones”, inciso “d”, se señala que el ensaye presiométrico *“se considerará principalmente aplicable para determinar las características de los suelos firmes de la zona I o de los estratos duros de las zonas II y III”*. La zona geotécnica I corresponde a la zona en estudio.

A diferencia de las pruebas que miden las propiedades de los suelos en condiciones de falla (como por ejemplo la prueba de penetración estándar; SPT), la prueba presiométrica permite medir las propiedades mecánicas del terreno tanto en condiciones de falla como antes de esta, constituyendo un ensaye de carga “in-situ” que se realiza a diferentes profundidades aprovechando la ejecución de una perforación.

3.4.1 Descripción del equipo presiométrico

El equipo empleado está constituido básicamente por los elementos siguientes.

- Una sonda cilíndrica dilatada en forma radial, la cual es posicionada en el terreno dentro de una perforación realizada previamente, de acuerdo con los procedimientos señalados en la Norma ASTM D4719-00 (**Referencia XIII, Tabla 3**, Guidelines for selection of borehole preparation methods and tools). La sonda empleada fue del tipo BX (Ménard estándar, de 58mm de diámetro).
 - Mangueras que conducen el nitrógeno y el agua a presión desde el aparato de medición ubicado en la superficie del terreno hasta la sonda.
 - Controlador presión – volumen (CPV). En este caso se empleó un presiómetro Ménard marca APAGEO con capacidad para aplicar hasta 100 kg/cm² y contiene todos los elementos necesarios
-

para regular y medir la presión de los fluidos inyectados, midiendo además la correspondiente variación del volumen dentro de la sonda.

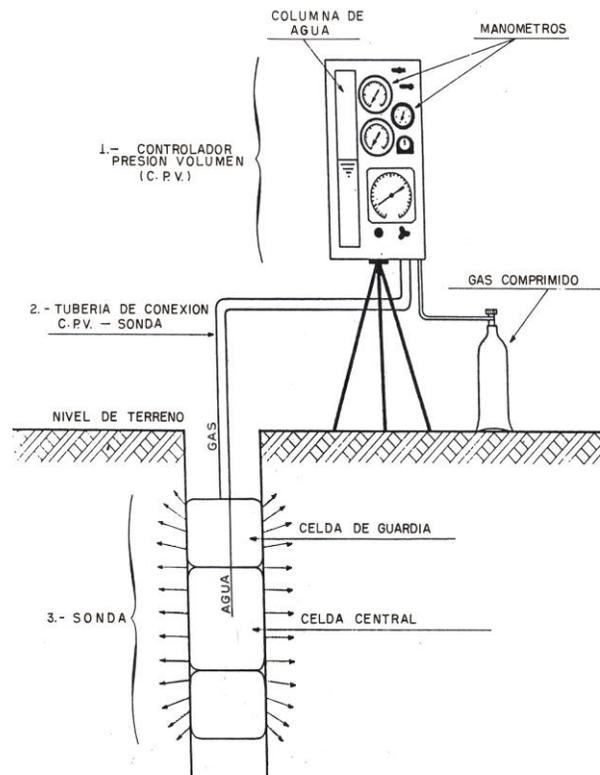


Figura 23. Esquema con elementos que componen el equipo presiométrico

La sonda está constituida por una membrana de medición central (recibe el agua a presión desde el CPV) y una membrana llamada de “guardia” (recibe nitrógeno desde el CPV). Este montaje permite que al expandirse la sonda durante la ejecución del ensaye en todo momento tenga una forma cilíndrica; esto se logra estableciendo una diferencia de presión entre dichas membranas con un valor que depende de la profundidad de prueba.

El montaje fue complementado con un tubo de acero ranurado en el que fue introducida la sonda; esta condición permite la aplicación del ensaye con la intención de proteger en lo factible las membranas de la sonda.

3.4.2 Procedimiento de Ejecución del ensaye Presiométrico

El procedimiento de ejecución del ensaye incluyó las operaciones siguientes:

- a) Obtención de curvas de calibración por resistencia propia y por pérdida de volumen en la sonda.

Mediante un ensaye sin confinamiento del sistema “sonda - tubo ranurado”, se obtuvo la presión requerida para lograr la expansión del sistema (resistencia propia o “pressure losses”), que finalmente es descontada a la presión manométrica para obtener la presión neta transmitida al terreno.

Asimismo, con el objeto de determinar la pérdida de volumen en la prueba (“volume losses”, debida principalmente a la expansión de la tubería de conducción), se colocó la sonda – tubo ranurado dentro de un tubo de acero, procediendo a aplicar una presión de hasta 70 kg/cm².

En cada prueba se realizaron incrementos de presión en los fluidos inyectados que fueron mantenidos constantes durante 60 segundos, y se registró el volumen de agua inyectado trazando la curva de expansión correspondientes.

Los registros de campo de estas calibraciones se muestran en el **ANEXO V**.

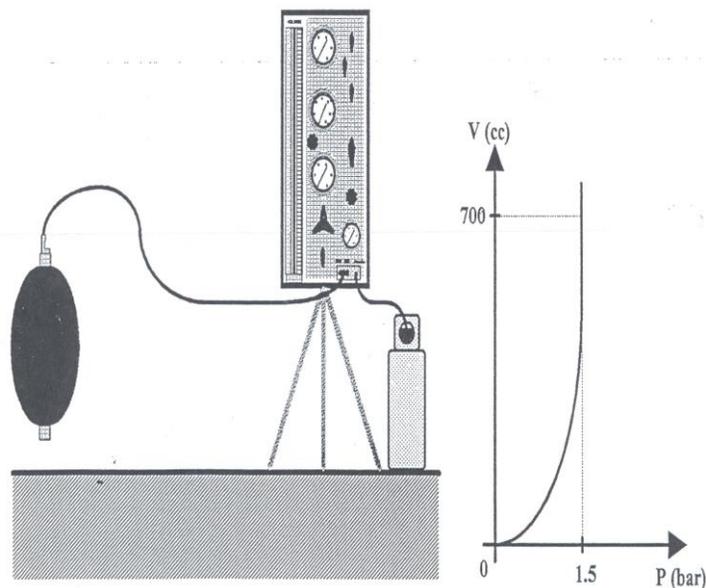


Figura 24. Calibración por resistencia propia de la sonda (Inercia)

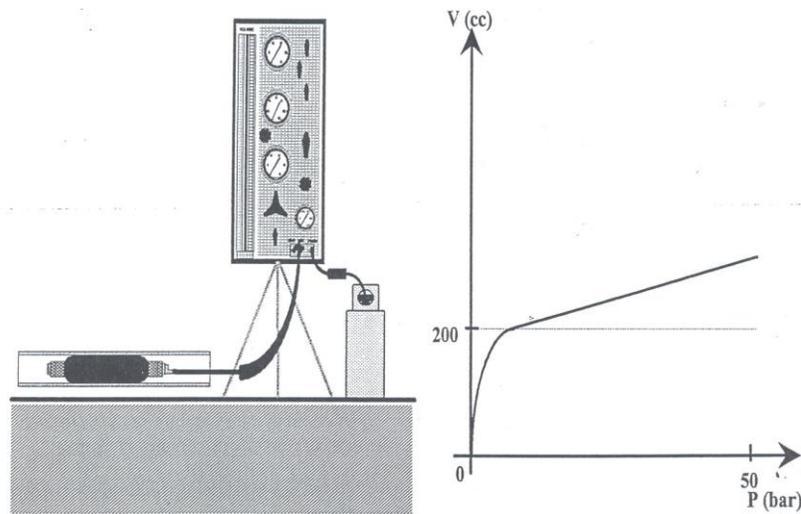


Figura 25. Calibración por pérdida de volumen

b) Ejecución del ensayo presiométrico.

La ejecución del ensayo incluye básicamente las operaciones siguientes: Instalación de la sonda dentro del terreno y la carga del suelo mediante un procedimiento estandarizado.

La instalación de la sonda y el tubo ranurado se realizó una vez concluida la perforación, escogiendo adecuadamente las técnicas y herramientas de perforación en función del tipo de suelo por ensayar, limitando la longitud de perforación a un valor del orden de 1 a 3 m, de tal forma que el suelo se encontrara poco alterado durante el momento de la prueba. La ejecución de la prueba consistió en incrementar la presión dentro de la sonda según una progresión aritmética, registrando la correspondiente variación de volumen que ocurre durante un periodo de 30 y 60 segundos en el que se mantuvo la presión constante.

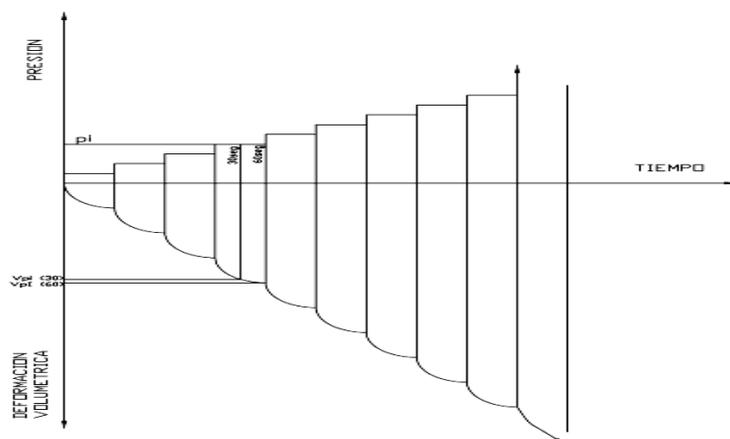


Figura 26. Procedimiento de ejecución del ensayo presiométrico

La presión manométrica correspondiente a cada incremento de presión (p_{mi}), leída durante el ensaye en el CPV, fue corregida de acuerdo a la expresión siguiente para obtener la presión neta (p_{ci}) transmitida al suelo.

$$P_{ci} = P_{mi} - P_{ii} + \gamma_w h$$

Dónde:

- p_{ii} presión necesaria para deformar el sistema de carga (membranas y tubo ranurado) obtenida mediante la “curva de calibración”.
- γ_w peso volumétrico del agua
- h profundidad a la que se ejecuta el ensaye

A partir de la presión en que la sonda hizo contacto con el terreno, se descontó a las lecturas de volumen el correspondiente a la dilatación propia del sistema.

En el **ANEXO V** se presentan los datos recopilados en el campo durante la ejecución de cada uno de los ensayos realizados, mientras que en el **ANEXO IX** se presenta las “curvas presiométricas” en las representaciones siguientes:

- p_{ci} contra v_{60} (volumen registrado a 60 segundos en cada incremento de presión).
- p_{ci} contra $\Delta v / \Delta p$

Cada ensaye fue interpretado para determinar los parámetros presiométricos siguientes:

- El módulo Ménard (E_m)
- La presión llamada de “fluencia” (P_f), que marca el final de tramo recto de la curva
- La presión límite (P_l).

El módulo presiométrico fue calculado aplicando la expresión siguiente:

$$E_m = 2.66(V_0 + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta v}$$

Dónde:

- V_0 Volumen de la sonda “en reposo” determinado mediante las pruebas de calibración (*volume looses*)
- V_m Volumen de agua inyectado para una presión equivalente a $P_m = \left(\frac{P_f + P_i}{2}\right)$, siendo “ p_i ” la presión a la que inicia el tramo recto de la curva presiométrica
- Δp Incremento de presión en el tramo recto de la curva, igual a “ p_f ” menos “ p_i ”

Δv Incremento de volumen correspondiente a " Δp ".

La presión de fluencia fue determinada de acuerdo con el procedimiento marcado en la norma europea ENV 1997-3 (Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 3: Design assisted by fieldtesting), **Referencia XII**, en la que se representa la variación de $\Delta v/\Delta p$ en función de la presión aplicada en cada incremento de carga.

En la enorme mayoría de los ensayos fue posible determinar al menos tres puntos del tramo de deformación plástica del suelo, por lo que la presión límite (p_l) se extrapoló a partir de la curva presiométrica inversa ($1/v_m$ en función de p_{ci}) conforme señala la **Referencia XIII** (norma ASTM D 4719-00).

En el **ANEXO VIII** de este informe se presentan los perfiles que muestran la variación con la profundidad de los parámetros presiométricos.

Ya se ha mencionado que la determinación de los parámetros mecánicos mediante muestras intactas, recuperadas en las unidades geotécnicas presentes en este proyecto, no es factible en la gran mayoría de dichas unidades. Sin embargo, en las tablas siguientes se observa que el ensayo presiométrico ofrece una excelente solución técnica para este problema, sin que se presente una contradicción con las diferentes herramientas de exploración utilizadas, permitiendo una caracterización de todas las unidades geotécnicas involucradas, demostrando nuevamente ser una herramienta ágil y adecuada para el diseño geotécnico de las cimentaciones.

En cada uno de los tramos del proyecto se observó que los valores de los parámetros presiométricos de cada unidad geotécnica (presentados de manera inicial en la forma de los perfiles presiométricos), muestran un claro contraste que permitió identificar con relativa facilidad los diferentes contactos geológicos.

Durante el periodo de ejecución de estos trabajos se elaboró paulatinamente el plano geológico a lo largo del trazo de la estructura proyectada, pasando de un análisis cualitativo de los perfiles presiométricos, a la integración de todos los resultados disponibles de campo, y laboratorio por parte de un ingeniero geólogo y sus continuos caminamientos en la zona; cabe señalar que uno de los puntos clave para identificar los contactos geológicos fueron los perfiles presiométricos.

Como se indica puntualmente en secciones posteriores de este reporte, basándose en los siguientes factores:

- A. La información geológica publicada existente para esta zona.
 - B. Los resultados del reconocimiento geológico efectuado en superficie respecto a la forma y posición de los depósitos y las relaciones estratigráficas entre las diferentes unidades, la litología y las variaciones laterales, espesores, color, etc.
-



- C. Los recorridos de campo efectuados.
- D. Los sondeos profundos de tipo directo ejecutados.
- E. La inspección visual y manual de las muestras recuperadas durante y posteriormente a la ejecución de los sondeos.
- F. Los resultados del conteo del número de golpes N en prueba de penetración estándar en aquellos materiales tobaceos de naturaleza fundamentalmente limosa y arenosa con una proporción no significativa de gravas y tamaños grandes.
- G. Los resultados de los ensayos de laboratorio.
- H. Los resultados de los ensayos “in – situ” de tipo presiométrico.

Se elaboró un plano geológico a lo largo del trazo. En dicho plano geológico se consigna la presencia de una serie de unidades geológicas congruentes con la información indicada en los incisos A-H anteriormente indicados.

Las unidades geológicas detectadas se presentan detalladamente en capítulos posteriores de este documento, no obstante, y con el objetivo de contextualizar adecuadamente los resultados de los ensayos presiométricos efectuados, se muestran a continuación para efectos de pronta referencia:

UNIDADES GEOLOGICAS TREN INTERURBANO MEXICO TOLUCA Km 41+334 al Km 57+494	
DESCRIPCION	UNIDAD GEOTECNICA
Azolves.	UG-1.1
Rellenos antrópicos compactos: Conforman principalmente las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta $15 < NSPT < 50$ golpes.	UG-1.2
Depósitos de arcilla blanda $2 < N < 10$	UG-1.3
Depósitos aluviales de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz arenosa con algo de finos muy compacta $NSPT > 50$ golpes.	UG-2
Depósitos de arena con limo y gravas aisladas de alta compactidad $N > 50$.	UG-3.1
Depósitos de la formación Tarango de color cafe claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa muy compacta $NSPT > 50$ golpes.	UG-4.1
Depósitos de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta $30 < NSPT < 50$ golpes.	UG-4.2
Depósitos de lahar de color gris oscuro, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta $NSPT > 50$ golpes.	UG-5
Toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme $15 < NSPT < 30$ golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.	UG-6.1
Toba con fragmentos líticos de tamaños variables de 15 a 40 cm empacados en una matriz arenosa muy compacta $NSPT > 50$ golpes. con diferentes contenidos de finos, de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.	UG-6.2
Roca Débil (R-2). Toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV)	UG-7.1
Roca Débil (R-2). Brecha volcanica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV).	UG-7.2
Roca muy fuerte (R-5). Colada andesítica fracturada poco intemperizada (GM-II) de color gris acero.	UG-8

TABLA 10. Unidades Geológicas

Por ejemplo, en los depósitos aluviales, con mezclas de gravas y bloques redondeados a subangulosos empacados en una matriz areno limosa (UG-4.1 y 4.2), donde en definitiva la prueba de penetración estándar no ofrece una respuesta adecuada para su caracterización geomecánica, se pudieron



obtener exitosamente los parámetros presiométricos. Debido a su propia naturaleza se observa una heterogeneidad significativa de un punto a otro del proyecto con valores de módulo Menard (E_m) variables en los diferentes tramos entre 300 y 2600 kg/cm^2 , determinando que los valores de la presión límite (p_l) son muy elevados y por arriba de 80 kg/cm^2 ; excepcionalmente en la zona de la Glorieta Vasco de Quiroga se obtiene el valor promedio más pequeño determinado en esta unidad $p_l = 26 \text{ kg/cm}^2$.

En lo que respecta a los materiales tobáceos, se aprecia una clara diferencia entre aquellos de consistencia firme a muy firme (Unidad UG-6.1) con aquellos donde aparecen fragmentos líticos empacados en una matriz arenosa (Unidad UG-6.2) con número de golpes en la prueba de penetración estándar (SPT) mayor que 50. En efecto, para la UG-6.1 se determinó un promedio global $E_m = 128 \text{ kg/cm}^2$ con $p_l = 12 \text{ kg/cm}^2$, mientras que en la UG-6.2 es de $E_m = 397 \text{ kg/cm}^2$ y $p_l = 48 \text{ kg/cm}^2$.

Como se aprecia en las tablas de esta sección, el contacto geológico de las unidades UG-7.1, UG-7.2 y UG-8 aparece muy clara en términos de los parámetros presiométricos, con francos contrastes entre los valores de E_m y p_l promedio global determinados en cada unidad.

Este análisis cualitativo fue relativamente fácil hacerlo durante el curso de los trabajos, ya que como mencionamos los perfiles presiométricos marcan claros contrastes entre las diferentes unidades geológicas identificadas.

Sin embargo, como se ha señalado a lo largo de este trabajo debe aplicarse un adecuado criterio geotécnico para evaluar los parámetros presiométricos para diseño de las cimentaciones y en particular en lo que respecta a los rellenos antrópicos superficiales (UG-1.2, UG-2 y UG-3.1) donde se determinó la mayor dispersión en los valores presiométricos con valores de presión límite tan bajos como 4.5 kg/cm^2 (Glorieta de Santa Fe).

TREN INTERURBANO MEXICO - TOLUCA																		
PARAMETROS PRESIOMETRICOS PROMEDIO EN CADA TRAMO Y POR UNIDAD																		
TRAMO	UG-1.2			UG-2			UG-3.1			UG-4.1			UG-4.2			UG-5		
	Rellenos antrópicos compactos: Conforman principalmente las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta 15<NSPT<50			Depósitos aluviales de la Formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz arenosa con algo de finos muy compacta NSPT> 50			Depósitos de compactidad alta de arena con limo y gravas aisladas N>50.			Depósitos de la formación Tarango de color cafe claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa			Depósitos de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta 30<NSPT<50 golpes.			Depósitos de lahar de color gris oscuro, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta NSPT >50 golpes.		
Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	
PORTAL CRUCE																		
CASETAS																		
PPP																		
CUNETAS																		
SOBRETALUD																		
LOS PERROS	104	7.2	12.5															
TERCER CRUCE AUTOPISTA										1756	44.6	173.2	1756	44.6	173.2			
ENCINO										921	32.0	114.8	872	10.5	45.7			
GLORIETA SANTA FE-C.C. SANTA FE	46	2.2	4.5							2278	21.7	94.3	2402	35.7	160.9			
VIADUCTO SANTA FE	220	21.7	100.6										2407	34.4	206.8	1429	22.9	146.5
IBERO / TELEVISA	109	6.3	13.6							272	19.2	99.8	194.0	15.4	40.7	2213	31.0	177.8
GLORIETA / VASCO DE QUIROGA										219	12.7	26.3				1512	35.1	126.6
VIADUCTO HONDONADA SAGARPA				2334	26.2	165.6	205	11.3	23.6	1013	25.3	84.3						
VIADUCTO CONAGUA - MANANTIAL				1775	25.2	109.2	215	14.5	34.4	6352	57.0	158.0						
INDUSTRIA MILITAR				3108	32.8	135.8	523	20.8	62.3	2625	24.2	194.2						
ESTADO MAYOR PRESIDENCIA				336	12.9	36.3	687	23.2	80.1	1666	28.5	91.0						
PROMEDIO GLOBAL DE UNIDAD	89	6.8	16.7	932	23.0	97.2	310	16.8	44.9	722	27.0	101.7	649	24.5	101.4	1655	29.2	148.9

Tabla 11a. Parámetros presiometricos promedio por tramo y por unidad geológica

MODULO MENARD Em (kg/cm²)
 PRESION DE FLUENCIA NETA pf * (kg/cm²)
 PRESION LIMITE NETA pl * (kg/cm²)

TREN INTERURBANO MEXICO - TOLUCA															
PARAMETROS PRESIOMETRICOS PROMEDIO EN CADA TRAMO Y POR UNIDAD															
TRAMO	UG-6.1			UG-6.2			UG-7.1			UG-7.2			UG-8		
	<p>UG-6.1: Toba limosa con arena fina de consistencia firma a muy firme 15<NSPT<30 golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.</p> <p>UG-6.2: Toba con fragmentos líticos de tamaños variables de 15 a 40 cm empacados en una matriz arenosa muy compacta NSPT >50 golpes. con diferentes contenidos de finos, de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.</p> <p>UG-7.1: Roca Débil (R-2). Toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris</p> <p>UG-7.2: Roca Débil (R-2). Brecha volcanica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta</p> <p>UG-8: Roca muy fuerte (R-5). Colada andesítica fracturada poco intemperizada (GM-II) de color gris acero.</p>														
	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*	Em	pf*	pl*
PORTAL CRUCE				178	13.1	18.4							887	31.5	175.6
CASETAS				294	11.6	32.0	1007	24.5	40.0	7634	26.3	306.8			
PFP				783	27.7	69.5	206	11.2	31.1	1341	19.2	82.6			
CUNETAS	105	5.3	10.5	3986	17.8	101.4				697	14.7	31.4	25059	33.1	315.3
SOBRETALUD	133	7.2	13.5	597	24.6	74.9							1728	28.7	131.4
LOS PERROS	157	6.2	12.8	345	15.1	38.9									
TERCER CRUCE AUTOPISTA															
ENCINO															
GLORIETA SANTA FE-C.C. SANTA FE															
VIADUCTO SANTA FE															
IBERO / TELEVISA															
GLORIETA / VASCO DE QUIROGA															
VIADUCTO HONDONADA SAGARPA															
VIADUCTO CONAGUA - MANANTIAL															
INDUSTRIA MILITAR															
ESTADO MAYOR PRESIDENCIA															
PROMEDIO GLOBAL DE UNIDAD	128	6.2	12.2	397	17.4	47.9	342	16.6	35.3	1298	19.5	92.7	1718	31.0	193.7

Tabla 11b. Parámetros presiometricos promedio por tramo y por unidad geológica

MODULO MENARD Em (kg/cm²)
 PRESION DE FLUENCIA NETA pf * (kg/cm²)
 PRESION LIMITE NETA pl * (kg/cm²)

4. TRABAJOS DE LABORATORIO

Las muestras recuperadas se protegieron y se etiquetaron cuidadosamente para ser enviadas al laboratorio donde se efectuaron los siguientes ensayos conforme normas ASTM:

- Clasificación Visual y Manual (ASTM D 2487 - 11)
- Contenido de agua natural (ASTM D 2216 – 10)
- Granulometría por mallas (ASTM D 422 – 63 2007e2)
- Límites de consistencia (ASTM D4318 - 10e1)
- Compresión No confinada (ASTM D2166 / D2166M)
- Compresión Triaxial No consolidada No drenada (ASTM D2850 – 15)
- Compresión Triaxial consolidada drenada (ASTM D7181 – 11)
- Compresión simple en núcleos de roca (16, ASTM D2938-95(2002))
- Prueba brasileña en núcleos de roca (ASTM D3967 – 16)

Los resultados de estos trabajos se muestran tanto en los perfiles estratigráficos de cada sondeo mostrados en el **Anexo VI**, así como en el **Anexo X** donde se presentan los registros de los ensayos de laboratorio efectuados. En el **Anexo XIV** se presentan para cada sondeo las tablas que resumen la información de y laboratorio obtenida.

En las diez muestras señaladas en la siguiente tabla, recuperadas del sondeo SM-27 A, se determinó el contenido de cloruros, sulfatos y pH (la agresividad de los suelos frente al concreto) conforme a las normas ASTM-114-11 A, ASTM C 1218/1218 M-99 (2008), ASTM D 1293-99 (2005) y NMX-AA-021-1985.

MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	
	DE	HASTA
1 A	0.00	4.60
2 A	4.60	7.25
3 A	7.65	9.25
4 A	9.40	11.65
5 A	11.80	15.90
1 B	16.00	18.15
2 B	18.40	20.60
3 B	20.80	22.40
4 B	22.60	24.40
5 B	25.60	32.87

Tabla 12. Profundidad de muestras para ensayos químicos en suelos (sondeo SM-27 A)

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO

Conforme lo mencionado en el **Capítulo 2** de este reporte, la geología a lo largo del trazo no es compleja. Efectivamente. Predominan en su enorme mayoría depósitos de origen volcánico y depósitos aluviales. A grandes rasgos y con base en el levantamiento geológico efectuado se puede resumir lo siguiente:

- A. Del km 41+000 al km 42+620 predominan Andesitas, Dacitas y Brechas volcánicas.
- B. Del km 42+620 hasta la estación Observatorio, Brechas volcánicas, Tobas, Lahares, y Depósitos Aluviales.

Con el objetivo de normar el criterio con el que se deben interpretar los resultados de los trabajos de campo y laboratorio, es necesario indicar lo siguiente:

- Los materiales detectados son de origen ígneo fundamentalmente. Efectivamente, como se observa en la tabla de unidades geológicas, los materiales que existen en el trazo son rocas de tipo andesítico, dacítico, tobas limosas y tobas arenosas con gravas y fragmentos líticos, tobas brechoides y brechas volcánicas, lahares, y materiales tipo depósito aluvial de la formación Tarango. Estos materiales, con excepción de las rocas andesítica y dacítica, presentan un porcentaje significativo de fragmentos de tamaños grandes embebidos en una matriz fina potencialmente sensible a erosión ante la presencia de fluidos en movimiento.
 - Las técnicas de exploración con recuperación de muestras, establecidas en la denominada *“Especificación Técnica Particular. Estudio Geotécnico”*, son fundamentalmente de dos tipos. Ensaye de penetración estándar y muestreo con barril con rima y corona de diamante NQ.
 - Dadas las características dimensionales y geométricas de estas herramientas de exploración y considerando la naturaleza física y estratigráfica de los materiales del subsuelo, en principio es evidente que NO es factible esperar que el muestreo con la herramienta de penetración estándar efectuado, recupere los fragmentos con diámetros mayores al diámetro de la zapata del penetrómetro. Así mismo es evidente, que el barril muestreador con rima y corona de diamante, requiere para su utilización, el uso de fluidos de perforación, lo cual indiscutiblemente puede producir erosión de los materiales finos del terreno, al momento de efectuar el muestreo con dicho barril.
 - De lo anterior se concluye que las muestras recuperadas con los sondeos efectuados, así como los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados sobre dichas muestras, deben interpretarse
-

con criterio, apoyándose en todo momento en la geología detectada en la zona.

- Adicionalmente a lo anterior, es claro que ante la fuerte dificultad para obtener muestras de tipo “inalterado” que representaran adecuadamente las unidades geológicas compuestas por rocas de tipo andesítico, de tobas limosas, de tobas arenosas con gravas y fragmentos líticos, de tobas brechoides y brechas volcánicas, de lahares, y de materiales tipo “depósito aluvial” de la formación Tarango, **requirió de efectuar pruebas in situ con presiometro Menard**, que permitieron caracterizar desde un puntos de vista mecánico las diferentes formaciones que yacen en el sitio del proyecto. Los resultados obtenidos permitieron además caracterizar adecuadamente las unidades geológicas presentes.

Con base en lo anterior es claro que, para interpretar los resultados de los trabajos de campo y laboratorio, es necesario tomar en consideración los resultados del levantamiento geológico y los recorridos de campo efectuados y correlacionarlo con los resultados de la exploración efectuada tomando en consideración las limitaciones antes mencionadas.

Los factores que se tomaron en consideración para efectuar la interpretación indicada luego entonces son:

- I. La información geológica publicada existente para esta zona.
 - J. Los resultados del reconocimiento geológico efectuado en superficie respecto a la forma y posición de los depósitos y las relaciones estratigráficas entre las diferentes unidades, la litología y las variaciones laterales, espesores, color, etc.
 - K. Los recorridos de campo efectuados.
 - L. Los sondeos profundos de tipo directo ejecutados.
 - M. La inspección visual y manual de las muestras recuperadas durante y posteriormente a la ejecución de los sondeos.
 - N. Los resultados del conteo del número de golpes N en prueba de penetración estándar en aquellos materiales tobaceos de naturaleza fundamentalmente limosa y arenosa con una proporción no significativa de gravas y tamaños grandes.
 - O. Los resultados de los ensayos de laboratorio.
 - P. Los resultados de los ensayos “in – situ” de tipo presiométrico.
-



De todo lo anterior es evidente que los valores de los parámetros índices y mecánicos derivados de los ensayos de laboratorio en muestras recuperadas de los sondeos, no son el único elemento que debe tomarse en consideración en la clasificación de los materiales del subsuelo. En este caso se utilizaron a título orientativo y complementados con toda la información mencionada anteriormente.

Con base en los anteriores criterios y a manera de ejemplo, se presenta la interpretación que se realizó de un pequeño sector del trazo ubicado entre los cadenamientos KM 44+860 - 45+150 en donde se utilizó la información de los sondeos efectuados en esta zona:

En este sector del tramo se tiene información de los sondeos SPP-28A y SM-22, así como de los sondeos S-29 y S29-A, mismos que se muestran enseguida para pronta referencia.

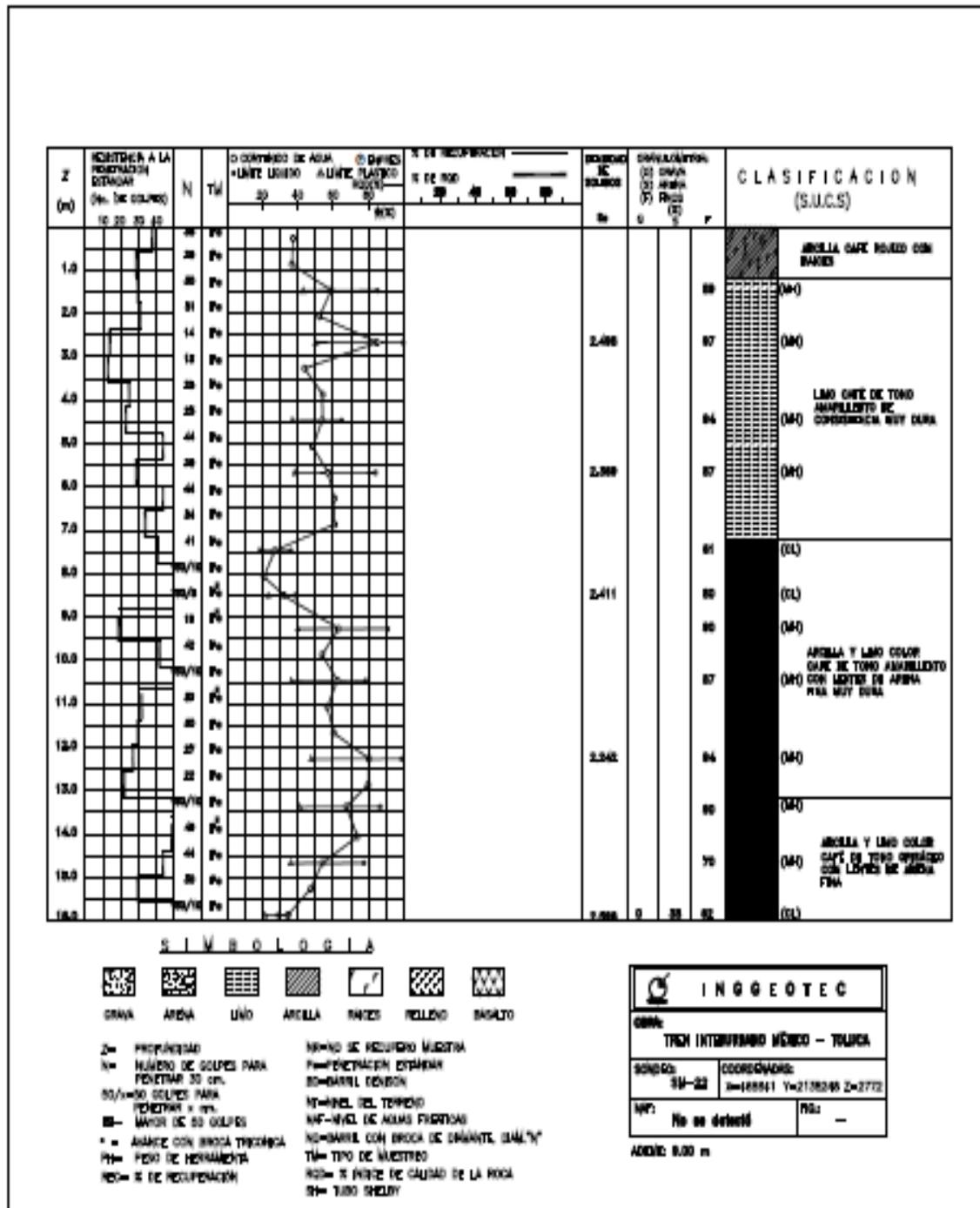


Figura 27a. Sondeo SM-22

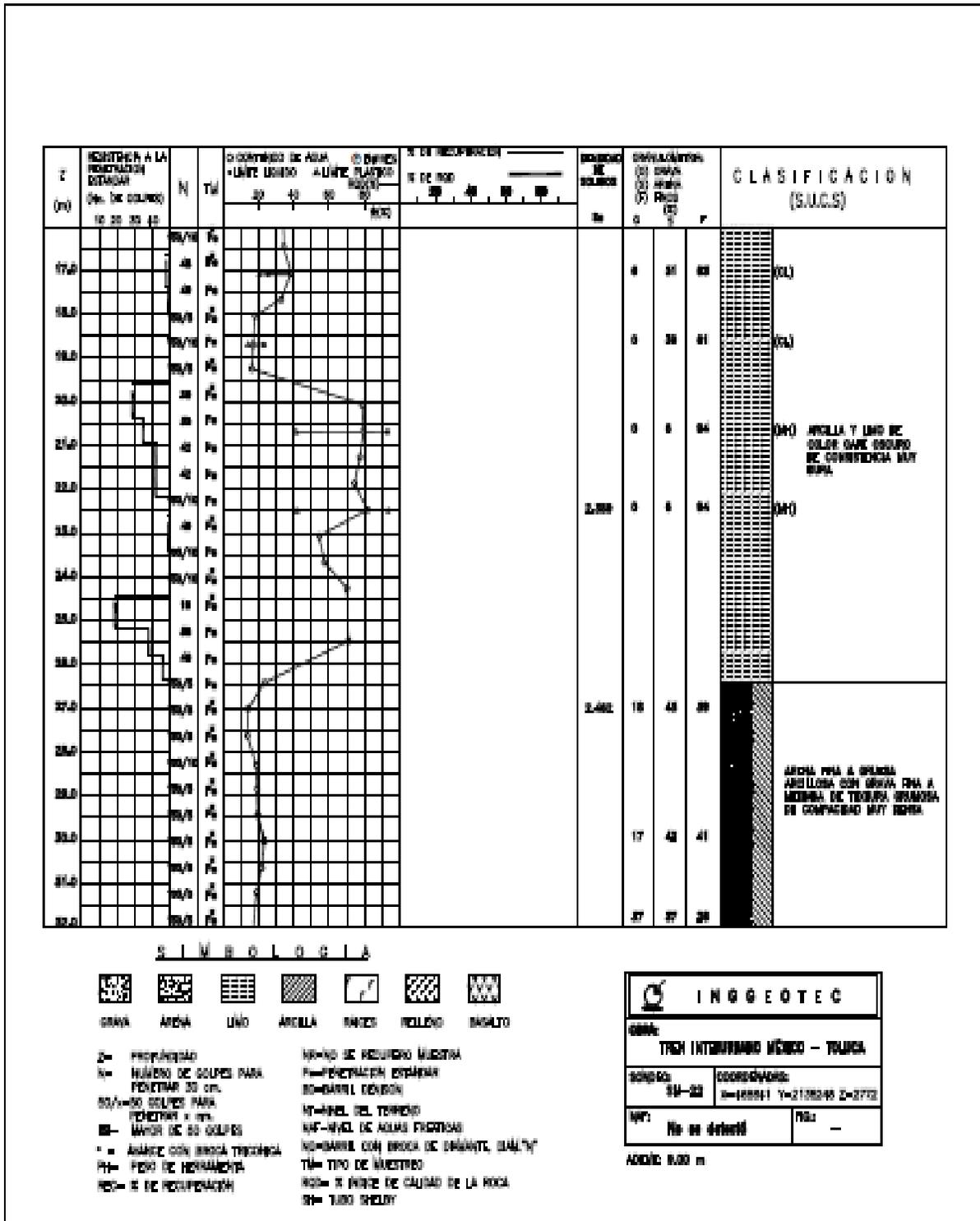


Figura 27b. Sondeo SM-22

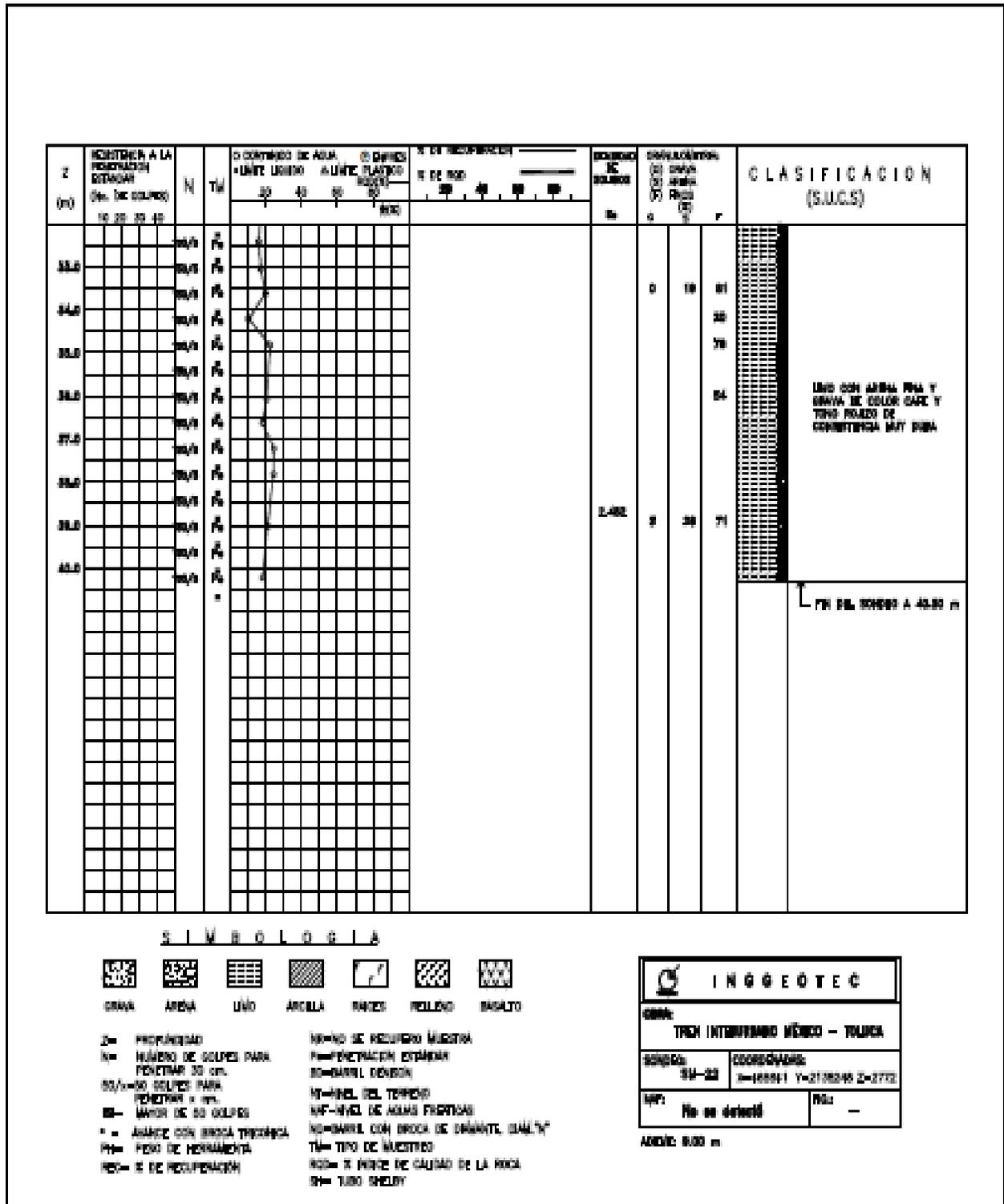


Figura 27c. Sondeo SM-22



SONDEO MIXTO

Proyecto: Construcción y obras complementarias del Tramo 3 para el Pádelo elevado del Ten. Infante Mercedes Roldán Valle de México, localización 0+102 y 0+192				SONDEO S-29A	PROFUNDIDAD: 40.00 m
ESQA: Curato	EMPO: MAB/D/DE/H/1	EDM: DE. 00/00/00/00/00	FECHA: 08/08/2014	E: 488.834	T: 23847.148
ESP. CAMPO: Demanda Gómez Ojeda	ESVD: Ing. Juan Manuel Ruiz Saldaña		Int. 44995	Z: 2765.00 m	

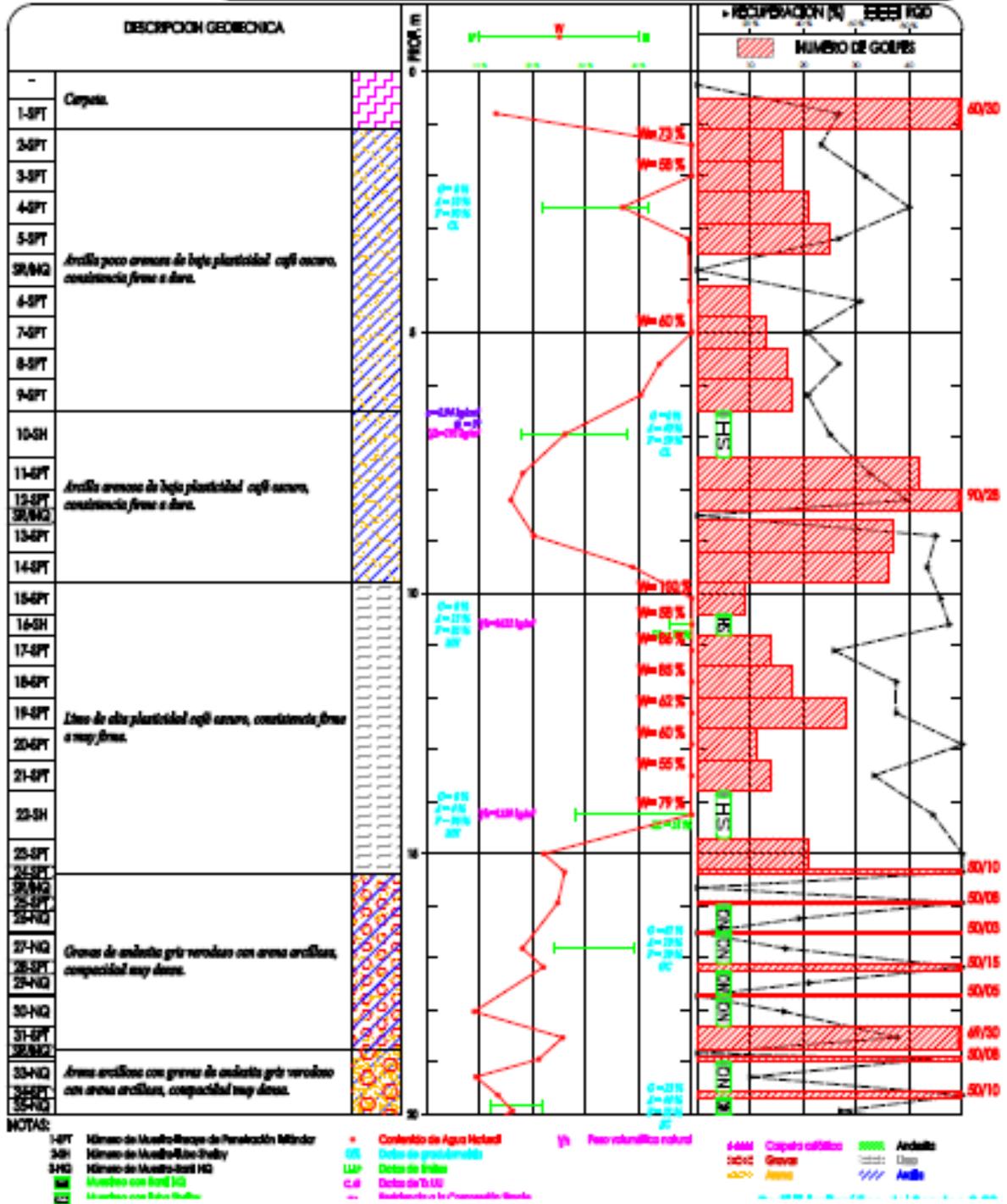


Figura 29a. Sondeo S-29A

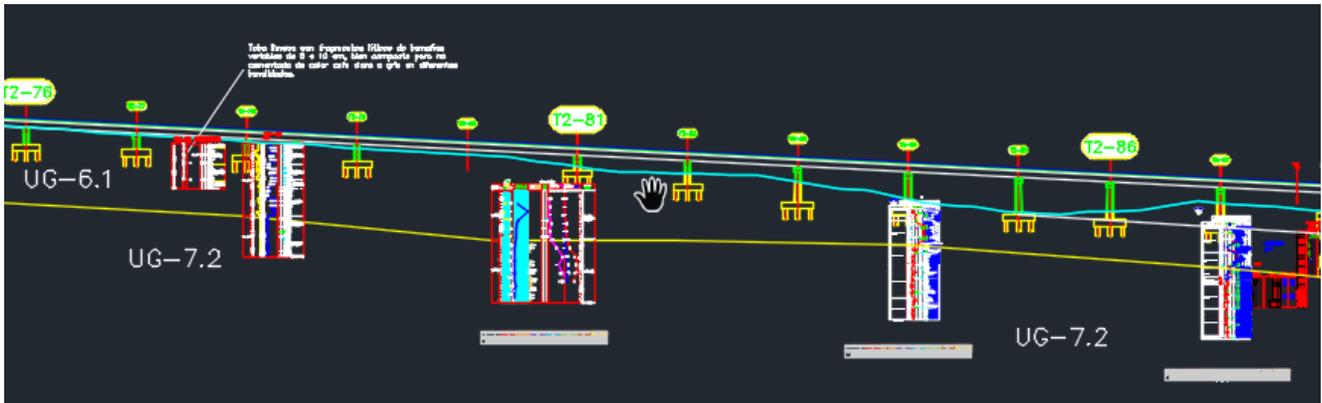


Figura 30. Unidades geológicas del KM 44+860 - 45+000

En los sondeos exploratorios se detectó la presencia de materiales con clasificaciones tales como “limo café, arcilla con limo café, Toba limo arenosa con gravas, arena limosa con gravas, limo poco arenoso de alta plasticidad café oscuro, limo de alta plasticidad café oscuro de consistencia firme.

Estos materiales en la prueba de penetración estándar reportaron números de golpes de entre 10 y 40 en promedio.

Asimismo, el sondeo presiométrico mostró un comportamiento relativamente constante en los valores de presión límite, presión de fluencia y el módulo presiométrico hasta 24 m de profundidad, reportando a continuación roca débil a muy fuerte.

En superficie existen afloramientos extensos de Toba limo arenosa de color café con gravas, de tal suerte que se pudieron correlacionar dichos afloramientos con los resultados de los sondeos, clasificándolos como parte de la unidad UG-6.1 (toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme $15 < NSPT < 30$ golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color café claro a gris en diferentes tonalidades), situando el contacto de ésta unidad en el subsuelo a profundidades de 26.40 m, 19.50 m, 12.80 m y 15.40m respectivamente.

Subyaciendo al estrato anterior la naturaleza de los materiales cambia, el número de golpes en la prueba de penetración aumenta a más de 50. El comportamiento en resistencia mostrado en las pruebas presiométricas aumenta de manera muy significativa con módulo presiométrico y presión límite mayores que 3805 y 250 kg/cm², respectivamente. En este caso, la clasificación reportada en los sondeos señala “limo con gravas, andesita fracturada a muy fracturada, grava mal graduada con poca arena arcillosa, y grava de andesita con arena arcillosa”, observando además que en esta unidad se utilizó el barril NQ para su muestreo.

Esta unidad fue interpretada y correlacionada con una brecha volcánica, con fragmentos líticos de entre 5

y 40 cm. Esta unidad aflora hacia la zona de la caseta expuesta de manera muy clara en los cortes de la carretera.

continuación, mostramos fotografías de los afloramientos característicos de estas unidades.



Foto 36. Afloramiento de tobas limo arenosas de color café.



Foto 37. Brecha volcánica con fragmentos líticos de entre 5 y 40 cm.

Con base en lo anterior se estableció la secuencia de unidades geológicas en profundidad que se muestra en los planos geológicos del **Anexo XII**.

6. CARACTERISTICAS GEOLÓGICO – GEOTÉCNICAS A LO LARGO DEL TRAZO

El levantamiento y los recorridos geológicos efectuados, así como los resultados de la exploración realizada, permitieron establecer que los materiales detectados a lo largo del trazo son de naturaleza predominantemente ígnea. Resultado de lo anterior se acordó con la proyectista la presencia de las siguientes unidades geológicas:

UNIDADES GEOLOGICAS TREN INTERURBANO MEXICO TOLUCA Km 41+334 al Km 57+494	
DESCRIPCION	UNIDAD GEOTECNICA
Azolves.	UG-1.1
Rellenos antrópicos compactos: Conforman principalmente las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta 15<NSPT<50 golpes.	UG-1.2
Depósitos de arcilla blanda 2< N < 10	UG-1.3
Depósitos aluviales de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz arenosa con algo de finos muy compacta NSPT >50 golpes.	UG-2
Depósitos de arena con limo y gravas aisladas de alta compacidad N>50.	UG-3.1
Depósitos de la formación Tarango de color cafe claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa muy compacta NSPT >50 golpes.	UG-4.1
Depósitos de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta 30<NSPT<50 golpes.	UG-4.2
Depósitos de lahar de color gris oscuro, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta NSPT >50 golpes.	UG-5
Toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme 15<NSPT<30 golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.	UG-6.1
Toba con fragmentos líticos de tamaños variables de 15 a 40 cm empacados en una matriz arenosa muy compacta NSPT >50 golpes. con diferentes contenidos de finos, de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.	UG-6.2
Roca Débil (R-2). Toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV)	UG-7.1
Roca Débil (R-2). Brecha volcanica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV).	UG-7.2
Roca muy fuerte (R-5). Colada andesítica fracturada poco intemperizada (GM-II) de color gris acero.	UG-8

Tabla 13. Unidades Geológicas en la zona de estudio

Para la clasificación de las unidades geológicas indicadas se recurrió al criterio modificado de Waltham y a los grados de meteorización indicados por la ISRM.

Grado	Descripción	Identificación de terreno	Rango aproximado de resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)
R6	Roca extremadamente fuerte	La muestra solo puede ser astillada con el martillo geológico	>250
R5	Roca muy fuerte	La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada	100 - 250
R4	Roca fuerte	La muestra requiere mas de un golpe del martillo geológico para ser fracturada	50 - 100
R3	Roca medianamente fuerte	No puede ser escarbada o disgregada por una cortapluma, la muestra se fractura con un solo golpe del martillo geológico	25 - 50
R2	Roca débil	Puede ser escarbada por la cortapluma con dificultad, se deforma o disgrega con un fuerte golpe de la punta del martillo	5,0 - 25
R1	Roca muy débil	Se disgrega con un golpe fuerte de la punta del martillo geológico, puede ser escarbada por la cortapluma	1,0 - 5,0
R0	Roca extremadamente débil	Marcada por la uña	0,25 - 1,0

Tabla 14. Criterio de Waltham

TERMINO	DESCRIPCIÓN	GRADO
Roca Fresca	No presenta signos visibles de meteorización en la roca: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores.	I
Levemente Meteorizada	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar externamente algo más débil, que en su condición fresca.	II
Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.	III
Muy Meteorizada	Más de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos.	IV
Completamente Meteorizada	Toda la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.	V
Suelo Residual	Toda la roca está convertida como suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

Tabla 15. Grados de meteorización ISRM

Con base en lo anterior se elaboraron planos con la interpretación geológica del tramo en estudio, mismos



que se muestran en el **Anexo XII**.

Como se aprecia en la tabla de unidades geológicas, en los planos geológicos correspondientes, y como se indicó en el **Capítulo V** de este informe, las unidades geológicas detectadas no son complejas.

Como es de esperar en una obra lineal de esta naturaleza, existen zonas en las cuales se presentan variaciones y/o cambios de facies. Dada la predominancia de materiales ígneos a lo largo del trazo es factible darles seguimiento a lo largo del trazo como se muestra en la secuencia que se indica enseguida. Es altamente recomendable que para seguir la discusión de unidades geológicas que se presenta enseguida se tenga a la mano el plano geológico correspondiente.

Zona I Del km 41+200 al km 42+100 aproximadamente, se detectó subyaciendo la unidad UG-8 constituida por andesitas poco intemperizadas color gris acero. El módulo presiométrico es variable entre 3721 y 16546 kg/cm², salvo en la parte más superficial de la unidad en donde se detectaron valores tan bajos como 247 kg/cm², probablemente debido a la alteración superficial en el contacto con unidades superiores. La interpretación efectuada indica que sobreyace a partir del km 41+500 la unidad denominada UG-7.1 formada por toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV), no se dispone de parámetros presiométricos para esta unidad en este subtramo por lo cual se recomienda efectuar ensayos presiométricos adicionales para disponer de más datos a este respecto. Sobreyace la unidad UG-7.2 constituida por una Roca Débil (R-2). Brecha volcánica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV). En esta unidad los módulos presiométricos varían entre 144 y 3821 kg/cm². Los valores de los límites de consistencia y del valor SPT son congruentes entre sí y con lo indicado en la tabla de unidades geológicas. Para esta unidad aplica una recomendación similar a la indicada para la unidad UG-7.1 en el sentido de efectuar ensayos presiométricos adicionales. Superficialmente se encuentra la unidad UG-6.1, toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme 15<NSPT<30 golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color café claro a gris en diferentes tonalidades. Solamente se dispone de un valor de módulo presiométrico para esta unidad en este tramo, 209 kg/cm², aplica la misma recomendación. Los valores de los límites de consistencia se encuentran en el rango de 20% a 150%, aproximadamente. Los valores SPT son compatibles con los valores indicados en la tabla para la unidad UG-6.1. En algunas zonas del subtramo se encontró superficialmente cuerpo de terraplén conformado por fragmentos líticos empacados en una matriz arenosa.

Zona II Del km 42+100 al km 43+500 se presenta en la mayor parte del subtramo superficialmente y hasta una profundidad máxima del orden de 10 m la unidad UG-6.1, Toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme 15<NSPT<30 golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color café claro a gris en diferentes tonalidades. Solamente se dispone de dos valores de módulo

presiométrico para esta unidad en este tramo con valores iguales a 346 y 1226 kg/cm². En general los valores del índice plástico se encuentran en rangos equiparables entre si y el valor de golpeo N es congruente con lo indicado en la Tabla de Unidades. Subyace y hasta una profundidad máxima de 30 m la unidad UG-7.2 constituida por una Roca Débil (R-2). Brecha volcánica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV). Su módulo presiométrico varía entre 132 y 5434 kg/cm². Los valores de los límites de consistencia son variables entre 14% para el límite plástico a 89% para el límite líquido. Se aprecian variaciones notables del valor del módulo presiométrico para una misma unidad y aún en un mismo sondeo lo cual pudiera ser indicativo de que la prueba en algunos casos se efectuó en porciones donde predominaba la matriz o bien los fragmentos. Continúa hasta una profundidad del orden de 50 m la unidad UG-7.1 formada por toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV). Su módulo presiométrico varía entre 44 y 15578 kg/cm², ambos valores extremos y que se estima no son representativos del conjunto. Los valores de contenido de agua natural se ubican en el rango de 20 a 40% fundamentalmente. Nuevamente, la variación en los valores del módulo presiométrico pudiera ser imputable en principio a que la prueba se ejecutó en materiales donde predominaban la matriz o los fragmentos. Existen algunas zonas como la que se encuentra a la altura del km 43+00 y del km 43+200 en las cuales aparentemente se ubica un paquete de la unidad UG-6.1 hasta 33.5 m de profundidad o bien se detecta lo que se considera una bolsa de material tipo UG-1.2 respectivamente.

Zona III Del Km 43+500 al km 44+000. Superficialmente existe y hasta una profundidad máxima de 17 m la unidad UG-7-2 Roca Débil (R-2). Brecha volcánica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV). Solamente se dispone de los valores de módulos presiométricos en el sondeo SP-22 por lo cual no es factible contrastarlos para discutir la representatividad de los mismos. Subyace hasta 25.5 m de profundidad la unidad UG-7.1. Roca Débil (R-2). Toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV). Sus módulos presiométricos parecen aumentar con la profundidad, pero no se dispone de más datos para establecer este hecho de manera contundente. Continúa hasta la máxima profundidad explorada la unidad UG-8.

Zona IV Del km 44+000 al km 46+000 se presenta superficialmente un cambio lateral de facies en el km 44+050. Entre los sondeos SP-33 y SP-35 aproximadamente, se presenta la unidad UG-1.2 Rellenos antrópicos compactos. Conformada principalmente las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta 15<NSPT<50 golpes. Subyace hasta una profundidad máxima del orden de 33 m, en esta sección y aflorando en la totalidad del subtramo la unidad UG-6.1 ya descrita anteriormente. Los módulos presiométricos varían entre 47 a 10929 kg/cm². Subyace la unidad UG-7.2 con valores presiométricos variables entre 519 y 16,853 kg/cm², valor este último extremo y probablemente no representativo de las



condiciones del subsuelo. La humedad natural se ubica generalmente en el orden de 10 a 15%.

A la altura del km 44+100 se presenta una faja de terreno afectada por el cruce de un arroyo el cual parece corresponder con la traza de una falla geológica. Se presenta una falta de continuidad lateral entre los estratos del sondeo SM-24 y S24. Por lo que hace falta información del subsuelo que permita detallar esa condición del subsuelo en los apoyos T2-60 y T2-61.

A la altura del km 45+830 se presenta lo que se considera un cambio lateral de facies.

Zona V Del km 46+000 al km 46+770. Del 45+800 al 46+250, y del 46+460 al 46+700 se detecta aflorando la unidad UG-1.2, con una intercalación intermedia correspondiente a la unidad UG-6.1. Subyace la unidad UG-6.2. Sus módulos presiométricos varían entre 81 y 287 kg/cm². Finalmente se encontró la unidad UG-4.2 para la cual no se dispone de módulos presiométricos. En el sondeo SP-35 se detectó lo que en principio parece ser otro flujo de andesita en un antiguo Paleovalle.

Zona VI km 46+770 al km 49+600. Aparece superficialmente entre los km 48+400 al 49+100 la unidad UG-1.2. Del 46+200 al 46+800 aflora superficialmente la unidad UG-6.1. Asimismo, entre los cadenamientos 49+100 al 49+300 se detecta un importante depósito de azolves. Superficialmente en el resto del subtramo y con espesor máximo del orden de 20 m se presenta la unidad UG-4.1. Depósitos de la formación Tarango de color café claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa muy compacta NSPT >50 golpes. Los módulos presiométricos varían entre 284 y 17249 kg/cm². Se presentan variaciones muy importantes en el módulo aún en un mismo sondeo, (por ejemplo, SP-44, SP-51A), lo cual pudiera deberse en principio a razones análogas a las expuestas anteriormente, es decir, los valores relativamente elevados pudieran corresponder a que la prueba presiométrica se efectuó en fragmentos de roca de dimensiones relativamente grandes, y los valores menores en la fracción más fina del depósito. El contenido de agua natural es del orden del 10 al 20% generalmente. Subyaciendo a todo lo anterior se presenta la unidad UG-4.2, Depósitos de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos subredondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta 30<NSPT<50 golpes. En este caso en forma análoga a la anterior se presentan valores contrastantes del módulo presiométrico en un mismo sondeo, por ejemplo, SP-44, lo cual puede obedecer a las mismas razones expuestas anteriormente. La humedad natural se ubica en el orden del 10 al 20%. En el sondeo SPT-14 se presenta una lente de suelos relativamente blandos, condición que debe ser investigada con mayor detalle. En el km 49+540 (SM-05) se detectaron espesores importantes (39 m) de arcilla blanda que contrastan con la estratigrafía detectada en los sondeos aledaños. Se considera que este sitio pudiera corresponder con alguna zona de fractura o falla y que la zona arcillosa es la faja que corresponde con la brecha de falla la cual se redujo a arcilla por efectos de la percolación de agua, intemperismo, etc. Esta condición se repite en el sondeo SPT-14 aunque en mucha menor proporción. Es evidente que estas zonas requieren exploración adicional.

Zona VII Del km 49+600 al km 50+600 se encuentra aflorando y con espesor máximo del orden de 10.5 m la unidad UG-1.2, Rellenos antrópicos compactos, Conformados principalmente por las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen principalmente por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta $15 < NSPT < 50$ golpes. Subyace con espesor máximo la unidad UG-4.2. Los módulos presiométricos reportados son iguales a 56 kg/cm^2 mínimo y $18,816 \text{ kg/cm}^2$ máximo. Estos valores tan variables (ver sondeos SP-56 y SPP-60) pueden obedecer a causas similares a las expuestas anteriormente. Es notorio el contraste entre los sondeos SPP-60 y SPP-61 en los cuales para número de golpes SPT relativamente similares, se obtienen valores de módulo presiométrico sumamente distintos entre ambos sondeos. Esta situación se repite en el SPP-56 en el cual por cierto se obtuvo el valor más elevado del módulo presiométrico. Continúa hasta la máxima profundidad explorada la unidad UG-5, depósitos de lahar de color gris oscuro, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta $NSPT > 50$ golpes. Los valores de los módulos presiométricos reportan valores mínimos y máximos de 1180 y $19,658 \text{ kg/cm}^2$, lo cual en principio pudiera ser explicable debido a la presencia de fragmentos de elevadas dimensiones en el cuerpo del lahar.

Zona VIII Del km 50+600 al km 51+950 Se encuentran superficialmente rellenos antrópicos compactos. Continúa y hasta 27 m de profundidad (máxima) la unidad UG-4.1. Es interesante notar que se repite la variabilidad de los módulos expuesta anteriormente, por razones en principio similares a las enumeradas. Subyace la unidad UG-5. Se aprecia que siguen existiendo las variaciones en módulo presiométrico las cuales en principio son imputables a las razones anteriormente expuestas.

Zona IX Del km 51+950 al km 52+400 En esta zona, debido a problemáticas sociales, se encuentran pendientes de ejecución los sondeos, por lo cual NO se pueden establecer unidades geológicas. Se detecta un cambio lateral de facies.

Zona X Del km 52+400 al km 57+000 la estratigrafía es relativamente uniforme. Superficialmente se detectó la unidad UG-3.1, depósitos de compacidad alta de arena con limo y gravas aisladas $N > 50$. Subyace, con la excepción del tramo comprendido entre los km 54+000 al km 54+870, la unidad UG-4.1 depósitos de la formación Tarango de color café claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa muy compacta $NSPT > 50$ golpes. No obstante, la relativa uniformidad en este tramo es obvio que existen variaciones locales dignas de ser tomadas en consideración:

- Km 53+400 al km 53+540. Los apoyos T5-29, T5-33 y T5-36 se sitúan en lo que puede interpretarse como una zona posible de falla, relacionada con la "Falla Contadero". En esta zona los sondeos muestran variaciones laterales y verticales de los estratos, perdiendo así la continuidad lo que sugieren desplazamiento de bloques.
-



- Km 52+700 al km 53+300. Aflora superficialmente la unidad UG-2. Depósitos aluviales de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz arenosa con algo de finos, muy compacta, N SPT >50.
- Km 54+100 al km 54+200 y 55+930 al km 56+080. Se detecta lo que aparentemente son encapsulamientos de la unidad de la UG-2.
- Km 56+050 al km 56+370. Aflora superficialmente la unidad UG-1.1, Azolves de la presa Tacubaya, conformados por depósitos de arenas finas a medias con gravas aisladas de compactidad predominantemente suelta a media $4 < NSPT < 20$ golpes de color gris a café.
- km 52+400 al 52+700 y Km 56+650 al km 57+200. Aflora la unidad UG-1.2. Rellenos antrópicos compactos: Conforman principalmente las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta $15 < NSPT < 50$ golpes.

Se aprecia nuevamente la misma variabilidad entre módulos presiométricos.

Con objeto de verificar la estratigrafía se han efectuado visitas a diversos puntos en los que a la fecha de edición de este reporte se encuentra en proceso la construcción de pilas de cimentación.

Por ejemplo, en el **Apoyo T2-103**. En este apoyo el día 14 de octubre de 2016 se encontraba en proceso la construcción de elementos profundos de cimentación. En este punto se detectaron las unidades UG-6.1 y UG-6.2. Como se aprecia en la fotografía el material excavado para la pila en ese momento a 45 m de profundidad, así como los cortes cercanos concuerdan adecuadamente con lo indicado en el plano geológico a lo largo del trazo. Lo anterior se ha verificado también en diversas reuniones de proyecto en las cuales se han mostrado filmaciones del material detectado durante la perforación de los elementos profundos de cimentación.



Foto 38. Excavación de Pila en el apoyo T2-103



Foto 39. Vista del material excavado a 45 m de profundidad.

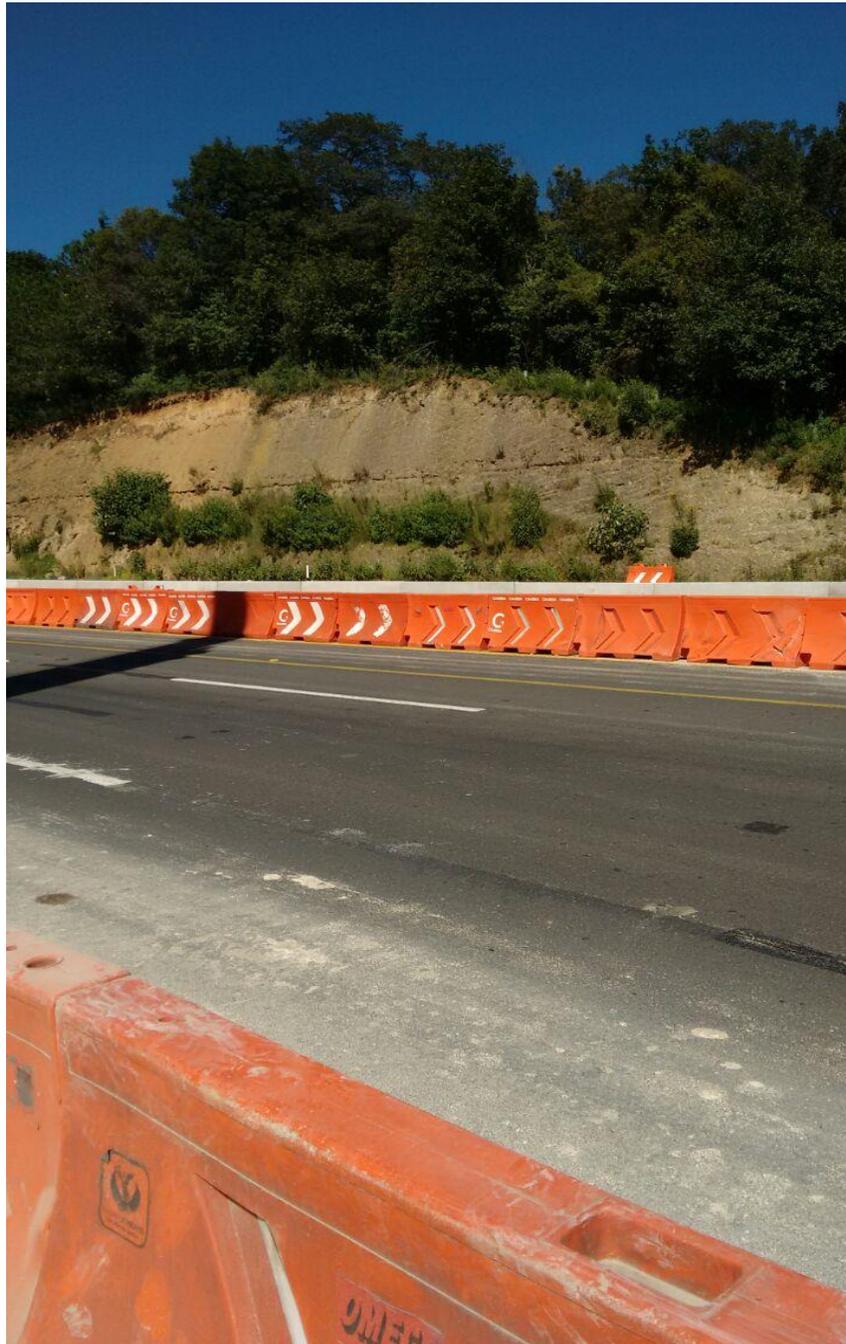


Foto 40. Corte cercano al apoyo T2-103

Es evidente que, dada la naturaleza puntual de las exploraciones efectuadas, el perfil geológico pudiera sufrir algunos ajustes conforme continúe la excavación de los elementos profundos de cimentación.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- a) Se proyecta la construcción del Tren Interurbano México – Toluca. Como parte de los trabajos del proyecto **CAABSA** procedió a la ejecución de un estudio geotécnico complementario al desarrollado en el denominado proyecto ejecutivo, entre los cadenamientos 41+334 (portal cruce) y 57+494, (callejero Tacubaya-Adolfo Ruíz Cortines), Tramo III, con los alcances que se indican en el **inciso 1.2** de este reporte.

 - b) Para la ejecución del Estudio Geotécnico Complementario se proporcionó a **CAABSA** un documento denominado **ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARTICULAR. ESTUDIO GEOTÉCNICO**. Como se indica en el cuerpo de este informe, para mejorar la caracterización del subsuelo, resultó necesario efectuar adecuaciones al tipo de exploración y ensayos “in-situ” indicada en la **ESPECIFICACION**. El más relevante de estos cambios fue la ejecución de ensayos “in-situ” de tipo presiométrico, los cuales, como se indica en el cuerpo de este informe, resultaron indispensables para la completa caracterización del subsuelo.

 - c) El subsuelo detectado a lo largo del trazo es de origen esencialmente ígneo. Como resultado del levantamiento geológico realizado, de la exploración efectuada, de los ensayos de laboratorio y de la interpretación de toda esta información se definieron las siguientes unidades geológicas, mismas que se muestran en los planos del **Anexo XII**:
-

UNIDADES GEOLOGICAS TREN INTERURBANO MEXICO TOLUCA Km 41+334 al Km 57+494	
DESCRIPCION	UNIDAD GEOTECNICA
Azolves.	UG-1.1
Rellenos antrópicos compactos: Conforman principalmente las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta 15<NSPT<50 golpes.	UG-1.2
Depósitos de arcilla blanda 2< N < 10	UG-1.3
Depósitos aluviales de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz arenosa con algo de finos muy compacta NSPT >50 golpes.	UG-2
Depósitos de arena con limo y gravas aisladas de alta compactación N>50.	UG-3.1
Depósitos de la formación Tarango de color cafe claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa muy compacta NSPT >50 golpes.	UG-4.1
Depósitos de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta 30<NSPT<50 golpes.	UG-4.2
Depósitos de lahar de color gris oscuro, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta NSPT >50 golpes.	UG-5
Toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme 15<NSPT<30 golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.	UG-6.1
Toba con fragmentos líticos de tamaños variables de 15 a 40 cm empacados en una matriz arenosa muy compacta NSPT >50 golpes. con diferentes contenidos de finos, de color cafe claro a gris en diferentes tonalidades.	UG-6.2
Roca Débil (R-2). Toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV)	UG-7.1
Roca Débil (R-2). Brecha volcanica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV).	UG-7.2
Roca muy fuerte (R-5). Colada andesítica fracturada poco intemperizada (GM-II) de color gris acero.	UG-8

Tabla 16. Unidades Geológicas.

- d) Tomando en cuenta las características físicas y estratigráficas del subsuelo indicadas en la tabla anterior, así como los resultados de los trabajos de exploración en campo ensayos “in-situ” y ensayos de laboratorio efectuados, se obtuvieron los planos mostrados en el **Anexo XII**; para su

análisis e interpretación es fundamental considerar lo siguiente:

- La información geológica publicada existente para esta zona.
- Los resultados del levantamiento geológico efectuado, en el que se señala la forma de depósito de los materiales y las relaciones estratigráficas con otras unidades, litología, variaciones laterales, espesores, color, etc.
- Los recorridos de campo efectuados.
- La proximidad de los sondeos.
- La inspección visual y manual de las muestras recuperadas durante la ejecución de los sondeos.
- Los resultados del conteo del número de golpes N en prueba de penetración estándar, en aquellos materiales tobaceos de naturaleza fundamentalmente limosa y arenosa con una proporción no significativa de gravas y tamaños grandes.
- Considerando las características del subsuelo, es evidente que los valores de los parámetros índice y mecánicos derivados de los ensayos de laboratorio en muestras recuperadas de los sondeos, no son el elemento guía fundamental en la caracterización de los materiales del subsuelo. Solamente se utilizaron a título orientativo. En el **Anexo XIV**, y para cada sondeo exploratorio, se presentan en forma tabular los resultados de los ensayos de laboratorio.

e) En resumen, resultó factible establecer la siguiente zonificación a lo largo del tramo en estudio:

Zona I Del km 41+200 al km 42+100 aproximadamente, se detectó subyaciendo la unidad UG-8 constituida por andesitas poco intemperizadas color gris acero. La interpretación efectuada indica que sobreyace a partir del km 41+500 la unidad denominada UG-7.1 formada por toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV), no se dispone de parámetros presiométricos para esta unidad en este subtramo. Sobreyace la unidad UG-7.2 constituida por una Roca Débil (R-2). Brecha volcánica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV). En esta unidad los módulos presiométricos varían entre 144 y 3821 kg/cm². Superficialmente se encuentra la unidad UG-6.1, toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme 15<NSPT<30 golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color café claro a gris en diferentes tonalidades. Solamente se dispone de un valor de módulo presiométrico para esta unidad en este tramo, 209 kg/cm². En algunas zonas del subtramo se encontró superficialmente cuerpo de terraplén conformado por fragmentos líticos empacados en una matriz arenosa.

Zona II Del km 42+100 al km 43+500 se presenta en la mayor parte del subtramo superficialmente y hasta una profundidad máxima del orden de 10 m la unidad UG-6.1, Toba limosa con arena fina de consistencia firme a muy firme $15 < NSPT < 30$ golpes, con fragmentos líticos aislados de tamaños variables de 5 a 15 cm de color café claro a gris en diferentes tonalidades. Subyace y hasta una profundidad máxima de 30 m la unidad UG-7.2 constituida por una Roca Débil (R-2). Brecha volcánica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV). Su módulo presiométrico varía entre 132 y 5434 kg/cm². Se aprecian variaciones notables del valor del módulo presiométrico para una misma unidad y aún en un mismo sondeo lo cual pudiera ser indicativo de que la prueba en algunos casos se efectuó en porciones donde predominaba la matriz o bien los fragmentos. Continúa hasta una profundidad del orden de 50 m la unidad UG-7.1 formada por toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV). Su módulo presiométrico varía entre 44 y 15578 kg/cm², ambos valores extremos y que se estima no son representativos del conjunto. Existen algunas zonas como la que se encuentra a la altura del km 43+00 y del km 43+200 en las cuales aparentemente se ubica un paquete de la unidad UG-6.1 hasta 33.5 m de profundidad o bien se detecta lo que se considera una bolsa de material tipo UG-1.2 respectivamente.

Zona III Del Km 43+500 al km 44+000. Superficialmente existe y hasta una profundidad máxima del orden de 17 m la unidad UG-7-2 Roca Débil (R-2). Brecha volcánica de color gris a café oscuro y tonos rojizos compuesta por líticos de andesita de tamaños variables de entre 5 y 40 cm empacados en una matriz arcillosa de consistencia muy firme. La roca se presenta alterada (GM-III/IV). Solamente se dispone de los valores de módulos presiométricos en el sondeo SP-22 por lo cual no es factible contrastarlos para discutir la representatividad de los mismos. Subyace hasta 25.5 m de profundidad la unidad UG-7.1. Roca Débil (R-2). Toba brechoide constituida de fragmentos líticos de tamaños variables de entre 5 y 20 cm empacados en una matriz arenosa compacta a muy compacta con diferentes contenidos de finos, de color gris en diferentes tonalidades. Alterada (GM-III/IV). Sus módulos presiométricos parecen aumentar con la profundidad, pero no se dispone de más datos para establecer este hecho de manera contundente. Continúa hasta la máxima profundidad explorada la unidad UG-8.

Zona IV Del km 44+000 al km 46+000 se presenta superficialmente un cambio lateral de facies en el km 44+050. Entre los sondeos SP-33 y SP-35 aproximadamente, se presenta la unidad UG-1.2 Rellenos antrópicos compactos. Conformada principalmente las estructuras de los terraplenes de la autopista. Se componen por depósitos de limos y arenas finas a medias con gravas de compactación media a compacta $15 < NSPT < 50$ golpes. Subyace hasta una profundidad máxima del orden de 33 m, en esta sección y aflorando en la totalidad del subtramo la unidad UG-6.1 ya descrita

anteriormente. Los módulos presiométricos varían entre 47 a 10929 kg/cm². Subyace la unidad UG-7.2 con valores presiométricos variables entre 519 y 16,853 kg/cm², valor este último extremo y probablemente no representativo de las condiciones del subsuelo.

A la altura del km 44+100 se presenta una faja de terreno afectada por el cruce de un arroyo el cual parece corresponder con la traza de una falla geológica. Se presenta una falta de continuidad lateral entre los estratos del sondeo SM-24 y S24. Por lo que hace falta información del subsuelo que permita detallar esa condición del subsuelo en los apoyos T2-60 y T2-61.

A la altura del km 45+830 se presenta un cambio lateral de facies

Zona V Del km 46+000 al km 46+770. Del 45+800 al 46+250, y del 46+460 al 46+700 se detecta aflorando la unidad UG-1.2, con una intercalación intermedia correspondiente a la unidad UG-6.1. Subyace la unidad UG-6.2. Sus módulos presiométricos varían entre 81 y 287 kg/cm². Finalmente se encontró la unidad UG-4.2 para la cual no se dispone de módulos presiométricos. En el sondeo SP-35 se detectó lo que en principio parece ser otro flujo de andesita en un antiguo Paleovalle.

Zona VI km 46+770 al km 49+600. Aparece superficialmente entre los km 48+400 al 49+100 la unidad UG-1.2. Del 46+200 al 46+800 aflora superficialmente la unidad UG-6.1. Asimismo, entre los cadenamientos 49+100 al 49+300 se detecta un importante depósito de azolves. Superficialmente en el resto del subtramo y con espesor máximo del orden de 20 m se presenta la unidad UG-4.1. Depósitos de la formación Tarango de color café claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa muy compacta NSPT >50 golpes. Los módulos presiométricos varían entre 284 y 17249 kg/cm². Se presentan variaciones muy importantes en el módulo aún en un mismo sondeo, (por ejemplo, SP-44, SP-51A), lo cual pudiera deberse en principio a razones análogas a las expuestas anteriormente, es decir, los valores relativamente elevados pudieran corresponder a que la prueba presiométrica se efectuó en fragmentos de roca de dimensiones relativamente grandes, y los valores menores en la fracción más fina del depósito. Subyaciendo a todo lo anterior se presenta la unidad UG-4.2, Depósitos de la formación Tarango de color gris, constituidos por una mezcla de fragmentos subredondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta 30<NSPT<50 golpes. En este caso en forma análoga a la anterior se presentan valores contrastantes del módulo presiométrico en un mismo sondeo, por ejemplo, SP-44, lo cual puede obedecer a las mismas razones expuestas anteriormente. En el sondeo SPT-14 se presenta una lente de suelos relativamente blandos, condición que debe ser investigada con mayor detalle. En el km 49+540 (SM-05) se detectaron espesores importantes (39 m) de arcilla blanda que contrastan con la estratigrafía detectada en los sondeos aledaños. Se considera que este sitio pudiera corresponder con alguna zona de fractura o falla y que la zona arcillosa es la faja que corresponde con la brecha de falla la cual se redujo a arcilla

por efectos de la percolación de agua, intemperismo, etc. Esta condición se repite en el sondeo SPT-14 aunque en mucha menor proporción.

Zona VII Del km 49+600 al km 50+600, se encuentra aflorando y con espesor máximo del orden de 10.5 m la unidad UG-1.2, Rellenos antrópicos compactos, Conformados principalmente por las estructuras de los terraplenes de la autopista. Subyace con espesor máximo la unidad UG-4.2. Los módulos presiométricos reportados son iguales a 56 kg/cm² mínimo y 18, 816 kg/cm² máximo. Estos valores tan variables (ver sondeos SP-56 y SPP-60) pueden obedecer a causas similares a las expuestas anteriormente. Es notorio el contraste entre los sondeos SPP-60 y SPP-61 en los cuales para número de golpes SPT relativamente similares, se obtienen valores de módulo presiométrico sumamente distintos entre ambos sondeos. Esta situación se repite en el SPP-56 en el cual por cierto se obtuvo el valor más elevado del módulo presiométrico. Continúa hasta la máxima profundidad explorada la unidad UG-5, depósitos de lahar de color gris oscuro, constituidos por una mezcla de fragmentos sub redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz de tipo arenosa muy compacta NSPT >50 golpes. Los valores de los módulos presiométricos reportan valores mínimos y máximos de 1180 y 19,658 kg/cm², lo cual en principio pudiera ser explicable debido a la presencia de fragmentos de elevadas dimensiones en el cuerpo del lahar.

Zona VIII Del km 50+600 al km 51+950 Se encuentran superficialmente rellenos antrópicos compactos. Continúa y hasta 27 m de profundidad (máxima) la unidad UG-4.1. Es interesante notar que se repite la variabilidad de los módulos expuesta anteriormente, por razones en principio similares a las enumeradas. Subyace la unidad UG-5. Se aprecia que siguen existiendo las variaciones en módulo presiométrico las cuales en principio son imputables a las razones anteriormente expuestas.

Zona IX Del km 51+950 al km 52+400 En esta zona, debido a problemáticas sociales, se encuentran pendientes de ejecución los sondeos, por lo cual NO se pueden establecer unidades geológicas. Se detecta un cambio lateral de facies.

Zona X Del km 52+400 al km 57+000 la estratigrafía es relativamente uniforme. Superficialmente se detectó la unidad UG-3.1, depósitos de compacidad alta de arena con limo y gravas aisladas N>50. Subyace, con la excepción del tramo comprendido entre los km 54+000 al km 54+870, la unidad UG-4.1 depósitos de la formación Tarango de color café claro, constituidos por una mezcla de fragmentos de tamaños de gravas y bloques redondeados a subangulosos de rocas volcánicas empacados en una matriz densa de tipo arenosa limosa muy compacta NSPT >50 golpes. No obstante, la relativa uniformidad en este tramo es obvio que existen variaciones locales dignas de ser tomadas en consideración mismas que se mencionan en el **Capítulo 6** de este informe

- f) Como se indica con mayor detalle en el **Capítulo 6** de este documento, y como es de esperar en una obra lineal de esta envergadura, a lo largo del trazo existen algunas zonas donde se presentan incertidumbres debido a cambios laterales de facies, zonas de suelos blandos, así como probables fallas del terreno. Dichas zonas requieren investigación geotécnica adicional.

 - g) Dato importante es que, en general y hasta la profundidad explorada, **NO** se detectó la presencia de agua en el subsuelo. Lo anterior se ha comprobado durante la construcción de las pilas en proceso, las cuales se han efectuado en su enorme mayoría en seco. Solamente en puntos aislados se ha detectado agua en el terreno lo cual en principio corresponde a mantos colgados aislados.

 - h) Finalmente es necesario indicar que debido a problemas sociales se encuentra pendiente la ejecución de 16 sondeos desde la Presa Tacubaya a Observatorio. En el momento que sea factible efectuar estos 16 sondeos se agregarán al presente informe, sin modificar la estructura del mismo.

 - i) Considerando los resultados de la campaña de exploración efectuada, así como la información presentada en el Atlas de Riesgo de la Delegación Cuajimalpa y los Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón, se elaboró una Tabla de Riesgos Geológicos Potenciales Probables. Es evidente que la información contenida en dicha tabla es cualitativa, y la información presentada en la misma es solamente de carácter orientativo, ya que, para elaborar una Tabla de Riesgos de cualquier tipo, acorde a la magnitud del proyecto, se requiere un estudio formal en este sentido, mismo que no está contemplado en los alcances de este informe.
-



CAABSA CONSTRUCTORA		TREN INTERURBANO MÉXICO TOLUCA TRAMO III (Km 41+334 al Km 57+494)						
		RIESGOS GEOLÓGICOS POTENCIALES PROBABLES						
TIPO DE RIESGO	TRAMO							
	PORTAL-CRUCE	FEDERAL-AUTOPISTA	DESUSO	CASSETAS	PPF	CUNETAS	HIPICO	LOS PERROS
RELLENOS		X	X	X				X
DEFORMACIONES				X	X	X	X	X
AGRIETAMIENTOS	X	X	X	X	X	X	X	X
SOCAVACIONES	X	X	X	X	X	X	X	X
CAVIDADES								
DISCONTINUIDADES	X	X	X	X	X	X	X	X
HUNDIMIENTOS				X	X	X	X	X
NIVEL DE AGUAS FREATICAS								
VULCANISMO (CORTO PLAZO)	X	X	X	X	X	X	X	X
LICUACIÓN								
EROSION	X	X	X	X	X	X	X	X
DESIZAMIENTOS	X	X	X	X	X	X	X	X
SISMOS	X	X	X	X	X	X	X	X
FALLAS GEOLÓGICAS PROBABLES	X	X		X	X	X	X	X

NOTAS	
VULCANISMO (CORTO PLAZO)	Considerando las condiciones actuales del Nevado de Toluca, Sierra de las Cruces, Sierra Chichinautzin, y Volcán Popocateptl se puede considerar que el peligro volcánico en el corto plazo es bajo
SISMOS	El proyecto se ubica en la zona sísmica B. Nivel de peligrosidad Medio - Alto
NIVEL DE AGUAS FREATICAS	No se detectó un nivel de aguas freáticas (NAF) como tal en la zona. Se detectaron mantos colgados asociados a flujos transitorios por recarga
FALLAS GEOLÓGICAS PROBABLES	Las Fallas geológicas indicadas son probables. NO necesariamente activas en el sentido geológico, (algún movimiento en los últimos 10,000 años)
REFERENCIAS	
	Atlas de Riesgos de la Delegación Cuajimalpa
	Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón
	Tren Interurbano México-Toluca. Perfil de Unidades Geológicas.

Considerando los resultados de la campaña de exploración efectuada, así como la información presentada en el Atlas de Riesgo de la Delegación Cuajimalpa y los Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón, se elaboró esta Tabla de Riesgos Geológicos Potenciales Probables. Es evidente que la información contenida en esta tabla es cualitativa, y la información presentada en la misma es solamente de carácter orientativo, ya que, para elaborar una Tabla de Riesgos de cualquier tipo, acorde a la magnitud del proyecto, se requiere un estudio formal en este sentido, mismo que no está contemplado en los alcances de este informe



CAABSA CONSTRUCTORA		TREN INTERURBANO MÉXICO TOLUCA TRAMO III (Km 41+334 al Km 57+494)						
		RIESGOS GEOLÓGICOS POTENCIALES PROBABLES						
TIPO DE RIESGO	TRAMO							
	MURO TIERRA ARMADA	COLEGIO	MURO SANTA FE	ENCINO	GLORIE TA CENTRO COMERCIAL SANTA FE	ESTACIÓN SANTA FE	VIADUCTO SANTA FE	IBERO- TELEVISA
RELLENOS	X				X	X	X	X
DEFORMACIONES				X		X	X	X
AGRIETAMIENTOS	X	X	X	X	X	X	X	X
SOCAVACIONES	X	X	X	X	X	X	X	X
CAVIDADES			X	X	X	X	X	X
DISCONTINUIDADES	X	X	X	X	X	X	X	
HUNDIMIENTOS				X	X	X	X	X
NIVEL DE AGUAS FREATICAS							X	
VULCANISMO (CORTO PLAZO)	X	X	X	X	X	X	X	X
LICUACIÓN								
EROSION	X	X	X	X	X	X	X	X
DESLIZAMIENTOS	X	X	X	X	X	X	X	X
SISMOS	X	X	X	X	X	X	X	X
FALLAS GEOLÓGICAS PROBABLES	X			X			X	

NOTAS	
VULCANISMO (CORTO PLAZO)	Considerando las condiciones actuales del Nevado de Toluca, Sierra de las Cruces, Sierra Chichinautzin, y Volcán Popocateptl se puede considerar que el peligro volcánico en el corto plazo es bajo
SISMOS	El proyecto se ubica en la zona sísmica B. Nivel de peligrosidad Medio - Alto
NIVEL DE AGUAS FREATICAS	No se detectó un nivel de aguas freáticas (NAF) como tal en la zona. Se detectaron mantos colgados asociados a flujos transitorios por recarga
FALLAS GEOLÓGICAS PROBABLES	Las Fallas geológicas indicadas son probables. NO necesariamente activas en el sentido geológico, (algún movimiento en los últimos 10,000 años)
REFERENCIAS	Atlas de Riesgos de la Delegación Cuajimalpa Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón Tren Interurbano México-Toluca. Perfil de Unidades Geológicas.

Considerando los resultados de la campaña de exploración efectuada, así como la información presentada en el Atlas de Riesgo de la Delegación Cuajimalpa y los Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón, se elaboró esta Tabla de Riesgos Geológicos Potenciales Probables. Es evidente que la información contenida en esta tabla es cualitativa, y la información presentada en la misma es solamente de carácter orientativo, ya que, para elaborar una Tabla de Riesgos de cualquier tipo, acorde a la magnitud del proyecto, se requiere un estudio formal en este sentido, mismo que no está contemplado en los alcances de este informe



CAABSA CONSTRUCTORA		TREN INTERURBANO MÉXICO TOLUCA TRAMO III (Km 41+334 al Km 57+494)						
		RIESGOS GEOLÓGICOS POTENCIALES PROBABLES						
TIPO DE RIESGO	TRAMO							
	GLORIETA VASCO DE QUIROGA	HONDONADA	AGRONOMO	VIADUCTO CONAGUA	INDUSTRIA MILITAR	ESTADO MAYOR PRESIDENCIAL	PRESA TACUBAYA	RUIZ CORTINEZ OBSERVATORIO
RELLENOS	X	X	X	X	X	X	X	X
DEFORMACIONES	X	X	X	X	X	X	X	X
AGRIETAMIENTOS	X	X	X	X	X	X	X	X
SOCAVACIONES	X	X	X	X	X	X	X	X
CAVIDADES	X	X	X	X	X	X	X	X
DISCONTINUIDADES	X	X	X	X	X	X	X	X
HUNDIMIENTOS	X	X	X	X	X	X	X	X
NIVEL DE AGUAS FREATICAS							X	
VULCANISMO (CORTO PLAZO)	X	X	X	X	X	X	X	X
LICUACIÓN								
EROSION	X	X	X	X	X	X	X	X
DESPLAZAMIENTOS	X	X	X	X	X	X	X	X
SISMOS	X	X	X	X	X	X	X	X
FALLAS GEOLÓGICAS PROBABLES	X	X		X	X	X	X	X

NOTAS	
VULCANISMO (CORTO PLAZO)	Considerando las condiciones actuales del Nevado de Toluca, Sierra de las Cruces, Sierra Chichinautzin, y Volcán Popocateptl se puede considerar que el peligro volcánico en el corto plazo es bajo
SISMOS	El proyecto se ubica en la zona sísmica B. Nivel de peligrosidad Medio - Alto
NIVEL DE AGUAS FREATICAS	No se detectó un nivel de aguas freáticas (NAF) como tal en la zona. Se detectaron mantos colgados asociados a flujos transitorios por recarga
FALLAS GEOLÓGICAS PROBABLES	Las Fallas geológicas indicadas son probables. NO necesariamente activas en el sentido geológico, (algún movimiento en los últimos 10,000 años)
REFERENCIAS	Atlas de Riesgos de la Delegación Cuajimalpa Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón Tren Interurbano México-Toluca. Perfil de Unidades Geológicas.

Considerando los resultados de la campaña de exploración efectuada, así como la información presentada en el Atlas de Riesgo de la Delegación Cuajimalpa y los Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón, se elaboró esta Tabla de Riesgos Geológicos Potenciales Probables. Es evidente que la información contenida en esta tabla es cualitativa, y la información presentada en la misma es solamente de carácter orientativo, ya que, para elaborar una Tabla de Riesgos de cualquier tipo, acorde a la magnitud del proyecto, se requiere un estudio formal en este sentido, mismo que no está contemplado en los alcances de este informe



7.2 RECOMENDACIONES

- i. Es recomendable se efectúe exploración adicional en los puntos donde se presentan incertidumbres como se indica en el **Capítulo 6** de este informe.
 - ii. Se requiere se lleven registros de perforación de los elementos profundos de cimentación que se construyan a lo largo del trazo.
 - iii. Se recomienda llevar un control topográfico adecuado en las zonas donde por requerimientos del proyecto se efectúen cortes, así como de los posibles movimientos de la estructura y de su cimentación.
 - iv. Se recomienda proyectar, instalar y operar un sistema de instrumentación que permita monitorear el comportamiento del subsuelo a lo largo del trazo, así como el comportamiento de la estructura y su cimentación.
 - v. La interpretación de los parámetros presiométricos indicados en el **Capítulo 3 y 6** de este informe solamente tiene un carácter orientativo. La interpretación final y el uso de dichos parámetros presiométricos en el diseño, es responsabilidad absoluta de la proyectista de las cimentaciones correspondientes.
 - vi. Es importante enfatizar que la exploración del subsuelo efectuada es de carácter puntual, por lo cual pueden existir variaciones en las características del subsuelo a lo largo del trazo en relación con las presentadas en este reporte. Por lo anterior durante la construcción se recomienda llevar un registro detallado del material detectado durante la construcción de los elementos profundos de cimentación y en caso de existir variaciones significativas, tomar las medidas pertinentes dependiendo de cada caso.
-

BIBLIOGRAFÍA

- I. Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., Rendón-Marquéz, G., 2006a. La Caldera de La Catedral, Sierra de Las Cruces, una caldera al norponiente de la Ciudad de México (resumen), en Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jal.: Geos, 26, p.215.
 - II. Armando García-Palomo, José Juan Zamorano, Celia López-Miguel, Adriana Galván-García, Víctor Carlos-Valerio, Roberto Ortega, José Luis Macías; 2008, El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25, núm. 1, 2008, p. 158-178.
 - III. Delgado-Granados, H., Martín del Pozo, A.L., 1993, Pliocene to Holocene volcanic geology at the junction of Las Cruces, Chichinahutzin and Ajusco ranges southwest of Mexico City: Geofísica Internacional, 34, 341-351.
 - IV. Mora-Álvarez, G., Caballero, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Uchiumi, S., 1991, Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of Mexico? A preliminary K-Ar dating and paleomagnetic study: Geofísica Internacional 30 (2), 61-70.
 - V. Romero-Terán, E, 2001, Geología del Complejo Volcánico San Miguel al sur-poniente de la Cuenca de México: México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México Posgrado en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría.
 - VI. Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: Geofísica Internacional, 28(2), 133-190
 - VII. Le pressiomètre Louis Ménard. Notice Général D/60. Francia.
 - VIII. Fondations profondes pour le bâtiment. P11-212, septembre 1992, Francia
 - IX. Sols: reconnaissance et essais. Essai pressiométrique Ménard NFP 94-110-1, Francia.
 - X. Uso del presiómetro para la caracterización del subsuelo de la zona poniente del Valle de México. Luis García, Gabriel Auvinet. SMMS.
 - XI. Les essais in situ en Mécanique des Sols. Tome I. Réalisation et interpretation. Maurice CASSAN. 1978
 - XII. Eurocode 7. Geotechnical Design, Part 3: Design assisted by fieldtesting.
 - XIII. ASTM D 4719-87. Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils
 - XIV. Normas ASTM aplicables.
 - XV. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones.
 - XVI. Atlas de riesgos de la Delegación Cuajimalpa
 - XVII. Mapas de Riesgos de la Delegación Álvaro Obregón.
 - XVIII. Atlas del Agua en México 2015. Comisión Nacional del Agua.
-