

## *Introducción*

La ingeniería geotécnica es la rama de la ingeniería civil que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes del suelo. El ingeniero civil investiga el suelo para determinar sus propiedades y la interacción suelo-estructura para poder diseñar las cimentaciones para edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, estabilizar taludes, construir túneles, carreteras, etcétera.

Debido a la naturaleza y diversidad de los suelos y a las condiciones de contorno o frontera desconocidas, la mecánica de suelos puede proporcionar soluciones para un determinado modelo matemático, pero puede ser que el modelo matemático no represente exactamente el problema real. Al avanzar la construcción, y a medida que se adquiere más información, las propiedades del suelo y las condiciones del contorno se pueden rectificar, modificando adecuadamente la solución del problema (William Lambe). Por otro lado, los resultados obtenidos de modelos matemáticos serán siempre una idealización de un problema mucho más complejo que se simplifica para fines prácticos, siendo necesario estar siempre atentos a los resultados que pueden ser “los esperados”, pero no necesariamente los que mejor representen el problema en cuestión.

La ciudad de México es un reto constante en cuanto al suelo se refiere, esto debido a que anteriormente gran parte de la ciudad fue un lago, sin embargo, la ingeniería mexicana ha provisto soluciones y técnicas novedosas para hacer del valle de México el mayor centro urbano del país y uno de los mayores del mundo. El ingeniero es el encargado de proveer la infraestructura necesaria para desarrollar las actividades diversas de una sociedad. El sistema de transporte colectivo metro forma parte de esta infraestructura en la ciudad de México, por lo que en la presente tesis se presenta el caso específico de un tramo del túnel excavado con escudo para la línea 12 del metro y la aplicación de la instrumentación geotécnica como apoyo en la construcción del mismo.

## *Generalidades de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México*

El sistema de transporte colectivo metro es el máximo ícono del transporte público en la ciudad de México. Desde los inicios de su operación a finales de la década de los sesentas y hasta la actualidad, este medio de transporte masivo sigue siendo la mejor opción de movilidad en la ciudad y en la zona urbana del valle de México. Casi 10 años habían pasado sin que se incrementara la cobertura de la red, sin embargo, el gobierno capitalino dio apertura a la nueva línea 12, también llamada del bicentenario.

Esta línea será la más larga no sólo del Distrito Federal, sino incluso de América Latina. Tendrá un recorrido de poniente-oriental y viceversa, uniendo la zona de Tláhuac con el centro y poniente de la ciudad, y desde la terminal Mixcoac permitirá el flujo de pasajeros hacia el oriente y centro de la capital. Además, es importante señalar que la parte oriente del valle de México es una de las más densamente pobladas del mundo, por lo que la ampliación de la cobertura hacia esa zona es de gran interés social.

Esta línea cruzará las demarcaciones políticas de Iztapalapa, Coyoacán, Benito Juárez, Tláhuac y Álvaro Obregón, para de esta forma cubrir una longitud total de 25 kilómetros. Se tendrán estaciones de correspondencia en Ermita (línea 2), Zapata (línea 3), Atlalilco (línea 8), y en la estación terminal Mixcoac con correspondencia con la línea 7. Además de las estaciones de correspondencia existirán 15 estaciones de paso, y la estación terminal Tláhuac contará con una nave de depósito para talleres y mantenimiento de los diversos trenes que den servicio a la línea.

Otra característica distintiva de la línea 12 es que a lo largo de su recorrido contará con diferentes secciones constructivas, es decir, desde el intertramo de maniobras Mixcoac, llamado también cola Mixcoac, hasta la lumbrera de salida se construirá un túnel del tipo convencional; de la lumbrera de salida hasta la lumbrera de acceso en Mexicaltzingo se construirá bajo la modalidad de túnel con escudo para lo cual se utilizará una tuneladora de presión balanceada (EPB); de la lumbrera de acceso en dirección oriente y hasta antes de llegar a la estación pueblo Culhuacán, se construirá con una sección cajón subterráneo. El cuarto sistema constructivo corresponde al tramo elevado que irá desde un poco antes de la estación Pueblo Culhuacán y hasta el intertramo Zapotitlán-Tlaltenco, ya que es en este intertramo donde nuevamente vuelve a cambiar la modalidad de construcción para convertirse en una sección superficial que terminará hasta los talleres de mantenimiento en la estación terminal Tláhuac.

## *Zonificación del trazo Línea 12 del Metro de la Ciudad de México*

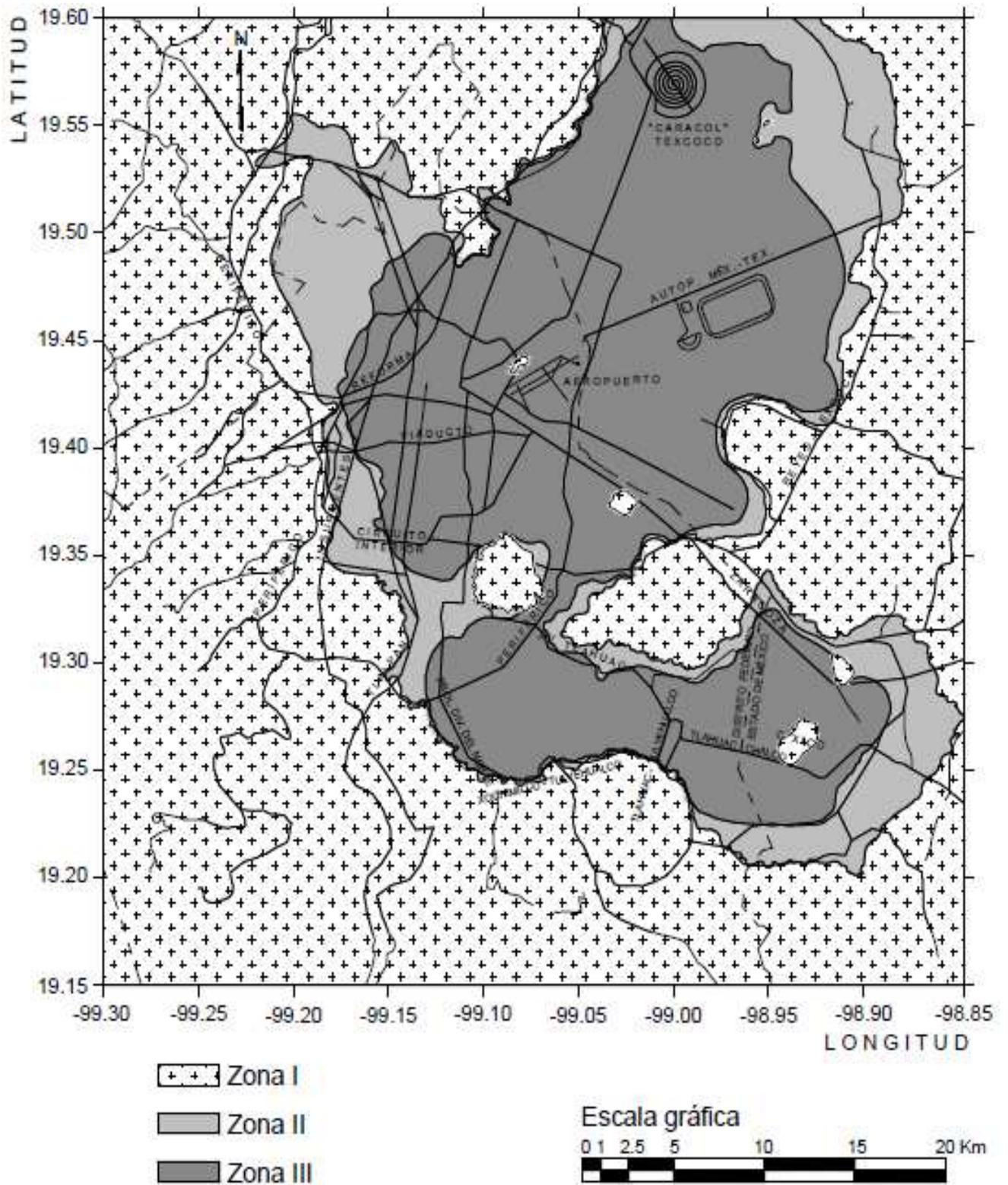
Como lo define el artículo 170 del Capítulo VIII del Título Sexto del Reglamento del Distrito Federal, el suelo de la ciudad de México se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

a) Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados.

b) Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limos arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En la figura 1 se muestran las porciones del Distrito Federal cuyo subsuelo se conoce aproximadamente en cuanto a la zonificación anterior.



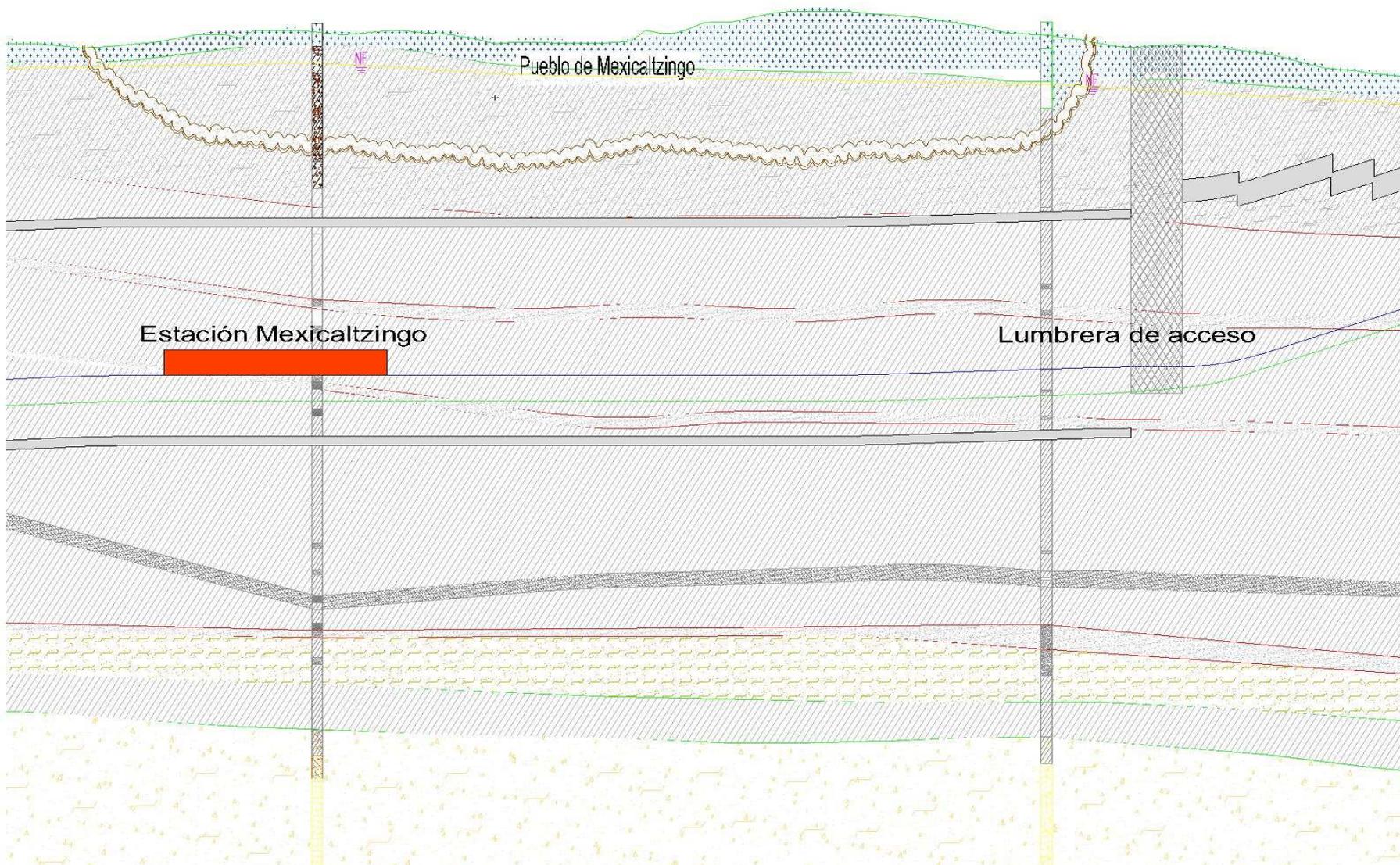
**Fig. 1 Zonificación geotécnica de la ciudad de México.**

Esta figura solamente podrá usarse para definir la zona a la que pertenece un predio dado en el caso de las construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras. En el caso particular de la línea 12, debido a su magnitud e importancia, las distintas zonas por las que cruzará, así como el tipo de suelo en que se ubicarán las estaciones se definieron a partir de exploraciones directas del subsuelo mediante estudios de campo y pruebas de laboratorio. Además la exploración se apoyó en el conocimiento geológico general y local que se tiene de la zona de interés y fue suficiente para definir de manera confiable los parámetros de diseño que permitan una buena interacción del suelo con la estructura.

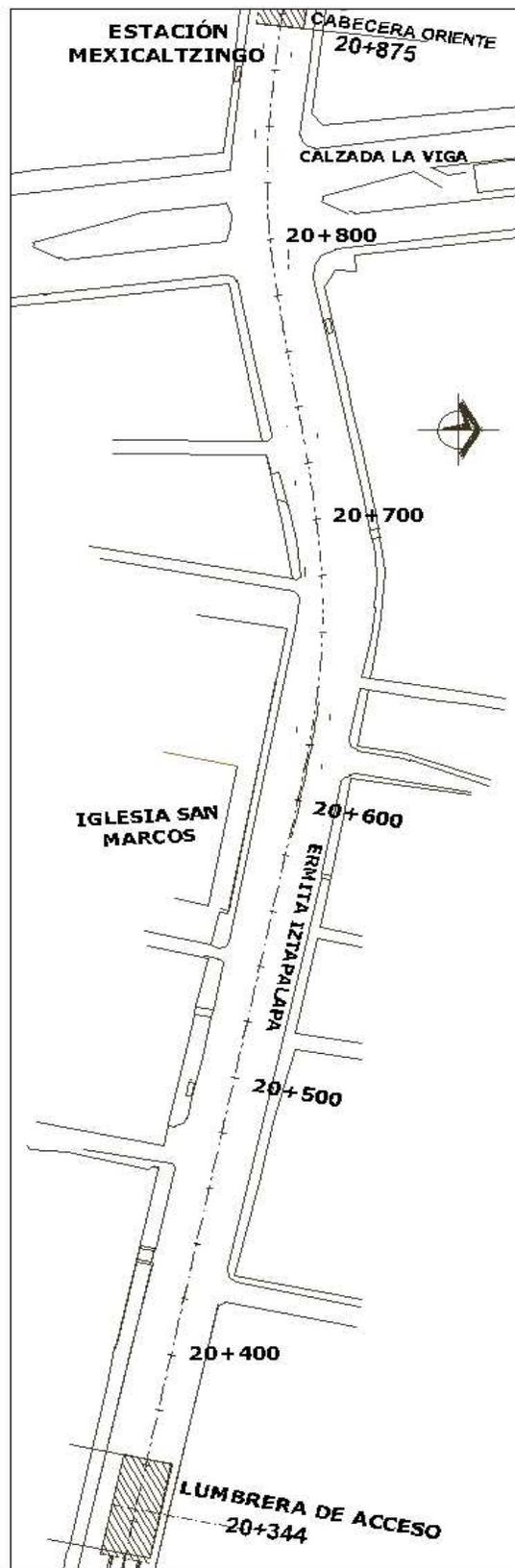
Para la presente tesis, el intertramo de estudio está comprendido entre la lumbrera de entrada y la cabecera oriente de la estación Mexicaltzingo, ubicadas en los cadenamientos 20+344 y 20+875 respectivamente (figura 3). La exploración geotécnica permitió definir como zona III a la que corresponde a este intertramo (figura 2), integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla, el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros. El sistema constructivo que se eligió para este tramo es a través de una tuneladora tipo escudo de presión balanceada (EPB).

La siguiente tabla muestra la simbología usada en la imagen correspondiente al perfil estratigráfico de la lumbrera de entrada a la estación Mexicaltzingo.

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
	MATERIAL ARENO-LIMOSO CON FRAGMENTOS DE CONCRETO CORRESPONDIENTE AL RELLENO SUPERFICIAL DE LA ZONA.
	ARCILLA ARENOSA DE CONSISTENCIA DE MEDIA A FIRME, DE BAJA PLASTICIDAD CON FRAGMENTOS DE GRAVA CAFÉ OSCURO (DETRITO ALUVIAL).
	ARCILLA DE CONSISTENCIA DE MUY BLANDA A MEDIA, DE ALTA PLASTICIDAD, CON LENTES DE ARENA FINA Y GENIZA VOLCÁNICA, GRIS, CAFÉ ROJIZO Y VERDE OLIVO (ARCILLA LACUSTRE).
	ARENA LIMOSA POCO ARCILLOSA EN ESTADO MUY COMPACTO, CAFÉ AMARILLO CON LENTES DE ARENA PUMÍTICA (SEGUNDA TOBA).
	ARENA LIMOSA POCO ARCILLOSA EN ESTADO MUY COMPACTO, CAFÉ CLARO CON LENTES DE ARENA PUMÍTICA (PRIMER TOBA)
	GRAVAS EMPACADAS EN ARENA LIMOSA, EN ESTADO MUY COMPACTO, GRIS OSCURO (SEGUNDO LAHAR).
	GRAVAS EMPACADAS EN ARENA LIMOSA, EN ESTADO MUY COMPACTO, GRIS OSCURO (PRIMER LAHAR)
	ARENA DE GRANO FINO A GRUESO, LIMOSA, CON FRAGMENTOS DE GRAVA Y GRAVILLA REDONDEADA, GRIS OLIVO Y CAFÉ AMARILLO (MATERIAL ALUVIAL)
	ARENA PUMÍTICA EN ESTADO MUY COMPACTO, CAFÉ OSCURO (MIEMBRO ARENOSO DE LA FORMACIÓN TARANGO)
	LIMO ARENOSO DE CONSISTENCIA FIRME A DURA GRIS VERDOSO
	CONTACTO INDEFINIDO
	FALLA NORMAL



**Fig. 2 Perfil estratigráfico correspondiente al intertramo.**



**Fig. 3 Intertramo Estación Mexicaltzingo - Lumbra de acceso.**

## *Objetivo del trabajo*

El propósito de la presente tesis es presentar las mediciones de las deformaciones del túnel excavado con el escudo en zona III y las deformaciones del terreno adyacente al túnel, mediciones que fueron obtenidas in situ por medio de un sistema de instrumentación. Derivadas de dicha instrumentación se dan las conclusiones y recomendaciones pertinentes que puedan ser utilizadas en un futuro en el monitoreo durante la construcción de túneles excavados con escudo tipo EPB.

En principio, se introduce de manera breve un resumen de los instrumentos utilizados en la medición de las deformaciones del túnel y del suelo aledaño a este (Capítulo I), también se presentarán las mediciones obtenidas en campo realizadas por el departamento de instrumentación del consorcio de la línea 12 y que corresponden a la lumbrera de acceso y hasta la estación Mexicaltzingo (Capítulo II); se hacen la interpretación y observaciones del monitoreo realizado en el intertramo en estudio (Capítulo III). Por último, se dan las recomendaciones y conclusiones pertinentes derivadas de del análisis de los parámetros medidos por medio del sistema de instrumentación (Capítulo IV).