



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – (GEOTÉCNIA)**

**DETERMINACIÓN DEL MARCO GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO E HIDROGEOLÓGICO DE UNA ZONA EN LOS MUNICIPIOS DE TULA DE ALLENDE, ATITALAQUIA, TLAXCOAPAN, TLAHUELILPAN Y ATOTONILCO DE TULA EN EL ESTADO DE HIDALGO**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**NEFTALI LEÓN CRUZ**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. SALVADOR MARÍN CÓRDOVA, FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MÉXICO, D. F. JUNIO 2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Jorge Abraham Díaz Rodríguez  
Secretario: M. en I. Germán López Rincón  
Vocal: Dr. Salvador Marín Córdova  
1<sup>er.</sup> Suplente: M. en I. Hugo Sergio Haaz Mora  
2<sup>do.</sup> Suplente: Dr. Joaquín Eduardo Aguayo Camargo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: MÉXICO D.F.

**TUTOR DE TESIS: Dr. Salvador Marín Córdova**

NOMBRE

FIRMA



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
<b>OBJETIVO</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I</b> Identificar la metodología para la evaluación geotécnica de un sitio en el Estado de Hidalgo.	
I.1 Estudios preliminares	9
I.2 Investigación de detalle	10
I.3 Pruebas de laboratorio	11
<b>CAPÍTULO II</b> Determinación del marco físico y geológico del área	
<b>II.1 Marco físico.</b>	
II.1.1 Localización	11
II.1.2 Vías de comunicación	14
<b>II.2 Marco geológico</b>	
II.2.1 Fisiografía	15
II.2.2 Geología regional	21
II.2.2.1 Litología	22
II.2.2.2 Estratigrafía	29
II.2.2.3 Estructuras geológicas	32
II.2.2.4 Sismicidad	36
II.2.3 Geología local	39
II.2.3.1 Inspección de Bancos de Material B-I	40



II.2.3.2 Inspección de Bancos de Material B-II	54
II.2.3.3 Inspección de Bancos de Material B-III	63
<b>CAPÍTULO III</b> Determinación del marco geotécnico del área	
<b>III.1 Estudios geofísicos</b>	<b>67</b>
III.1.1 Métodos geoelectricos	
III.1.1.1 Antecedentes	69
III.1.1.2 Métodos de corriente continua y corriente alterna	74
III.1.1.3 Sondeo eléctrico vertical (SEV)	77
<b>III.2 Estudios geotécnicos</b>	
III.2.1 Sondeos de Penetración Estándar	83
<b>CAPÍTULO IV</b> Determinación del marco hidrológico del área	
<b>IV.1 Hidrografía regional</b>	<b>87</b>
<b>IV.2 Hidrografía local</b>	<b>89</b>
<b>CAPITULO V</b> Determinación del marco hidrogeológico del área	
<b>V.1</b> Unidades hidrogeológicas	<b>94</b>
<b>CAPÍTULO VI</b> Conclusiones	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO 1</b> Registros de Campo SM-2, SM-4, y SM-10	<b>101</b>
<b>ANEXO 2</b> Contenido de agua y descripción macroscópica	<b>113</b>
<b>ANEXO 3</b> Peso específico relativo de sólidos S <sub>s</sub>	<b>120</b>
<b>ANEXO 4</b> Análisis granulométrico y Limites de consistencia	<b>122</b>



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**ANEXO 5** Peso volumétrico

**129**

**ANEXO 6** Prueba de compresión simple

**131**



## Introducción

El rápido crecimiento de la población y las aspiraciones de todos a un mejor modo de vida están complicando todas las cuestiones ambientales. El nivel de desarrollo, o bien el desarrollo a secas, es un complejo de fenómenos que de manera explícita o implícita se refieren al grado de bienestar alcanzado por una población determinada. Este grado esta en relación directa con las oportunidades que tienen los individuos de una sociedad, para satisfacer sus necesidades materiales en un momento dado.

El aumento de la población significa una demanda cada vez mayor de recursos y una presión creciente para que las personas habiten en ambientes con peligros geológicos significativos.

Debe considerarse de manera fundamental el conocimiento adecuado del medio geológico para la elaboración de modelos realistas que mejoren los diseños y procedimientos constructivos, así como la extracción de hidrocarburos y recursos minerales, factores fundamentales para el desarrollo económico y social de nuestro país, de ahí que su estudio y evaluación adquiera singular importancia.

La ciencia se basa en la suposición de que el mundo natural se comporta de una manera constante y predecible que puede comprenderse mediante el estudio atento y sistemático. El objetivo general de la ciencia es descubrir los modelos subyacentes en la naturaleza y luego utilizar ese conocimiento para hacer predicciones sobre lo que cabría o no cabría esperar que ocurriera dado ciertos hechos y circunstancias. Como escribiera Julio Verne en su libro titulado Viaje al centro de la Tierra (1867): "...por más grandes que sean las maravillas de la naturaleza siempre son explicables por razones físicas". Por ejemplo, sabiendo cómo se forman los depósitos de Piemonte (de gravedad), generados por el desprendimiento y transporte desde fragmentos de roca hasta grandes masas de roca a posiciones más estables, pueden esperarse movimiento futuros, debido a su condición inestable y heterogeneidad. Un escaso conocimiento de las características geológicas y geotécnicas de este tipo de depósitos, puede tener consecuencias de un diseño fallido en el sitio.

En Ingeniería el fracaso no se reduce solo a un debate sobre el conocimiento o las condiciones de su verificación, sino que puede incidir directamente en el deterioro de la calidad de vida de los seres humanos (más grave aún, a pérdidas de vida) producido por el mal funcionamiento de un dispositivo, obra civil o diseño tecnológico cuyos impactos o comportamiento bajo ciertas acciones son, en ocasiones, difícil de predecir. La Ingeniería en Geotecnia tiene una tarea que en muchas ocasiones parece inverosímil: observar los fenómenos naturales, en este caso sobre y debajo de la superficie terrestre, en base a investigación tratar de estimar sus condiciones y predecir su comportamiento para salvaguardar vidas humanas e infraestructura que le proporcione un mejor nivel de vida.



Al paso de los años muchos investigadores se han dado a la tarea de caracterizar regiones de nuestro país, con el fin de conocer la naturaleza de las mismas, recopilando información sobre el origen, la litología, la morfología y propiedades de los estratos, las estructuras y formaciones presentes en la región, etc. Todo este cúmulo de conocimiento sobre el territorio nacional ha provocado el levantamiento de grandes obras de Ingeniería que ayudan al crecimiento económico nacional y por ende un beneficio social (presas, refinerías, vías de comunicación, puertos marítimos, parques industriales, entre otros), así como la detección de zonas y tipos de material que pueden ocasionar un peligro latente para nosotros como sociedad o para el rechazo de algún proyecto que se tenga considerado a desarrollar en dicha zona.

En la actualidad, no es raro que se llame a un geotecnista para que dé su informe cuando ya una construcción está muy avanzada. Su misión consiste entonces en actuar como perito, y a veces como defensor, en algún pleito que haya surgido, tarea innecesariamente difícil, porque implica la resolución de problemas que no se habrían presentado si desde un principio se le hubiese consultado. Un ingeniero que conozca la mecánica de suelos y la geología estará en condiciones de resolver la mayor parte de las dificultades que dependen de la naturaleza del terreno, de la constitución de las rocas y de las corrientes de agua, y lo que no es menos importante, sabrá decidir cuando es necesario consultar a un especialista.

Ha sido frecuente el que se hayan aducido las causas geológicas para justificar muchos fracasos de la Ingeniería. Valioso, como es, el estudio de los factores geológicos en tales justificaciones que pudiéramos llamar “post-mortem”, el mero hecho de que esos factores influyan en los fracasos, demuestra que el momento indicado para estudiar esas condiciones geológicas es antes de que las obras comiencen, (Legget, 1956).

A pesar de que el suelo, como sabemos, es un material natural, anisotrópico, heterogéneo y de comportamiento no lineal, ya que sus propiedades y características pueden variar de un punto a un metro a la redonda, muchas de las teorías que hoy en día rigen la Ingeniería suponen que el suelo se comporta como un material continuo, homogéneo e isótropo, desde luego que el uso de estas teorías involucra grandes simplificaciones, que pueden estar alejadas de las características de un suelo real; sin embargo, se reconoce que las soluciones a las que se llega, aunque aproximadas, resultan en no pocos casos, de aproximación suficiente para la práctica profesional. Desde luego que los resultados deberían verse con criterio y, no pocas veces ajustarse con la experiencia. Aunado a esto, sería antieconómico realizar exploraciones que nos permitieran conocer cada centímetro del subsuelo, aunque sería lo ideal, dependiendo de la envergadura de la obra.

Como ingenieros requerimos información altamente confiable de campo y de laboratorio, a partir de dicha información obtenida de una pequeña porción del sitio, se predice el



comportamiento de todo el sitio y obra, lo cual puede introducir errores (Díaz Rodríguez, 2010).

### **Objetivo**

El presente trabajo pretende definir el marco geológico, geotécnico e hidrogeológico de la región comprendida entre los municipios de Tula de Allende, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, Atotonilco de Tula y Atitalaquia en el Estado de Hidalgo, como visión de su constante crecimiento industrial y social. Aportar ideas que sumadas a las investigaciones previas a este trabajo, puedan servir para enriquecer el conocimiento que actualmente se tiene del marco físico de esta zona y que sea de utilidad en los programas sobre asentamientos humanos y en la construcción de obras civiles, para el desarrollo de la región Tula – Tepeji del Río, que promueve el Gobierno del Estado de Hidalgo.

En años recientes, se han programado en la región y se encuentran en desarrollo, obras de gran importancia, como son: Plantas industriales, fraccionamientos, ampliaciones de refinerías y estructuras en autopistas (Arco Norte).

## **CAPITULO I Identificar la metodología para la evaluación geotécnica de un sitio en el Estado de Hidalgo**



### I.1 Estudios preliminares

A continuación se enlistan algunos puntos que se desarrollaron en la investigación preliminar:

- Recopilación de la información del sitio disponible.

<b>Tabla 1 Información consultada durante los estudios preliminares</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Información</b>	<b>Institución</b>
Topografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mapas topográficos</li> <li>➤ Fotografías aéreas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)</li> </ul>
Geología	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mapas geológicos</li> <li>➤ Informes y memorias geológicas</li> <li>➤ Mapas edafológicos</li> <li>➤ Fotografías aéreas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ INEGI</li> <li>➤ Secretaría de Obras Publicas Comunicaciones, Traspotes y Asentamientos del Estado de Hidalgo (SOPCTyA)</li> <li>➤ Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS)</li> <li>➤ Instituto de Geología UNAM</li> </ul>
Geotecnia	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Publicaciones geotécnicas</li> <li>➤ Informes geotécnicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ SMMS</li> <li>➤ Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)</li> </ul>
Geohidrología e Hidrología	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mapas hidrogeológicos</li> <li>➤ Fotografías aéreas</li> <li>➤ Datos de pozos y sondeos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ SOPCTyA</li> <li>➤ Comisión Nacional del Agua (CNA)</li> <li>➤ PEMEX</li> </ul>
Datos meteorológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Registros pluviométricos y temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)</li> </ul>
Datos sísmicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Datos de sismos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Servicio Sismológico Nacional</li> </ul>
Minería y Bancos de Materiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Registro de minas y canteras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ INEGI</li> </ul>

Aunado a la información anterior, es importante recopilar información histórica del lugar, imágenes satelitales y toponimia, el estudio del origen y significación de los nombres, en un buen número de casos, este nombre constituye una descripción sucinta de la topografía, de la geología o del tipo de suelo encontrado en el sitio.

- Inspección del área de estudio, para verificar o ampliar la información disponible acerca de:
  - Accesibilidad
  - Líneas de alta tensión
  - Recursos humanos y materiales del sitio
  - Conocer el ambiente geológico general
  - Conocer la geomorfología



- Tipo de drenaje superficial
- Procesos erosivos actuales
- Uso actual del suelo

La práctica en el campo es la única guía segura, aunque mucho puede ayudar la experiencia ajena por medio de la palabra escrita.

- Planteamiento del programa de trabajos de campo necesarios para definir:
  - Estratigrafía general del sitio
  - Litología del lugar
  - Estructuras geológicas
  - Condiciones hidráulicas del subsuelo

Las fotografías obtenidas son de inestimable valía para el posterior trabajo de gabinete, pues sirven para refrescar la memoria con datos de indiscutible veracidad, hacen posible comparar ciertas estructuras con otras observadas.

## **I.2 Investigación de detalle**

- Exploración de campo: Inspección a Bancos de material
- Exploración indirecta (Geofísica): Sondeo eléctrico vertical (SEV)
- Exploración directa: Sondeos mecánicos (SPT)

Este tipo de investigación en conjunto permite determinar la estructura de una parte de la corteza terrestre y su relación con las estructuras inmediatas y similares. Las observaciones de campo reclaman extraordinaria atención, examinar afloramientos, anotar la naturaleza de la roca, fijar los contactos de las formaciones contiguas, dirección, buzamiento, etc. En el recorrido se observará la uniformidad topográfica, filtraciones, deslizamientos existentes, condiciones de cortes y cimentaciones cercanas, si las hubiera.

Se debe evaluar la importancia de la obra por ejecutar, en relación con el costo de su correspondiente programa de exploración y muestreo, también el tipo de obra, en relación, por ejemplo, con las consecuencias de su falla respecto a pérdidas de bienes o vidas; puede haber obras de poco costo cuyos requerimientos de seguridad y, por lo tanto, de previsión en el proyecto, sean mucho mayores que en otras obras de mayor inversión presupuestal. Un aspecto importante será siempre que la magnitud, tanto en tiempo como en costo, del programa de exploración y muestreo esté acorde con el tipo de obra a ejecutar.

## **I.3 Pruebas de laboratorio**

- Determinación de Propiedades Índice y



- Propiedades Mecánicas

El objeto de las acciones anteriores va encaminado a que el ingeniero necesita datos suficientes para asegurarse de las condiciones que puede esperar en el lugar donde ha de realizar los trabajos, "...si se nos dijese cómo se extienden los suelos, sus características y si sus límites aparecieran en un mapa, algo más de lo que ahora se puede prever podría comprenderse acerca del conjunto y de cada parte; de modo que bien merecería el esfuerzo de hacer este trabajo. Pero dejo esto a la industria de los tiempos futuros..." (Líster M., 1864).

Si la investigación geotécnica y geológica hubiera precedido a la realización de muchas empresas, se habrían ahorrado vidas y catástrofes, se habría reducido el coste de muchas construcciones y se hubieran evitado los gastos y molestias de muchos pleitos. Conociendo el marco geológico y las características de los sedimentos que lo constituyen en diferentes sitios, éstos planteados en el programa de trabajos de campo, se podrá conocer la variación probable de las propiedades mecánicas de los sedimentos en el área de estudio.

## **CAPÍTULO II Determinación del marco físico y geológico del área.**

### **II.1 Marco físico**

#### **II.1.1 Localización**

El área de estudio se ubica en el Estado de Hidalgo, su extensión abarca cierta porción de las siguientes cabeceras municipales (**FIG. 1**):

- Atitalaquia. El nombre de Atitalaquia proviene de la lengua Nahoatl, "agua", talaquia "entrada", es decir "lugar donde se mete el agua o resumidero". ([www.hgo.gob.mx](http://www.hgo.gob.mx))
- Atotonilco de Tula. El nombre de Atotonilco deriva de las raíces Nahoatl, "agua" totonqui "caliente" y co "en o dentro; que unido le da el significado a "Lugar en donde el agua hierve".
- Tezontepec de Aldama. Con respecto al origen de la palabra Tezontepec, se tiene que en lengua Nahoatl, según las raíces etimológicas que la componen significa: "En el Cerro del Tezontle", cosa que realmente extraña, si se toma en cuenta que la región carece totalmente de dicho material, esto hace dudar un poco de la originalidad del nombre.
- Tlahuelilpan. El nombre de la población ha sido escrito de diversas formas; en los papeles de la Nueva España, se asienta "Tlahuelilpa" y en diversos documentos del siglo XVI, que



constituyen los títulos primordiales de la Hacienda de San Servando se asienta Tlaxualilpan; todos estos nombres se derivan del original que fue Tlaxualilpan, y que en lengua Nahoá significa: “En donde se riegan las tierras”, que por cierto parece muy adecuado, ya que por toda esta región, hay muchas tierras de riego, en donde anualmente se recogen muy buenas cosechas.

- Tlaxcoapan. El nombre de la población ha sido escrito e interpretado de diversas formas; ello ha cuestionado la originalidad de las diversas versiones que se han proporcionado. Ahora bien, la etimología que predomina respecto a Tlaxcoapan es que el origen del nombre es Náhuatl y tiene por significado, “Sobre o en el río del juego de pelota”.
- Tula de Allende. Su nombre deriva de las raíces Náhuatl Tollan "Junto del Tular" o "cerca del Tular". En otomí fue su nombre Namemhi que significa "lugar de mucha gente". Su nombre actual es Tula ya castellanizado y que significa lugar de tules o esparto, junto o cerca del Tular.



FIG.1 Municipios que integran la zona en estudio (INEGI, 2009)

La zona estudiada está situada entre los paralelos 20°01' y 20°08' Latitud Norte y entre los meridianos 99°13' y 99°18' Longitud Oeste, en la región Suroeste del Estado de Hidalgo, ocupa una superficie aproximada de 137.75 km<sup>2</sup> (FIG. 2)

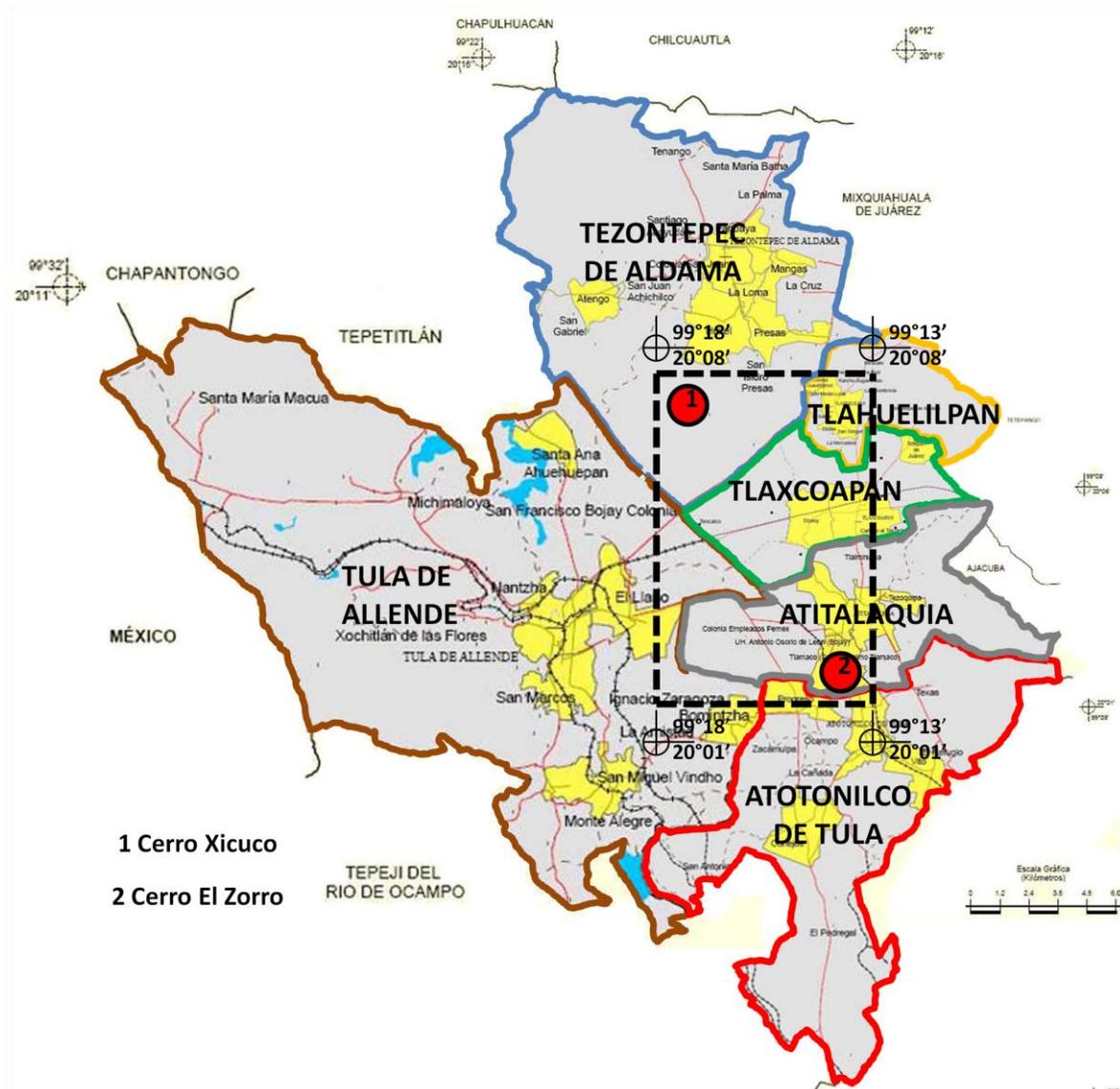


FIG. 2 Delimitación de la zona de estudio (INEGI, 2009)

De sus 137.75 km<sup>2</sup> de superficie, el Municipio de Atitalaquia comprende aproximadamente 37 km<sup>2</sup> (26.86%), el Municipio de Tlaxcoapan 35 km<sup>2</sup> (25.41%), 27 km<sup>2</sup> (19.6%) al sur del Municipio de Tezontepec de Aldama, 22.75 km<sup>2</sup> (16.5%) el sector oriental del Municipio de Tula de Allende y 5 km<sup>2</sup> (3.63%) al norte del Municipio de Atotonilco de Tula.



Al noroeste, la zona a estudiar se encuentra delimitada por la elevación montañosa denominada “Cerro Xicuco”, mientras que al sureste es delimitada por la elevación montañosa denominada “Cerro El Zorro”.

## II.1.2 Vías de Comunicación

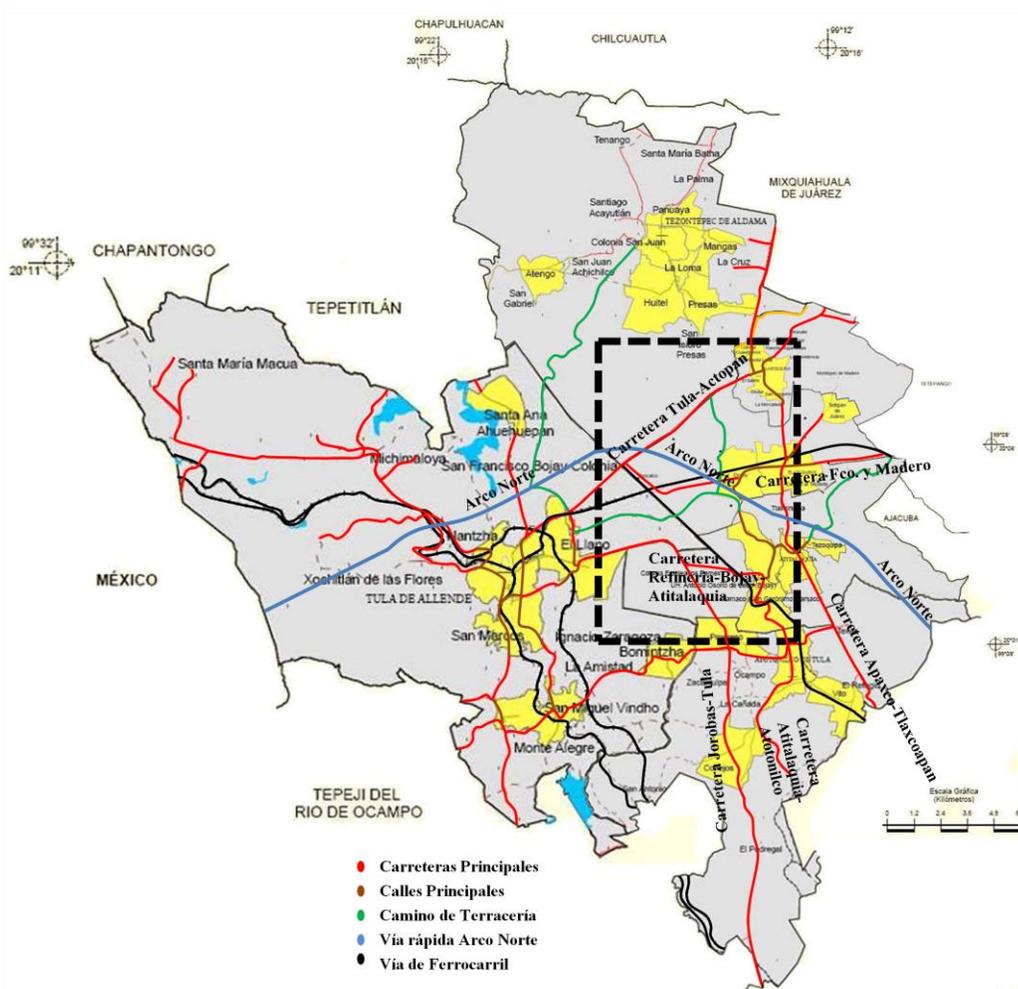


FIG. 3 Vías de Comunicación (INEGI, 2009)

La Ciudad de Tula se encuentra a 10 km al oeste y la Ciudad de México a 80 km al sur. Para llegar a la zona estudiada de la Ciudad de México, se transitan 55 km por la carretera No. 57 hasta el entronque con la carretera Jorobas-Tula, por la que se recorren alrededor de 25 km.

## II.2 Marco geológico

### II.2.1 Fisiografía

Los límites del estado de Hidalgo encierran áreas que corresponden a tres provincias fisiográficas del país (FIG. 4):

- La Sierra Madre Oriental (superficie dentro del estado 46.46%)
- El Eje Neovolcánico (53.27%)
- La Llanura Costera del Golfo de México (0.27%)



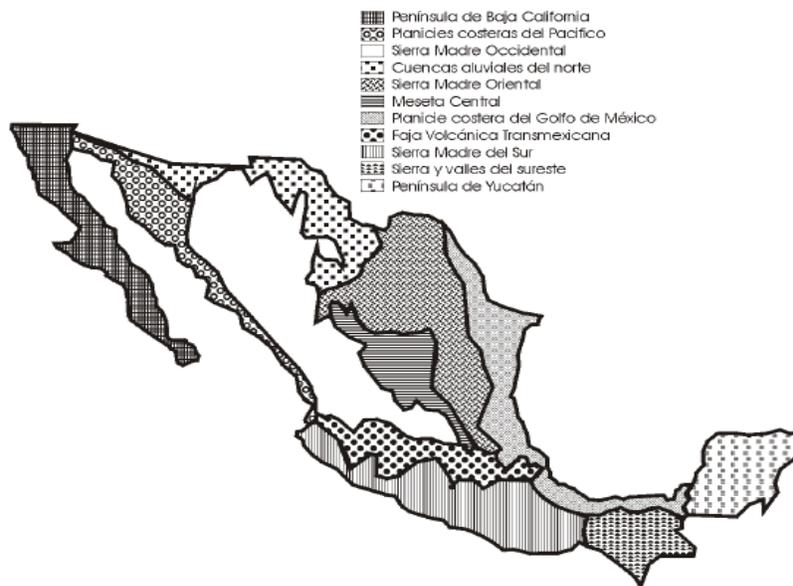
FIG. 4 Provincias Fisiográficas del Estado de Hidalgo (INEGI, 2009)

Como puede observarse (FIG. 4), la zona en estudio pertenece al Eje Neovolcánico, cuyas subprovincias son: Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo así como Lagos y Volcanes de Anáhuac.



Es necesario conocer las características de la provincia conocida como Faja Neovolcánica o Cinturón Volcánico Transmexicano (**FIG. 5**), ésta es una expresión fisiográfica que bisecta a la porción meridional de la República Mexicana, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México, con una extensión de unos 920 km, desde la Bahía de Banderas en el Estado de Jalisco hasta Punta Delgada en el Estado de Veracruz. La zona de influencia norte-sur del CVT es variable en la porción central del CVT; desde la ciudad de San Luis Potosí, al norte, hasta el poblado de Chaucingo en el Estado de Morelos, al sur, son alrededor de 400 km; siendo de aproximadamente 100 km hacia el Golfo de México, entre el poblado de Teziutlán, Puebla, al norte, y la Cd. de Orizaba, al sur, en el Estado de Veracruz (Marín, S., y Aguayo, J., 1989).

El origen de este complejo volcánico es controvertido por sus características geomorfológicas, el CVT está en proceso de emersión, afectado éste por esfuerzos distensivos, que generan sistemas estructurales complejos de fosas y pilares, y cuya expresión geomorfológica es el desarrollo de numerosos valles escalonados hacia el centro del CVT. Estos valles son elevados; en los estados de Nayarit y Colima, al occidente de México, tienen una altitud de unos 400 metros, hasta unos 2600 metros en las cuencas de Toluca y de Tlaxcala.

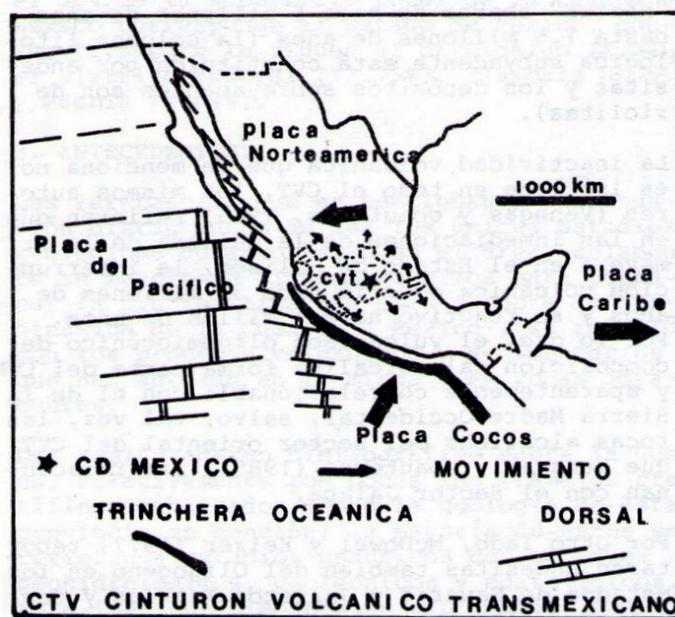


**FIG. 5** Provincias Fisiográficas de la República Mexicana (INEGI, 2009)

El CVT es consecuencia del desplazamiento sucesivo de tres placas tectónicas, la de Norteamérica, Cocos y del Caribe, en la que la placa de Cocos obstaculiza el movimiento hacia el suroeste de la de Norteamérica, creándose una fisura cortical (**FIG. 6**). Las placas litosféricas se mueven como unidades coherentes en relación con otras placas. Las

principales interacciones entre las placas se producen a lo largo de sus bordes, en el caso del CVT donde dos placas van convergiendo lentamente, el borde frontal de una de ellas se dobla hacia abajo, permitiendo deslizarse por debajo de la otra (Bordes convergentes).

- **BORDES CONVERGENTES** (bordes destructivos): donde dos placas se juntan provocando el descenso de la litosfera oceánica debajo de una placa superpuesta, que finalmente es reabsorbida en el manto o probablemente la colisión de dos bloques para crear un sistema montañoso.



**FIG. 6** Geodinámica regional y su relación con el Cinturón Volcánico Transmexicano (Marín, S., y Aguayo, J., 1989)

Los bordes convergentes también se denominan **zonas de subducción** porque son lugares donde la litosfera desciende (es subducida) hacia la astenósfera. La subducción se produce porque la densidad de la placa litosférica descendente es mayor que la de la astenósfera subyacente. En general, la litosfera oceánica es más densa que la astenósfera subyacente, mientras que la litosfera continental es menos densa y resiste la subducción. Por consiguiente, es siempre la litosfera cubierta por corteza oceánica la que experimenta la subducción.

Cuando una placa oceánica descendente alcanza la profundidad de aproximadamente 100 km, se desencadena la fusión dentro de la cuña de la astenósfera caliente suprayacente. La roca húmeda, en un ambiente de alta presión, se funde a temperaturas sustancialmente inferiores que la roca seca de la misma composición. Los sedimentos y la corteza oceánica

contienen una gran cantidad de agua que es transportada a grandes profundidades por una placa de subducción.

A medida que la placa se hunde, el agua es expulsada de los espacios porosos conforme aumenta la presión de confinamiento. A cierta profundidad, el manto es lo suficiente caliente como para que la introducción de agua conduzca a la fusión. Este proceso, denominado, fusión parcial, genera un mínimo de porcentaje de material fundido, que se entremezcla con la roca del manto aun fundida, el resultado es la formación de un magma rico en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) con una composición andesítica. Como es menos densa que el manto que la rodea, esta mezcla móvil y caliente (magma) asciende de una manera gradual hacia la superficie. Estos magmas derivados del manto pueden ascender a través de la corteza y provocar una erupción volcánica (FIG. 7).

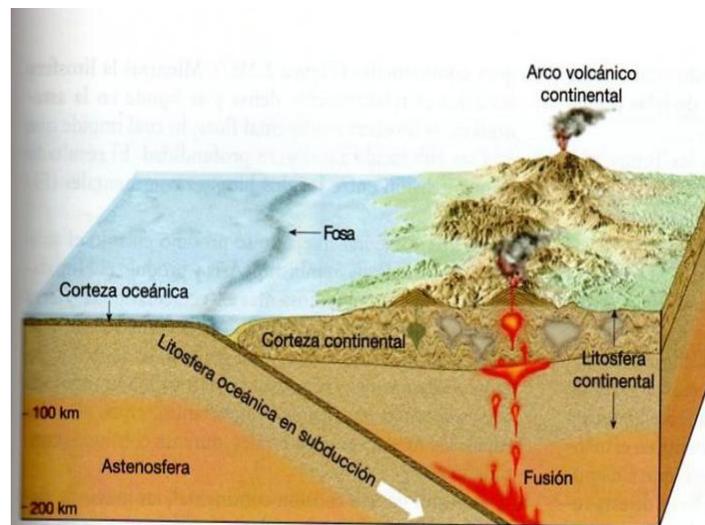
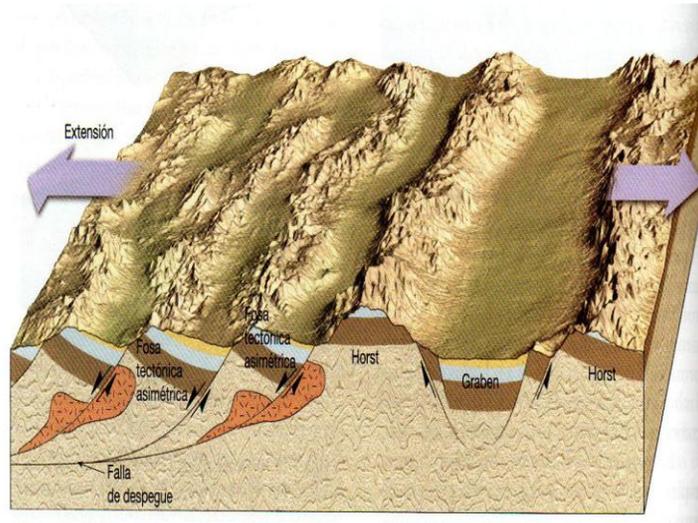


FIG. 7 Zona de convergencia oceánica-continental (Tarbuck E. y Lutgens F., 2005)

Debido a la subducción de la Placa de Cocos y a la efusión del magma hacia la superficie, los primeros esfuerzos fueron compresivos, formándose estratovolcanes generalmente de composición andesítica, riolítica y dacítica. Durante este proceso la provincia tectónica siguió emergiendo con etapas sucesivas de vulcanismo, erosión, y sedimentación aluvial, fluvial y lacustre. Cuando los bloques de origen distensivo se conformaron en forma escalonada hacia la porción central del CVT (FIG. 8), se presentaron otros episodios volcánicos de tipo explosivo con lavas y piroclastos de composición básica e intermedia. La composición volcánica a lo largo del CVT varía de acuerdo a su lejanía y su ángulo de incidencia con la Trinchera de Acapulco.



**FIG. 8** Bloques de origen distensivo (Tarbuck E. y Lutgens F., 2005)

El CVT continua en emersión, por lo que se generan esfuerzos distensivos que dan origen, de occidente y oriente, de la fosa de Bahía de Banderas, el Graben de Chapala y de Cuitzeo, las Cuencas de Toluca, de México, de Puebla-Tlaxcala y la Oriental, hasta la Punta Delgada en el Estado de Veracruz (Marín y Aguayo, 1989). Estas regiones están caracterizadas por tener expresiones fisiográficas de grandes planicies azolvadas con sedimentos lacustres, aluviales, fluviales y vulcano sedimentarias (tobas, piroclastos arenosos y brechas), la secuencia sedimentaria está interstratificada e interdigitada con derrames volcánicos de diferente composición mineralógica y química.

Dean y Drake (1978, en Marín, S., y Aguayo, J., 1989) concluyeron que la Placa de Cocos tiende hacia el noreste con un ángulo acimutal que varía entre  $31^\circ$  y  $41^\circ$ .

De acuerdo a los diferentes criterios petrogenéticos que del CVT se tienen, se llega a la conclusión que las zonas de expulsión lávica han migrado a través del tiempo geológico, variando también en composición. Los cambios de los focos magnéticos de CVT, así como sus diversidades química y mineralógica, probablemente reflejen las variaciones de angularidad y de profundidad que tienen las dos placas entre sí, la oceánica del Pacífico conocida como Placa de Cocos, con la continental de Norteamérica (Hubp y coautores, 1985, en Marín y coautores, 1989). Otro parámetro también significativo es, la velocidad de desplazamiento relativo entre ambas placas.

La región estudiada se ubica en la vertiente sur-occidente del estado, presenta una fisiografía muy variada, ya que en la misma se definen llanuras, lomeríos suaves, cuencas y cauces de ríos, algunos de los cuales han sido aprovechados para almacenamiento, como es el caso de la Presa Requena y de la Endhó.

Tanto al este como al oeste, la región posee una topografía muy irregular con altitudes que oscilan desde 2,050 a 2,650 m.s.n.m. (FIG. 9). La zona estudiada se encuentra en una amplia planicie aluvial entre los ríos Tula y Salado. En esta planicie se encuentran afloramientos volcánicos aislados como es el caso del cerro Xicuco y El Zorro. El paisaje es característico de cerros y lomas separados por valles y llanuras.

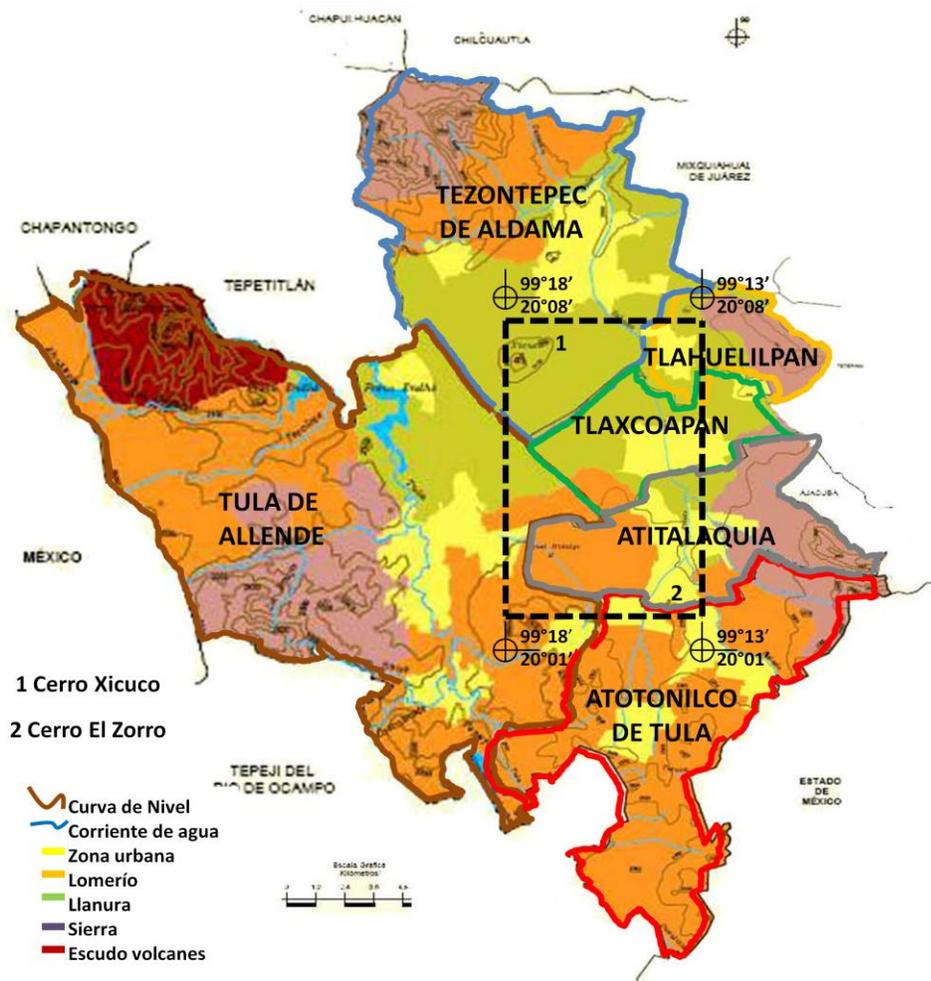


FIG. 9 Fisiografía de la zona de estudio (INEGI, 2009)

Por fortuna muchos de los accidentes geográficos representan las expresiones externas del comportamiento dinámico de los materiales que se encuentran debajo de la superficie. Examinando los rasgos superficiales más destacados y su extensión global, podemos obtener pistas para explicar los procesos dinámicos que los han conformado.



## II.2.2 Geología regional

Como los procesos geológicos ocurren tan lentamente, y consecuentemente tienen tan larga duración, los geólogos han ido desarrollando desde hace más de un siglo, una escala de tiempo, basada en eventos geológicos globales.

Para tener una idea clara sobre el tiempo en que se formaron los diferentes depósitos en la región se muestra la siguiente tabla de historia geológica. Los eones representan las mayores extensiones de tiempo, el eón Fanerozoico se divide en 3 eras, las cuales se: Cenozoico, Mesozoico y Paleozoico (TABLA 2). El eón que antecede al Fanerozoico es el Precámbrico, no creo conveniente colocar la división de éste eón puesto que los depósitos que se estudiaron pertenecen al Fanerozoico.

Era	Periodo	Época	Hace millones de años
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0,01
		Pleistoceno	1,8
	Terciario	Plioceno	5,3
		Mioceno	23,8
		Oligoceno	33,7
		Eoceno	54,8
		Paleoceno	65,0
Mesozoico	Cretácico		144
	Jurásico		206
	Triásico		248
Paleozoico	Pérmico		290
	Carbonífero	Pensilvaniense	323
		Misisipiense	354
	Devónico		417
	Silúrico		443
	Ordovícico		490
	Cámbrico		540
Precámbrico			

TABLA. 2 Escala de tiempo geológico (Tarbuck E. y Lutgens F., 2005)



### II.2.2.1 Litología

En la región estudiada se encuentran rocas vulcanosedimentarias del Plioceno y Mioceno. Como sabemos las rocas ígneas se forman conforme se enfría y solidifica una roca fundida, esto se produce a varios niveles dentro de la corteza terrestre y el manto superior. Una vez formado, un cuerpo magnético asciende por flotación hacia la superficie porque es menos denso que las rocas que la rodean. Cuando la roca fundida se abre camino hacia la superficie, produce una erupción volcánica. Las rocas ígneas que se forman cuando se solidifica la roca fundida en la superficie terrestre se clasifican como extrusivas o volcánicas.

Los procesos externos (meteorización, procesos gravitacionales, y erosión) son una parte básica en el ciclo de las rocas porque son los responsables de la transformación de las rocas ígneas en sedimentos, los productos de la meteorización mecánica y química constituyen la materia prima para las rocas sedimentarias, de ahí el nombre de las rocas vulcanosedimentarias.

La FIG. 10 muestra un paisaje constituido por formas y edificios volcánicos: aparatos de forma cómica andesíticos y riolíticos, conos brechoides de pequeña dimensión, valles aluviales y cuencas lacustres

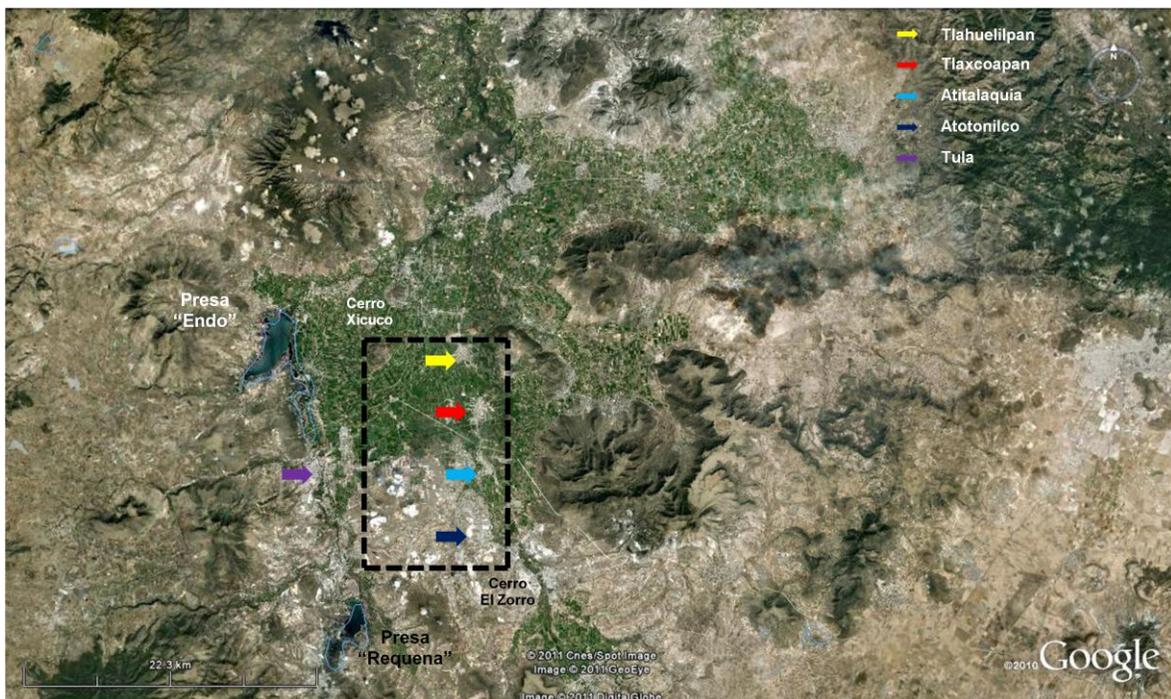


FIG. 10 Imagen satelital de la región (Google Earth, 2010)



**FIG. 11** Fotografía panorámica de la zona en estudio

Esta unidad de rocas vulcanosedimentarias representa un conjunto de depósitos heterogéneos de origen continental (ambiente continental). Éste tipo de ambiente está caracterizado por la alteración irregular de tobas vítreas híbridas, arenas y paleosuelos; depositados en un marco geológico de actividad ígnea explosiva asociada a cuencas lacustres.

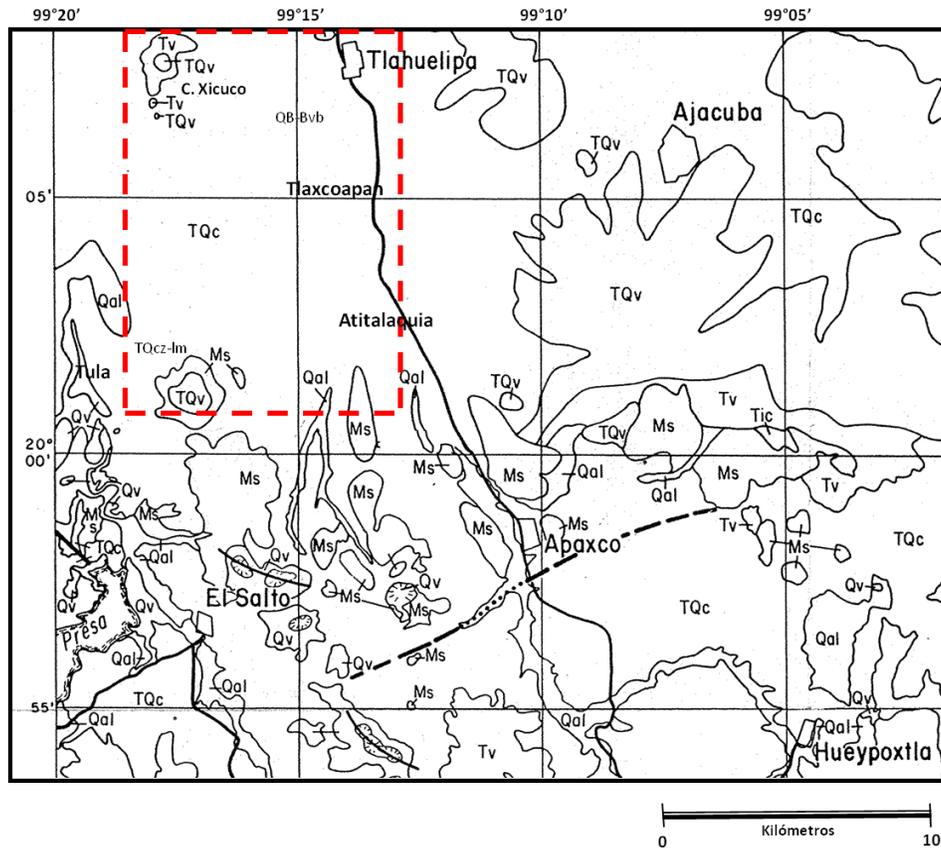
Está dominado por la erosión, la deposición asociada a corrientes y el viento, es evidente que este tipo de ambiente recibe una fuerte influencia del clima.

Las corrientes fluviales en este caso son el agente dominante de la alteración del paisaje, erosionando, transportando y depositando sedimentos. Durante la erupción de rocas ígneas, ocurrieron también emisiones de enormes cantidades de productos desagregados que, sedimentados luego por los vapores acuosos de las mismas erupciones y arrastrados después por las aguas meteóricas, rellenaron en parte las cuencas lacustres preexistentes y originaron depósitos de tobas y brechas que son tan abundantes en esta zona.

Las riolitas, dacitas y andesitas generalmente cubiertas por basaltos, forman la masa de las montañas. Rocas calcáreas, principalmente calizas del cretácico, forman parte de los picos más elevados. Rocas riolíticas vítreas y brechas riolíticas forman el cerro Xicuco (**FIG. 12**).



**FIG. 12** Cerro Xicuco (a la izquierda visto desde un costado del Arco Norte)



**FIG. 13** Carta geológica de la región (INEG, 2010)

En la región, afloran rocas cuya edad varía desde el Mesozoico, hasta el Cuaternario, como puede observarse en la figura (FIG. 13).

**Qal** (Depósitos Cuaternarios), aluvión a lo largo de cauces de ríos y alrededor de vasos lacustres. Consiste en sedimentos continentales fluviales. Cubriendo a los materiales de la Formación Tarango, y las faldas de los cerros de rocas calizas y volcánicas, existen depósitos de sedimentos recientes transportados por los ríos de hasta 10 m de espesor.

Ésta unidad representa a los depósitos detríticos no consolidados, constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas, situados en abanicos aluviales al pie de las sierras con cuerpos lenticulares de caliche y localmente impregnado con óxidos de hierro. Morfológicamente se presenta como abanicos y planicies aluviales y rellenando los valles fluviales

**Qv** (Depósitos Cuaternarios), lavas, cenizas y depósitos epiclásticos, de composición basáltica o basáltico – andesítica.



- *Basalto - Brecha volcánica básica (B-Bvb)*, se compone de una alternancia de derrames y material piroclástico de composición basáltica. El basalto es de color negro e imberiza en color pardo claro, de textura holocristalina, en ocasiones porfídica, estructura compacta vesicular. El material piroclástico forma capas de ceniza y brecha volcánica de color gris y rojo oscuro, intercaladas con tobas riolíticas de espesor máximo de 10 m.

**TQc** (Depósitos Plio - Cuaternarios), principalmente rocas vulcanosedimentarias, formando antiguos abanicos aluviales, incluyendo depósitos laháricos en algunos sitios y capas de caliche. Representado por derrames de andesita y sedimentos lacustres (limos, arenas y arcillas, así como calizas lacustres y conglomerado fluvial), que cubren parcialmente a las calizas y hacia el este se interdigita con las rocas volcánicas.

Forma estratos masivos de color pardo claro y ocre con estratificación cruzada local, tiene textura arenosa con granos minerales de vidrio y cuarzo, en una matriz arcillosa, que en conjunto ofrecen una roca semicompacta y porosa; localmente forma un tipo de material conocido como tepetate.

**Formación Tarango (Tpt).**- Integrada por derrames clásticos depositados en un ambiente fluvio – lacustre, intercalados con lentes de caliza lacustre, ampliamente dispersos y localmente cubiertos en parte por flujos de roca volcánica basáltica o intercaladas con esas rocas. Interdigitada localmente con derrames de lava de composición máfica (Tpb); corresponde a la cuenca hidrográfica del Río Tula. El nombre de Formación Tarango, lo asigno Bryan (1948) para depósitos vulcanosedimentarios, lahares, en la zona de Tarango, D.F., y de abanicos aluviales.

Los depósitos de esta formación rellenaron amplios valles, cubriendo las partes bajas y las faldas de los cerros que delimitan la planicie, o que forman altos aislados en el interior de ella. En la zona estudiada, la Formación Tarango está constituida por una alternancia indistinta de arenas-limos, que varía desde gruesa a fina, limoso y arcilloso. Es frecuente la existencia de una mezcla de esos tres componentes, es decir, existen lentes de limo-arena, limo-arcillas, arcilla-limosa, etc.

- *Caliza – Limolita (cz – lm)*, de ambiente continental, de facies lacustres. Contiene caliza color crema con tono rojizo, dispuesta en capas de dos metros de espesor; limolitas calcáreas de color verde claro en capas de 40 cm de espesor. Cubre discordantemente a calizas del Cretácico y subyace a la unidad vulcanoclástica perteneciente a la Formación Tarango de edad Plioceno superior. La morfología es de pequeñas mesetas con escaso relieve, aflora exclusivamente en las cercanías de Tula.



**TQv** (Depósitos Plio-Cuaternarios), rocas andesíticas, riolíticas y dacíticas en forma de volcanes, de domos volcánicos y derrames de lava, con material piroclástico asociado.

- *Basalto* (B), basaltos de olivino con estructura compacta y vesicular, color negro con intemperismo en tono gris verde, textura porfídica. La expresión morfológica corresponde a pequeñas mesetas y cerros bajos. Sobreyace discordantemente a la unidad vulcanoclástica Formación Tarango, se correlaciona con el Grupo Chichinautzin de la Cuenca de México.

**Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc).**- Relacionados con la actividad piroclástica y fluvial de todo el Plioceno. Se trata de flujos de lavas, de basalto, andesita y dacita en ocasiones cubiertas por tobas de igual composición; existen también algunos conglomerados volcánicos. “Fueron acumulados fluvialmente en amplios valles socavados en rocas preexistentes y están interdigitados con rocas volcánicas (Tpb), localmente se intercalan tobas de grano fino e igualmente se tiene tierra diatomácea, arcillas y caliza lacustre, relacionado con manantiales termales en la zona de Ajacuba y Tula” (Fries, 1962.).

**Rocas volcánicas máficas del Plioceno Tardío (Tpb).**- Éstas rocas están constituidas por derrames de lava interestratificados, en ocasiones, con capas de poco espesor de brechas volcánicas y/o con piroclásticos que se consideran pertenecientes a los Depósitos piroclásticos y clastos aluviales del Plioceno (Tppc). La composición varía de basáltica a andesítica.

**Tv** (Rocas Volcánicas Terciarias), incluye derrames de lava de composición andesítica y dacítica.

- *Toba acida* (Ta), unidad representada por tobas de composición riolítica y dacítica, asociada con derrames basálticos.

**Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv).**- Conjunto de rocas extrusivas que representan un segundo periodo magnético del CVT; se incluye en esta unidad, por su posición estratigráfica la Toba Don Guinyó (Seegerstrom, 1961). La composición varía de andesítica a dacítica; las secuencias piroclásticas constituyen tobas cristalinas, vítreas, se encuentran cubiertas por intercalaciones de derrames lávicos. En la base del cerro Xicuco consta de ignimbritas riolíticas vítreas con lentes aplastadas de obsidiana (Fries, 1962).

**Ms** (Depósitos Mesozoicos), incluye, en la base, anhidritas cubiertas por calizas del Cretácico Inferior, seguidos por areniscas y lutitas del Cretácico Superior. Toda esta secuencia es de origen marino.

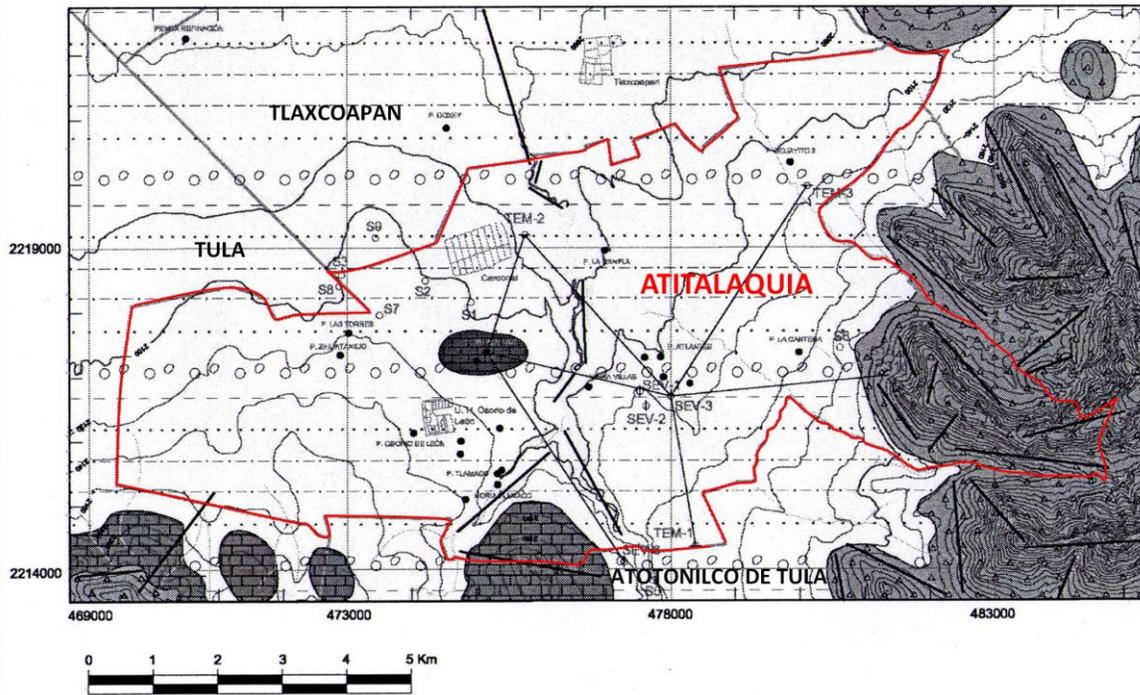


- *Caliza (cz)* del Cretácico Inferior, está constituida por rocas calcáreas de la Formación Doctor (K. Segerstrom, 1961), son las rocas mas distribuidas, afloran en el área de Tula y Apaxco.

**Formación Doctor (kid)**, Segerstrom (1961), llamo así a una secuencia de calizas puras con o sin lentes de pedernal, las calizas están bien estratificadas, las capas más gruesas están en la base y las delgadas hacia la cima. Son calizas de color gris y forman relieves arredondados a la erosión. Fries (1962) menciona que la facies de cuenca es la que aflora entre Apaxco y Tula, y probablemente hacia el sur se interdigita en el subsuelo con la Formación Morelos. En el cerro El Zorro, la Formación Doctor está muy fracturada y presenta constantes pliegues (ondulaciones), también presenta numerosas fallas tanto verticales como de tipo lateral, aunque los desplazamientos observados son pequeños, no dejan de ser significativos pues indican deformación, y que en muchas ocasiones son barreras o conductos de flujos de agua. Fuera del área de estudio, la Formación Doctor está cubierta por la Formación Soyatal Méndez.

- *Caliza (cz)* del Cretácico Superior, sobreyace discordantemente a las calizas del Cretácico Inferior, de la Formación Doctor, y subyace a basaltos de edad Terciario Superior. Morfológicamente se presenta como cerros aislados de forma redondeada y aflora en las cercanías de Apaxco, Edo. de México. Debido a la pureza de la caliza, se explota en gran escala para la fabricación de cemento.
- *Lutita - arenisca (lu - ar)*, de ambiente de depósito continental de facies lacustre, constituida por lutitas bentoníticas de color verde olivo y pardo claro, en capas con algunas intercalaciones de tobas, limolitas y areniscas. La expresión morfológica corresponde a lomeríos bajos, es utilizada en gran escala en la fabricación de cemento. Pertenece a la Formación Mexcala.

**Formación Mexcala (kmx).**- Denominada por Fries (1960). Capas interestratificadas de lutitas, limolitas, arenisca y caliza. La Formación Mexcala es de origen marino.



**FORMACIÓN TARANGO**

Tpt.- Material clástico predominantemente con lentes de caliza lacustre y de ceniza volcánica ; interdigitados localmente con derrames de lava de composición mafica.

Tpc. Calizas lacustres.



Tpb.- Derrames de lava con brechas y canizas asociadas principalmente de composición basáltica o andesítica; interdigitados localmente con la Formación Tarango.



**FORMACIÓN EL DOCTOR**

Kid.- Caliza marina con capas variables de gruesas a delgadas, localmente contiene nódulos de pedernal y capas dolomíticas.

FIG. 14 Mapa Geológico de Atitalaquia y zonas aledañas (Instituto de Geología UNAM, 2010)



TABLA 3 TIPO DE SUELO Y ROCAS EN LA REGIÓN				
DESCRIPCIÓN		SIMBOLO	NOMBRE	OBSERVACIONES
<b>SUELO</b>		<b>al</b>	Aluvial	Depósitos detríticos no consolidados por gravas, arenas, limos y arcillas con cuerpos lenticulares de caliche.
<b>ROCAS</b>	<b>Ígneas extrusivas</b>	<b>B-Bvb</b>	Basalto - Brecha volcánica básica	El basalto es de color negro e intemperiza en color pardo claro, de textura holocristalina, en ocasiones porfídica, estructura compacta vesicular.
		<b>B</b>	Basalto	Basaltos de olivino con estructura compacta y vesicular, color negro con intemperismo en tono gris verde, textura porfídica.
		<b>Ta</b>	Toba ácida	Unidad representada por tobas de composición riolítica y dacítica, asociada con derrames basálticos.
	<b>Sedimentarias</b>	<b>lu-ar</b>	Lutita-arenisca	Constituida por lutitas bentoníticas de color verde olivo y pardo claro, en capas con algunas intercalaciones de tobas, limolitas y areniscas.
		<b>cz-lm</b>	Caliza-limolita	Contiene caliza color crema con tono rojizo, dispuesta en capas de dos metros de espesor; limolitas calcáreas de color verde claro.
		<b>cz</b>	Caliza	Capas de calcarenitas color gris claro, debido a la pureza de la caliza, se explota en gran escala para la fabricación del cemento.

### II.2.2.2 Estratigrafía

Grabau (1913) define a la estratigrafía como “la parte inorgánica de la geología histórica, o sea, el desarrollo, a través de las sucesivas edades geológicas, de la litosfera, o armazón de la Tierra”. Le concierne la descripción, organización y clasificación de las rocas.

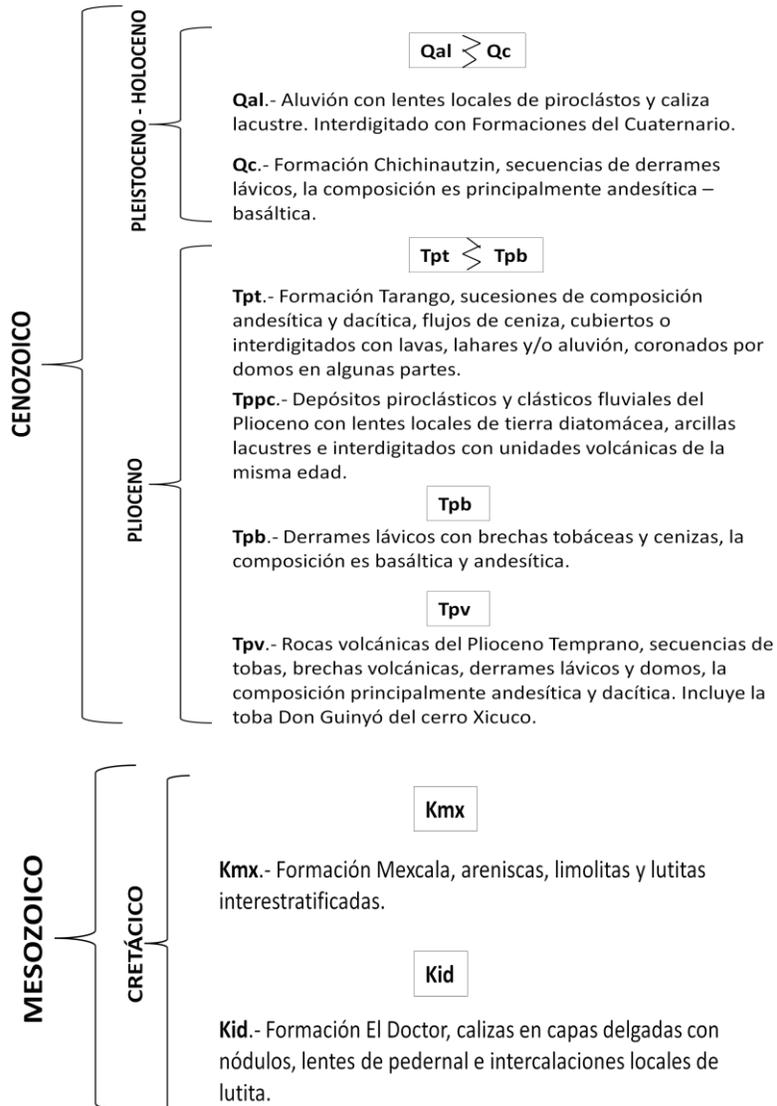
Se comienza con la observación y organización sistemática de los materiales básicos a saber: la sucesión de rocas observables en afloramientos o puestos al descubierto por la perforación de pozos.

La secuencia estratigráfica del área que es objeto el presente trabajo y su entorno corresponde a rocas sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior, que componen el grupo de rocas más antiguas; siguiéndoles en este orden también de origen sedimentario son las rocas calcáreas continentales de edad terciaria; posteriormente se presentaron las



rocas ígneas del Terciario y Cuaternario; por último se tienen zonas aisladas de material aluvial del cuaternario.

TABLA 4 SECUENCIA ESTRATIGRAFICA	
SUELO O ROCA	EDAD
Aluvial (al)	Cuaternario
Caliza-limolita $\left\{ \begin{array}{l} \text{Rocas ígneas} \\ \text{Rocas ígneas} \end{array} \right.$	Terciario - Cuaternario
Lutita-arenisca (lu-ar)	Cretácico Superior
Caliza (cz)	Cretácico Inferior



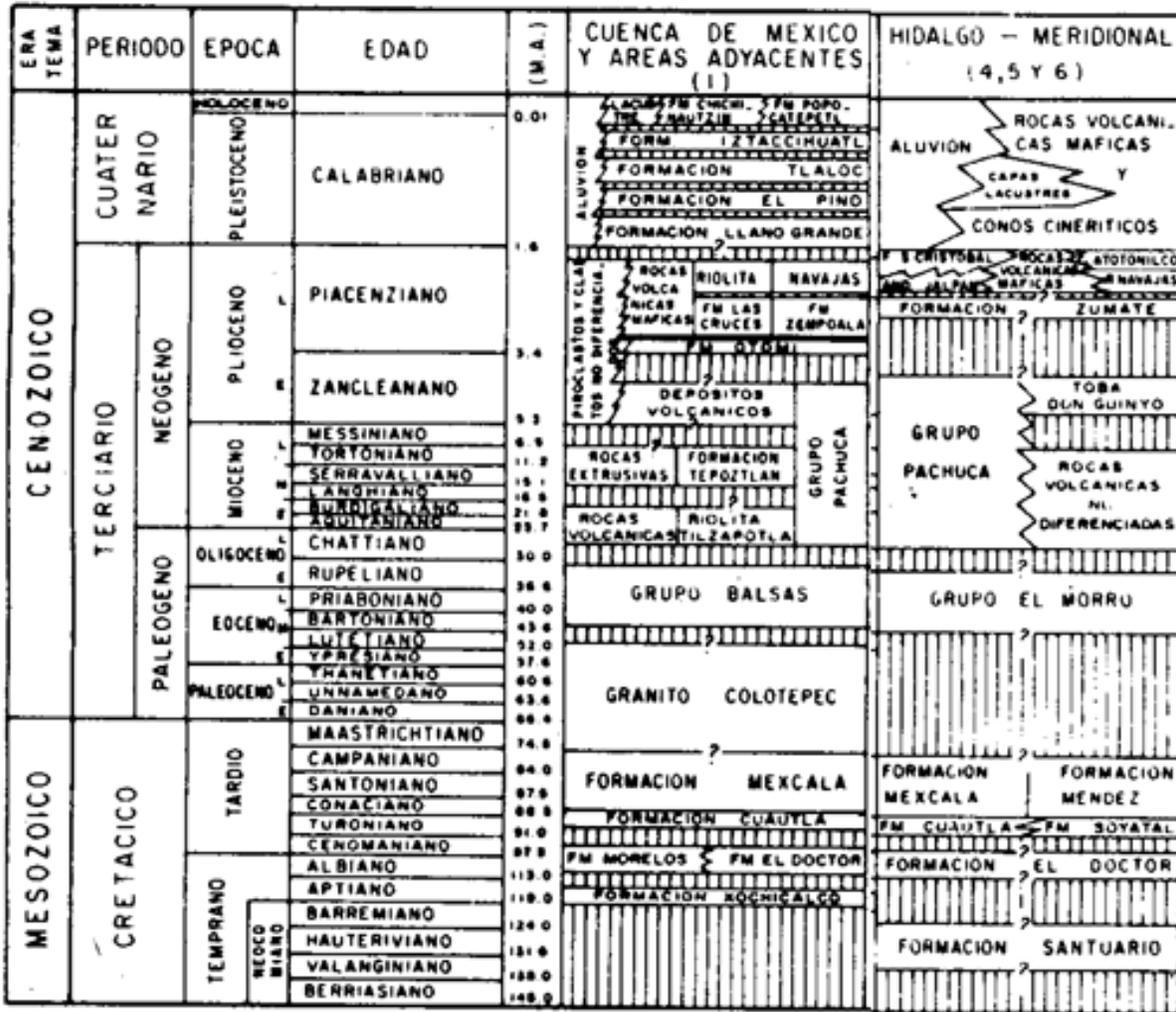


FIG. 15 (1) Fries (1960), (4) Fries (1962), (5) Geyne et al. (1963), (6) Mooser (1975)

El registro estratigráfico es grandemente el resultado de la continuidad de procesos sedimentarios a través de la dimensión del tiempo geológico. La ciencia de la estratigrafía ha sido dirigida hacia el análisis del registro sedimentario en función de la reconstrucción de la historia geológica y nomenclatura de las diferentes unidades litológicas.

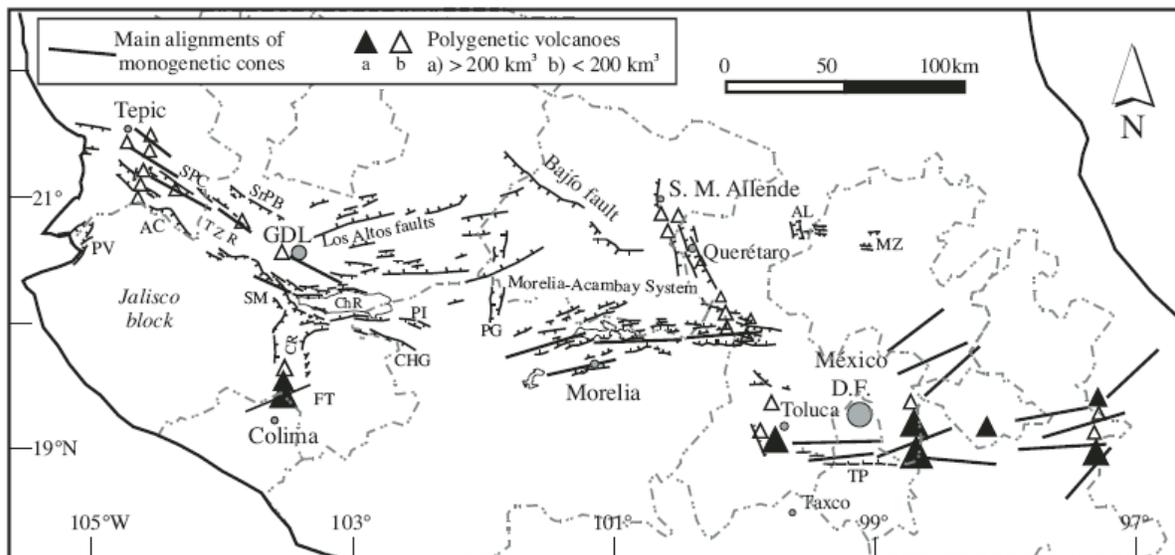
Los afloramientos, las excavaciones, canteras, minas y perforaciones de pozos sirven para realizar estudios accesibles. Se han recopilado grandes cantidades de datos sobre los estratos del subsuelo, resultantes en su mayoría de la exploración y explotación del petróleo.

Se puede considerar cada Formación rocosa como un episodio de la historia terrestre.

### II.2.2.3 Estructuras geológicas

El vulcanismo y tectónica del Terciario ha desempeñado un papel importante en la Historia Geológica del Cenozoico Mexicano.

Se tienen dos fases de deformación, una compresiva, responsable de plegar y dislocar los relieves Cretácicos, y otra distensiva, responsable de la formación de relieve volcánico dispuesto en bloques y cuencas.



**FIG. 16** TPZ – Rift Tepic-Zacoalco; PV – Graben de Puerto Vallarta; SPC – Graben San Pedro-Ceboruco; AC – Graben Amatlán de Cañas; SRPB – Graben Santa Rosa-Plan de Barrancas; SM – Falla San Marcos; CR – Rift de Colima; FT – Sistema de fallas Tamazula; ChR – Rift de Chapala; PI – Falla Pajacuarán-Ixtlán de los Hervores; CHG – Graben de Cotija; PG – Graben Penjamillo; AL – Graben Aljibes; MZ – Graben del Mezquital; GDL – Guadalajara; Sistema de Fallas TP – Tenango-La Perla (Gómez Tuena, A. et al., 2007)

En la figura (**FIG. 16**) se muestran el sistema de fallas Chapa – Tula (SFCHT) relacionado con el Cinturón Volcánico Transmexicano durante el Mioceno y el Cuaternario. De manera ortogonal al sistema de fallas Chapala – Tula, se encuentra el sistema de fallas Taxco – San Miguel de Allende (SFTSMA) (Demant, 1978, en Aguirre, G. et al., 2000), la cual tiene orientación NNW-SSE.

El fallamiento ENE-WSW está asociado al SFCHT que es paralelo al Cinturón Volcánico Mexicano, el cual es considerado sísmicamente activo (Suter et al., 1995).

Durante el Mioceno Inferior y Medio, en la Cuenca de México nuevamente hubo reactivaciones tectónicas, con el consecuente fracturamiento y fallamiento de la misma. Los sistemas estructurales son conjugados SW-NE y SE-NW, probablemente generados por los



esfuerzos compresivos de la placa de Cocos (Mooser, 1975; Aguayo y Marín, 1987). Destacan la regionalidad del fallamiento y fracturamiento conjugado, con tendencia hacia el noreste, como producto de la asimilación de fallas que dividen a la placa oceánica de Cocos en subplacas, cada una desciende hacia el manto durante su subducción con diferente inclinación y rumbo acimutal.

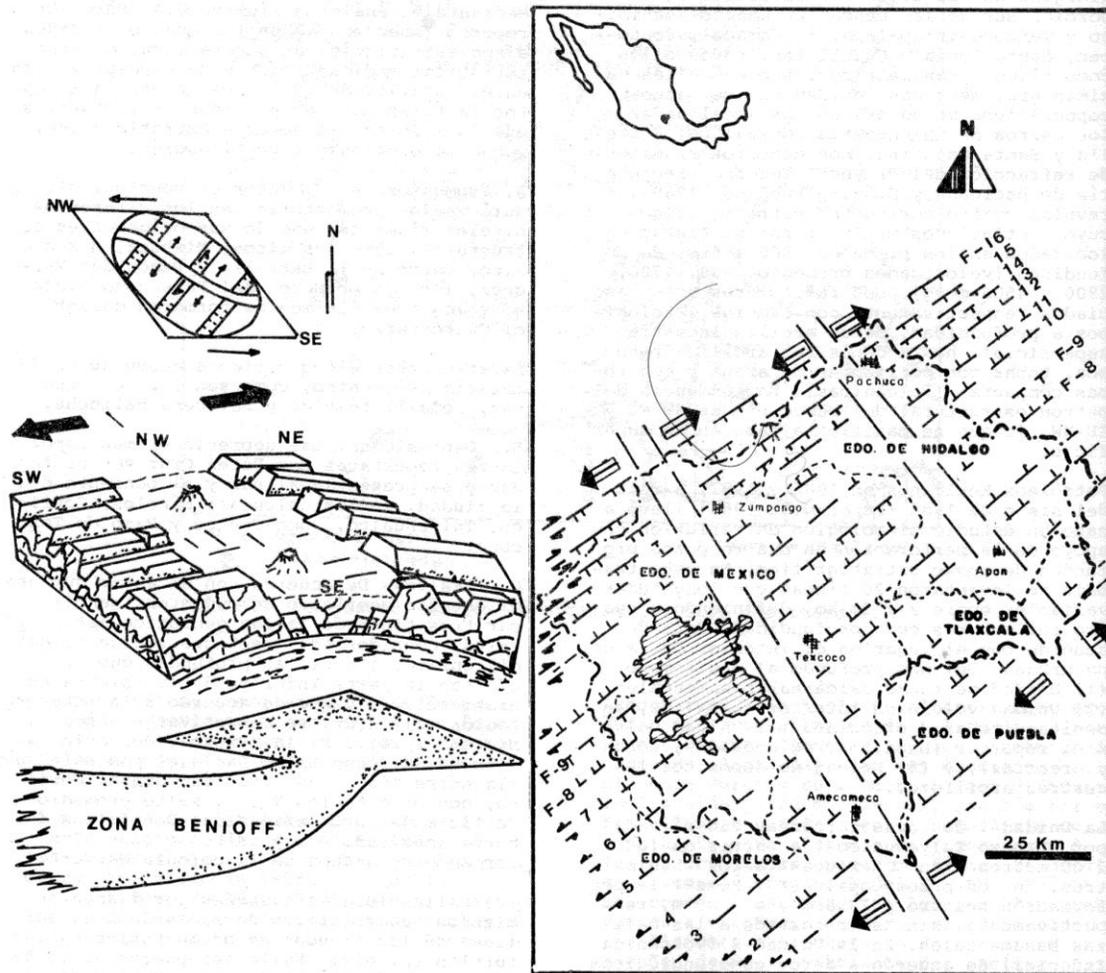
Los límites entre ellas se reflejan en la superficie del continente como sistemas de fracturas y de fallas conjugadas, pero con tendencia de la alineación regional del SW45° - 55°NE. El fracturamiento suroeste-noreste está representado por la falla Apan-Tlaloc que incide en el extremo sur del Tepozteco. El otro sistema estructural sureste-noroeste corresponde a los alineamientos Popocatepetl-Cerro de Chimalhuacán, Sierra de Guadalupe y Pathe.

Los sistemas de fallamiento están controlados por sistemas estructurales regionales, que inciden afectando al Cinturón Volcánico Transmexicano. (Mooser, 1975), y también a todo el sector de la República Mexicana, desde el Pacífico hasta el Golfo de México (Aguayo y Marín, 1987). Estos sistemas están asociados con hidrotermalismo, rocas volcánicas básicas, zonas de mineralización y focos sísmicos.

La región estudiada se encuentra situada muy cerca de una zona distensiva NW-SE, lo cual es evidente, ya que a unos kilómetros se encuentran manantiales, en los municipios de Ajacuba e Ixmiquilpan, donde existen manifestaciones de aguas termales asociadas a intensa alteración hidrotermal (sílice y caolín), a lo largo de zonas permeables originadas por la intersección de fallas con rumbos E-W y N-S. Al suroriente de Ixmiquilpan, también existen manifestaciones hidrotermales posiblemente relacionadas a las fallas con rumbo E-W que limitan hacia el sur al Graben Mezquital (Suter, et al. en Hernandez I. et al., 1996).

Aguayo y Marín (1987) reconocieron 16 fallas principales que inciden en el interior de la Cuenca de México, todas distensivas y con rumbo NE45°SW, delimitando a 15 bloques estructurales mayores (FIG. 17).

La separación promedio entre fallas es de unos 6 km y se manifiestan afectando a los sistemas Norte-Sur y Oriente-Poniente, así como a las estructuras NW-SE del Mioceno y a los estratos del Plio-Cuaternario.



**FIG. 17** Sistema de fracturas y fallas conjugadas en la Cuenca de México y zonas aledañas (Marín Cordova S. y Aguayo C., 1987, 1987)

Los sistemas de fallas descritos de la F-1 a la F-16 delimitan a quince bloques distensivos escalonados, con dos depresiones mayores (grabens) paralelas entre sí, una de éstas depresiones corresponde a los límites de las fallas 8 y 9; la otra depresión corresponde al valle de Tizayuca – Pachuca y está limitado por las fallas 12 y 13.

Los sistemas de fallas transcurrentes y distensivos tienen dirección de movimientos izquierdo de la 1 a la 8 y son derechos de la 9 a la 16.

Fallas sismogénicas son parte de grabens cercanos a la zona estudiada, como el graben Aljibes y el graben de Acambay, además de encontrarse en el graben del Mezquital (**FIG. 18**).

Las estructuras geológicas más prominentes hacia el este del CVT son los grabens de Aljibes, Mezquital y las fallas de Apan. El Graben Aljibes está formado por cuatro fallas normales mayores con orientación E-W, localizadas en el límite norte del CVT a 140 km al NW de la Ciudad de México. El graben del Mezquital tiene orientación E-W, localizado a 40 km al este del graben Aljibes, está limitado por la falla el Cardonal. Suter et al (1995) indica que la estructura es potencialmente activa.

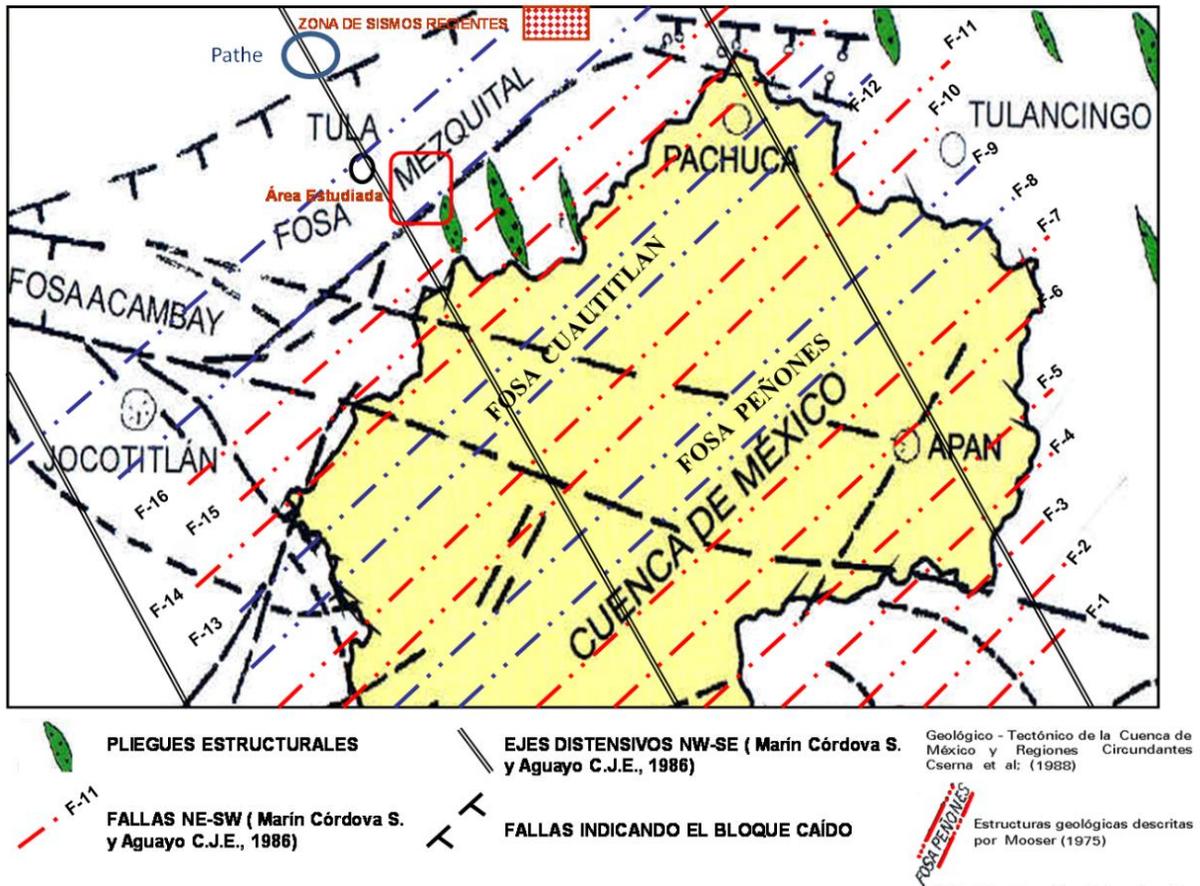


FIG. 18 Sistema de fracturas y fallas conjugadas en la Cuenca de México y zonas aledañas (Marín Cordova S. y Aguayo C., 1987)



#### II.2.2.4 Sismicidad

La provincia del Eje Neovolcánico es conocida por su gran riesgo sísmico, ya que está íntimamente relacionado con los movimientos mayores de la placa tectónica continental de Norteamérica hacia el occidente y al suroccidente, y la oceánica de Cocos hacia el noreste.

Como se menciona, durante la subducción la capa litosférica oceánica desciende en la astenósfera con cierto ángulo. El ángulo al que la litosfera oceánica desciende en la astenósfera depende de su densidad, los ángulos bajos suelen provocar una interacción considerable entre la placa descendente y la placa superior, esas regiones experimentan sismos (Aguayo y Marín, 1987).

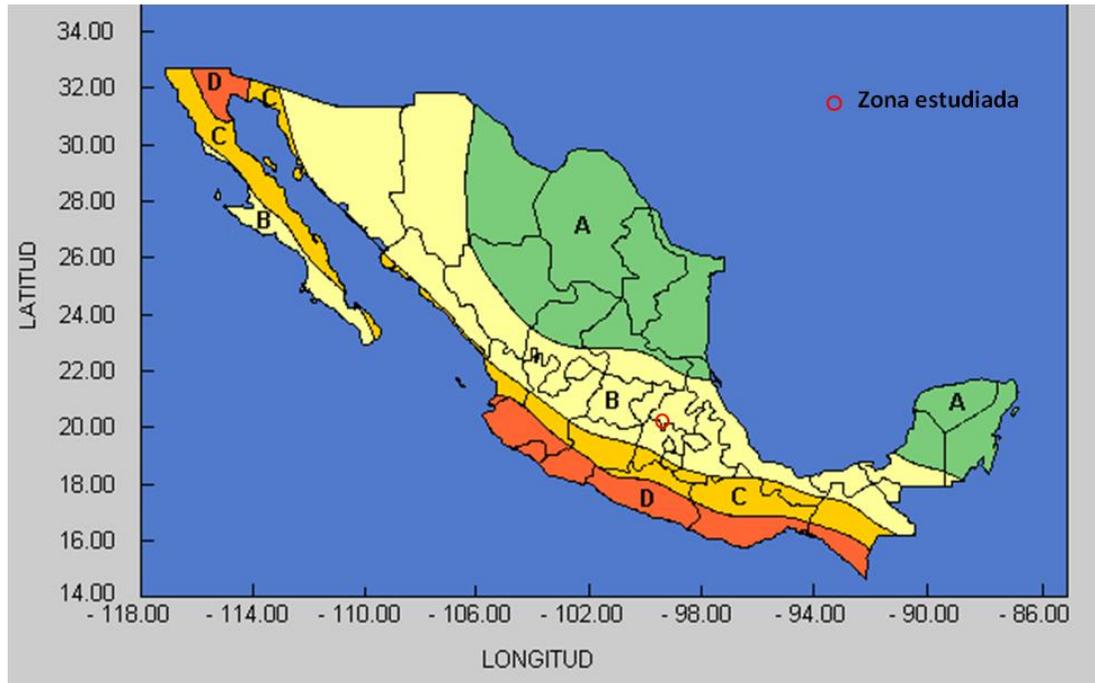
Normalmente, los sismos se producen a lo largo de fallas preexistentes que se formaron en el pasado lejano a lo largo de zonas de fragilidad de la corteza terrestre, liberando energía. El grado de inestabilidad del subsuelo en ciertos sectores está afectado por sistemas estructurales de fracturas y fallas, tema que se tocara más adelante.

La República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas. Esto se realizó con fines de diseño antisísmico. Para realizar esta división (**FIG. 19**) se utilizaron los catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios del siglo XX, grandes sismos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en el siglo pasado. Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar en un periodo de 100 años.

La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.



**FIG. 19** Regionalización sísmica de la República (Servicio Sismológico Nacional, 2011)

Aún cuando la mayor parte de los sismos en México y en el mundo se relacionan directamente con el movimiento de placas tectónicas, hay temblores menos frecuentes que ocurren en los continentes, hacia el interior de las placas. Las áreas donde se han reportado sismos sugieren que éstos se originan en fallas superficiales asociadas probablemente a las estructuras geológicas tensionales que existen en la zona (grabens).

En el mes de mayo de 2010, se presentaron 22 sismos en la región de Actopan, Hidalgo, localidad aledaña a la zona estudiada. De estos sismos, ha sido posible localizar 13 de ellos, ya que los 8 restantes tienen magnitudes muy pequeñas (TABLA 5). De esta secuencia sísmica, el mayor de ellos tiene una magnitud de 4 (preliminarmente reportada como 4.3).

Estos sismos están relacionados a sistemas de fallas que existen en la región (Graben del Mezquital), por ser esta la frontera norte del Eje Neovolcánico. Los sismos tienen profundidades someras, de menos de 4.6 km, y esto hace que sean sentidos fuertemente, pero debido a su magnitud, su duración es corta, de sólo unos cuantos segundos.



Fecha (año,mes,día)	Hora local	Latitud	Longitud	Profundidad Km	Magnitud
100518	00:12:07	20.361	98.914	3	2.9
100518	00:12:29	20.4086	99.074	5	3.1
100518	00:29:08	20.36433	98.895833	3	4
100518	00:32:37	20.35183	98.924333	5	3.1
100518	00:36:23	20.361	98.955833	5	3.3
100518	02:37:14	20.344	98.884	5	3.2
100518	23:34:40	20.356	98.890833	5	3.2
100520	03:23:52	20.4736	99.010833	4.6	3.1
100520	15:49:36	20.34767	98.895167	3	2.9
100520	16:11:03	20.34767	98.895167	2	3.9
100521	00:29:33	20.35017	98.909	2	3.3

**TABLA 5** Sismos localizados (Servicio Sismológico Nacional, 2010)

Fecha	Región	Latitud	Longitud	Profundidad Km	Magnitud	Intensidad máxima
1887, 26 de noviembre	Pinal de Amoles	21.14	99.63	?	5.3	VIII
1950, 11 de marzo	Ixmiquilpan	20.35	99.97	15	4.9	VII
1976, 25 de marzo	Cardonal	20.62	99.09	15	5.3	VIII
1987, 27 de enero	Actopan	20.31	99.21	15	4.1	VII
1989, 10 de septiembre	Landa	21.04	99.43	10	4.6	VII

**TABLA 6** Sismos históricos en la región (Servicio Sismológico Nacional, 2010)

### II.2.3. Geología local

Se realizaron inspecciones a diferentes bancos de material ubicados dentro de la zona estudiada (FIG. 20), con el objeto de reconocer la litología, estratigrafía y estructuras geológicas de la región.

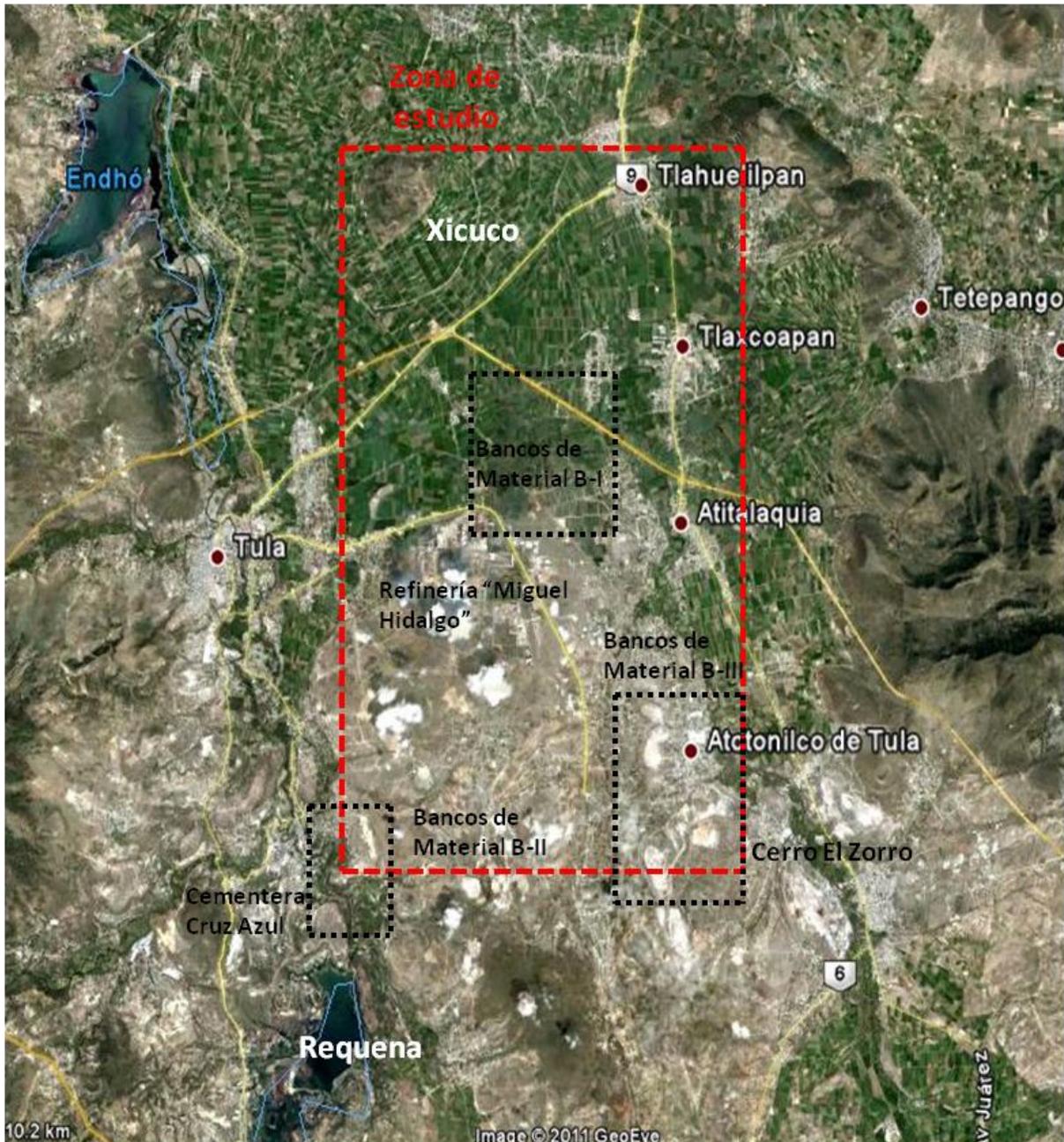


FIG. 20 Zonas de bancos de material (Google, 2011)

### II.2.3.1 Inspección de Bancos de Material B-I

El área de **Bancos de Material B-I** se localiza a escasos kilómetros al Noreste de la Refinería de PEMEX “Miguel Hidalgo” y la Termoeléctrica “”, la llegada a los predios es a través de terracería, ya que éstos son de cultivo. Tres canales de riego son los que abastecen a todas las parcelas a través de compuertas, el canal “Salto-Tlamaco”, el canal “Antiguo Requena” y el canal “Dendho” (FIG. 21). En el capítulo IV se hace referencia al aspecto hidrológico de la zona.

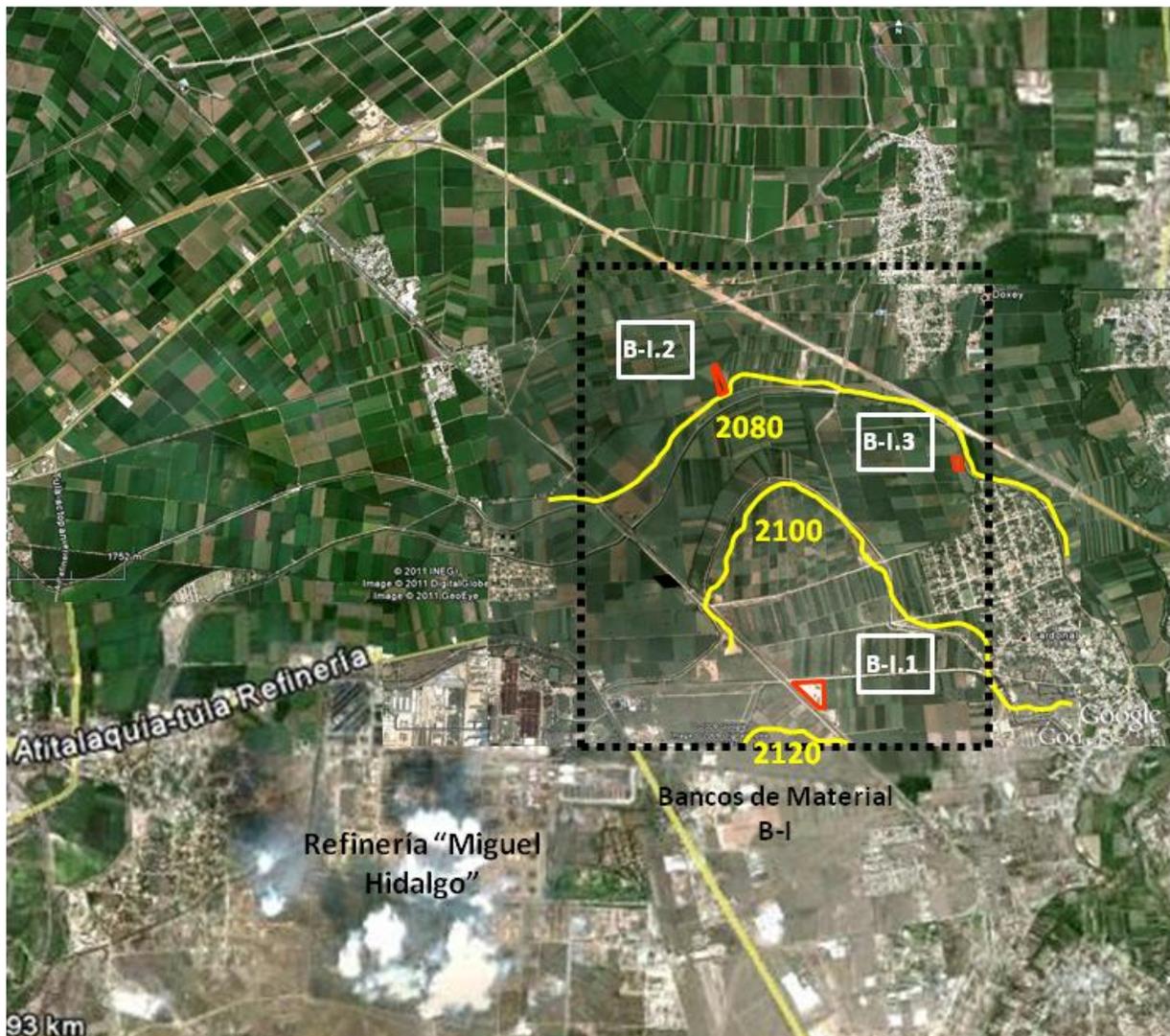
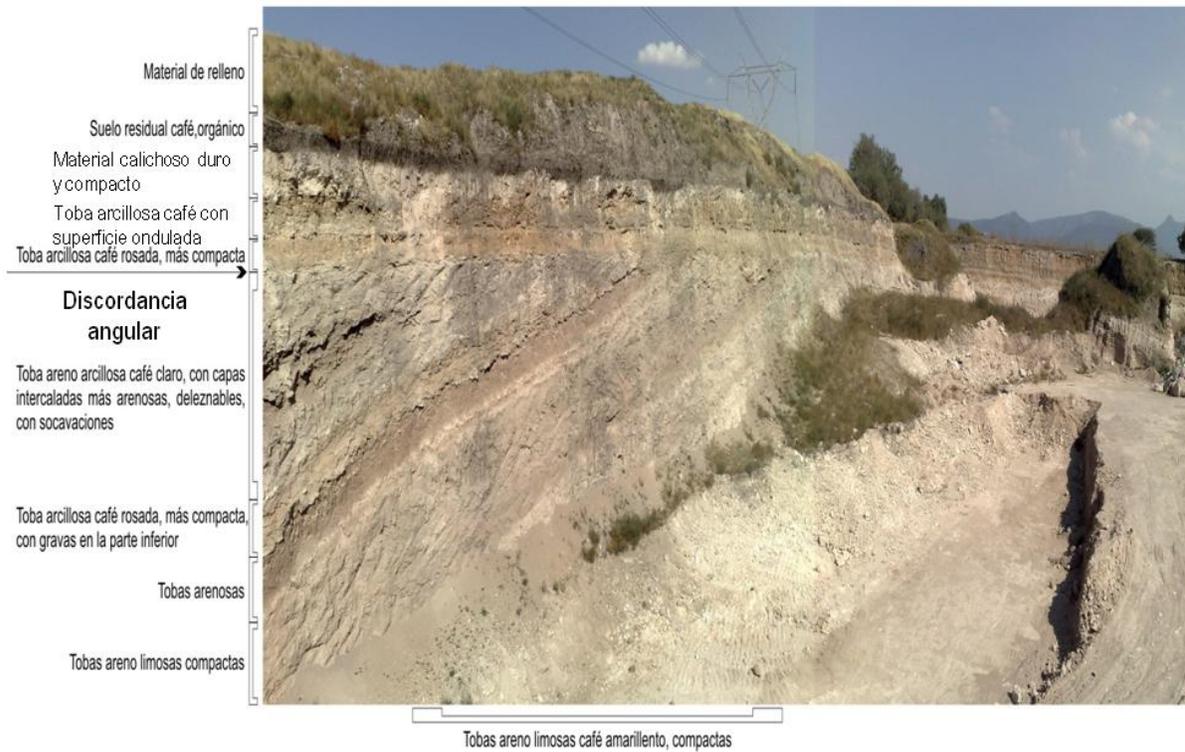


FIG. 21 Zonas de Bancos de Material B-I (Google, 2011)

- Banco de Material B-I.1



**FIG. 22** Banco de Material B-I.1, pared Norte



**FIG. 23** Estratigrafía del Banco de Material B-I.1

En ambas fotografías (FIG. 22 y 23), se aprecia un horizonte de materiales calichosos, cubierto por una capa de suelo residual, con materia orgánica, que descansan sobre capas de materiales tobáceos de naturaleza arenolimsa, que a su vez se encuentran sobre otra serie de depósitos en discordancia angular, de diferentes consistencias y de naturaleza arenosa, limosa y arcillosa.



FIG. 24 Estratigrafía del Banco de Material B-I.1, paredes Sur y Oeste



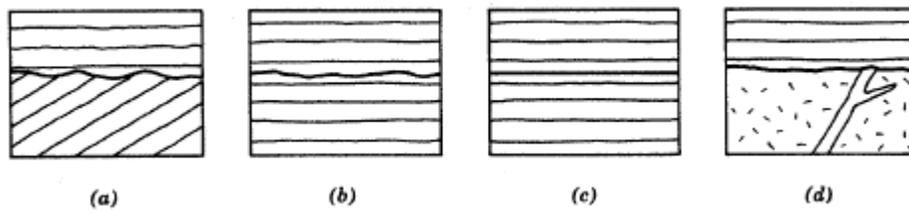
FIG. 25 Estratigrafía del Banco de Material B-I.1, pared Norte

En la pared Oeste y en una zona de la pared Sur se distingue una discordancia angular, FIG. 24, las estructuras geológicas están relacionadas con todos los accidentes tectónicos de la masa de suelo, éstas son formadas por movimientos epirogénicos y/o movimientos orogénicos.

Entre los acontecimientos geológicos que ayudan a destacar periodos de movimiento estructural, se encuentran las discordancias. Ésta es una superficie de erosión o de no deposición que separa rocas más modernas de rocas más antiguas.

El B-I.1 muestra una discordancia angular, donde existe un plano de separación entre series de materiales o estratos no paralelos.

Aunque no existan determinaciones absolutas de la edad, los acontecimientos geológicos pueden ser ordenados. Cuando existe una interrupción en la sedimentación, un periodo de erosión o de deformación y sedimentación ulterior, las formaciones sedimentarias son susceptibles de registrar esa circunstancia mediante superficies discontinuas o discordancias, las cuales pueden ir desde pequeñas interrupciones erosionales hasta muy marcadas diferencias angulares entre los estratos.



**FIG. 26** Principales tipos de discordancia entre formaciones geológicas, a) Discordancia angular; b) Disconformidad; c) Paraconformidad; d) Discordancia heterolítica o no-concordancia. (Ragan, D.M., 1973)

Una discordancia indica un periodo en el que el registro rocoso no está presente y, por esa misma razón, su alcance temporal puede llegar a ser muy largo (**FIG. 26 (a) - (d)**). Todo ello puede ser indicativo de que durante determinados periodos geológicos se hayan producido levantamientos, plegamientos, hundimientos, ausencia de sedimentación, movimientos tectónicos o bien acontecimientos magmáticos que pudieran de algún modo configurar la historia geológica de la región.

Como ejemplo, en la discordancia angular de la **FIG. 27** el basamento tiene dos posibilidades: que lo más antiguo sea 1 o que sea 6, dependiendo del grado de volcamiento. Sí, durante la ausencia de la sedimentación existe una actividad tectónica, los estratos antiguos (1-6) se inclinaran o presentaron fuertes deformaciones, continúa un proceso erosivo (e) que nivela la superficie de sedimentación para los depósitos recientes 14-17. La laguna estratigráfica estará representada por los estratos comprendidos entre los 6 primeros y los 4 últimos, no presentes en la columna.



FIG. 27 Discordancia entre 10 unidades litológicas. Faltan los eventos desde el 7 hasta el 13 incluidos (www.geovirtual.cl)

De las observaciones realizadas a la pared Norte del banco de material, se deduce lo siguiente:

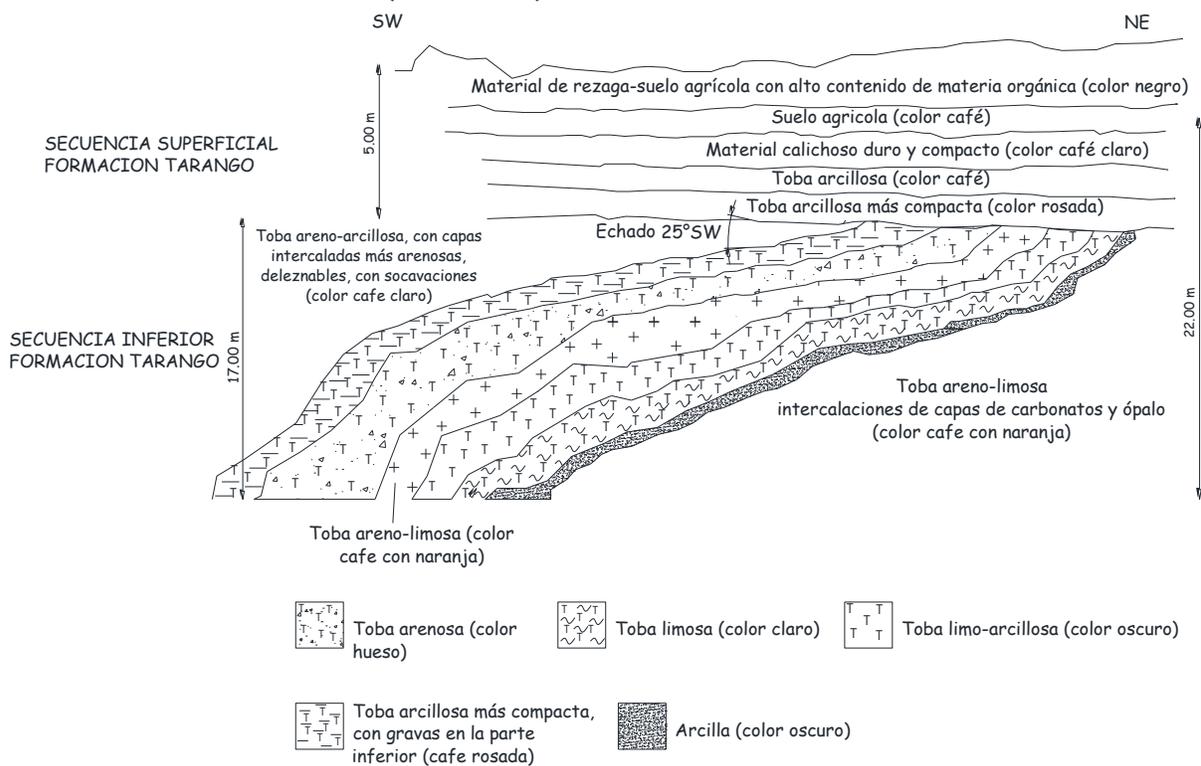


FIG. 28 Estratigrafía del Banco de Material B-I.1



En el banco de material B-I.1, se observan principalmente rocas vulcanosedimentarias, y capas de caliche. Materiales tobáceos de naturaleza areno limoso, así mismo material arcilloso, Secuencia Superficial de la Formación Tarango. Uno de los estratos presenta ondulación, la cual puede deberse al viento o a las corrientes de agua que han estado presentes en la región.

La discordancia angular existente tiene un buzamiento de 15° al S25°W, separan dos unidades estratigráficas superpuestas en las que no hay paralelismo de capas, de manera que la unidad inferior tiene un mayor grado de deformación que la unidad superior, con respecto a la superficie de discontinuidad. Se presentan sedimentos lacustres (limos, arenas y arcillas, así como calizas lacustres y conglomerado fluvial), debido a la presencia de corrientes fluviales dentro de la Cuenca Hidrográfica, se observa una alternancia indistinta de arenas-limos, que varía desde gruesa a fina, limosa y arcillosa, denominada Secuencia Inferior de la Formación Tarango. Es frecuente la existencia de una mezcla de esos tres componentes, es decir, existen lentes de limo-arena, limo-arcillas, arcilla-limosa, etc. En la **FIG. 25** se aprecia un estrato de conglomerado oligomóctico, constituido por boleos, gravas (**TABLA 7**) de aproximadamente 15 cm de diámetro en una matriz arenosa, éste material se localiza dentro de la discordancia angular.

Intervalos de tamaño (milímetros)	Nombre del clasto	Nombre del Sedimento	Roca detrítica
>256	] Bloque	Grava	Conglomerado o brecha
64-256			
4-64	] Canto	Arena	Arenisca
2-4			
1/16-2	Grano	Limo	Limolita
1/256-1/16	Gránulo	Arcilla	Lutita
<1/256	Partícula		

**TABLA 7** Clasificación de las rocas detríticas según el tamaño del clasto (Tarbuck E. y Lutgens F., 2005)

En primera instancia la deposición de los estratos observados en la zona del Banco B-I.1, pudo ser paralela, de diferentes propiedades en cuanto a los materiales así como los espesores (**FIG. 29**). Encontrándose en un marco geológico de actividad ígnea explosiva asociada a cuencas lacustres. El clima y el viento, erosionando el ambiente, fueron modelando el paisaje.



Si los estratos siguieran siendo horizontales, esto nos dice que probablemente el área no ha experimentado modificaciones estructurales. Pero si los estratos están inclinados o doblados, esto indica que se produjo un periodo de deformación después de la deposición.



**FIG. 29** Idealización de los estratos antes de la discordancia angular

Los procesos gravitacionales, la erosión causada por el agua y, en gran medida, las fuerzas tectónicas deformaron la corteza. Evidencia que demuestra la actuación de fuerzas al interior cortical se cuenta con los estratos que están volcados. Como se menciona en los apartados II.2.2.3 y II.2.2.4, la zona estudiada se encuentra en una zona distensiva, por lo que sistemas de fallamiento dan lugar a sismos de diferentes magnitudes. La liberación de energía a través de fallas y fracturas provocó que los estratos se inclinaran, se deformaran. Los movimientos de las placas y las interacciones a lo largo de ellas generan fuerzas tectónicas que provocan la deformación de las unidades de roca. La deformación es un término general que se refiere a todos los cambios de tamaño, forma, orientación o posición de una masa.

Sería ideal explorar a una mayor profundidad y longitud con el objeto de conocer el comportamiento de la discordancia angular en toda la región y así tener datos del área de estratos que se volcaron en un momento dado del tiempo geológico.

En base a las observaciones, parecería que después de la inclinación de los estratos, éstos fueran cortados de manera horizontal y posteriormente se inició la sedimentación de las



capas suprayacentes (FIG. 30). Es decir tuvo que ocurrir un proceso de erosión y/o hundimiento (movimientos abruptos de la corteza) de manera tal que nivelara la discontinuidad y así las capas posteriores se sedimentaran de una manera horizontal y paralela entre ellas. Factores como el intemperismo (fragmentación física y alteración química de las rocas), procesos gravitacionales y erosión (eliminación física de material por agentes dinámicos como el agua o el viento), son capaces de modificar las características de los minerales tanto físicas como químicas, alterando el paisaje.

Los cambios de temperatura, la fragmentación por hielo, la actividad biológica, el alivio de esfuerzos y la gravedad, intemperismo físico, destruye la roca mediante desintegración mecánica, rompiendo la roca en tamaños cada vez más pequeños, pero sin afectar apreciablemente su composición. El intemperismo químico, descompone la roca, da lugar a un suelo cuya constitución mineralógica es distinta de la que tenía la roca madre, produce nuevos componentes mineralógicos. Tiene lugar en presencia el agua, hidratación, hidrólisis, oxidación y carbonatación (Díaz Rodríguez, 2009).



**FIG. 30** Volcamiento de los estratos

Las corrientes fluviales en este caso son el agente dominante de la alteración del paisaje, erosionando, transportando y depositando sedimentos.



Durante la erupción de rocas ígneas, ocurrieron también emisiones de enormes cantidades de productos desagregados que, sedimentados luego por los vapores acuosos de las mismas erupciones y arrastrados después por las aguas meteóricas, rellenaron en parte las cuencas lacustres preexistentes y originaron depósitos de tobas que son tan abundantes en esta zona.

Las corrientes transportan su carga de sedimentos de tres maneras: en solución (minerales y sales), en suspensión y a lo largo del fondo del cauce. Transportan boleos, cantos, gravas y llevan en suspensión arena, limo y arcilla. Es por esto que se encuentran lentes de caliche en la Formación.

Ésta estructura geológica ocasiona que la circulación de agua subterránea sea distinta en el plano de la discordancia, afectando la permeabilidad de los estratos. Las discontinuidades son planos de debilidad, provocando una inestabilidad en el terreno, ya que afectan sus condiciones hidrogeológicas, aunado a eso, las estructuras pueden sufrir asentamientos diferenciales debido al cambio en las propiedades de la masa de suelo. La influencia de una discordancia sobre una estructura puede considerarse doble: una directa, derivada de su presencia en el emplazamiento y otra indirecta resultante de la acción de sismos generados en una falla activa. El conocimiento de la existencia de las discontinuidades, nos ayudan a determinar el método y costo de una excavación como material de préstamo ya sea para una carretera o vía férrea, la excavación de un túnel, la ubicación de pozos de agua subterránea, la cimentación de obras civiles, etc.

Estructuras geológicas	Factores característicos	Problemas geotécnicos
Fallas y fracturas	— Superficies muy continuas; espesor variable.	Roturas, inestabilidades, acumulación de tensiones, filtraciones y alteraciones.
Planos de estratificación	— Superficies continuas; poca separación.	Roturas, inestabilidades y filtraciones.
Discontinuidades	— Superficies poco continuas, cerradas o poco separadas.	Roturas, inestabilidades, filtraciones y alteraciones.
Pliegues	— Superficies de gran continuidad.	Inestabilidad, filtraciones y tensiones condicionadas a la orientación.
Foliación, esquistosidad	— Superficies poco continuas y cerradas.	Anisotropía en función de la orientación.

**TABLA 8** Estructuras geológicas y problemas geotécnicos (Gonzales de Vallejo Luis I. et al, 2002)



- Banco de Material B-I.2



**FIG. 31** Paredes Norte y Oriente respectivamente

No se aprecia la discordancia, se observa un ligero ángulo con echado hacia el Norte. Las capas de materiales son más uniformes en cuanto a su granulometría y color, materiales tobáceos y capas de caliche.



**FIG. 32** Paredes Sur y Oriente

- Banco de Material B-I.3



**FIG. 33** Paredes Sur y Occidente

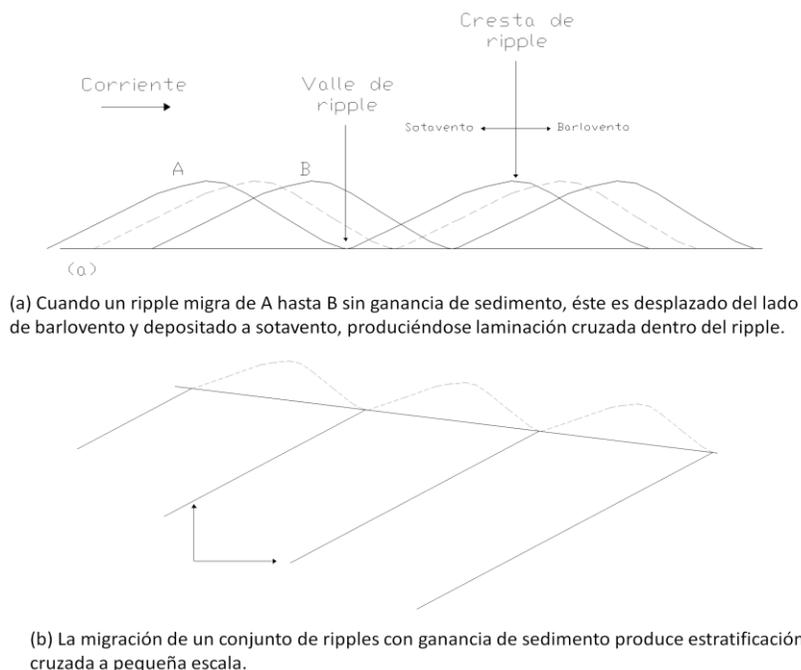
La **FIG. 33** corresponde al B-I.3, en donde se aprecia la esquina suroccidental del mismo, con depósitos de materiales granulares, con estratificación cruzada, taludes potencialmente inestables y capas de caliche.

La estratificación cruzada (current beddings o cross bedding) es un tipo de estructura sedimentaria que deriva de la organización particular de granos o componentes minerales y es muy común en las rocas detríticas. Esto comúnmente se origina a causa de que la carga es movida por la corriente como si fuese una alfombra móvil de granos, los lechos o capas son una respuesta a cambios en el ambiente de deposición, como puede ser una variación en la intensidad y/o de la corriente (Tarbuck E. y Lutgens F., 2005). La estratificación es un

plano de debilidad debido a una interrupción y/o erosión del depósito o bien debido a un cambio en la naturaleza del depósito.

En un sedimento arenoso sometido a un flujo (de aire o agua) continuo cuya velocidad se va incrementando (o cuya granulometría se va variando), irán apareciendo progresivamente diversas estructuras sedimentarias. Si se parte de cero y se va aumentando el flujo aparece el tipo de estructura sedimentaria primaria, los *ripples*. Los *ripples* son formas con una pendiente suave en barlovento y una brusca en sotavento, **FIG. 34 a y b** (Grass I. G., Wilson R. C., 1980). Se consideran como estructuras sedimentarias de flujo débil los *ripples* y las dunas, y de régimen de flujo intenso a la laminación paralela, los *standing waves* y las *antidunas*.

Las capas con una laminación paralela planar se caracterizan por no presentar elevaciones ni depresiones, y por ser sus límites de base y techo dos superficies paralelas.



**FIG. 34** Migración de ripples (Grass I. G., Wilson R. C., 1980)

En otras rocas, como las formadas por precipitación química, caliche, la laminación se ha formado debido tanto por escurrimiento de agua superficial, como de agua subterránea; existiendo también en la región, aguas termales que afloran en algunos balnearios (Vito,



Ajacuba, etc), cambios de temperatura del agua y a otros factores que afectan a la concentración de las sales disueltas.

En la FIG. 36 se muestra con línea punteada de color rojo la estratigrafía cruzada conforme se depositó el material, las crestas y valles se alinean paralelos a la dirección perpendicular a la de la corriente original (FIG. 38), se originan por una corriente o flujo unidireccional. En el capítulo IV se trata el estudio hidrológico de la zona, ya que la estratigrafía de los bancos de material analizados están fuertemente influenciados por las corrientes de agua presentes en la zona. Debido a la presencia de corrientes fluviales (Rio “Salado”, Rio “El Salto”, y Rio “Tula”) puede suponerse q en una pasado la región se consideraba una zona de inundación o de escurrimientos naturales de sur a norte debido a la topografía de la misma.



FIG. 35 Paredes Sur y Occidente

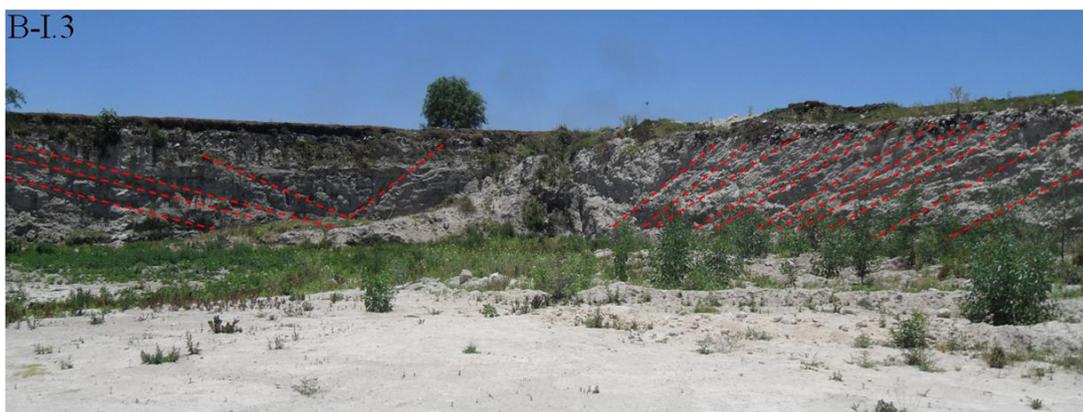
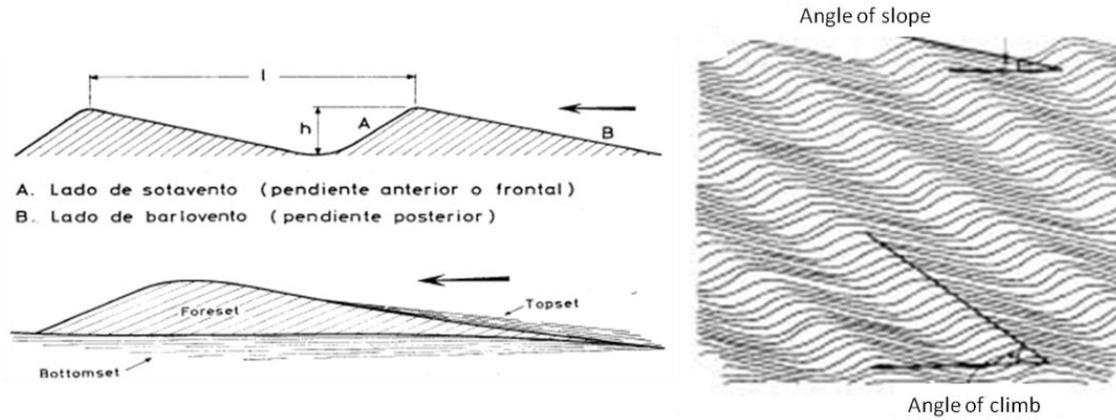


FIG. 36 Paredes Sur y Occidente



**FIG. 37** Estructura interna de ripples (Corrales I. et al, 1977) **FIG. 38** Ripples de corriente (Boggs S., 1995)

No todas las láminas inclinadas son debidas a deposición en el frente de una estructura creciente. Después de la deposición de sedimentos no consolidados, pueden presentarse deslizamientos y desarrollarse una serie de pliegues que pueden ser recubiertos por sedimentos posteriores.



### II.2.3.2 Inspección de Bancos de Material B-II

El área de **Bancos de Material B-II** se localiza sobre la carretera Tula-Tepeji del Rio Km 6, Cd. Cooperativa Cruz Azul Tula de Allende. La zona sur de la región estudiada se caracteriza por poseer depósitos de calizas y tobas arcillosas cuya forma de deposición es lacustre pertenecientes a la Formación Doctor, como se expuso en el capítulo de Geología local. Una de las principales actividades productivas del municipio es la explotación minera para la fabricación de cemento y cal. La mayoría de los bancos de material donde se puede apreciar la litología existente son propiedad de empresas dedicadas a la producción de cemento y cal. Las empresas más importantes son: Cementos Tolteca, Lafarge Cementos y Cementos Cruz Azul (FIG. 40). Es posible apreciar los bancos de material explotados a orilla de carretera (Tepeji-Cd. Cooperativa), estos bancos se encuentran a escasos kilómetros de la Presa Requena. En el capítulo IV se hace referencia al aspecto hidrológico de la zona.



FIG. 39 Zonas de Bancos de Material B-II (Google, 2011)



Estas empresas se encargan de la fabricación del cemento mediante la explotación de depósitos de calizas y arcillas. Una vez extraída la materia prima (caliza, arcilla, hierro, sílice) es reducida a tamaños que pueden ser procesados por molinos. Posteriormente se homogeniza el material y es llevado a hornos donde se calcina la mezcla, obteniendo así el clinker, el cual es luego molido con pequeñas cantidades de yeso para finalmente obtener el cemento, de acuerdo al tamaño deseado y conforme a normas.

En cuanto a la cal, de acuerdo a la página web de la Cementera Cruz Azul, menciona que ésta debe llenar determinados requerimientos físicos y químicos, por lo que se requieren calizas de alta pureza y de un proceso de producción controlado que aseguren un producto de excelente calidad. Se realizan estudios geológicos y geoquímicos (composición química, granulometría y contenido de agua) de las áreas a explotar, para obtener la materia prima. El proceso de la elaboración de la cal hidratada consiste en: obtención de la caliza, preparación de la materia prima (trituración y tamizaje), calcinación (descarbonatación – cal viva), hidratación (cal hidratada), separación de los óxidos no hidratados de la cal y finalmente envasado-empaque.



**FIG. 40** Bancos de tobas arcillosas cercanos a la Cementera “Cruz Azul”



Llámesese, en general, calizas a las rocas sedimentarias en cuya composición predomina ( $\text{CaCo} > 80\%$ ) el carbonato de calcio; si el calcio es sustituido en buena parte por el magnesio la roca recibe el nombre de caliza dolomítica o dolomita (Alvarez Jr. M., 1956).

Los depósitos de calizas se localizan en el límite de Tula de Allende y Tepeji del Rio, las cuales presentan estratificación y son utilizadas principalmente para la industria del cemento.

En la porción sur de la zona bajo estudio (porción suroriental de Tula y central de Atotonilco de Tula), quedaron al descubierto rocas calizas del Cretácico Medio, adoptando formas de lomas subredondeadas (**FIG. 41**). Es importante mencionar que las tobas limo-arcillosas y materiales granulares de la Formación Tarango, inspeccionadas en los bancos de materia B-I, van engrosando su espesor en la medida que se alejan de los afloramientos de caliza. Esto fue identificado primeramente por la geología superficial y medido en el subsuelo por los trabajos geofísicos.



**FIG. 41** Bancos de tobas arcillosas y afloramientos de caliza cercanos

Durante el recorrido en campo, en la superficie del terreno aflora material calcáreo con diferentes grados de compacidad, en ocasiones se vuelve rocoso y en otros casos deleznable. Existe una capa vegetal que cubre a la mayor parte del material calcáreo.



Estas calizas pertenecen a la unidad litológica más antigua de la zona estudiada, conocida como Formación Doctor, está constituida por calizas. Los diferentes tipos de ambientes donde se lleva a cabo los depósitos carbonatados incluyen: marinos, lacustres y carbonatos eólicos.

Existen diferencias fundamentales entre los depósitos carbonatados terrígenos y marinos. Mientras que los terrígenos son producto del intemperismo químico y físico de las rocas preexistentes que han sido transportados a la cuenca de depósito, los sedimentos carbonatados se derivan de una precipitación “in situ” dentro de la misma cuenca.



**FIG. 42** Tobas lacustres intercaladas con calizas

Como puede observarse en la **FIG. 42** las tobas arcillosas muestran fracturamiento, intercaladas con capas de caliza. Se aprecia una falla del tipo normal con un desplazamiento de aproximadamente 3 m. y un buzamiento de  $60^\circ$ . Debido a la gravedad y a los agentes de desintegración mecánica y química se produjo la deposición detrítica del material parental. En la **FIG.43** las tobas presentan estratificación, con espesores variables, se aprecian capas más gruesas en la base y las delgadas hacia la cima, presenta diferente grado de fracturamiento y alteración.



**FIG. 43** Banco de material para la extracción de la arcilla

El color del suelo es una propiedad evidente que puede indicarnos el material parental, el contenido de materia orgánica así como el grado de oxidación. El color del suelo puede variar en función de su contenido de agua, durante el secado, una muestra de suelo se torna más clara. Las tobas y calizas presentan un color gris claro verdoso, por lo que se deduce la reducción de óxidos por la materia orgánica, característica del color verde en los suelos, además es lógico que se encuentre dicha materia formada por residuos de plantas, animales y microorganismos, ya que estas tienen origen marino. “Los minerales más comunes en la mayoría de los suelos son de color claro, por lo mismo, los suelos que han sufrido pocos cambios químicos, tendrán un color gris claro (Díaz Rodríguez, 2009)”.

En el ambiente marino hay una producción considerable de carbonato permaneciendo la mayor parte en el lugar donde se precipitó, debido a la presencia de organismos que no solo secretan el  $\text{CaCO}_3$ , sino que también lo utilizan para la construcción de sus conchas o esqueletos. Sin embargo, es importante considerar que parte del sedimento carbonatado producido en el ambiente marino, puede llegar a sufrir un cierto transporte por la acción del viento, oleaje, corrientes, etc.

Mullerried, 1939 en Ordenamiento ecológico territorial Tula-Tepeji, 2002 (Gobierno del Edo. de Hidalgo), hace referencia al color gris claro de las calizas, describiéndolas como: porosas, permeables, el color verde corresponde al abundante contenido de macro y microfósiles, biostromas (acumulación de restos biogénicos en capas lenticulares, p.e.



crecimiento de algas) y rudistas (orden extinto de moluscos bivalvos, su mayor diversificación se produce durante el Cretácico), llegan a existir corales, ostreas y pelecípodos (organismos marinos, moluscos bivalvos), con lentes de pedernal. Con base a estas características, a la Formación Doctor de la asigna al Cretácico Medio.

El término “biostroma”, se aplica a estructuras estratificadas que consisten y han sido construidas principalmente por organismos sedentarios y que no se dilatan hasta crear formas lenticulares o de montículo. Debido quizás a su porosidad, los biostromas son susceptibles de dolomitización como los biohermas (Alvarez Jr. M., 1956).

El pedernal es una roca sedimentaria constituida por sílice amorfo ( $\text{SiO}_2$ , el sílice se presenta en forma amorfa o cristalizada, el primero es un polvo parduzco, más activo que la variante cristalina). Su color es negro o en tonos oscuros de azul, gris o pardo con una apariencia vitrea en superficies frescas. Tiene una dureza de 7.0 en la escala Mohs. Cuando es golpeado, el pedernal se rompe formando una superficie característica irregular ondulada con numerosos vértices afilados. El pedernal generalmente se encuentra asociado con calizas, rocas sedimentarias formadas por carbonato de calcio. Típicamente se presenta en forma de nódulos entre estratos de caliza ([www.geoforum.com](http://www.geoforum.com)).



FIG. 44 Banco de material para la extracción de arcillas

En su artículo “Clasificación y descripción de muestras de caliza”, 1956, Manuel Álvarez Jr., menciona que genéticamente las calizas pueden dividirse en cuatro tipos principales a saber:

- I. **Calizas endogénicas**, autóctonas o de acreción. Estas calizas son aquellas que han sido formadas *in situ* por la acumulación lenta de restos orgánicos, tales como conchas. Varios organismos pueden tener parte igualmente



importante en la acumulación que da origen a la roca, o bien un solo tipo puede ser responsable de la acumulación.

- II. **Calizas exogénicas**, o clásticas. Estas calizas son aquellas en las que su última etapa de formación fue el transporte y depósito de detritus carbonatados en la misma forma que el de los otros clásticos comunes. Aunque muestran los mismos rasgos estructurales y de textura que los demás clásticos, no se formaron necesariamente en tierra, sino probablemente debido a la erosión subacuosa de depósitos calcáreos de acreción o sea que son hidroclásticos.
- III. **Calizas químicas o bioquímicas**. Estas calizas son las formadas directamente por la precipitación química de carbonato de calcio debido a causas físico-químicas o a la acción bioquímica de bacterias u otros organismos.
- IV. **Calizas epigénicas o metasomáticas**. Estas calizas son aquellas que han sido formadas por la alteración de las anteriores por procesos tales como dolomitización, silicificación o recristalización.

Es de pensarse en base a lo expuesto por Mullerried, 1939 en Ordenamiento ecológico territorial Tula-Tepeji, 2002 (Gobierno del Edo. de Hidalgo), en cuanto a la presencia de organismos en depósitos de caliza, éstas se considerarían como calizas endogénicas (caliza biostrómic), según Manuel Álvarez Jr., 1956.

Las observaciones realizadas a los bancos de y afloramientos, muestran estratificación, siendo otro punto a favor en cuanto a la formación de las calizas *in situ*, no considerándose depósitos detríticos. Formadas por la acumulación de restos orgánicos, pueden contener intersticios entre las conchas o entre los fragmentos de corales. La parte que se descompone de los organismos, es de esperarse que se elimine durante el proceso de formación de la roca, permitiendo la creación de orificios o huecos, los cuales pueden interconectarse con otros, formando así un esqueleto que permita el paso de fluidos. Los intersticios pueden ser rellenados por material fino también, lo cual puede reducir la porosidad considerablemente.

El fracturamiento, aumenta la porosidad del depósito, ya que al desplazarse relativamente una de la otra, dejan entre ambos fragmentos de roca espacios que permiten el paso de fluidos así como el desarrollo de la porosidad por disolución de las calizas, la **FIG. 45** muestra el corte de un cerro, donde se observa el grado de fracturamiento del depósito así como múltiples grietas, se aprecia un ligero echado hacia el Norte.



Las grietas, no obstante su pequeño espesor o extensión, puede incrementar la porosidad del depósitos, aunado a la abundancia y distribución de éstas.

El tratamiento del tema de la permeabilidad del suelo se parte de la hipótesis de que todos los poros del suelo están conectados a los poros vecinos, es decir que los poros presentan continuidad y que las trayectorias físicas del agua siguen curvas continuas y suaves llamadas líneas de flujo (Díaz Rodríguez, 2010).



**FIG. 45** Tobas arcillosas bentoníticas con alto grado de fracturamiento y grietas

Los planos de estratificación representan interrupciones en el depósito de las capas, de gran extensión en dos dimensiones. La diferencia entre los estratos, propiedades y características, puede afectar la permeabilidad del depósito. Estas características geohidrológicas nos señalan los depósitos que se consideran permeables e impermeables, y en función de ello, la presencia y/o ausencia de aguas subterráneas en distintas áreas.

Debido a la acción tectónica expuesta en el capítulo **II.2.2.3 Estructuras geológicas**, la Formación Doctor está muy fracturada y presenta constantes pliegues, presenta fallas tanto verticales como de tipo lateral (**FIG. 46**), aunque los desplazamientos observados son pequeños, no dejan de ser significativos pues indican deformación moderada, y que en muchas ocasiones son barreras o conductos de flujos de agua.



**FIG. 46** Afloramiento de calizas de la Formación Doctor, se observan las capas plegadas, fuertemente fracturadas.

### II.2.3.3 Inspección de Bancos de Material B-III

El área de **Bancos de Material B-III**, partiendo de la Ciudad de México, se recorre por la carretera federal número 57 México-Querétaro, aproximadamente 55 km hasta la desviación con la carretera denominada Jorobas-Tula, por la que se transitan 17 km para llegar a la cabecera municipal de Atotonilco de Tula. En el municipio, están asentadas las fábricas de cemento y cal de CEMEX-Atotonilco, Caleras Beltrán, Cementos La Polar y Caleras Portland.



FIG. 47 Zonas de Bancos de Material B-III (Google, 2011)

Regionalmente de estos bancos de material se obtienen rocas ornamentales conocidas como cantera (FIG. 48), la cual sigue siendo una roca caliza. Este tipo de roca ha sido empleada en la escultura y la arquitectura regional, desde la época prehispánica (por los Toltecas) hasta nuestra época. En la región abundan los Bancos de Materiales (denominados “canteras”)



los cuales son importantes para el desarrollo minero-industrial de la zona ya que son explotados por las cementeras ahí ubicadas.



**FIG. 48** Roca para uso ornamental, explotada de los Bancos de Atotonilco de Tula

El cerro El Zorro (**FIG. 49**), que es límite geográfico de la zona que se ha estudiado, perteneciente al Municipio de Atotonilco, fue ocupado por la producción fílmica estadounidense que llevo a la pantalla grande la película El Zorro, protagonizada por el actor Antonio Banderas, desde entonces se le ha conocido con ese nombre a este cono cinerítico.



**FIG. 49** Cerro El Zorro, se aprecian los depósitos de caliza, actualmente explotados

Los afloramientos sustanciales de caliza en capas variables de gruesas a delgadas se observan al sur de la zona en estudio, correspondientes al Norte del municipio de Atotonilco de Tula, Sureste de Tula de Allende y Sur de Atitalaquia.



El municipio de Atitalaquia se encuentra en una zona de transición, ya que existen rocas volcánicas (Formación Tarango) y calizas (Formación Doctor), que forman pequeños relieves correspondientes a los cerros El Zorro, La Palma y la Lechuguilla. Hacia el Norte del área estudiada se extiende una extensa planicie interrumpida por algunos cerros, abarca desde los antes mencionados hasta la población de Ixmiquilpan.

En la superficie del terreno, en la parte alta del Cerro El Zorro (**FIG. 50**) aflora la caliza del Cretácico, muestran la acción tectónica que las plegó y fracturo. El material calcáreo se presenta con diferentes grados de compacidad, en ocasiones se vuelve rocoso y en otros casos es deleznable. Existe una pequeña capa vegetal que cubre a la mayor parte del material.



**FIG. 50** Camino de terracería en las inmediaciones hacia el pináculo del Cerro El Zorro

En la parte media aflora una capa de tobas, debajo del material calcáreo antes descrito, se tiene un paquete de rocas que pertenecen a la Formación Tarango, compuesto por material clástico predominante y lentes locales de caliza lacustre, debido a la descomposición y erosión de las mismas. El material clástico está formado por limos y arenas de grano fino con presencia de arcillas.

Como se ha mencionado la Formación Doctor subyace a la Formación Tarango, es posible inferir la posible existencia de fallas tipo normal de las rocas calizas, ya que éstas desaparecen en los límites del afloramiento del Cerro El Zorro, dando lugar a la presencia de tobas, en la **FIG. 50** se presenta claramente el horizonte de materiales granulares y en la parte superior el material calcáreo. La mayoría de los Bancos de Material a los alrededores del municipio son privados, pudiéndose observar la maya ciclónica para delimitarlos.



**FIG. 51** Se observa el afloramiento de calizas del Cretácico cortadas de manera abrupta por la Formación Tarango.

El Cerro La Palma presenta un caso similar al Cerro El Zorro, afloramiento de calizas y en las faldas el mismo material tabáceo.



**FIG. 52** Cerro La Palma



## CAPÍTULO III Determinación del marco geotécnico del área.

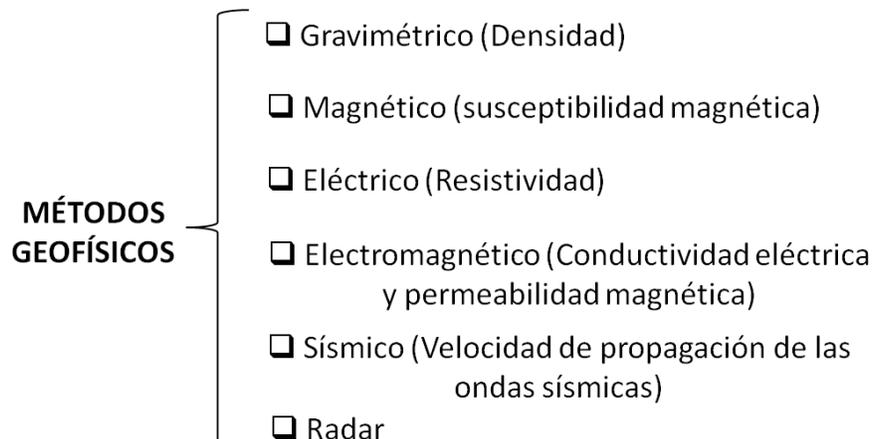
### III.1 Estudios Geofísicos

La prospección geofísica es el conjunto de técnicas que investiga el interior de la Tierra a partir de las variaciones detectadas en parámetros físicos significativos y de su correlación con las características geológicas. Son técnicas no destructivas y de investigación extensiva o con gran cobertura, complementarias de los ensayos *in situ* y técnicas de investigación directa, como los sondeos mecánicos (González de Vallejo L. et al, 2002).

Mucho de lo que sabemos del subsuelo está basado en la interpretación de mediciones realizadas en la superficie. La Geofísica como ciencia encaminada a investigar las propiedades físicas del subsuelo de manera indirecta ha tenido un gigantesco avance en los últimos años empleando computadoras de gran memoria y rapidez. Los desarrollos matemáticos, conjugados con los programas de cómputo, han permitido la obtención de modelos geológicos a partir de la interpretación de las mediciones realizadas.

La inspección geofísica se emplea para determinar las condiciones geológicas del subsuelo según el parámetro físico investigado, espesores de rellenos, posición del nivel freático, localización de cavidades, localización de estructuras geológicas (discontinuidades, fallas, pliegues, contactos, discordancias, estratificación, etc.), localización de conducciones subterráneas. Cabe mencionar que los estudios geofísicos deben tomarse como complemento a los datos geológicos - geotécnicos y no encasillar la litología, estratigrafía y estructuras geológicas del lugar tan solo con dichos estudios.

Los diferentes métodos geofísicos para el reconocimiento del subsuelo se dividen según el parámetro físico investigado:





Método	Técnicas		Aplicaciones
Eléctrico	S.E.V.		Interpretación geológica, grado de alteración, cubicación de materiales, contenido en agua y salinidad.
	Calicatas eléctricas		Ídem al anterior pero para el estudio de su variación lateral.
	Dipolo-dipolo		Ídem al anterior pero para el estudio de su variación a lo largo de una sección.
Sísmico	Sísmica de refracción		Espesor de recubrimientos, excavabilidad, cubicación de áreas de préstamo, calidad de la roca, condiciones de cimentación.
	Sísmica de reflexión		Investigación geológica profunda en obras subterráneas y laderas.
Electromagnético	EM en dominio de frecuencias		Interpretación geológica, grado de alteración, contenido en agua y salinidad.
	EM en dominio de tiempos		Ídem al anterior pero a grandes profundidades.
	V.L.F.		Resistividad del terreno en superficie, interpretación geológica y variaciones laterales.
	Geo-radar		Huecos y elementos enterrados, contactos litológicos, investigación del trasdós de estructuras, etc.
Gravimétrico	Gravimetría		Contactos litológicos con contraste de densidad, terrenos blandos, cavidades, zonas de disolución, zonas de falla.
	Microgravimetría		Ídem al anterior pero de mayor detalle.
Magnético	Magnetometría		Galerías mineras abandonadas, huecos rellenos de arcilla, conducciones enterradas, fallas, diques, masas mineralizadas.
Sísmica en sondeos	<i>Cross-hole</i>		Litología del sondeo, velocidad de ondas <i>P</i> y <i>S</i> , módulos dinámicos, propiedades resistentes, excavabilidad, espesor de recubrimientos.
	<i>Down-hole</i> <i>Up-hole</i>		
	Tomografía sísmica		Interpretación geológica, cavidades, módulos dinámicos, velocidad de ondas <i>P</i> y <i>S</i> , propiedades resistentes, zonas de fractura, zonas de alteración, excavabilidad, espesor de recubrimientos.
Testificación geofísica (en el interior de sondeos)	Eléctrica	Resistividad eléctrica Potencial espontáneo Conductividad eléctrica Tomografía eléctrica	Salinidad del agua, resistencia del material, secuencia litológica. Fracturas.
	Nuclear o radiactiva	Gamma natural Gamma espectral Neutrón Gamma-Gamma	Investigación de arcillas, contenido en agua, densidad del terreno.
	Sónica o acústica		Propiedades mecánicas, grado de fracturación, secuencia litológica.
	Fluidos	Temperatura Conductividad Velocidad de flujo	Puntos de afluencia de agua al sondeo, niveles freáticos.
	Geométricos	Calibre Dipmetro Registro de T.V.	Acotación del sondeo, huecos y fracturas, orientación de discontinuidades.

**TABLA 9** Métodos geofísicos empleados en la Ingeniería (González de Vallejo L. et al, 2002)



Se han realizado estudios geofísicos en el área estudiada, sondeos eléctricos y uno electromagnético, por lo que se profundizara en estos tipos de prospección geofísica.

### III.1.1 Métodos Geoelectricos

#### III.1.1.1 Antecedentes

Existe una estrecha relación entre la propiedad física conocida como resistividad eléctrica de las rocas y el contenido de fluidos. En la naturaleza existen dos formas de conducción de la corriente eléctrica en los materiales:

*Conducción electrónica:* es un fenómeno exclusivo de los minerales metálicos.

*Conducción electrolítica:* Durante la formación de las moléculas, quedan con una carga eléctrica, positiva o negativa, y reciben el nombre de iones; cuando el material en que se encuentran dichas moléculas lo permite, éstas se moverán debido a una diferencia de potencial, de acuerdo con una ley conocida: “partículas con signo igual se repelen y con signo contrario se atraen”. Este movimiento de iones constituye una corriente eléctrica de iguales propiedades que la corriente electrónica.

La mayoría de las rocas no contienen materiales de tipo metálico, por lo que su conductividad eléctrica se debe a los iones y a su movilidad; la presencia de iones está estrechamente relacionada con el contenido de agua en la roca y las sales que contenga en disolución.

Las propiedades físicas que definen a un material de acuerdo a su comportamiento electromagnético son: la constante dieléctrica, la permeabilidad magnética y la resistividad, ésta última es la propiedad que se mide en los métodos eléctricos de exploración (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

La mayoría de las rocas no son buenas conductoras de la corriente eléctrica, son prácticamente aislantes debido a que también lo son los minerales que se encuentran en mayor proporción en ellas (cuarzo, feldspatos, calcita, etc.). El fenómeno de conducción eléctrica se presenta por dos razones: la presencia de minerales tipo metálico, como la pirita, la magnetita o la pirrotita, que hacen que la roca se comporte como un conductor, y debido a la presencia de fluidos en los poros de las rocas, de los cuales el más común en el agua, pudiendo ser también hidrocarburos o gases.



Los valores típicos de las constantes eléctricas aparecen en la **TABLA 10**, obtenidos por Telford W. M. (1976) para minerales, la **TABLA 11** para rocas ígneas y metamórficas, **TABLA 12** para rocas sedimentarias.

Puede decirse que los factores que determinan la resistividad promedio de las rocas se conservan a menudo en toda una unidad, y debido a esto, puede diferenciarse una formación de otra tomando como base las mediciones de la resistividad.

Cuando existe agua relleno de poros, fisuras y fracturas de las rocas, la resistividad de éstas se modifica dependiendo de los siguientes parámetros:

- La resistividad de la roca sin la presencia de agua
- La porosidad de la roca
- La resistividad del agua contenida en la roca
- El grado de saturación

Tipo de Roca	Intervalo de resistividades (ohm-m)
Granito	$3 \times 10^2 - 10^6$
Pórfido granítico	$4.5 \times 10^3$ (húmedo) a $1.3 \times 10^6$
Pegmatita (Pórfido feldespático)	$4 \times 10^3$ (húmedo)
Albita	$3 \times 10^2$ (húmedo) a $3.3 \times 10^3$ (seco)
Sienita	$10^2$ a $10^6$
Diorita	$10^4$ a $10^5$
Pórfido de diorita	$1.9 \times 10^3$ (húmedo) a $2.8 \times 10^4$ (seco)
Porfírita	$10 - 5 \times 10^4$ (húmedo) a $3.3 \times 10^3$ (seco)
Pórfido carbonizado	$2.5 \times 10^3$ (húmedo) a $6 \times 10^4$ (seco)
Pórfido de cuarzo	$3 \times 10^2$ a $9 \times 10^3$
Diorita cuarzosa	$2 \times 10^4$ a $2 \times 10^6$ (hum) a $1.8 \times 10^5$ (seco)
Pórfidos (varios)	$60$ a $10^4$
Dacita	$2 \times 10^4$ (húmedo)
Andesita	$4.5 \times 10^4 \times 10$ (húmedo) a $1.7 \times 10^2$ (seco)
Pórfido de diabasa	$10^3$ (húmedo) a $1.7 \times 10^5$ (seco)
Diabasa (varios)	$20^1$ a $5 \times 10^7$
Lavas	$10^2$ a $5 \times 10^4$
Gabro	$10^3$ a $10^6$
Basalto	$10^1$ a $1.3 \times 10^7$ (seco)
Norita de olivino	$10^3$ a $6 \times 10^4$ (húmedo)
Peridotita	$3 \times 10^3$ (húmedo) a $6.5 \times 10^3$ (seco)
Corneana	$8 \times 10^3$ (húmedo) a $6 \times 10^7$ (seco)
Esquistos	$201$ a $10^4$
Tobas	$2 \times 10^3$ (húmedo) a $10^5$ (seco)
Esquisto de grafito	$10^1$ a $10^2$
Lajas (varios)	$6 \times 10^2$ a $4 \times 10^7$
Gneises (varios)	$6.8 \times 10^4$ (húmedo) a $3 \times 10^6$ (seco)
Mármol	$10^2$ a $2.5 \times 10^8$ (seco)
Eskarn	$2.5 \times 10^2$ (húmedo) a $2.5 \times 10^3$ (seco)
Cuarzitas (varias)	$10^1$ a $2 \times 10^3$

**TABLA 10** Resistividad de minerales (Telford W. M., 1976 en IMTA, 2009)



Mineral	Fórmula	Intervalo		Resistividad	
				(ohm-m) Promedio	
Diamante	C	10	a	$10^{14}$	
Serpentina		$2 \times 10^2$	a	$3 \times 10^3$	
Hornblenda		$2 \times 10^2$	a	$10^6$	
Mica		$9 \times 10^2$	a	$10^{14}$	
Biotita		$2 \times 10^2$	a	$10^6$	$2 \times 10^2$ a $10^5$
Flogopita		$10^{11}$	a	$10^{12}$	
Carbón bituminoso		0.6	a	$10^5$	
Carbones (varios)		10 a $10^{11}$			
Antracita		$10^{-3}$ a $2 \times 10^5$			
Lignito		9 a 200			
Mellorita (caolinita)					30
Aguas meteóricas		30 a $10^3$			
Aguas superficiales (rocas ígneas)		0.1 a $3 \times 10^3$			
Aguas superficiales (sedimentos)		10 a 100			
Aguas de suelos					100
Aguas naturales (rocas ígneas)		0.5 a 150			9
Aguas naturales (sedimentos)		1 a 100			3

Continuación TABLA 10 Resistividad de minerales (Telford W. M., 1976 en IMTA, 2009)

La resistividad eléctrica del agua varía en un amplio intervalo; en estado puro, el agua es poco conductora, llegando a tener resistividades hasta de  $10^4$  ohm-m, sin embargo, las aguas naturales presentan buena conductividad eléctrica debido a las sales que llevan en solución. Su resistividad depende del tipo de roca por donde el agua haya circulado, ya sea superficialmente o en forma subterránea. Los intervalos de variación de la resistividad de las aguas naturales se presentan en la TABLA 13.

La porosidad es también un parámetro que varía mucho no solo de roca a roca, sino también dentro de un mismo tipo de roca, y depende de factores como los diferentes grados de compactación, el fracturamiento, la homogeneidad en el tamaño de los granos que constituyen la roca y su edad.



Mineral	Fórmula	Intervalo	Resistividad
			(ohm-m) Promedio
Argentita	Ag <sub>2</sub> S	2x10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-4</sup>	1.7x10 <sup>-3</sup>
Bismutita	Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	18 a 570	
Covalita	CUS	3x10 <sup>-7</sup> a 8x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-5</sup>
Calcocita	Cu <sub>2</sub> S	3x10 <sup>-5</sup> a 0.6	10 <sup>-4</sup>
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	1.2x 10 <sup>-5</sup> a 0.3	4x10 <sup>-3</sup>
Bornita	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	2.5x10 <sup>-5</sup> a 0.5	3x10 <sup>-3</sup>
Marcasita	FeS <sub>2</sub>	10 <sup>-3</sup> a 3.5	5x10 <sup>-2</sup>
Pirita	FeS <sub>2</sub>	2.9x10 <sup>-5</sup> a 1.5	3x10 <sup>-1</sup>
Pirrotita	Fe <sub>x</sub> S <sub>m</sub>	6.5x10 <sup>-5</sup> a 5x10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup>
Cinabrio	HgS		2x10 <sup>-7</sup>
Galena	PbS	3x10 <sup>-5</sup> a 3x10 <sup>-2</sup>	2x10 <sup>-3</sup>
Milerita	NiS		3x10 <sup>-7</sup>
Stanita	Cu <sub>2</sub> FeSn <sub>2</sub>	10 <sup>-3</sup> a 6x10 <sup>3</sup>	
Stibnita	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	105 a 1012	5x10 <sup>5</sup>
Esfalerita	ZnS	1.5 a 10 <sup>7</sup>	10 <sup>2</sup>
Cobaltita	CoAsS	3.5x10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-1</sup>	
Smaltita	CoAs <sub>2</sub>		5x10 <sup>-5</sup>
Arsenopirita	FeAsS	2x10 <sup>-5</sup> a 15	10 <sup>-3</sup>
Nicolita	NiAs	10 <sup>-7</sup> a 2x10 <sup>-3</sup>	2x10 <sup>-5</sup>
Silvanita	AgAuTe <sub>4</sub>	4x10 <sup>-8</sup> a 2x10 <sup>-8</sup>	
Bauxita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nH <sub>2</sub> O	2x10 <sup>4</sup> a 6x10 <sup>3</sup>	
Braunita	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16 a 1.2	
Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	10 <sup>-3</sup> a 300	30
Cromita	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1 a 10 <sup>5</sup>	
Especularita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		6x10 <sup>-3</sup>
Hematita	Fe O <sub>3</sub>	3.5x10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>7</sup>	
Limonita	2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3H <sub>2</sub> O	10 <sup>3</sup> a 10 <sup>7</sup>	
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5X10 <sup>-5</sup> a 5.7x10 <sup>3</sup>	
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	10 <sup>-3</sup> a 50	
Wolframita	Fe,Mn.WO <sub>4</sub>	10 a 10 <sup>5</sup>	
Manganetita	MnO(OH)	10 <sup>-2</sup> a 0.3	
Pirolucita	MnOp <sub>2</sub>	5x10 <sup>-3</sup> a 10	
Cuarzo	siO <sub>2</sub>	4x10 <sup>10</sup> a 2X10 <sup>14</sup>	
Casiterita	SnO <sub>2</sub>	4x10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>4</sup>	0.2
Rutilo	TiO <sub>2</sub>	30 a 1000	500
Uraninita	UO <sub>2</sub>	1 a 200	
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>		10 <sup>3</sup>
Calcita	CaCO <sub>3</sub>		2x10 <sup>12</sup>
Fluorita	CaF <sub>2</sub>		8X10 <sup>13</sup>
Siderita	Fe (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>		70
Halita	NaCl	30 a 10 <sup>13</sup>	
Silvita	KCl	10 <sup>11</sup> a 10 <sup>12</sup>	

**TABLA 11** Resistividad de rocas ígneas y metamórficas (Telford W. M., 1976, en IMTA, 2009)



Tipo de roca	Intervalo de resistividad (ohm-m)
Lutitas consolidadas	20 a $2 \times 10^3$
Argilitas	10 a $8 \times 10^2$
Conglomerados	$2 \times 10^3$ a $10^2$
Areniscas	1 a $6.4 \times 10^8$
Lutitas	50 a $10^7$
Dolomias	$3.5 \times 10^2$ a $5 \times 10^3$
Arcillas saturadas no consolidadas	20
Margas	3 a 70
Arcillas	1 a 100
Aluviones y arenas	10 a 800
Arenas con petróleo	4 a 800

**TABLA 12** Resistividad de rocas sedimentarias (Telford W. M., 1976 en IMTA, 2009)

Tipo de agua	Intervalo de resistividad (ohm-m)
Aguas de lago	$10^3$ a $3 \times 10^3$
Aguas dulces superficiales	10 a $10^3$
Aguas salobres superficiales	2 a 10
Aguas subterráneas	1 a 20
Aguas de lagos salados	0.1 a 1
Aguas marinas	0.2
Aguas de impregnación de roca	0.03 a 10

**TABLA 13** Resistividad del agua (Orellana, 1972 en IMTA, 2009)

La resistividad es una propiedad intrínseca de las rocas y depende de la litología, estructura interna y, sobre todo, de su contenido de agua, no siendo, por tanto, una propiedad isótropa en la masa rocosa (González de Vallejo L. et al, 2002). Es notorio que el contenido de agua juega un papel muy importante en este método.

En palabras del Dr. Díaz Rodríguez (2009): “el suelo es un material natural particulado y multifásico. Es un material particulado porque está constituido por un sistema de partículas que varían en tamaño, desde micras hasta decenas de centímetros. Es multifásico porque puede estar compuesto de una fase sólida, una líquida y una gaseosa (FIG. 53). Es natural, heterogéneo, anisotrópico y de comportamiento no lineal”. Comúnmente, la fase líquida es agua, sin embargo los vacíos pueden estar llenos de otro líquido.

Por lo tanto la porosidad del material juega un papel importante, ya que si el material posee un alto porcentaje de porosidad, significa que es un espacio vacío, dejando fluir agua a través de él (agua gravitacional). La porosidad ( $n\%$ ) = Volumen de vacíos/Volumen de la muestra.



Éste flujo de agua en suelos gruesos está principalmente condicionado por su compacidad, ya que depende de la forma de acomodo de las partículas.



FIG. 53 Diagrama de las fases del suelo (Díaz Rodríguez, 2009)

La presencia de materiales arcillosos es otro parámetro a tomar en cuenta al tratar de evaluar las variaciones de la resistividad de una roca cuando ésta se encuentra total o parcialmente saturada, ya que la interacción entre la matriz de la roca y el agua contenida en sus poros produce dos fenómenos: conducción superficial y la ionización de los minerales arcillosos, que afectan las mediciones de la resistividad global de las rocas en estudio.

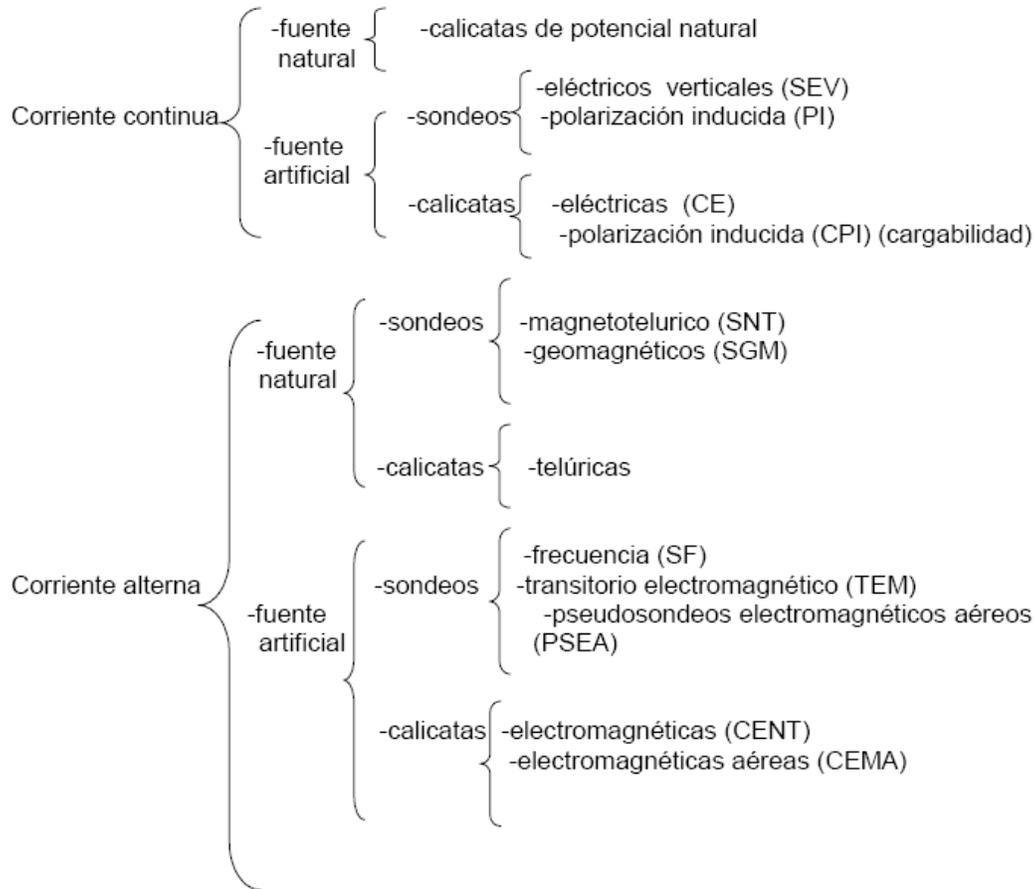
Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la aluminica (Díaz Rodríguez, 2009). De acuerdo a su estructura reticular, los minerales de arcilla se encasillan en tres grandes grupos: caolinitas, ilitas y montmorilonitas. En las caolinitas, la unión de todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (agua adsorbida). En la montmorilonitas se presenta el caso contrario, donde la unión entre retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar.

### III.1.1.2 Métodos de corriente continua y corriente alterna

Los métodos geoelectrónicos se dividen en dos grupos: los que usan corriente directa y los que emplean corriente alterna; estos grupos, a su vez, pueden subdividirse en: los que utilizan corrientes que existen normalmente en la naturaleza y los que emplean corrientes



creadas artificialmente. En cada una de ambas subdivisiones caben dos tipos de métodos: los que se utilizan para medir variaciones de resistividad con respecto a la profundidad y los empleados para medir cambios de resistividad en el sentido horizontal.



Los métodos eléctricos de corriente continua se dividen en dos: los que usan como fuentes las corrientes naturales que circulan en la corteza terrestre y los que requieren fuentes artificiales de corrientes introducidas al subsuelo. Del primer tipo sólo existe el método de potencial espontáneo, utilizado en la exploración geohidrológica, únicamente en los registros geofísicos de pozos.

Los métodos de corriente continua con fuente artificial son los sondeos que miden la variación vertical y las calicatas que cuantifican variaciones horizontales, estos se enfocan a la detección de dos propiedades de los materiales del subsuelo; la resistividad eléctrica



(sondeos y calicatas eléctricas) y la cargabilidad (sondeos y calicatas de polarización inducida).

La *cargabilidad* es la capacidad que tienen los materiales para retener carga eléctrica durante un periodo de suministro de corriente para posteriormente deshacerse de dicha carga cuando aquel se interrumpe.

Cuando se emplean métodos geoelectrónicos en la exploración es importante recalcar que la propiedad que se está midiendo de los materiales del subsuelo es la resistividad eléctrica y que ésta puede ser evaluada de formas diferentes. Así como es posible medir la variación de la resistividad con respecto a la profundidad en el Sondeo eléctrico vertical, también lo es utilizando las propiedades de los campos electromagnéticos generados al utilizar corriente alterna.

Los métodos de corriente alterna presentan las cuatro modalidades que se pueden formar con la utilización de las fuentes naturales o artificiales, y su aplicación en forma de sondeos y calicatas. Cuando se utiliza corriente alterna producida artificialmente se pueden concebir dos tipos de sondeos, que permiten definir la distribución de la resistividad respecto a la profundidad en el subsuelo.

- El sondeo por frecuencia (SF) aprovecha el que la profundidad de penetración de las ondas en el subsuelo depende principalmente de la frecuencia de la onda y de la resistividad de las capas más superficiales, por lo que si se varía la frecuencia de la señal emitida y se mide la resistividad aparente para cada frecuencia de emisión se obtiene una curva de variación similar a la que proporcionan los SEV, que puede ser interpretada en términos de un modelo de subsuelo estratificado horizontalmente (IMTA, 2009).
- El sondeo por Transitorio Electromagnético (TEM) genera una componente del campo electromagnético, induciendo con ello la creación de corrientes en el subsuelo; éstas, a su vez, generan un campo magnético secundario susceptible de ser medido. El principio básico del método consiste en medir el campo secundario inmediatamente después de apagar el equipo emisor, ya que en ese momento desaparece el campo primario y sólo queda el secundario, que va decayendo gradualmente de manera tal que se puede extraer información sobre la resistividad del subsuelo. La curva de decaimiento del campo secundario es normalizada de manera similar a las curvas en los otros tipos de sondeos de corriente alterna, obteniéndose una presentación de la resistividad contra tiempo, que también puede ser interpretada como las curvas de los SEV.



### III.1.1.3. Sonde eléctrico vertical (SEV)

Este tipo de sondeo estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de él corriente eléctrica continua. El parámetro físico que se controla es la resistividad ( $\rho$ ) y no directamente la presencia del agua, la interpretación final se hace en función de las características geológicas de la zona en que se aplica.

Se basa en la medición de la variación del flujo eléctrico, él cual se manifiesta por el incremento o decremento del potencial eléctrico entre dos electrodos. Ésta es representada en términos de resistividad eléctrica, la cual puede representar cambios en el tipo de suelo o roca. Como se menciona la conducción eléctrica ocurre a través del agua presente en los poros del depósito, es esencialmente electrolítica.

Si la salinidad del agua aumenta, significa un decremento en la medición de la resistividad. Se sugiere que entre más poroso sea el medio, es menor su resistividad. En general las rocas ígneas exhiben una baja porosidad, por lo que tienen una resistividad alta comparada con rocas sedimentarias más porosas. (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

En primer término se describe el método de trabajo a continuación:

- Mediante dos electrodos, que normalmente son unas varillas, un generador de corriente y un equipo denominado transmisor, se inyecta corriente continua de intensidad  $I$  en el terreno.
- Con otros dos electrodos y un voltímetro se mide la diferencia de potencial que existe entre dos puntos del terreno ocasionada por la corriente que se está inyectando.
- De acuerdo con un modelo de interpretación definido previamente y a un arreglo geométrico entre los electrodos de emisión de corriente y los de medición de potencial, se relaciona la corriente inyectada en el terreno con la diferencia de potencial medida, definiendo en este caso un parámetro conocido como resistividad aparente ( $\rho_a$ ), ésta no corresponde a una unidad litológica concreta, sino que define al conjunto de materiales afectados por el paso de corriente.
- Se relaciona geoméricamente la resistividad aparente con la separación entre los electrodos de corriente, obteniéndose una curva que es interpretada en términos de los parámetros que definen el modelo usado para la interpretación.
- Una vez conocidos los parámetros del modelo de interpretación, se hace una correlación con la geología, y con ello obtenemos la interpretación final en términos de la presencia de agua subterránea en el área de estudio.

Se realizaron 10 sondeos verticales (SEV), ubicados en las cercanías de la Refinería Miguel Hidalgo, Bancos de Material B-I FIG. 54.

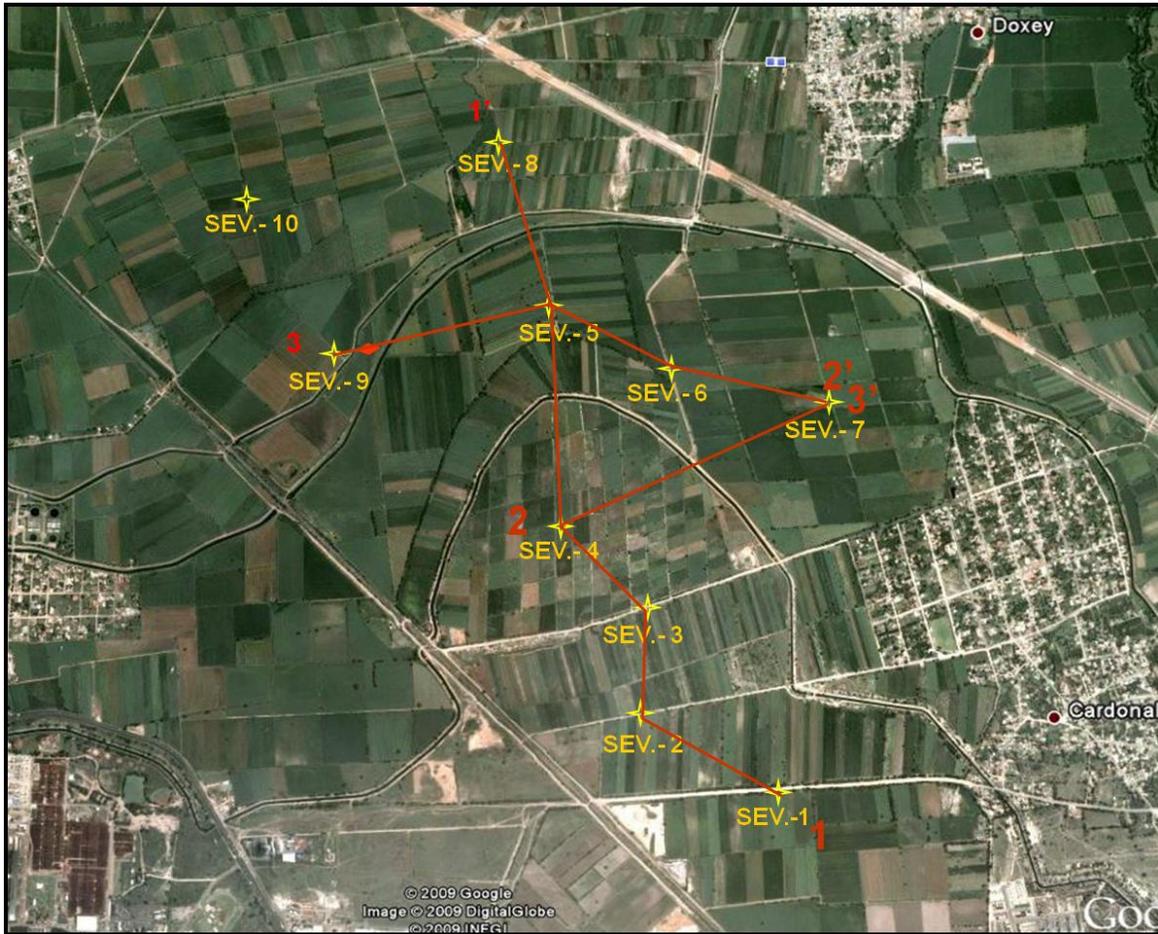


FIG. 54 Imagen satelital SEV (Google Earth, 2010)

Se utilizó un modelo electródico de Schlumberger con abertura de electrodos de 250 m. como máximo. La FIG. 55 muestra el modelo Schlumberger, la cual es simétrica, con los electrodos de potencial MN interiores y alineados con los de corriente AB, y separación entre MN inferior a  $1/5$  de AB

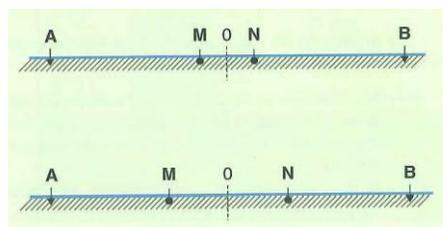


FIG. 55 Configuración Schlumberger y Wenner (González de Vallejo L. et al, 2002)



La técnica consistió en separar sucesivamente los electrodos de corriente A y B del punto central y medir la resistividad en cada disposición. La resistividad calculada será, por tanto, la correspondiente a mayores espesores según se fueron separando los electrodos. El resultado que se obtuvo es la variación de la resistividad con la profundidad en el punto central del perfil investigado.

Con los resultados se construyeron 3 secciones geoelectricas (**FIG. 54**):

La sección 1 en sentido sur-norte y contiene los SEV: 1, 2, 3, 4, 5 Y 8. Su longitud es de 3000 m. aproximadamente.

El perfil 2 con orientación NE-SW, cruzando a la sección 1 en el punto del SEV-4, con un desarrollo lineal de 1100 m., conteniendo a los SEV: 4, 6 y 7.

La sección 3 se trazo en sentido E-W, siendo normal a la sección 1, en el punto del SEV-5, y teniendo al SEV-7 en común con la sección 2. Contiene los SEV: 9, 5, 6, 7 y su desarrollo lineal es de 1900 m.



Sección Geoeléctrica 1-1'

TABLA DE INTEGRACIÓN LITOESTRATIGRÁFICA Y GEOFÍSICA, 1-1'

Geofísica		Geológica
Unidad Geoeléctrica	Resistividad Ohms/m	Descripción Litológica
<b>U 1</b>	9-355	Caliche y toba arenosa
<b>U 2</b>	1-14	Toba arcillosa
<b>U 3</b>	14-140	Gravilla, toba arenosa y conglomerado
<b>U 4</b>	1-5	Arcillas lacustres
<b>U 5</b>	227-1167	Macizo rocoso, denso duro y compacto

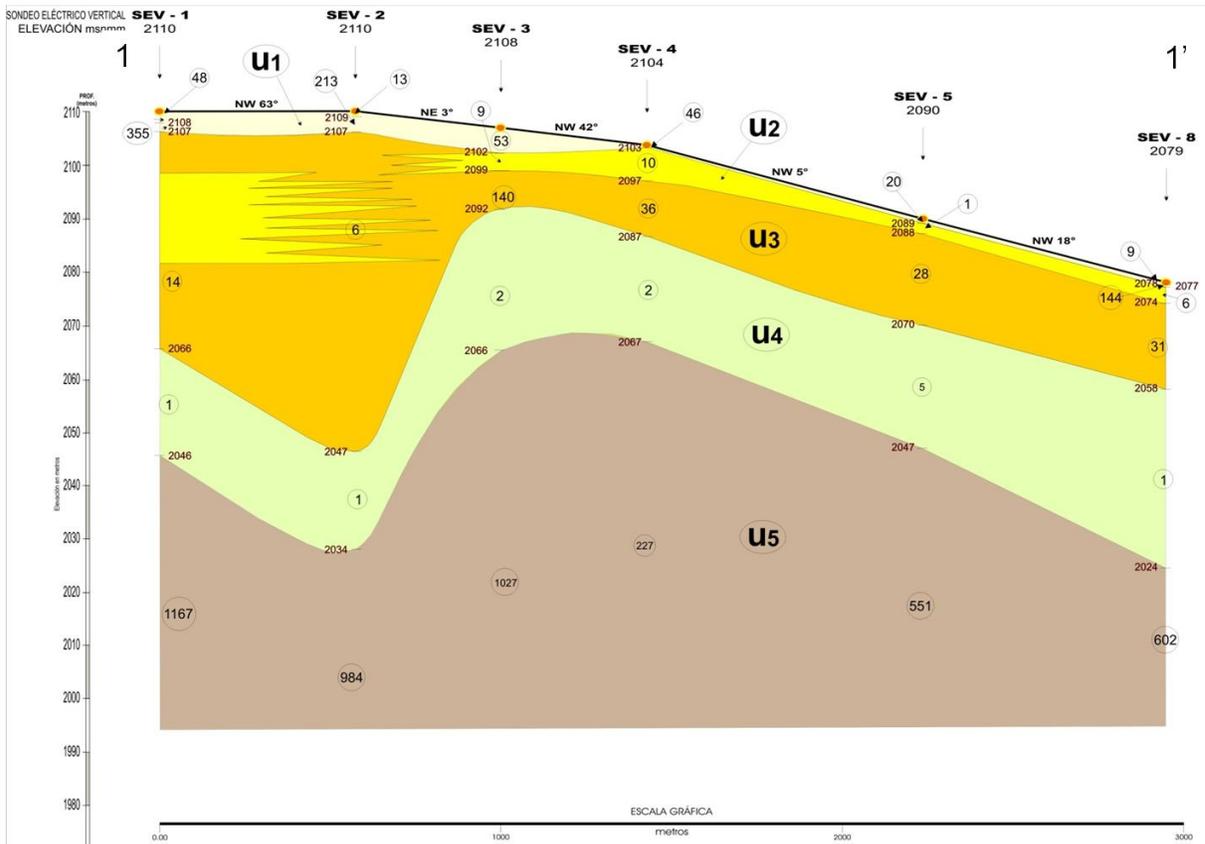


FIG. 55 Sección Geoeléctrica 1-1' (Software Resix Plus de Interplex, Co.)



Sección Geoeléctrica 2-2'

TABLA DE INTEGRACIÓN LITOESTRATIGRÁFICA Y GEOFÍSICA, 2-2'

Geofísica		Geológica
Unidad Geoeléctrica	Resistividad Ohms/m	Descripción Litológica
<b>U 1</b>	28-46	Caliche, toba arenosa y toba arcillosa
<b>U 2</b>	2-11	Toba arcillosa
<b>U 3</b>	30-53	Gravilla, toba arenosa y conglomerado
<b>U 4</b>	1-2	Arcillas lacustres
<b>U 5</b>	227-1273	Macizo rocoso, denso duro y compacto

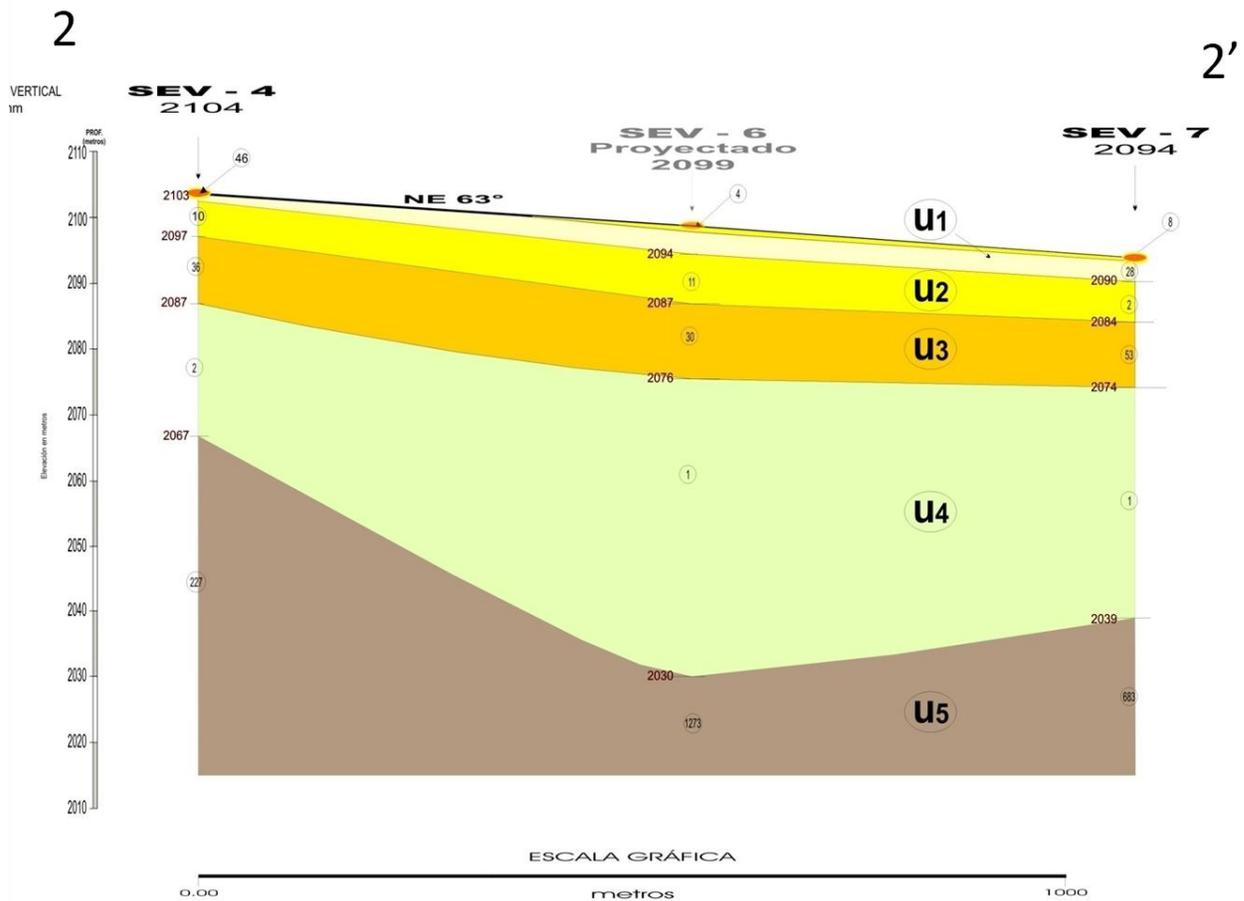


FIG. 56 Sección Geoeléctrica 2-2' (Software Resix Plus de Interplex, Co.)



Sección Geoeléctrica 3-3'

TABLA DE INTEGRACIÓN LITOSTRATIGRÁFICA Y GEOFÍSICA, 3-3'

Geofísica		Geológica
Unidad Geoeléctrica	Resistividad Ohms/m	Descripción Litológica
<b>U 1</b>	8-20	Material calcáreo compacto y duro
<b>U 2</b>	1-11	Material arcilloso lacustre
<b>U 3</b>	15-53	Material tobáceo areno limoso
<b>U 4</b>	1-5	Arcillas lacustres
<b>U 5</b>	551-1273	Macizo rocoso, denso duro y compacto

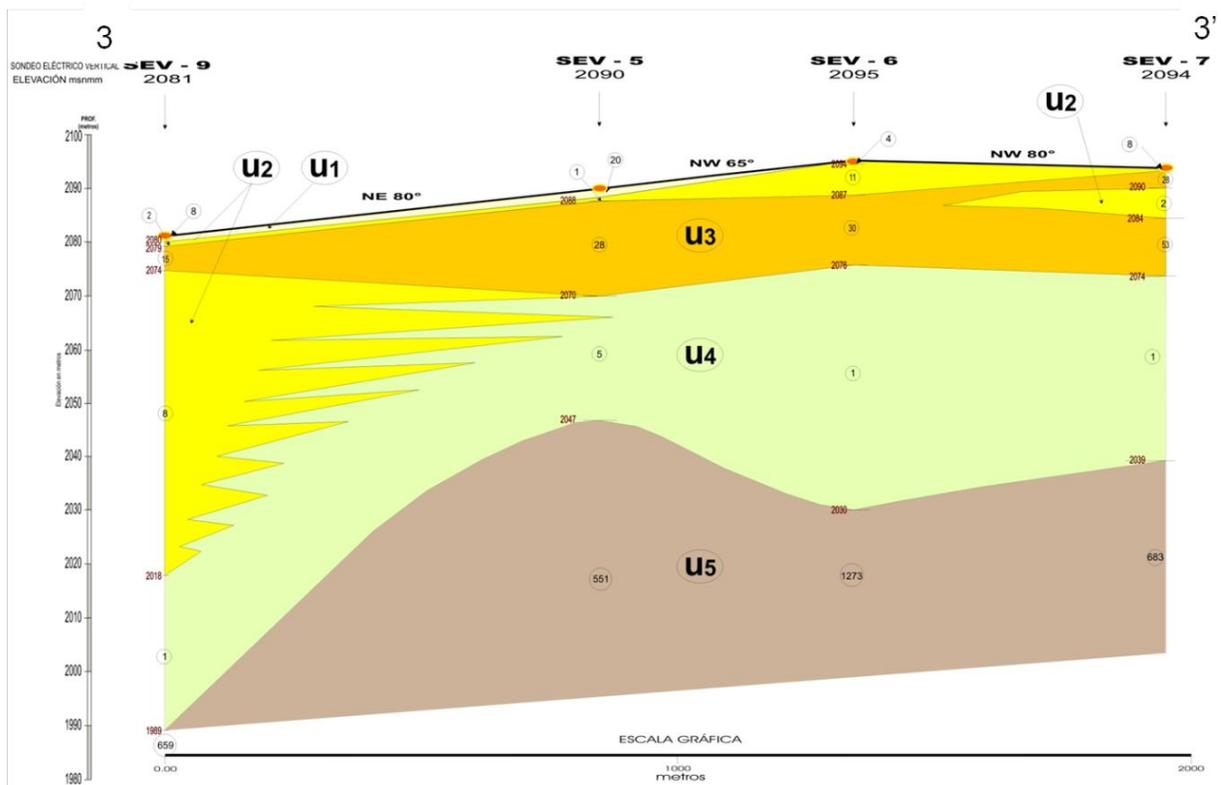


FIG. 57 Sección Geoeléctrica 3-3' (Software Resix Plus de Interplex, Co.)



### **III.2 Estudios geotécnicos**

El contexto del informe geotécnico es un proceso continuo que debe abarcar la investigación, diseño, monitoreo y construcción. Todas las estructuras ingenieriles involucran al suelo, ya que es el encargado de recibir las fuerzas actuantes propias de las estructuras, por tanto la Ingeniería Geotécnica juega un papel muy importante en el diseño de las mismas.

La primera parte de un estudio bien estructurado es un estudio documentado y reconocimiento del sitio, es la base para la investigación y diseño posterior, de tal manera que se puede establecer un programa de actividades. Es necesario que durante el reconocimiento se visite los archivos locales, así como ponerse en contacto con la Autoridad Local y Medio Ambiente para obtener información del terreno. Los informes Geoambientales nos pueden proporcionar la identificación de áreas de contaminación, localización de aguas subterráneas, aguas superficiales, etc.

El programa de exploración geotécnica deberá proporcionar información sobre las condiciones estratigráficas del sitio en estudio y consta de dos etapas.

La primera, estudios preliminares, deberá determinar los problemas geotécnicos del sitio, lo que servirá para fundamentar la segunda etapa de investigación de detalle la cual incluye la realización de sondeos y pruebas de campo y de laboratorio.

Es posible que en función de la importancia y magnitud del proyecto y de las condiciones del sitio, sea necesario que en la etapa de estudios preliminares se ejecuten sondeos y pruebas de laboratorio orientadas a definir la factibilidad del proyecto.

#### **III.2.1 Sondeos de Penetración Estándar (SPT)**

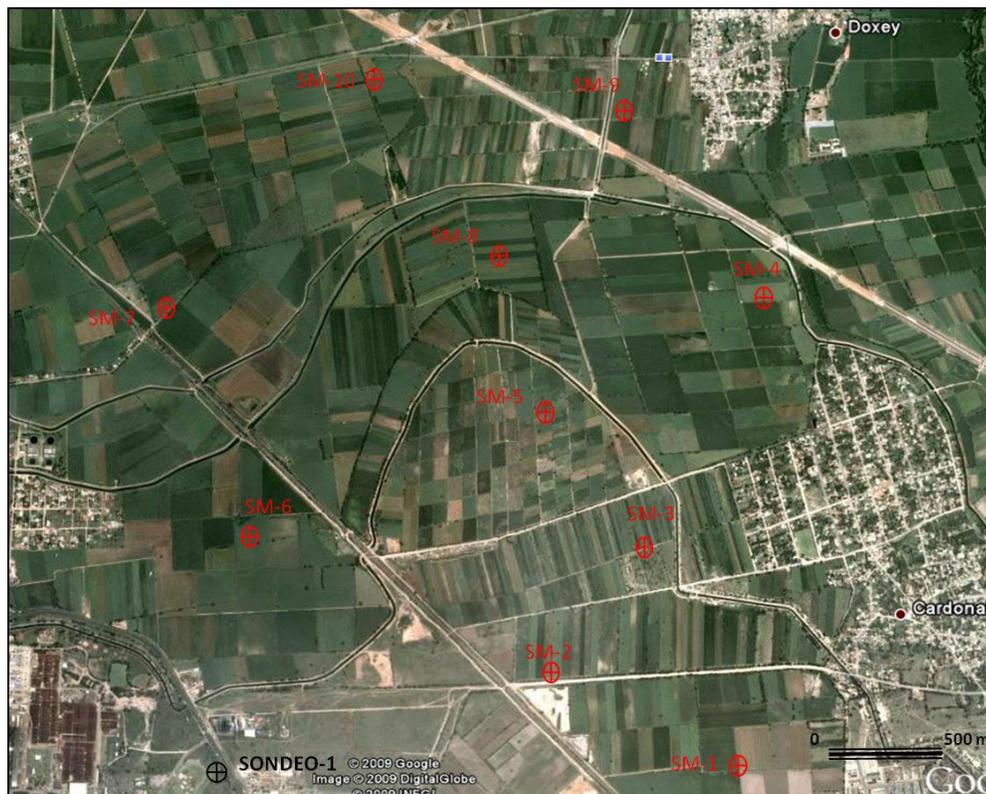
A pesar de que las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones no son un manual de diseño, nos auxilian en cuanto a fijar criterios y métodos de diseño que permitan cumplir con el Reglamento del Distrito Federal. Aspectos que no se cubran en ellas quedan a criterio del Director Responsable de Obra.

Al igual que las NTC, el Manual de Diseño de Obras Civiles-Geotécnica (CFE, 2008) de la CFE, proporciona recomendaciones en cuanto a la exploración. El número de sondeos dependerá de las características del terreno (uniforme o errático), de la longitud de las cargas impuestas por la estructura al terreno y de las características y funciones de las obras proyectadas (susceptibilidad a los asentamientos diferenciales, por ejemplo).

Si de los estudios geológicos previos se puede suponer que el subsuelo es uniforme, se separarán los sondeos de 100 a 150 metros para áreas de mediana extensión localizando los iniciales en las esquinas y los siguientes hacia el centro. En el caso de boquillas de las presas, la distancia entre sondeos puede variar de 20 a 100 metros. Cuando a raíz de los estudios geológicos previstos o de los primeros resultados de sondeos, se infiere que el subsuelo presenta condiciones muy erráticas, la distancia entre sondeos deberá reducirse.

No hay regla que permita definir exactamente el número de sondeos, pues este depende de las características del sitio por investigar. Es decir, el tipo de suelo, nivel de aguas freáticas así como de la magnitud, el costo y el tipo de obra.

En cuanto a la exploración, en las cercanías a la zona de Bancos de Material B-I (entre el poblado de Doxey y la Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”), se realizaron 10 sondeos a 20 m. de profundidad, **FIG. 58**, a partir de sondeos mixtos con recuperación alternada de muestras inalteradas y alteradas, siendo las primeras aceptables para determinar propiedades mecánicas según las NTC.



⊕ SM-1 Sondeo mixto

**FIG. 58** Distribución de Sondeos de Penetración Estándar



SONDEO	X	Y	Z	PROFUNDIDAD DE SONDEO EN MTS
SM-1	473,925.4436	2'218,040.8210	2,107.3490	20.10
SM-2	474,447.3410	2'218,071.2460	2,104.2090	20.15
SM-3	473,582.1030	2'218,805.8250	2,111.3060	20.40
SM-4	472,526.6007	2'219,242.1050	2,090.5330	20.05
SM-5	473,486.8592	2'219,473.7830	2,102.3170	20.15
SM-6	473,948.5145	2'219,653.0585	2,092.1783	20.05
SM-7	472,160.7522	2'220,081.0245	2,077.1048	20.00
SM-8	472,863.0626	2'220,205.6830	2,085.4920	20.50
SM-9	473,309.8676	2'220,539.0334	2,081.1820	20.10
SM-10	472,752.8227	2'220,905.7173	2,072.1790	20.10

**TABLA 14** Coordenadas de posicionamiento para ejecución de Sondeos

En la **FIG. 58**, esquina inferior izquierda, se muestra el Sondeo-1, el cual es tomado del artículo denominado “El subsuelo de la ciudad de Tula” (Soto Yañez E. y Lara Aréchiga J.,1989). Se encuentra ubicado dentro de los terrenos de la Refinería “Miguel Hidalgo”.

En el presente capítulo sólo hago referencia a los resultados obtenidos para 3 sondeos mixtos, SM-2, SM-4 y SM-10, ubicados sobre depósitos pertenecientes a la Formación Tarango, los cuales se realizaron con el objeto de conocer las propiedades índice y mecánicas del subsuelo (no se realizaron pruebas de consolidación unidimensional), para dar lugar a la elaboración de perfiles estratigráficos.

Fisiográficamente la zona donde se realizaron los sondeos corresponde a lomeríos, en los que el subsuelo se constituye de materiales resistentes (es decir el subsuelo es competente), que normalmente se consideran como rocas suaves con alteraciones superficiales, en donde el problema de Ingeniería de Cimentaciones se concreta al diseño de cimientos poco profundos (zapatas aisladas, zapatas corridas, o losas de cimentación).

La Ingeniería de Cimentaciones se basa en la Mecánica de Suelos y la Ingeniería Geológica, así como en el comportamiento de las estructuras y el diseño de las mismas, esto en su conjunto nos permite visualizar que tipo de cimentación será utilizada y su posterior comportamiento (Zeevaert L., 1973).

Para proyectar correctamente una cimentación es necesario tener el conocimiento de la zona en las proximidades de la nueva construcción pero sobre todo es indispensable poseer datos tan precisos como sea posible sobre las características geotécnicas de las diferentes capas que constituyen el terreno de cimentación hasta una profundidad que es función de las dimensiones de conjunto del sistema de cimentación proyectado.



En este trabajo se caracterizo la region estudiada, no tiene por objeto el diseño de una obra civil en particular o el estudio de acuíferos para abastecimiento de agua. En base a características específicas de futuros proyectos de construcción civil, como son dimensiones, cargas, exigencias de forma, instalaciones inducidas, arquitectura de los prototipos, tendra que realizarse una futura campaña de exploración geotécnica en el lugar específico donde se pretenda ubicar la construcción, conociendo el programa arquitectónico y las exigencias que ello demande para proponer el tipo de cimentación más adecuada (no solo cimentaciones, pudiendo ser taludes y excavaciones, el suelo como material de construcción, estructuras de retención, mejoramiento de suelos, etc), considerando el equilibrio entre seguridad y economía, definir la profundidad de desplante, calcular la capacidad de carga permisible para el tipo de cimentación y desplante proyectado, analizar los movimientos probables en el corto y largo plazo.

A continuación se presenta la información que debemos tener en cuenta para un proyecto de cimentación (López Rincón G., 2011):

#### **Del proyecto estructural**

- Cargas estáticas y dinámicas
- Tipo de estructura en cuanto a flexibilidad y capacidad de aceptar desplazamientos diferenciales.
- Magnitud permisible de hundimientos totales y diferenciales.
- Restricciones en cuanto a hundimientos totales para el proyecto mismo y para construcciones adyacentes.
- Estudio de las condiciones de la cimentación de los edificios vecinos.

#### **Del subsuelo del sitio**

- Estratigrafía.
- Condiciones hidráulicas a la fecha del estudio y en el futuro, hundimiento regional.
- Propiedades mecánicas de resistencia al esfuerzo cortante y permeabilidad hasta una profundidad que ya no se vea afectada por las cargas de la cimentación.
- Propiedades mecánicas de compresibilidad de los estratos afectados por las cargas.
- Propiedades dinámicas en zonas sísmicas.

#### **Aspectos a revisar en una cimentación**

- Análisis de estabilidad de la cimentación. Capacidad de carga del suelo para el tipo de cimentación elegida. Estabilidad de la excavación donde el punto de vista mecánico e hidráulico.

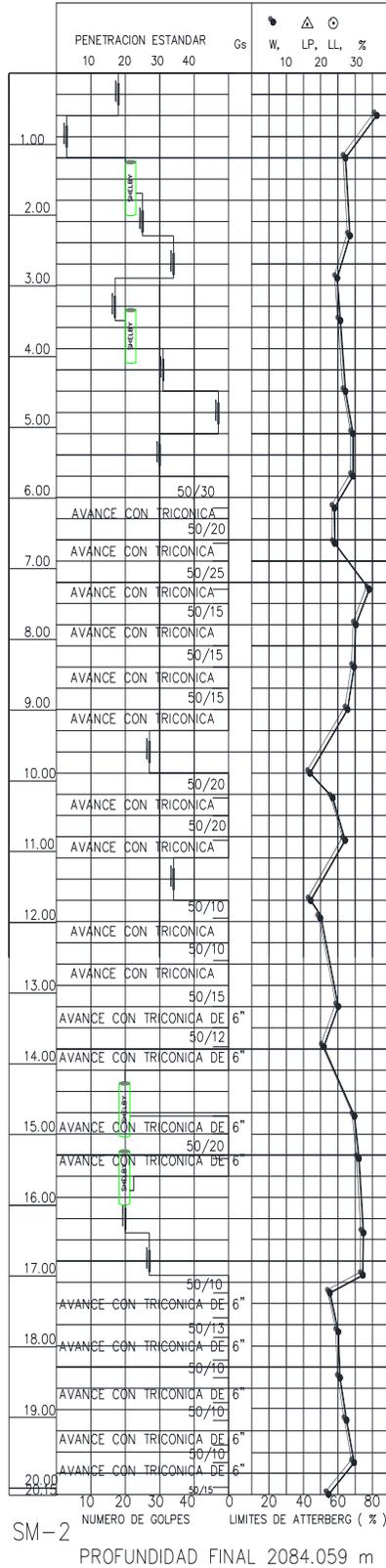


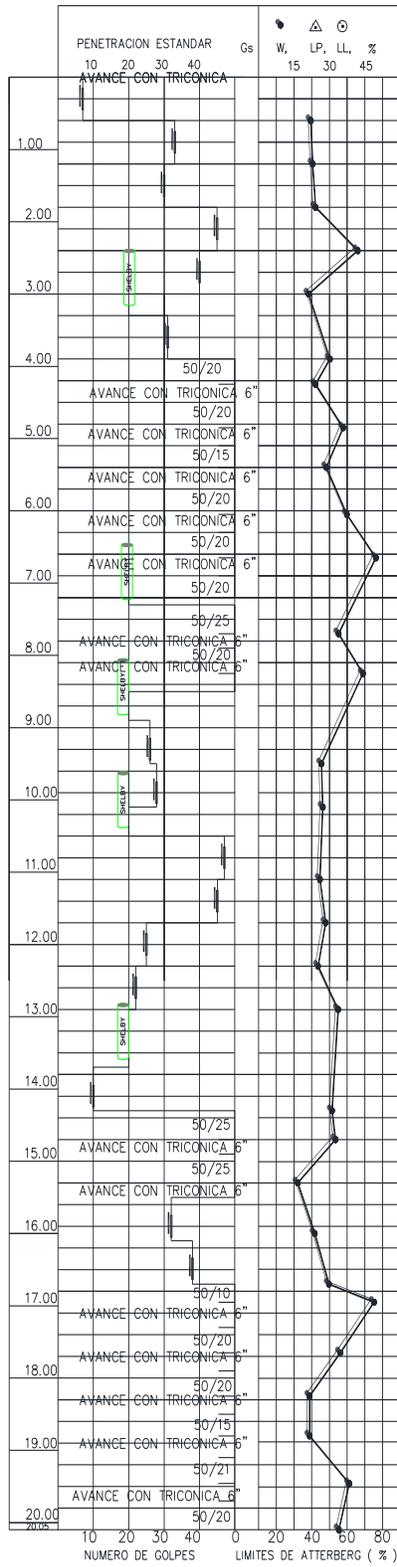
- Análisis de los desplazamientos verticales y horizontales, durante la construcción y posteriormente.
- Análisis del comportamiento debido a sismo o viento.
- Elección del procedimiento de excavación.
- Diseño estructural de la cimentación.
- Observación del comportamiento para verificar todo lo anterior mediante piezómetros y puntos de referencia.

En base al impulso que en los últimos años el Gobierno del Estado de Hidalgo ha dado a esta región de la Entidad Federativa, es de pensar un futuro asentamiento poblacional o el aumento del mismo, así como construcción de nuevas industrias, vías de comunicación, o como la ya proyectada Refinería de PEMEX y la planta de tratamiento de agua residuales provenientes del Distrito Federal. Los proyectos que pudieran ser desarrollados en esta zona son los típicos de refinación y petroquímica en el tratamiento de derivados del petróleo como: plantas de destilación que forman verdaderos complejos de equipos, áreas de almacenamiento de destilados y gases, definidas con tanques de grandes dimensiones; torres de enfriamiento, servicios de energía y vapor que implican la operación de turbogeneradores y calderas; áreas de bodegas y almacenes, edificios administrativos, etc.

A una profundidad de 4.5 m. en promedio, las tobas presentan una resistencia a la penetración estándar mayor a los 50 golpes, siendo necesario el uso de broca tricónica; no se localizó un nivel establecido de aguas freáticas. Las tobas descritas anteriormente, por su resistencia y compacidad rebasan la frontera de clasificación de suelos y se les puede considerar como rocas suaves.

Se presentan a continuación los perfiles estratigráficos de los 3 sondeos mixtos, SM-2, SM-4 y SM-10.





SM-4 PROFUNDIDAD FINAL 2070.483 m





**ANEXO 1** Registros de Campo SM-2, SM-4 y SM-10

**ANEXO 2** Contenido de agua y descripción macroscópica SM-2, SM-4, y SM-10

**ANEXO 3** Peso Específico Relativo de Sólidos (Ss) SM-2, SM-4 y SM-10

**ANEXO 4** Análisis Granulométrico y Límites de Consistencia SM-2, 4 y 10, solo se presenta un ejemplo de cada muestra. En la **TABLA A** me refiero al resultado para cada espécimen por sondeo obtenido de tubo Shelby.

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	MUESTRA	GRAVA (%)	ARENA (%)	FINOS (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACIÓN S.U.C.S.
SM-2	1.20-1.70	3	0.00	64.35	35.65	32.30	15.30	17.00	Arena limoarcillosa de baja plasticidad (SM)
SM-2	3.50-3.90	7	0.00	18.24	81.76	43.50	28.00	15.5	Limo arcilloarenoso de baja plasticidad (ML)
SM-2	14.10-14.40	25	0.00	11.66	86.34	26.30	21.30	5	Limo arcilloarenoso de baja plasticidad (ML)
SM-2	15.60-15.80	28	0.00	37.00	63.00	28.30	20.10	8.20	Arcilla limoarenosa de baja plasticidad (CL)
SM-4	3.00-3.30	6	0.00	27.72	72.28	41.20	19.00	22.20	Limo arcilloarenoso de baja plasticidad (ML)
SM-4	6.90-7.30	13	0.00	23.56	76.44	46.20	22.90	23.30	Limo arcilloarenoso de baja plasticidad (ML)
SM-4	8.50-8.90	16	1.65	61.11	37.25	45.20	21.50	23.70	grava (CL)
SM-4	10.10-10.50	19	0.00	96.91	2.09				Arena mal graduada (SP)
SM-4	12.90-13.70	24	0.37	20.46	79.18	63.00	34.10	28.90	Limo arcilloarenoso de alta plasticidad con grava
SM-10	0.60-1.40	2	0.00	23.52	76.48	49.20	13.10	36.10	Arcilla limosa de alta plasticidad con arena (CH)
SM-10	5.60-6.10	10	0.00	50.67	49.33	52.00	27.90	24.10	Arena con limo orgánico de baja plasticidad (SM)
SM-10	16.00-16.70	28	0.00	34.96	65.04	49.00	30.90	18.10	Limo arcilloarenoso de baja plasticidad (ML)
SM-10	18.50-19.20	32	0.00	41.14	58.86	43.10	11.00	32.10	Arcilla limoarenosa de baja plasticidad (CL)

**TABLA A** Clasificación S.U.C.S. de muestras

**ANEXO 5** Peso volumétrico SM-2, SM-4 y SM-10

**ANEXO 6** Pruebas de Compresión Simple SM-2, SM-4 y SM-10, solo se presenta un ejemplo de cada muestra. En la **TABLA B** me refiero al resultado para cada espécimen por sondeo obtenido de tubo Shelby.

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	MUESTRA	ALTURA DE PROBETA (cm)	CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VACIOS e	PESO VOLUMÉTRICO (ton/m <sup>3</sup> )	DEFORMACIÓN (mm)	CARGA ÚLTIMA (kg/cm <sup>2</sup> )
SM-2	1.20-1.70	3	8.10	25.70	2.33	0.80	1.633	0.60	0.462
SM-2	3.50-3.90	7	8.66	21.10	2.65	1.26	1.419	2.00	0.700
SM-2	14.10-14.40	25	8.25	29.10	2.59	1.07	1.618	1.00	0.672
SM-2	15.60-15.80	28	8.31	23.10	2.41	0.74	1.705	1.60	0.996
SM-4	3.00-3.30	6	9.26	29.30	2.51	0.97	1.647	2.50	0.808
SM-4	6.90-7.30	13	9.27	29.80	2.61	1.04	1.661	1.40	1.280
SM-4	8.50-8.90	16	8.20	26.40	2.57	0.92	1.689	1.80	1.020
SM-4	10.10-10.50	19	9.00	34.60	2.65	1.30	1.548	2.50	0.821
SM-4	12.90-13.70	24	8.00	17.10	2.61	0.46	2.098	4.50	1.471
SM-10	0.60-1.40	2	9.40	33.80	2.69	1.09	1.724	16.80	0.617
SM-10	5.60-6.10	10	8.30	27.40	2.78	0.82	1.952	6.00	0.487
SM-10	16.00-16.70	28	8.60	41.20	2.68	1.50	1.511	0.40	0.168
SM-10	18.50-19.20	32	7.70	37.70	2.42	0.86	1.792	0.60	0.093



**TABLA B** Resultados de la Prueba de Compresión Simple

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	MUESTRA	$\phi$ (°)	Cohesión (kPa)
SM-2	1.20-1.70	3	23.54	145.17
SM-2	3.50-3.90	7	38.52	27.21
SM-2	14.10-14.40	25	26.49	90.83
SM-2	15.60-15.80	28	35.65	53.16
SM-4	3.00-3.30	6	13.30	155.96
SM-4	6.90-7.30	13	19.96	84.73
SM-4	8.50-8.90	16	22.56	188.21
SM-4	10.10-10.50	19	21.78	143.21
SM-4	12.90-13.70	24	16.42	54.77
SM-10	0.60-1.40	2	15.17	82.57
SM-10	5.60-6.10	10	21.31	112.16
SM-10	16.00-16.70	28	11.54	33.65
SM-10	18.50-19.20	32	9.14	4.39

**TABLA C** Valores de  $\phi$  y C de las diferentes muestras

## CAPÍTULO IV Determinación del marco hidrológico del área.

### IV.1 Hidrografía regional

El estado de Hidalgo cuenta con dos regiones hidrológicas: Pánuco y Tuxpan – Nautla (FIG. 59). Dentro de la región del Pánuco, se encuentra la Cuenca del Río Moctezuma, mientras que en la región Tuxpan – Nautla, las Cuencas del Río Tecozautla, Cazones y Tuxpan.



FIG. 59 Regiones Hidrológicas (INEGI, 2009)

El estado de Hidalgo se encuentra comprendido casi en su totalidad dentro de la región hidrológica Río Pánuco con una superficie de 19, 793.60 km<sup>2</sup>. Sólo una pequeña extensión de la porción oriental forma parte de la región Tuxpan-Nautla, la cual cubre un área de 1,111.52 km<sup>2</sup> (TABLA 48).

### Región Hidrológica Río Pánuco

Corresponde a la vertiente del Golfo de México y es considerada como una de las más importantes del país, tanto por su superficie, que la ubica en el cuarto lugar nacional, como por el volumen de sus escurrimientos, que le otorgan el quinto lugar.



Debido a su gran superficie, se dividió esta región en dos: Alto Pánuco y Bajo Pánuco.

La zona del Alto Pánuco comprende las cuencas de los ríos Tula y San Juan del Río, que son afluentes del Río Moctezuma; las cuencas Metztitlán y Amajac que originan el Río Amajac.

La zona del Bajo Pánuco comprende las cuencas de los ríos Extóraz, Bajo Amajac, Tempoal, Moctezuma, Tampaón y Pánuco.

Región	Cuenca	% de la superficie estatal
Pánuco	R. Moctezuma	95.51
Tuxpan-Nautla	R. Tecolutla	0.36
	R. Cazonas	0.87
	R. Tuxpan	3.26

**TABLA 48** Hidrografía (INEGI, 2009)

### Cuenca Río Moctezuma

Ocupa una superficie dentro de Hidalgo de 19, 793.60 km<sup>2</sup>; y tiene como corriente principal el Río Moctezuma, que se origina en el cerro La Bufo, Estado de México, a 3,800 m.s.n.m. En su inicio es denominado San Jerónimo. Los afluentes de esta corriente en territorio hidalguense son: el Río Tizahuapan, que nace en la Sierra de Pachuca. El Metztitlán, que se origina en Puebla y deposita sus aguas en la laguna de Metztitlán con el nombre de Río Tulancingo, para continuar posteriormente su curso hasta el Moctezuma, como Río Amajac. El Río Tula, generado en el Estado de México, inicia su recorrido con dirección norte hasta la población de Ixmiquilpan, de ahí cambia su curso hacia el noroeste para después confluir con el Río San Juan del Río, a partir de donde recibe la denominación de Río Moctezuma y funciona como límite natural entre Querétaro e Hidalgo, el Río Moctezuma cambia su nombre al de Río Pánuco, el cual desemboca en el Golfo de México.

Esta cuenca reviste gran importancia tanto por su extensa superficie y la cantidad de afluentes que alimentan sus corrientes principales, como por los distritos de riego que se

ubican en ella, de los cuales destaca el de Tula que, después de los del norte de la República, es uno de los más importantes del país. El distrito de Tula está ubicado en la porción suroeste del estado y se abastece de los ríos San Luis, Tepeji, El Salto y Tula; así como de los volúmenes almacenados por las presas Taxhimay, del estado de México, Requena y Endhó, de Hidalgo. Además una considerable cantidad de hectáreas son irrigadas por grandes volúmenes de aguas negras provenientes del Valle de México.

## IV.2 Hidrografía local

La zona estudiada se encuentra dentro de la Cuenca del Río Tula y la subcuenca del Río Salado (FIG. 60), colinda al norte con la cuenca del Bajo Pánuco, al Sur con la Cuenca del Valle de México, al suroeste con la Cuenca del Río Lerma.

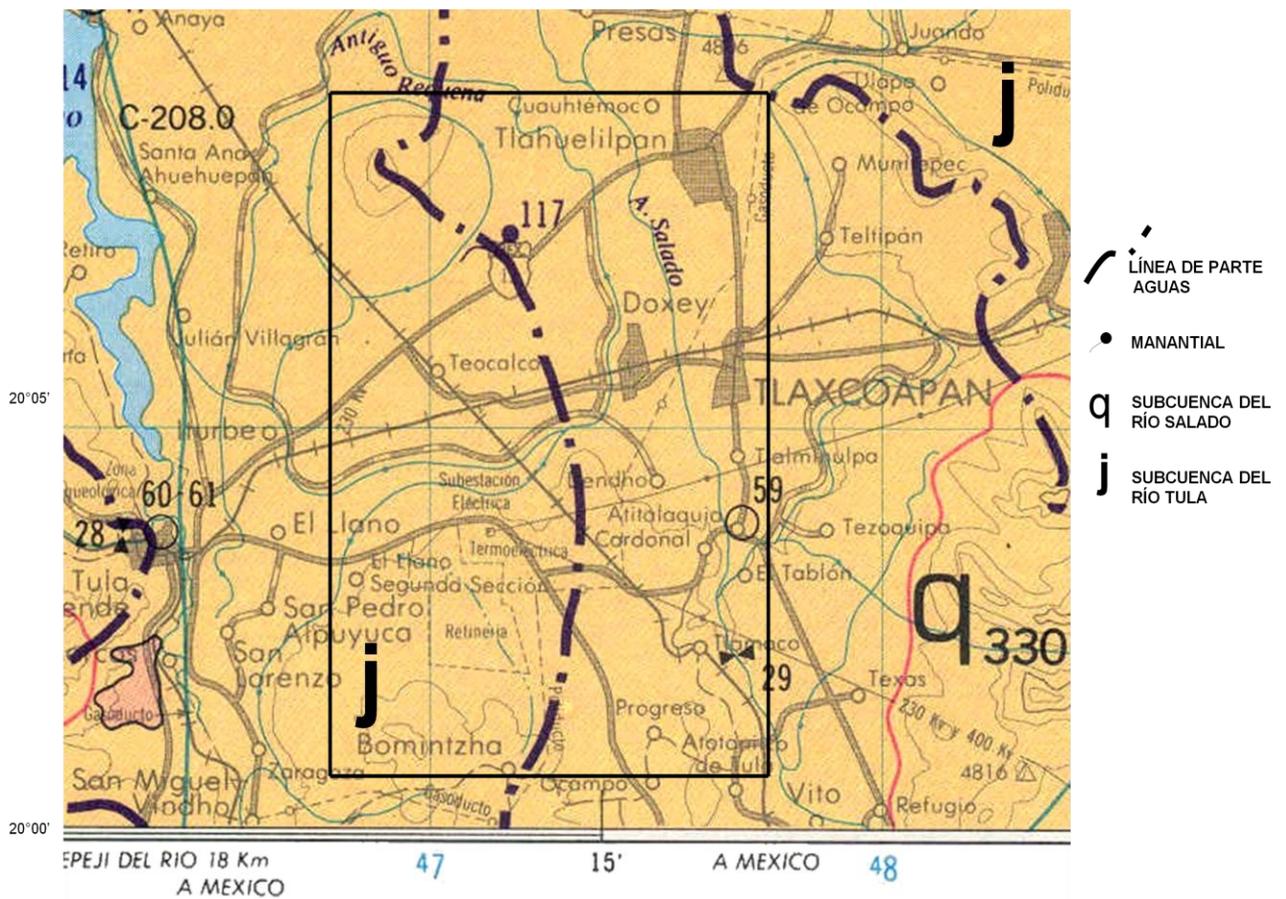


FIG. 60 Hidrología Superficial (INEGI, 2009)

Los ríos en la región estudiada reciben aguas negras provenientes de la Ciudad de México a través de los interceptores Poniente, Central y Oriente así como el Emisor Central (FIG. 61), el Gran Canal del desagüe y el Dren General del Valle de México. Posteriormente esta red es conectada mediante tajos y túneles a las principales corrientes superficiales de la zona: Río El Salto, Tula y Salado

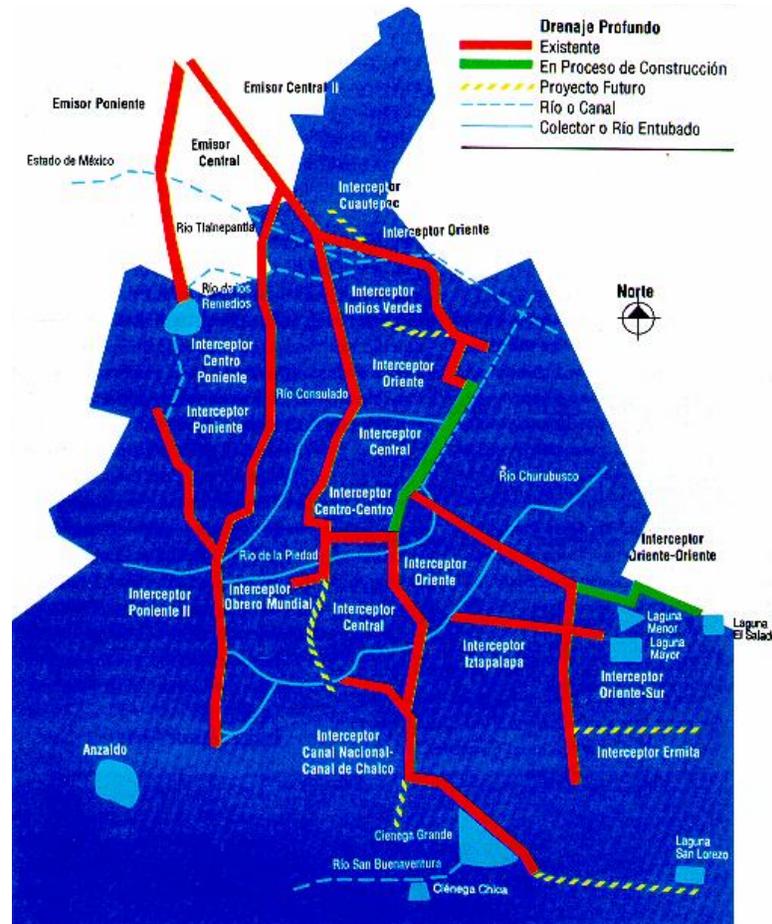


FIG. 61 Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México

Estas tres corrientes de régimen perenne cruzan a la región con una dirección preponderante de sur a norte:

1. **El Río Tula.** Nace en la Sierra la Catedral bajo el nombre del Río San Jerónimo, al llegar a la presa Taximay (Edo. de México) cambia su dirección al N-NE y su nombre por el de Río Tepeji; aguas abajo lo intercepta la presa Requena para controlare sus descargas; en este punto cambia su nombre al de Río Tula; en las inmediaciones de la Cd. de Tula el río descarga sus aguas a la presa Endhó y toma



una dirección N-NE hasta llegar a Mixquiahuala donde tiene un recorrido irregular. A partir de la construcción del Sistema de Desagüe del Distrito Federal y del Área Metropolitana, se alimenta de las aguas negras provenientes de los otrora ríos Churubusco, Los Remedios, La Piedad y Consulado. Los cuales formaban parte del sistema hidrológico del Valle de México

2. **Río Salado.** Se origina en el Cerro El Epazote con el nombre de arroyo Tenguedó, cerca de la población de Hueyoxtla (Edo. de México) toma este nombre hasta llegar a la confluencia con el túnel Tequixquiac (Gran Canal de Desagüe), en donde cambia su nombre por el de Río Salado, recibe aportaciones de aguas negras del túnel Tequixquiac, parte de estas aguas se derivan hasta el Distrito de Riego 03. Entra a la presa de la hacienda de San Sebastián, en tiempo de seca recoge toda su agua. En el de lluvias se aumenta considerablemente por las avenidas y sigue hasta reunirse con el río grande de Tezontepec y Mixquiahuala.
3. **Río El Salto.** Lleva ese nombre desde el Tajo de Nochistongo, el cual introduce aguas negras mediante el interceptor poniente, así como escurrimientos captados del Río Hondo, posteriormente el río vierte sus aguas al Río Tula aguas abajo de la presa Requena.

Éstas corrientes se integran en el sistema de riego número tres, el más importante del Estado. Existen obras de almacenamiento como la presa Requena y la presa Endhó (**FIG. 62**) situada en el municipio de Tula, cuenta con una capacidad total de almacenamiento de 183 millones de metros cúbicos, que irrigan más de 42,000 hectáreas. En este almacenamiento se concentran las aguas negras del Distrito Federal. La presa Requena (**FIG. 63**) tiene una capacidad total de almacenamiento es de 52.420 millones de  $m^3$ , de esta cantidad se ocupa 50.000 millones de  $m^3$  que es utilizada para el riego.



**FIG. 62 y 63** Izquierda, Cerro Xicuco visto desde el vaso de la presa Endhó. Derecha, vaso de la presa.

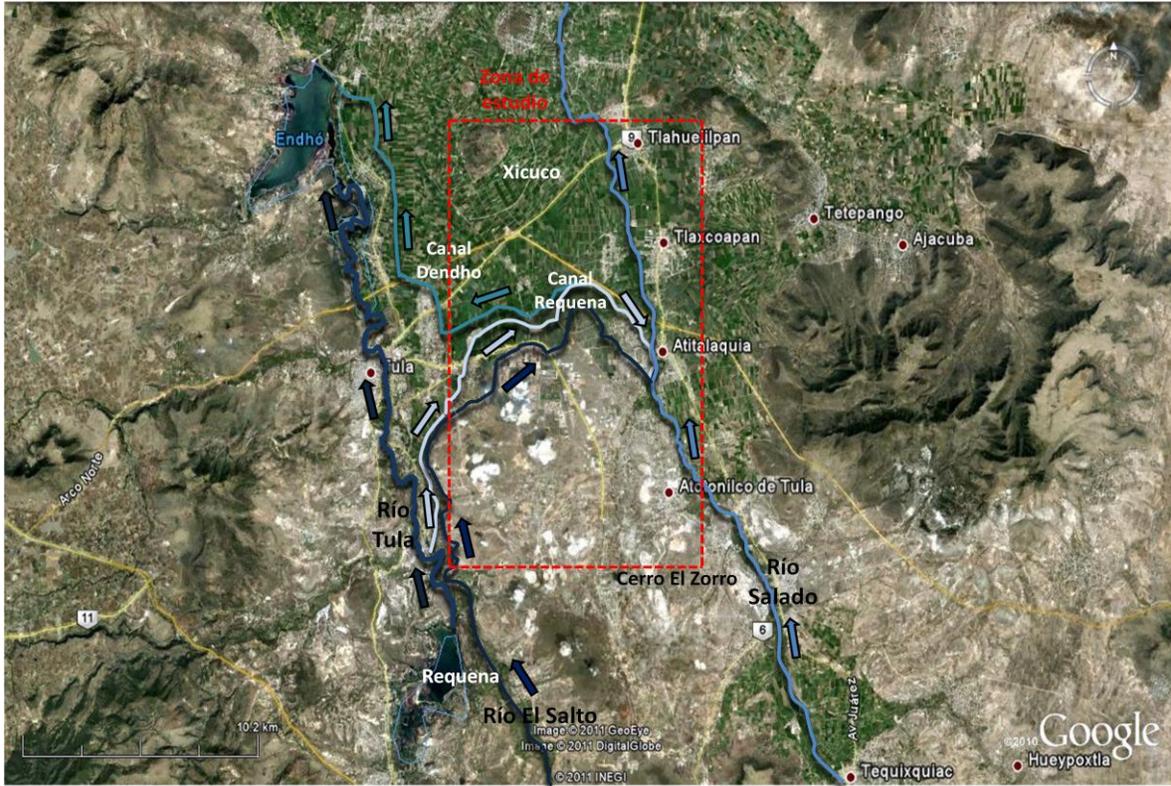


FIG. 64 Corrientes principales en la región

## Sistema de Canales

Las corrientes antes mencionadas, se distribuyen mediante 4 sistemas principales de riego (FIG. 64); estos sistemas están gobernados por las presas almacenadoras y derivadoras existentes en la zona.

1. **Sistema del Río El Salto - Tlamaco.** Parte de los volúmenes aportados a este sistema provienen del Emisor Central (que es alimentado por los interceptores Oriente y Central localizados al sur de la Laguna de Zumpango).

2. **Sistema Requena.** El agua de este sistema proviene del suroeste y oeste del área, está mezclada en ocasiones con los escurrimientos del Río El Salto. La Presa Requena se utiliza para administrar el agua proveniente principalmente del Río Tepeji; el principal objetivo de este sistema es llevar agua para uso agrícola al Distrito de Riego 03 (Valle del Mezquital). El canal principal Requena no está completamente revestido.



3. **Sistema Dendhó.** Recibe aguas directamente de los dos sistemas anteriores, así como de los ríos Tlautla y Rosas que descargan al Río Tula. El canal principal Endhó lleva sus aguas en una dirección NW y mediante este sistema se derivan volúmenes al Distrito de Riego No. 100 (Alfajayucan) ubicado al norte de la presa Endhó mediante un canal lateral y el túnel El Gallinero.

4. **Sistema del Río Salado.** Este sistema es alimentado por los túneles de Tequixquiac que conducen gran parte de las aguas negras provenientes de la Ciudad de México, las cuales son transportadas por el Gran Canal del Desagüe, además se descargan las aguas residuales del Dren General del Valle de México. Este sistema tiene dos canales principales de derivación que son el canal Juandhó y Dendhó, el primero de estos está construido en tierra y el segundo se encuentra parcialmente revestido desde el inicio hasta el poblado de Mixquiahuala; parte de esta agua sirve para generar energía eléctrica en la termoeléctrica Juandhó. Como parte del manejo de esta agua se encuentra el Río Chicvasco (Actopan, Hgo), los escurrimientos superficiales que se originan dentro de la cuenca hidrográfica son captados por el Río Chicvasco y conducidos fuera del área.



## CAPÍTULO V Determinación del marco hidrogeológico

### V.1 Unidades Hidrogeológicas

En la superficie del terreno se tiene un paquete de rocas, que pertenecen a la Formación Tarango de edad Terciaria, compuesta por material clástico y lentes locales de caliza lacustre. El material clástico está formado por limos, arcillas y arenas de grano fino. Desde el punto de vista hidrogeológico es poco permeable, sin embargo es un material que en sección presenta conductos de tubificación por influencia del flujo subterráneo del agua, y en conjunto con la porosidad le permiten obtener una capacidad hidráulica mayor (FIG. 65).



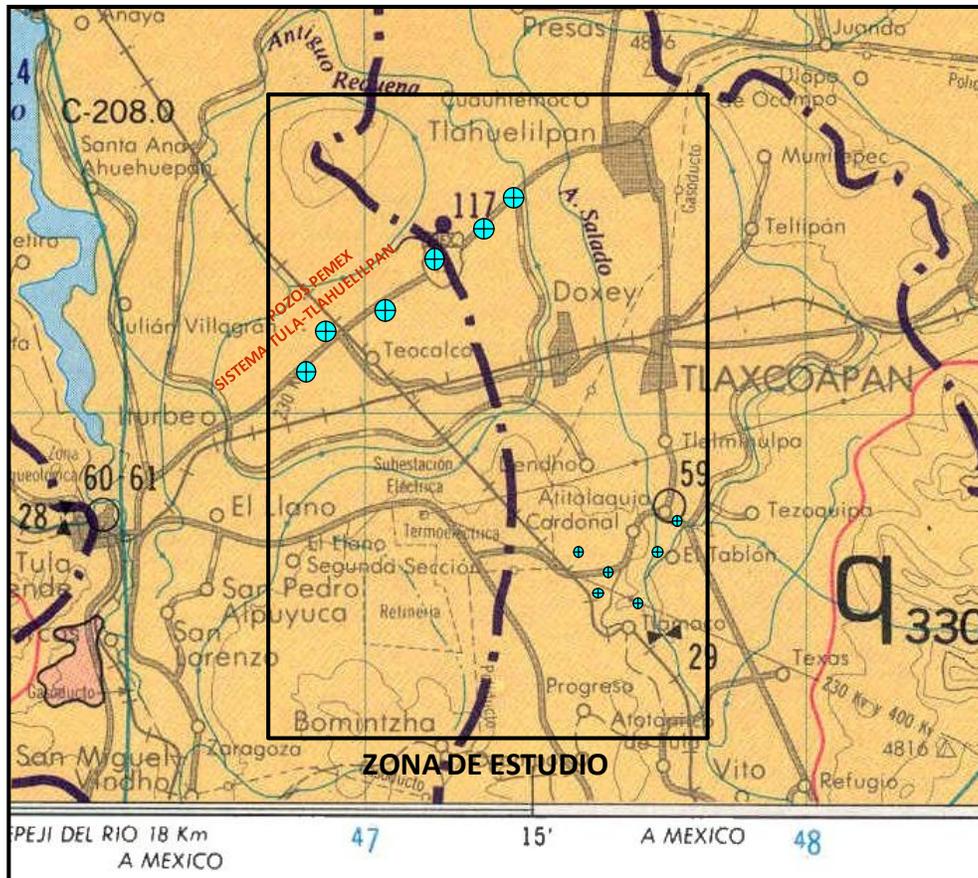
**FIG. 65** Afloramiento de material calcáreo arcilloso y calizas de la Formación Tarango, se observan planos de tubificación

Es importante mencionar entonces que la Formación Tarango, constituye la unidad hidrogeológica permeable más importante. Esta Formación, por tener variaciones litológicas a lo largo, ancho y profundidad, su capacidad hidráulica es variable.

En la zona de Bancos de Material B-I se encuentra un conglomerado oligomítico empaquetado en limos y arcillas. Probablemente el conglomerado está relacionado con la presencia de antiguos cauces pertenecientes a las rocas del Cretácico de la Formación

Doctor. Los cauces de los arroyos y ríos durante el Cretácico fueron sepultados por los materiales granulares del Terciario.

Por otra parte, hasta el momento la Formación Tarango es la única fuente subterránea activa en la zona de estudio, exceptuando los pozos profundos de PEMEX y CFE (FIG. 66).



● POZOS DE AGUA PEMEX    ● POZOS DE AGUA ZONA INDUSTRIAL

FIG. 66 Pozos existentes en la región (INEGI, 2009)

Las calizas pertenecientes a la Formación Doctor se caracterizan por estar fracturadas y constituyen otra unidad acuífera en la región, prueba de ello son los pozos profundos de las Cementeras.

La base hidrogeológica está formada por la propia Formación Tarango, en donde la capa interior está constituida por materiales más arcillosos, sin embargo, si la caliza de la Formación Doctor considerando que esta fracturada en el lugar de estudio es permeable y



## Universidad Nacional Autónoma de México



existe la comunicación hidráulica con la Formación Tarango, entonces será esta Formación calcárea la que se considere el basamento impermeable, en aquella parte donde el fracturamiento se vuelva prácticamente nulo.

En superficie la Formación Doctor aflora al Sur, Este y Oeste de la zona en estudio, un poco más hacia el Este se encuentran los afloramientos de roca ígnea, ambas rocas geomorfológicamente componen las estructuras más elevadas e importantes de la región, por lo que representan la zona de infiltración o de recarga de los acuíferos.

Desde el punto de vista hidrogeológico en la región se tienen las 3 fases que integran el proceso de recarga, transición y descarga de un sistema acuífero. Como ya se mencionó anteriormente, la zona de recarga está compuesta por las montañas alrededor de la zona en estudio, la zona de transición es la parte por donde el flujo de agua subterránea circula para llegar al valle y está compuesta por los lomeríos, y por último la zona de descarga perteneciente al valle.



## CAPÍTULO VI Conclusiones

**1.-** El marco geológico del área estudiada se integra por una secuencia de materiales sedimentarios correspondientes a las Formaciones denominadas Tarango y Doctor.

La Formación Tarango está integrada por capas de espesor promedio de 1.00 m. de origen volcano-sedimentario conocidos geológicamente con el nombre de tobas, las cuales presentan una granulometría que va de arcillosa a limosa y arenosa, intermezcladas y con diferentes grados de consolidación y resistencia. Además de las capas anteriores, se presentan cuerpos lenticulares de rocas carbonatadas de origen lacustre y areniscas conglomeráticas de grano más grueso que las tobas.

La Formación Tarango presenta dos etapas de depósito, la inferior se encuentra plegada, observándose las capas inclinadas, y la superior en posición propiamente horizontal, cubriendo la más antigua.

Las tobas limo-arcillosas y materiales granulares de la Formación Tarango, inspeccionadas en los bancos de material, van engrosando su espesor en la medida que se alejan de los afloramientos de caliza.

La mayor parte de las unidades contienen carbonato de calcio, aportado por las rocas calizas que se encuentran a mayor profundidad en el subsuelo y que afloran en los alrededores (Formación Doctor), las cuales son explotadas por diversas compañías cementeras.

Empresas Cementeras como: Tolteca, Lafarge, Cruz Azul, CEMEX y Portland explotan los yacimientos de calizas y arcillas para la fabricación del cemento y cal, siendo ésta una de las principales actividades económicas de la región.

**2.-** Durante el recorrido a los Bancos de Material existentes en el área, identificamos las unidades litológicas que constituyen el subsuelo; los Bancos de Material B-I y II se encuentran excavados en las unidades de la Formación Tarango hasta una profundidad cercana a los 25 m. Únicamente en el B-III se notan las calizas suprayaciendo a las tobas de la Formación Tarango, hasta los 30 m.

**3.-** Las principales estructuras geológicas regionales corresponden a fallas y pliegues. Las primeras son en su mayoría de tipo Normal y de tipo Transcurrente.

Una de ellas fue observada en las calizas del Cerro “El Zorro”, localizado al sur, la cual fue interpretada en el área de estudio por la inclinación de los estratos de la secuencia inferior de la Formación Tarango.



La variación en el espesor de las arcillas lacustres y los cambios bruscos en la cima del macizo rocoso, presuponen la presencia de fallas de desplazamiento vertical, posiblemente relacionadas con la formación de la fosa del Mezquital (Marín S., et al, 1986, Cserna, et al 1988).

**4.-** Mediante los estudios geofísicos, se obtuvieron los resultados siguientes:

- Una unidad de moderada a baja resistividad, correlacionado con un paquete de rocas vulcanosedimentarias (U-2 y U-3).
- Una segunda unidad de muy baja resistividad, correlacionable con arcillas lacustres (U-4) y,
- Una unidad basal, de muy alta resistividad, atribuida a un macizo rocoso (U-5).
- En la superficie del terreno, esta secuencia litológica, se encuentra cubierta por un delgado cuerpo de material tobáceo calichoso (U-1).

La unidad geoelectrica, identificada como U-3 y contenida en el paquete vulcanoclástico, se ha correlacionado con gravillas, arenas limpias y conglomerados.

En la zona basal se las secciones geofísicas 1, 2, 3, se detectó una unidad de alta resistividad correlacionable con una roca compacta que puede ser de origen volcánico (derrames de lavas), o bien las calizas de edad cretácica.

**5.-** Todas las muestras recuperadas a partir de los ensayos de SPT fueron analizadas en el laboratorio, determinando los parámetros de: contenido de agua (%w), clasificación visual y al tacto. Se efectuaron pruebas para conocer la densidad de sólidos, límites de consistencia y granulometría, clasificándolo según el S.U.C.S.

En especímenes obtenidos a partir de tubo Shelby se practicaron pruebas de compresión simple y triaxiales UU, así como la determinación del peso volumétrico del material.

El tipo de material en los primeros metros corresponde a suelo agrícola, color negro y café oscuro, con materia orgánica, debido a su empleo en el campo agrícola de la región. Los estratos subyacentes son arenas, limos y arcillas con diferentes porcentajes de las mismas, teniendo así arenas limosas o arcillosas, limos arcilloarenosos y arcillas limoarenosas.

En general en los primeros metros, la consistencia de los materiales puede considerarse media en base al número de golpes en la prueba de SPT, posteriormente la consistencia es dura, mayor a 30 golpes, para el caso de las arcillas, siendo necesario perforar con broca tricónica. Mientras que las arenas poseen una compacidad relativa de mediana a compacta. El contenido de agua (%w), oscila entre el 20 y 40% casi en toda la columna estratigráfica.



6.- Puede considerarse que en la zona de estudio existe actualmente un solo acuífero en explotación; formado por materiales clásticos y arcillosos calcáreos de tipo tobáceo de origen lacustre y lentes de caliza lacustre, ambos de la Formación Tarango. Teniendo como característica principal la aportación vertical de agua subterránea a la cavidad de los pozos profundos, debido a las zonas de tubificación que se tienen en la Formación antes descrita por la acción de las mismas aguas subterráneas, que drenan de Sur a Norte.

El carbonato de calcio presente en la secuencia volcano-sedimentaria, ha sido introducido en la matriz tanto por escurrimiento de agua superficial como de agua subterránea. Existiendo también en la región aguas termales que afloran en algunos balnearios (Vito, Ajacuba, Ixmiquilpan, etc).

7.- Este marco geológico e hidrogeológico descrito, así como los parámetros geotécnicos, han sido de gran utilidad para el diseño, proyecto y construcción de las diversas obras de ingeniería civil en la región.



## BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, C. J. E. y Marín, C. S. 1987. "Origen y evolución de los rasgos morfotectónicos Postcretácicos de México". Bol. Soc. Geol. Mexicana, Tomo 48 No. 2. P.p. 15-39.
- Aguirre, G. et al. 2000. "El graben de Querétaro México. Observaciones de fallamiento activo". GEOS. Volumen 20, número 1. P.p. 2-7.
- Álvarez, Jr. M. 1956. "Clasificación y descripción de muestras caliza". Editorial Limusa.
- Auvinet, G. 2010. "Toponimia y geotecnia en el Valle de México". Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Numero 216 noviembre-enero 2010. P.p. 19-24.
- Boggs, S. 1995. "Principles of Sedimentology and Stratigraphy". Editorial Prentice Hall. 2da. Edición.
- Bryan, K. 1948. "Los suelos y fósiles de la altiplanicie de México en relación a los cambios climáticos". Sociedad Geológica de México. Boletín volumen 13. P.p 1-20.
- Corrales, I. 1977. "Estratigrafía". Editorial Rueda.
- Dean, B. y Drake, C. 1978. "Focal mechanism solutions and tectonics of the middle America". American Journey Geology. Volume 86. P.p 111-128.
- Department of the Army U.S. Corps of Engineers. 1995. "Engineer Manual, Geophysical Exploration for Engineering and Enviromental Investigations". Manual Number EM1110-1-1802.
- Díaz Rodríguez, A. 2009. "Apuntes de la materia de Propiedades de los Suelos". Posgrado UNAM.
- Díaz Rodríguez, A. 2010. "Apuntes de la materia de Mecánica de Suelos Teórica". Posgrado UNAM.
- Fries, C. 1960. "Geología del Estado de Morelia y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México". Instituto de Geología UNAM Boletín 60. P.p. 236
- Fries, C. 1962. "Resumen de la Geología de la hoja Pachuca, Estados de Hidalgo y México, hoja Pachuca 14Q-c(11) esc. 1:100000". Instituto de Geología UNAM.
- Gobierno del Estado de Hidalgo. 2002. "Ordenamiento ecológico territorial Tula-Tepeji"



Gómez Tuena A. et al. 2007. "Igneous Petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt". Geological Society of America; Celebrating the Centenary of the Geological Society of Mexico. P.p. 129-181.

González de Vallejo L. et al. 2002. "Ingeniería Geológica". Editorial Pearson. Madrid, España.

Grass, I. y Wilson R. C. 1980. "Introducción a las ciencias de la Tierra". Editorial Reverté. P.p. 171-174.

Hubp, J. y coautores. 1985. "Las zonas más activas en el Cinturón Volcánico Transmexicano". Boletín del Instituto de Geofísica. Volumen 24, numero 1. P.p. 83-96.

Instituto de Geología UNAM. 2010. "Estudio hidrogeológico del municipio de Atitalaquia Hidalgo".

Legget, R. 1956. "Geología para ingenieros". American Journey Geology. Volumen 32. P.p 56-77.

Lister, M. 1864. "Comunicación presentada a la Royal Society". Journal of England. Inglaterra, Volume 13. P.p. 25-33.

Marín, S. y Aguayo, J. 1989. "Evolución geológica de la cuenca de México". Simposio sobre tópicos geológicos de la cuenca del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. P.p. 25-39.

Mooser, F. 1975. "Historia Geológica de la Cuenca de México". Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal. Tomo I. P.p. 7-38.

Ragan, D. 1973. "Structural Geology. An introduction to Geometrical Techniques" Ed. John Wiley and Sons. 2<sup>nd</sup> Edition. P.p. 208-209.

Sergerstrom, K. 1961. "Geología del Suroeste del Estado de Hidalgo y del Noreste del Estado de México". Boletín Asociación Mexicana de Geología. Volumen XIII, números 2 y 4. P.p. 147-168.

Soto Yañez E. y Lara Aréchiga J. 1989. "El subsuelo de la ciudad de Tula". Simposio sobre tópicos geológicos de la cuenca del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. P.p. 79-94.

Suter, M. et al. 1995. "The Acambay graben, active extension of the boundary between the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Southern Basin and Rang". Geological Society of America. Volume 107. P.p. 627-641.



## Universidad Nacional Autónoma de México



Suter, M. et al. 1996. “Macroseismic study of shallow earthquakes in the Central and Eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt”. Bulletin of the seismological Society of America. Volume 86. Numero 6. P.p. 1952-1963.

Tarback, E. y Lutgens F. 2005. “Ciencias de la tierra”. Editorial Pearson Prentice Hall. Madrid, España.

Telford W. M. y Geldart L.P. 1976. “Applied Geophysics”. Cambridge University Press

Verne, J. 1867. “Viaje al centro de la tierra”. Primera edición. Editorial Terramar. La Plata, Argentina.

[www.maps.google.com.mx](http://www.maps.google.com.mx)

[www.geoforum.com](http://www.geoforum.com)

[www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)

[www.ssn.unam.mx](http://www.ssn.unam.mx)



Universidad Nacional  
Autónoma de México



# ANEXO 1

## (Registros de campo)



LOCALIZACION: ESTE 474447.3410 NORTE 2218071.2460 ALTITUD 2104.2090 MTS.  
 SONDEO: SM-2 PERFORADOR: ERNESTO PEREZ GOMEZ N.A.F. \_\_\_\_\_  
 PROFUNDIDAD: 20.15 MTS EQUIPO DE PERFORACION: MOBILE DRILL B-80 COTA DE BROCAL: \_\_\_\_\_

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION N° DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTREO	CLASIFICACION DE CAMPO								COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA	
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	5"	OTRO	2 1/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R				
1	0.00	0.60	0.60	0.50	83.3	5	18	7							SPT	1	2								C	b	Limo poco arenoso
2	0.60	1.20	0.60	0.44	73.3	2	8	3							SPT	1	2								C	b	Limo poco arenoso
3	1.20	1.70	0.50	0.30	60.0	--	--	--							SH										C	b	Limo poco arenoso
4	1.70	2.30	0.60	0.45	75.0	8	25	19							SPT	1	2								C	b	Limo poco arenoso
5	2.30	2.90	0.60	0.40	66.7	15	34	7							SPT	1	2								C	b	Limo poco arenoso
6	2.90	3.50	0.60	0.35	58.3	4	17	11							SPT	1	2								C	b	Limo poco arenoso
7	3.50	3.90	0.40	0.19	47.5	--	--	--							SH	1									C	b	Limo
8	3.90	4.50	0.60	0.36	60.0	8	31	28							SPT	1									C	b	Limo
9	4.50	5.10	0.60	0.40	66.7	20	47	33							SPT	1									C	b	Limo
10	5.10	5.70	0.60	0.32	53.3	8	25	15							SPT	1									C	b	Limo
11	5.70	6.15	0.45	0.36	80.0	11	50/30								SPT	1									C	b	Limo
	6.15	6.30	0.15	--	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica
12	6.30	6.65	0.35	0.32	91.4	14	50/20								SPT	1									C	b	Limo
	6.65	6.90	0.25	--	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica
13	6.90	7.30	0.40	0.23	57.5	11	50/25								SPT	1									C	b	Limo
	7.30	7.50	0.20	--	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica
14	7.50	7.80	0.30	0.20	66.7	15	50/15								SPT	1									C	b	Limo
	7.80	8.10	0.30	--	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica
15	8.10	8.40	0.30	0.17	56.7	11	50/15								SPT	1									C	b	Limo
	8.40	8.70	0.30	--	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica
16	8.70	9.00	0.30	0.17	56.7	14	50/15								SPT	1									C	b	Limo

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR			
S	SHELBY	NQ	BARRIL NQ
R	ENTADA	NxL	BARRIL NxL
P	S.P.T.	D	DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
c	CAFÉ	n	OBSCURO
g	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R	NO RECUPERO

TABLA 15 REGISTRO DE CAMPO DE SM-2



LOCALIZACION: ESTE 474447.3410 NORTE 2218071.2460 ALTITUD 2104.2090 MTS.  
 SONDEO: SM-2 PERFORADOR: ERNESTO PEREZ GOMEZ N.A.F. \_\_\_\_\_  
 PROFUNDIDAD: 20.15 MTS EQUIPO DE PERFORACION: MOBILE DRILL B-80 COTA DE BROCAL: \_\_\_\_\_

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION N° DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTREO	CLASIFICACION DE CAMPO								COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA		
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	6"	OTRO	2 16/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R					
	9.00	9.30	0.30	--	--	--	--	--					✓	--									--	--	Avance con triconica			
17	9.30	9.90	0.60	0.28	46.7	10	27	20						SPT	1								C	b	Limo			
18	9.90	10.25	0.35	0.21	60.0	14	50/20							SPT	1									C	b	Limo		
	10.25	10.50	0.25	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica		
19	10.50	10.85	0.35	0.32	91.4	25	50/20							SPT	1									C	b	Limo		
	10.85	11.10	0.25	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica		
20	11.10	11.70	0.60	0.40	66.7	18	34	16						SPT	1									C	b	Limo		
21	11.70	11.95	0.25	0.18	72.0	28	50/10							SPT	1										C	n	Limo	
	11.95	12.30	0.35	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica		
22	12.30	12.55	0.25	0.12	48.0	32	50/10							SPT	1										C	n	Limo	
	12.55	12.90	0.35	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica		
23	12.90	13.20	0.30	0.22	73.3	33	50/15							SPT	1										C	n	Limo	
	13.20	13.50	0.30	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"		
24	13.50	13.77	0.27	0.16	59.3	30	50/12							SPT	1										C	n	Limo	
	13.77	14.10	0.33	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"		
25	14.10	14.40	0.30	0.22	73.3	--	--	--						SH	1										C	n	Limo	
26	14.40	14.75	0.35	0.20	57.1	26	50/20							SPT	1											C	n	Limo
	14.75	15.00	0.25	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"		
27	15.00	15.35	0.35	0.24	68.6	31	50/20							SPT	1											C	n	Limo
	15.35	15.60	0.25	--	--	--	--	--					✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"		
28	15.60	15.80	0.20	0.17	85.0	--	--	--						SH	1										C	n	Limo	

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR			
S	SHELBY	NQ	BARRIL NQ
R	VENTADA	NxL	BARRIL NxL
P	S.P.T.	D	DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
c	CAFÉ	n	OBSCURO
g	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R	NO RECUPERO

TABLA 16 REGISTRO DE CAMPO DE SM-2



LOCALIZACION: ESTE 474447.3410 NORTE 2218071.2460 ALTITUD 2104.2090 MTS.

SONDEO: SM-2  
PROFUNDIDAD: 20.15 MTS

PERFORADOR: ERNESTO PEREZ GOMEZ  
EQUIPO DE PERFORACION: MOBILE DRILL B-80

N.A.F. \_\_\_\_\_  
COTA DE BROCAL: \_\_\_\_\_

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION N° DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTREO	CLASIFICACION DE CAMPO								COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA		
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	6"	OTRO	2 15/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R					
29	15.80	16.40	0.60	0.32	53.3	9	20	9							SPT	1										C	n	Limo
30	16.40	17.00	0.60	0.28	46.7	8	27	10							SPT	1										C	n	Limo
31	17.00	17.25	0.25	0.23	92.0	30	50/10								SPT	1										C	n	Limo
	17.25	17.60	0.35	--	--	--	--	--						✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"	
32	17.60	17.88	0.28	0.27	96.4	25	50/13								SPT	1										C	n	Limo
	17.88	18.20	0.32	--	--	--	--	--						✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"	
33	18.20	18.45	0.25	0.22	88.0	33	50/10								SPT	1										C	n	Limo
	18.45	18.80	0.35	--	--	--	--	--						✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"	
34	18.80	19.05	0.25	0.23	92.0	28	50/10								SPT	1										C	n	Limo
	19.05	19.40	0.35	--	--	--	--	--						✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"	
35	19.40	19.65	0.25	0.21	84.0	30	50/10								SPT	1										C	n	Limo
	19.65	20.00	0.35	--	--	--	--	--						✓	--										--	--	Avance con triconica de 6"	
36	20.00	20.15	0.15	0.15	100.0	50/15									SPT	1										C	n	Limo

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR			
S	SHELBY	NQ	BARRIL NQ
R	ENTADY	NxL	BARRIL NxL
P	S.P.T.	D	DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
c	CAFÉ	n	OBSCURO
g	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R.	NO RECUPERO

TABLA 17 REGISTRO DE CAMPO DE SM-2



LOCALIZACION: ESTE472526.6007 NORTE 2219242.1050 ALTITUD 2090.5330 MTS.

SONDEO: SM-4

PERFORADOR: ERNESTO PEREZ GOMEZ

N.A.F. \_\_\_\_\_

PROFUNDIDAD: 20.05 MTS

EQUIPO DE PERFORACION: MOBILE DRILL B-80

COTA DE BROCAL: \_\_\_\_\_

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION N° DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTREO	CLASIFICACION DE CAMPO									COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	6"	OTRO	2 15/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R				
1	0.00	0.60	0.60	0.37	61.7	1	7	2							SPT	1									C	n	Limo
2	0.60	1.20	0.60	0.36	60.0	4	33	25							SPT	1									C	b	Limo
3	1.20	1.80	0.60	0.34	56.7	11	30	22							SPT	1									C	b	Limo
4	1.80	2.40	0.60	0.33	55.0	7	45	32							SPT	1									C	n	Limo
5	2.40	3.00	0.60	0.28	46.7	18	40	38							SPT	1									C	b	Limo
6	3.00	3.30	0.30	0.25	83.3	--	--	--							SH	1									C	b	Limo
7	3.30	3.90	0.60	0.31	51.7	8	31	32							SPT	1									C	n	Limo
8	3.90	4.25	0.35	0.30	85.7	12	50/20								SPT	1									C	n	Limo
	4.25	4.50	0.25	--	--	--	--	--							--										--	--	Avance con triconica
9	4.50	4.85	0.35	0.30	85.7	17	50/20								SPT	1									C	n	Limo
	4.85	5.10	0.25	--	--	--	--	--							--										--	--	Avance con triconica
10	5.10	5.40	0.30	0.28	93.3	22	50/15								SPT	1									C	n	Limo
	5.40	5.70	0.30	--	--	--	--	--							--										--	--	Avance con triconica
11	5.70	6.05	0.35	0.29	82.9	16	50/20								SPT	1									C	n	Limo
	6.05	6.30	0.25	--	--	--	--	--							--										--	--	Avance con triconica
12	6.30	6.65	0.35	0.30	85.7	14	50/20								SPT	1									C	n	Limo
	6.65	6.90	0.25	--	--	--	--	--							--										--	--	Avance con triconica
13	6.90	7.30	0.40	0.28	70.0	--	--	--							SH	1									C	n	Limo
14	7.30	7.70	0.40	0.30	75.0	12	50/25								SPT	1									C	n	Limo
	7.70	7.90	0.20	--	--	--	--	--							--										--	--	Avance con triconica de 6"
15	7.90	8.25	0.35	0.28	80.0	18	50/20								SPT	1									C	n	Limo

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR			
S	SHELBY	NQ	BARRIL NQ
R	ENTADA	NxL	BARRIL NxL
P	S.P.T.	D	DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
c	CAFÉ	n	OBSCURO
g	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R	NO RECUPERO

TABLA 18 REGISTRO DE CAMPO DE SM-4





LOCALIZACION: ESTE472526.6007 NORTE 2219242.1050 ALTITUD 2090.5330 MTS.

SONDEO: SM-4 PERFORADOR: ERNESTO PEREZ GOMEZ N.A.F. \_\_\_\_\_

PROFUNDIDAD: 20.05 MTS EQUIPO DE PERFORACION: MOBILE DRILL B-80 COTA DE BROCAL: \_\_\_\_\_

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION Nº DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTREO	CLASIFICACION DE CAMPO								COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	5"	OTRO	2 15/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R			
32	17.90	18.25	0.35	0.30	85.7	28	50/20							SPT	1									C	b	Limo
	18.25	18.50	0.25	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica de 6"
33	18.50	18.80	0.30	0.24	80.0	34	50/15							SPT	1									C	b	Limo
	18.80	19.10	0.30	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica de 6"
34	19.10	19.46	0.36	0.28	77.8	30	50/21							SPT	1									C	b	Limo
	19.46	19.70	0.24	--	--	--	--							✓	--									--	--	Avance con triconica de 6"
35	19.70	20.05	0.35	0.32	91.4	24	50/20							SPT	1									C	b	Limo

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR			
S	SHELBY	NQ	BARRIL NQ
R	ENTAD	NxL	BARRIL NxL
P	S.P.T.	D	DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
c	CAFÉ	n	OSCURO
g	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R	NO RECUPERO

TABLA 20 REGISTRO DE CAMPO DE SM-4



LOCALIZACION: ESTE 472752.8227 NORTE 2220905.7173 ALTITUD 2072.1790 MTS.

SONDEO: SM-10  
PROFUNDIDAD: 20.10 MTS

PERFORADOR: MANUEL OLVERA MOYA  
EQUIPO DE PERFORACION: LONGYEAR - 34

N.A.F. 9.5 MTS  
COTA DE BROCAL:

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION N° DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTREO	CLASIFICACION DE CAMPO								COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA		
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	6"	OTRO	2 15/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R					
1	0.00	0.60	0.60	0.40	66.7	5	13	5							SPT	1										C	n	Arcilla
2	0.60	1.40	0.80	0.47	58.8										SH	1		3								C	n	Arcilla arenosa
3	1.40	2.00	0.60	0.32	53.3	2	10	13							SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
4	2.00	2.60	0.60	0.25	41.7	10	30	17							SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
5	2.60	3.00	0.40	0.20	50.0	10	50/15								SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
	3.00	3.20	0.20	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°
6	3.20	3.55	0.35	0.19	54.3	20	50/20								SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
	3.55	3.80	0.25	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°
7	3.80	3.95	0.15	0.13	86.7	50/15									SPT		1	2		3						R	b	Limo arenoso con boleos
	3.95	4.40	0.45	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°
8	4.40	4.55	0.15	0.13	86.7	50/15									SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
	4.55	5.00	0.45	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°
9	5.00	5.15	0.15	0.13	86.7	50/15									SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
	5.15	5.60	0.45	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°
10	5.60	6.10	0.50	0.24	48.0										SH		1	2								R	b	Limo arenoso
11	6.10	6.40	0.30	0.15	50.0	20	50/15								SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
	6.40	6.70	0.30	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°
12	6.70	7.00	0.30	0.14	46.7	25	50/15								SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
	7.00	7.30	0.30	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°
13	7.30	7.45	0.15	0.10	66.7	50/15									SPT		1	2								R	b	Limo arenoso
	7.45	7.90	0.45	--	--	--	--	--							✓	--	--	--								--	--	Avance con triconica de 5°

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR		
S	SHELBY	NQ BARRIL NQ
R	ENTADA	NxL BARRIL NxL
P	S.P.T.	D DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
e	CAFÉ	n	OSCURO
n	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R	NO RECUPERO

TABLA 21 REGISTRO DE CAMPO DE SM-10



LOCALIZACION: ESTE 472752.8227 NORTE 2220905.7173 ALTITUD 2072.1790 MTS.

SONDEO: SM-10

PERFORADOR: MANUEL OLVERA MOYA

N.A.F. 9.5 MTS

PROFUNDIDAD: 20.10 MTS

EQUIPO DE PERFORACION: LONGYEAR - 34

COTA DE BROCAL:

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION N° DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTRO	CLASIFICACION DE CAMPO								COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	6"	OTRO	2 15/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R			
14	7.90	8.00	0.10	0.09	90.0	50/10								SPT	1	2								R	b	Limo arenoso
	8.00	8.50	0.50	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
15	8.50	9.10	0.60	0.27	45.0	20	45	35						SPT	1									G	b	Limo
16	9.10	9.70	0.60	0.34	56.7	25	40	33						SPT	1									G	b	Limo
17	9.70	10.00	0.30	0.15	50.0	muestra representativa								SH	1	3								C	b	Limo poco arenoso
18	10.00	10.30	0.30	0.18	60.0	20	50/15							SPT	1									C	b	Limo
	10.30	10.60	0.30	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
19	10.60	10.95	0.35	0.23	65.7	25	50/20							SPT	1									C	b	Limo
	10.95	11.20	0.25	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
20	11.20	11.35	0.15	0.15	100.0	50/15								SPT	1									C	b	Limo
	11.35	11.80	0.45	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
21	11.80	12.10	0.30	0.17	56.7	25	50/15							SPT	1									C	b	Limo
	12.10	12.40	0.30	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
22	12.40	12.70	0.30	0.18	60.0	20	50/15							SPT	1									C	b	Limo
	12.70	13.00	0.30	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
23	13.00	13.35	0.35	0.22	62.9	18	50/20							SPT	1									C	b	Limo
	13.35	13.60	0.25	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
24	13.60	13.95	0.35	0.15	42.9	20	50/20							SPT	1	3								R	b	Limo poco arenoso
	13.95	14.20	0.25	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"
25	14.20	14.50	0.30	0.15	50.0	28	50/15							SPT	1	3								R	b	Limo poco arenoso
	14.50	14.80	0.30	--		--	--							√	--									--	--	Avance con triconica de 5"

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR			
S	SHELBY	NQ	BARRIL NQ
R	ENTADA	NxL	BARRIL NxL
P	S.P.T.	D	DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
c	CAFÉ	n	OBSCURO
g	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R	NO RECUPERO

TABLA 22 REGISTRO DE CAMPO DE SM-10



LOCALIZACION: ESTE 472752.8227 NORTE 2220905.7173 ALTITUD 2072.1790 MTS.  
 SONDEO: SM-10 PERFORADOR: MANUEL OLVERA MOYA N.A.F. 9.5 MTS  
 PROFUNDIDAD: 20.10 MTS EQUIPO DE PERFORACION: LONGYEAR - 34 COTA DE BROCAL: \_\_\_\_\_

REGISTRO DE CAMPO PARA SONDEOS.

MTRA No.	PROFUNDIDAD (m)		AVANCE M	RECUPERACION		PENETRACION N° DE GOLPES			ADEME METALICO			AVANCE			TIPO DE MUESTREO	CLASIFICACION DE CAMPO								COLOR	TONO	CLASIFICACION GEOLOGICA		
	INICIAL	FINAL		(m)	%	15 cm	30 cm	15 cm	3"	6"	OTRO	2 15/16	4 1/2	OTRO		C	M	S	G	B	Pt	Re	R					
26	14.80	15.05	0.25	0.16	64.0	30	50/10							SPT	1	3								R	b	Limo poco arenoso		
	15.05	15.40	0.35	--	--	--	--						√	--										-	-	Avance con triconica de 5"		
27	15.40	15.55	0.15	0.15	100.0	50/15								SPT	1	3								R	b	Limo poco arenoso		
	15.55	16.00	0.45	--	--	--	--						√	--										--	--	Avance con triconica de 5"		
28	16.00	16.70	0.70	0.35	50.0									SH	1	3								R	b	Limo poco arenoso		
29	16.70	17.05	0.35	0.22	62.9	15	50/20							SPT	1	3									R	b	Limo poco arenoso	
	17.05	17.30	0.25	--	--	--	--						√	--											-	-	Avance con triconica de 5"	
30	17.30	17.60	0.30	0.20	66.7	20	50/15							SPT	1	3									R	b	Limo poco arenoso	
	17.60	17.90	0.30	--	--	--	--						√	--											-	-	Avance con triconica de 5"	
31	17.90	18.20	0.30	0.15	50.0	20	50/15							SPT	1	3									R	b	Limo poco arenoso	
	18.20	18.50	0.30	--	--	--	--						√	--											-	-	Avance con triconica de 5"	
32	18.50	19.20	0.70	0.34	48.6									SH	1	2									G	b	Limo arenoso	
33	19.20	19.50	0.30	0.16	53.3	15	50/15							SPT	1	2										G	b	Limo arenoso
	19.50	19.80	0.30	--	--	--	--						√	--											-	-	Avance con triconica de 5"	
34	19.80	20.10	0.30	0.17	56.7	20	50/15							SPT	1	2										G	b	Limo arenoso

CLASIFICACION DEL SUELO			
C	ARCILLA	B	BOLEOS
M	LIMO	Pt	TURBA
S	ARENA	Re	RELLENO
G	GRAVA	R	ROCA

MUESTREADOR			
S	SHELBY	NQ	BARRIL NQ
R	PENTAD	NxL	BARRIL NxL
P	S.P.T.	D	DENISON

COLOR			
V	VERDE	A	AMARILLO
R	ROJO	B	BLANCO
C	CAFE	N	NEGRO
G	GRIS		

TONO			
v	VERDOSO	a	AMARILLENTO
r	ROJIZO	b	CLARO
e	CAFÉ	n	OBSCURO
g	GRISACEO		

GRADO DE MATERIAL	
1	MATERIAL PREDOMINANTE
2	MATERIAL SECUNDARIO
3	MATERIAL COMPLEMENTARIO
N.R	NO RECUPERO

TABLA 23 REGISTRO DE CAMPO DE SM-10



Universidad Nacional  
Autónoma de México



# ANEXO 2

(Contenido de agua y  
descripción macroscópica)



## CONTENIDO DE AGUA

LOCALIZACION: TULA, HIDALGO

SONDEO : SM - 2

No MUESTRA	PROF.	PROF.	No. CAP.	W	Wh+WCAP	Ws+WCAP	Ws	Ww	HUMEDAD (%)	DESCRIPCION MACROSCOPICA
	INICIAL (m)	FINAL (m)		CAP. (gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)		
1	0.00	0.60	93	22.80	91.10	72.90	50.10	18.20	36.3	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR BEIGE
2	0.60	1.20	34	20.90	136.40	111.70	90.80	24.70	27.2	LIMO ARENOSO CON ARENAS GRUESAS COLOR CAFÉ CLARO
3 SH	1.20	1.70	64	20.91	179.44	146.84	125.93	32.60	25.9	ARENA DE GRUESA A MEDIA POCO LIMOSA, COLOR CAFÉ
4	1.70	2.30	2	21.90	107.50	88.50	66.60	19.00	28.5	LIMO ARENOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ
5	2.30	2.90	36	22.50	110.00	92.60	70.10	17.40	24.8	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR BEIGE
6	2.90	3.50	35	21.40	126.00	104.60	83.20	21.40	25.7	LIMO ARENOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ CLARO
7 SH	3.50	3.90	6	25.40	173.80	147.20	121.80	26.60	21.8	LIMO ARCILLOSO CON ARENA CAFÉ
8	3.90	4.50	104	20.20	96.50	80.20	60.00	16.30	27.2	LIMO ARCILLOSO CON LIGERAS ARENAS FINAS COLOR BEIGE
9	4.50	5.10	13	22.10	130.90	106.20	84.10	24.70	29.4	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ CLARO
10	5.10	5.70	55	21.30	109.00	89.10	67.80	19.90	29.4	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR BEIGE
11	5.70	6.15	46	20.90	107.60	90.80	69.90	16.80	24.0	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS CAFÉ CLARO
12	6.30	6.65	56	21.60	129.60	108.60	87.00	21.00	24.1	LIMO ARENOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ OSCURO
13	6.90	7.30	33	21.50	114.00	90.50	69.00	23.50	34.1	LIMO ARCILLOSO CON LIGERAS ARENAS FINAS COLOR BEIGE
14	7.50	7.80	45	21.90	113.70	92.40	70.50	21.30	30.2	LIMO ARCILLOSO CON GRAVILLA GRUESA COLOR CAFÉ OSCURO
15	8.10	8.40	85	21.20	105.10	85.90	64.70	19.20	29.7	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ OSCURO
16	8.20	9.00	73	20.70	74.90	63.10	42.40	11.80	27.8	LIMO ARCILLOSO COLOR CAFÉ CLARO
17	9.30	9.90	84	22.30	114.50	101.20	78.90	13.30	16.9	LIMO ARCILLOSO CON GRAVILLA GRUESA COLOR CAFÉ CLARO
18	9.90	10.25	96	22.40	89.10	76.40	54.00	12.70	23.5	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ CLARO
19	10.50	10.85	47	20.90	109.10	90.30	69.40	18.80	27.1	LIMO ARCILLOSO COLOR CAFÉ CLARO
20	11.10	11.70	66	21.60	104.30	92.20	70.60	12.10	17.1	LIMO ARCILLOSO CON GRAVILLA DE MEDIA COLOR CAFÉ CLARO
21	11.70	11.95	26	21.20	102.10	88.70	67.50	13.40	19.9	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ ROJIZO
22	12.30	12.55	39	21.90	103.70	88.80	66.90	14.90	22.3	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS Y BRUMOS CONSOLIDADOS COLOR CAFÉ ROJIZO
23	12.90	13.20	95	23.00	109.30	92.00	69.00	17.30	25.1	LIMO ARCILLOSOS COLOR CAFÉ CLARO
24	13.50	13.77	83	21.50	91.60	79.50	58.00	12.10	20.9	LIMO ARCILLOSO CON ARENAS FINAS COLOR CAFÉ CLARO

**TABLA 24** CONTENIDO DE AGUA Y DESCRIPCIÓN MAROSCÓPICA SM-2



## CONTENIDO DE AGUA

LOCALIZACION: TULA, HIDALGO

SONDEO: SM - 4

No MUESTRA	PROF. INICIAL (m)	PROF. FINAL (m)	No. CAP.	W CAP. (gr)	Wt+WCAP (gr)	Ws+WCAP (gr)	Ws (gr)	Ww (gr)	HUMEDAD (%)	DESCRIPCION MACROSCOPICA
1	0.00	0.60	105	21.60	114.50	97.70	76.10	16.80	22.1	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
2	0.60	1.20	24	23.80	103.90	89.00	65.20	14.90	22.9	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
3	1.20	1.80	63	26.00	94.60	81.30	55.30	13.30	24.1	LIMO ARCILLOSO CON ARENA FINA, COLOR CAFÉ OSCURO
4	1.80	2.40	111	21.60	107.50	82.10	60.50	25.40	42.0	LIMO ARCILLOSO CON ARENA FINA, COLOR CAFÉ ROJIZO
5	2.40	3.00	23	22.10	111.80	96.10	74.00	15.70	21.2	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
6 SH	3.00	3.30	117	21.50	136.50	110.00	88.50	26.50	29.9	LIMO ARCILLOSO CON ARENA DE MEDIAA FINA, CAFÉ CLARO
7	3.30	3.90	113	21.90	109.90	89.50	67.60	20.40	30.2	LIMO ARCILLOSO CON ARENA FINA, COLOR CAFÉ OSCURO
8	3.90	4.25	38	21.50	126.90	106.40	84.90	20.50	24.1	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
9	4.50	4.85	16	21.00	108.30	85.30	64.30	23.00	35.8	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
10	5.10	5.40	104	20.50	95.90	79.10	58.60	16.80	28.7	LIMO ARCILLOSO CON ARENA, COLOR CAFÉ CLARO
11	5.70	6.05	74	22.80	105.10	82.70	59.90	22.40	37.4	LIMO ARCILLOSO CON ARENA, COLOR CAFÉ OSCURO
12	6.30	6.65	64	20.90	110.10	80.50	59.60	29.60	49.7	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ OSCURO
13 SH	6.90	7.30	11	22.53	154.11	123.90	101.37	30.21	29.8	ARCILLA LIMOSA
14	7.30	7.70	30	21.20	93.80	75.40	54.20	18.40	33.9	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
15	7.90	8.25	82	22.10	118.30	88.80	66.70	29.50	44.2	LIMO ARCILLOSO CON ARENA FINA, COLOR CAFÉ OSCURO
16 SH	8.50	8.90	18	22.30	159.90	131.01	108.71	28.89	26.6	LIMO ARCILLOSO, CAFÉ CLARO
17	8.90	9.50	108	23.10	102.00	85.40	62.30	16.60	26.6	LIMO ARCILLOSO CON ARENA FINA, COLOR CAFÉ CLARO
18	9.50	10.10	77	20.20	112.40	92.70	72.50	19.70	27.2	LIMO ARENOSO CON BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
19 SH	10.10	10.50	40	23.58	167.85	130.44	106.86	37.41	35.0	ARENA MEDIA A FINA, POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO
20	10.50	11.10	118	22.60	98.60	82.90	60.30	15.70	26.0	LIMO ARCILLOSO CON ARENA FINA, COLOR CAFÉ CLARO
21	11.10	11.70	109	21.40	96.40	79.80	58.40	16.60	28.4	LIMO ARCILLOSO CON ARENA, COLOR CAFÉ CLARO
22	11.70	12.30	55	21.50	110.80	92.80	71.30	18.00	25.2	LIMO ARCILLOSO CON ARENA Y BRUMOS, COLOR CAFÉ CLARO
23	12.30	12.90	43	21.50	97.00	77.60	56.10	19.40	34.6	LIMO ARCILLOSO, COLOR CAFÉ CLARO

TABLA 26 CONTENIDO DE AGUA Y DESCRIPCIÓN MAROSCÓPICA SM-4







CONTENIDO DE AGUA

LOCALIZACION: TULA, HIDALGO

SONDEO : SM - 10

No MUESTRA	PROF. INICIAL (m)	PROF. FINAL (m)	No. CAP.	W CAP. (gr)	Wh+WCAP (gr)	Ws+WCAP (gr)	Ws (gr)	Ww (gr)	HUMEDAD (%)	DESCRIPCION MACROSCOPICA
1	0.00	0.60	61	21.29	130.50	103.31	82.02	27.19	33.15	ARCILLA CON MATERIA ORGANICA NEGRA
2SH	0.60	1.40	24	22.8	185.05	143.96	121.16	41.09	33.91	ARCILLA LIMOSA CAFÉ OBSCURO
3	1.40	2.00	20	20.42	161.98	120.07	99.65	41.91	42.06	GRAVILLA CON ARENA MEDIA, LIMO ARCILLOSO ,CAFÉ CLARO
4	2.00	2.60	41	26.66	99.03	85.36	58.70	13.67	23.29	ARENA MEDIA-FINA,POCO LIMOSA CAFÉ ROJIZO
5	2.60	3.00	90	22.35	119.62	112.20	89.85	7.42	8.26	ARENA DE MEDIA-FINA, ,POCO LIMOSA CAFÉ ROJIZO
6	3.20	3.55	19	22.94	120.09	97.03	74.09	23.06	31.12	ARENA DE GRUESA A MEDIA, POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO
7	3.80	3.95	52	22.45	70.58	59.94	37.49	10.64	28.38	ARENA DE GRUESA A MEDIA, POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO
8	4.40	4.55	49	24.25	118.24	91.73	67.48	26.51	39.29	ARENA DE GRUESA A MEDIA, POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO
9	5.00	5.15	59	35.79	119.63	96.11	60.32	23.52	38.99	ARENA FINA, POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO
10SH	5.60	6.10	45	21.95	158.16	128.67	106.72	29.49	27.6	LIMO POCO ARCILLOSO CON ARENA DE MEDIA-FINA, CAFÉ CLARO
11	6.10	6.40	57	21.60	110.29	88.97	67.37	21.32	31.6	ARENA DE GRUESA A MEDIA,POCO LIMOSA CAFÉ ROJIZO
12	6.70	7.00	26	21.36	123.19	100.29	78.93	22.90	29.0	LIMO ARCILLOSO CON ARENA MEDIA, CAFÉ
13	7.30	7.45	70	22.06	90.33	76.75	54.69	13.58	24.8	ARENA MEDIA, POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO
14	7.90	8.00	71	22.13	76.33	65.99	43.86	10.34	23.6	ARENA MEDIA, POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO
15	8.50	9.10	10	23.02	149.83	123.58	100.56	26.25	26.1	ARENA DE GRUESA A MEDIA CON GRAVILLA, POCO LIMOSA, CAFÉ CLARO
16	9.10	9.70	78	24.55	91.25	71.07	46.52	20.18	43.4	LIMO ARENOSO , CAFE CLARO
17SH	9.70	10.00	21	23.36	126.04	95.49	72.13	30.55	42.4	LIMO ARENOSO , CAFE CLARO CON GRAVILLA
18	10.00	10.30	14	21.22	128.88	96.20	74.98	32.68	43.6	ARCILLA LIMOSA, ARENA GRUESA, CAFÉ CLARO
19	10.60	10.95	99	21.83	99.56	77.20	55.37	22.36	40.4	ARCILLA LIMOSA, ARENA GRUESA, CAFÉ CLARO
20	11.20	10.35	55	21.48	88.19	68.16	46.68	20.03	42.9	ARENA DE GRUESA A MEDIA, POCO LIMOSA, CAFÉ OBSCURO
21	11.80	11.10	12	22.05	112.27	83.63	61.58	28.64	46.5	ARENA FINA POCO LIMOSA, CAFÉ ROJIZO OBSCURO
22	12.40	12.70	23	22.14	86.45	70.87	48.73	15.58	32.0	ARENA FINA POCO LIMOSA CON GRAVILLA, CAFÉ ROJIZO OBSCURO
23	13.00	13.35	45	21.97	109.82	87.66	65.69	22.16	33.7	ARENA FINA POCO LIMOSA,CAFÉ OBSCURO
24	13.60	13.95	98	22.46	95.41	76.80	54.34	18.61	34.2	ARENA DE MEDIA A FINA CON GRAVILLA , CAFÉ AMARILLENTO

TABLA 28 CONTENIDO DE AGUA Y DESCRIPCIÓN MAROSCÓPICA SM-10





Universidad Nacional  
Autónoma de México



# ANEXO 3

## (Peso Específico Relativo de Sólidos Ss)



**PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS**

LOCALIZACION: REFINERIA TULA, HIDALGO

SONDEO: SM - 2

MUESTRA	PROFUNDIDAD m		No. MATRAZ	TEMPERATURA (GRADOS)	MATRAZ MÁS AGUA (gr)	PESO SUELO MÁS MATRAZ +AGUA (gr)	No. CAPSULA	PESO CAPSULA (gr)	PESO CAPSULA +MUESTRA SECA (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	Ss (-)
	INICIAL	FINAL									
3	1.20	1.70	3	20.00	688.80	724.10	226	796.90	859.00	62.10	2.335
7	3.50	3.90	4	20.0	691.55	755.90	103	424.60	528.00	103.40	2.648
25	14.10	14.40	14	20.0	680.90	711.10	2	533.10	582.3	49.20	2.589
28	15.60	15.80	15	20.0	684.96	725.40	2	566.50	635.6	69.10	2.411

TABLA 30 PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SÓLIDOS SM-2

**PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS**

LOCALIZACION: REFINERIA TULA, HIDALGO

FECHA: 29-mar-10

SONDEO: SM - 4

MUESTRA	PROFUNDIDAD m		No. MATRAZ	TEMPERATURA (GRADOS)	MATRAZ MÁS AGUA (gr)	PESO SUELO MÁS MATRAZ +AGUA (gr)	No. CAPSULA	PESO CAPSULA (gr)	PESO CAPSULA +MUESTRA SECA (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	Ss (-)
	INICIAL	FINAL									
6	3.00	3.30	4	22.0	682.44	724.50	242	427.90	497.90	70.00	2.505
13	6.90	7.30	5	21.0	688.40	729.80	226	419.90	487.1	67.20	2.605
16	8.50	8.90	10	21.0	686.08	743.60	150	574.50	668.70	94.20	2.568
19	10.10	10.50	13	21.0	679.44	779.10	102	428.00	588.2	160.20	2.646
24	12.90	13.70	15	25.3	686.14	771.9	33	834.80	973.8	139.00	2.611

TABLA 31 PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SÓLIDOS SM-4

**PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS**

LOCALIZACION: REFINERIA TULA, HIDALGO

SONDEO: SM - 10

MUESTRA	PROFUNDIDAD m		No. MATRAZ	TEMPERATURA (GRADOS)	MATRAZ MÁS AGUA (gr)	PESO SUELO MÁS MATRAZ +AGUA (gr)	No. CAPSULA	PESO CAPSULA (gr)	PESO CAPSULA +MUESTRA SECA (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	Ss (-)
	INICIAL	FINAL									
2	0.60	1.40	4	39.00	615.3	715.6	246	582.8	742.6	159.80	2.686
10	5.60	6.10	10	36.0	678.27	734.30	2012	808.40	895.90	87.50	2.780
28	16.00	16.70	13	35.0	676.43	758.10	2012	808.50	938.90	130.40	2.676
32	18.50	19.20	15	32.0	681.30	764.00	100	427.90	568.90	141.00	2.419

TABLA 32 PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SÓLIDOS SM-10



Universidad Nacional  
Autónoma de México



# ANEXO 4

## (Análisis Granulométrico y Límites de Consistencia)



**ANALISIS GRANULOMETRICO**

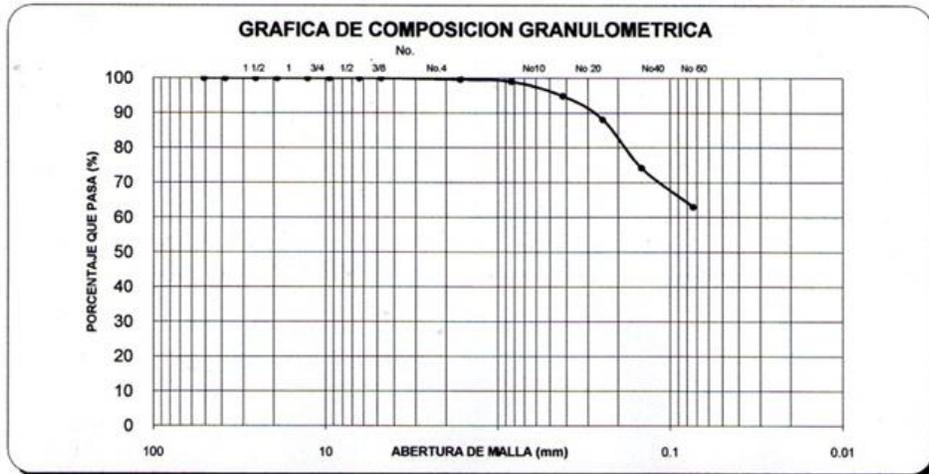
LOCALIZACION: TULA HIDALGO MUESTRA: 28  
 PROFUNDIDAD: 15.60-15.80 m PESO DE LA MUESTRA: 118.33 gr  
 SONDEO: SM - 2

COMPOSICION DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA No. 4

No MALLA	ABERTURA (mm)	PESO TARA (gr)	PESO SUELO RETENIDO (gr)	PORCENTALE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2	50.8	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2	38.1	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00
1	25.4	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.05	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2	12.7	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.53	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00
1/4	6.35	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.74	21.28	0.00	0.00	0.00	100.00

COMPOSICION DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA No. 4

No MALLA	ABERTURA (mm)	PESO TARA (gr)	PESO SUELO RETENIDO (gr)	PORCENTALE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
10	1.651	21.28	0.45	0.38	0.38	99.62
20	0.833	21.28	0.67	0.57	0.95	99.05
40	0.420	21.28	4.92	4.16	5.10	94.90
60	0.246	21.28	8.02	6.78	11.88	88.12
100	0.147	21.28	16.47	13.92	25.80	74.20
200	0.074	21.28	13.25	11.20	37.00	63.00
PASA MALLA 200			74.55	63.00	100.00	0.00



D<sub>10</sub>: 0 GRAVA (%): 0.00  
 D<sub>30</sub>: 0 ARENA (%): 37.00  
 D<sub>60</sub>: 0 FINOS (%): 63.00  
 Cu: \_\_\_\_\_  
 C<sub>c</sub>: \_\_\_\_\_

**TABLA 33** ANÁLISIS GRANULOMETRICO SM-2



**ÍNDICE DE CONSISTENCIA**

TULA, HIDALGO SM - 2 28  
LOCALIZACION SONDEO MUESTRA

**LIMITE LIQUIDO**

CÁPSULA No.	40	35	69	66	
PESO DE LA CÁPSULA (gr.)	7.65	7.70	7.71	7.95	
No. DE GOLPES	45	32	18	8	
PESO MUESTRA HÚMEDA + CÁPSULA (gr.)	30.26	30.71	36.55	41.03	
PESO MUESTRA SECA + CÁPSULA (gr.)	25.47	25.73	30.01	33.25	
PESO DEL AGUA (gr.)	4.79	4.98	6.54	7.78	
PESO DEL SUELO SECO (gr.)	17.82	18.03	22.30	25.30	
CONTENIDO DE AGUA	26.88	27.62	29.33	30.75	

**LIMITE PLÁSTICO**

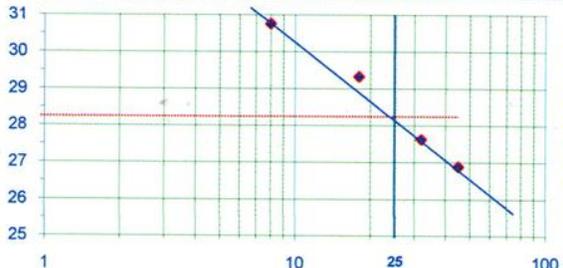
CÁPSULA No.	34
PESO DE LA CÁPSULA (gr.)	8.05
PESO MUESTRA HÚMEDA + CÁPSULA (gr.)	19.68
PESO MUESTRA SECA + CÁPSULA (gr.)	17.73
PESO DEL AGUA (gr.)	1.95
PESO DEL SUELO SECO (gr.)	9.68
CONTENIDO DE AGUA	20.14

**LIMITE LIQUIDO**  
28.3

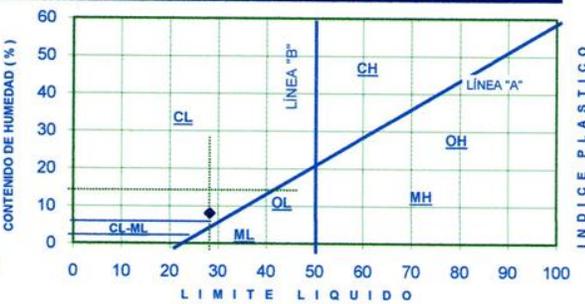
**LIMITE PLÁSTICO**  
20.1

**INDICE DE PLASTICIDAD**  
8.2

**GRAFICA DE LIMITE LIQUIDO**



**CARTA DE PLASTICIDAD**



**CONTRACCIÓN LINEAL**

LECTURA INICIAL (mm) =
LECTURA FINAL (mm) =
% DE CONTRACCIÓN. LINEAL

**CLASIFICACIÓN S.U.C.S.**  
**CL**

**OBSERVACIONES:**  
ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD

TABLA 34 LÍMITES DE CONSISTENCIA SM-2



### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

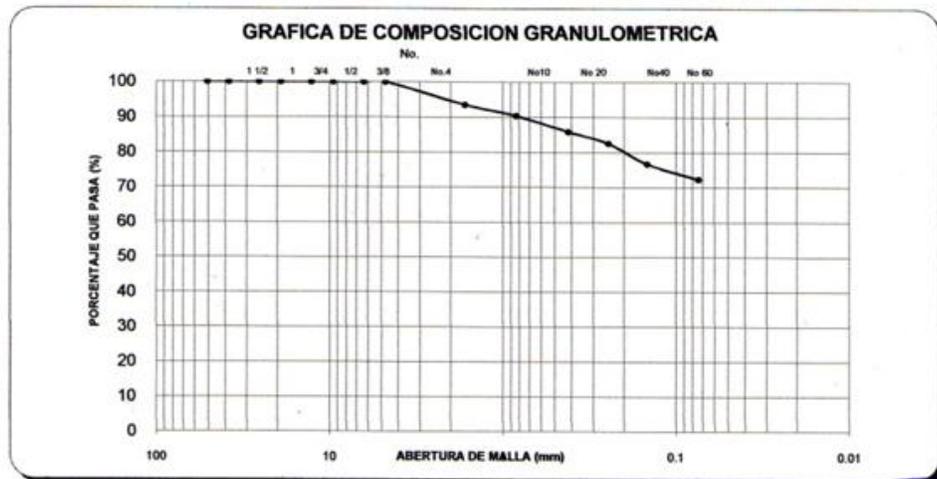
LOCALIZACIÓN: TULA, HIDALGO MUESTRA: 6  
 PROFUNDIDAD: 3.00-3.30 m PESO DE LA MUESTRA: 88.5 gr  
 SONDEO: SM - 4

COMPOSICION DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA No. 4

No MALLA	ABERTURA (mm)	PESO TARA (gr)	PESO SUELO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2	50.8	17.72	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2	38.1	17.72	0	0.00	0.00	100.00
1	25.4	17.72	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.05	17.72	0	0.00	0.00	100.00
1/2	12.7	17.72	0	0.00	0.00	100.00
3/8	9.53	17.72	0.00	0.00	0.00	100.00
1/4	6.35	17.72	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.74	17.72	0.00	0.00	0.00	100.00

COMPOSICION DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA No. 4

No MALLA	ABERTURA (mm)	PESO TARA (gr)	PESO SUELO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
10	1.651	17.72	5.72	6.46	6.46	93.54
20	0.833	17.72	2.78	3.14	9.60	90.40
40	0.420	17.72	4.01	4.53	14.14	85.86
60	0.246	17.72	2.93	3.31	17.45	82.55
100	0.147	17.72	5.17	5.84	23.29	76.71
200	0.074	17.72	3.92	4.43	27.72	72.28
PASA MALLA 200			63.97	72.28	100.00	0.00



D<sub>10</sub>: 0 GRAVA (%): 0.00  
 D<sub>30</sub>: 0 ARENA (%): 27.72  
 D<sub>60</sub>: 0 FINOS (%): 72.28  
 C<sub>u</sub>:  
 C<sub>c</sub>:

TABLA 35 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SM-4



**ÍNDICE DE CONSISTENCIA**

TULA, HIDALGO SM - 4 6  
 LOCALIZACION SONDEO MUESTRA

**LIMITE LIQUIDO**

CÁPSULA No.	20	15	32	61	
PESO DE LA CÁPSULA (gr.)	8.21	7.62	7.84	6.92	
No. DE GOLPES	45	28	18	7	
PESO MUESTRA HÚMEDA + CÁPSULA (gr.)	26.60	28.18	29.82	34.81	
PESO MUESTRA SECA + CÁPSULA (gr.)	21.49	22.23	23.23	25.84	
PESO DEL AGUA (gr.)	5.11	5.95	6.59	8.97	
PESO DEL SUELO SECO (gr.)	13.28	14.61	15.39	18.92	
CONTENIDO DE AGUA	38.48	40.73	42.82	47.41	

**LIMITE PLÁSTICO**

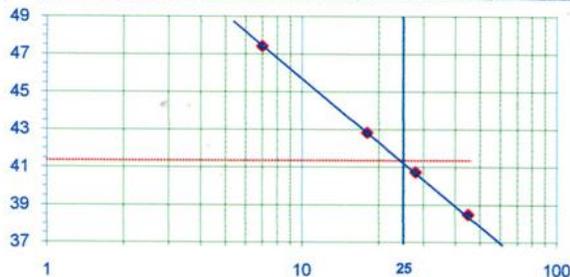
CÁPSULA No.	14
PESO DE LA CÁPSULA (gr.)	7.41
PESO MUESTRA HÚMEDA + CÁPSULA (gr.)	17.41
PESO MUESTRA SECA + CÁPSULA (gr.)	15.81
PESO DEL AGUA (gr.)	1.60
PESO DEL SUELO SECO (gr.)	8.40
CONTENIDO DE AGUA	19.05

**LIMITE LIQUIDO**  
41.2

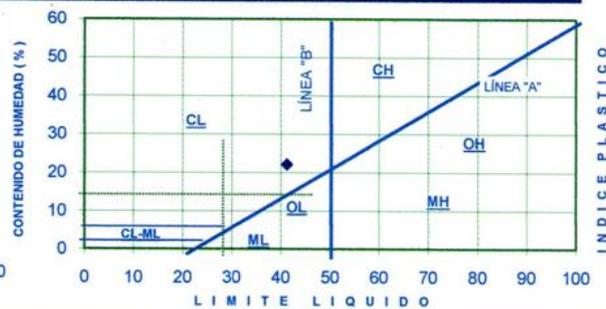
**LIMITE PLASTICO**  
19.0

**INDICE DE PLASTICIDAD**  
22.2

**GRAFICA DE LIMITE LIQUIDO**



**CARTA DE PLASTICIDAD**



<b>CONTRACCIÓN LINEAL</b>
LECTURA INICIAL (mm) =
LECTURA FINAL (mm) =
% DE CONTRACCIÓN. LINEAL

<b>CLASIFICACIÓN S.U.C.S.</b>
<b>CL</b>

**OBSERVACIONES:**  
ARCILLA DE MEDIANA PLASTICIDAD

TABLA 36 LÍMITES DE CONSISTENCIA SM-4



### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

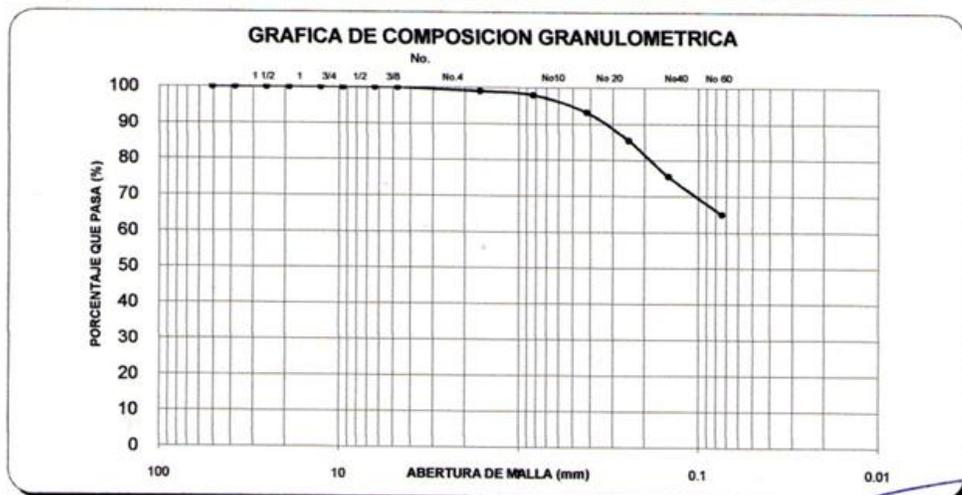
LOCALIZACIÓN: TULA, HIDALGO MUESTRA: 28  
 PROFUNDIDAD: 16.00-16.70 m PESO DE LA MUESTRA: 104.7 gr  
 SONDEO: SM-10

COMPOSICION DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA No. 4

No MALLA	ABERTURA (mm)	PESO TARA (gr)	PESO SUELO RETENIDO (gr)	PORCENTALE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2	50.8	21.5	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2	38.1	21.5	0	0.00	0.00	100.00
1	25.4	21.5	0	0.00	0.00	100.00
3/4	19.05	21.5	0	0.00	0.00	100.00
1/2	12.7	21.5	0	0.00	0.00	100.00
3/8	9.53	21.5	0	0.00	0.00	100.00
1/4	6.35	21.5	0	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.74	21.5	0	0.00	0.00	100.00

COMPOSICION DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA No. 4

No MALLA	ABERTURA (mm)	PESO TARA (gr)	PESO SUELO RETENIDO (gr)	PORCENTALE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
10	1.651	21.5	1.00	0.96	0.96	99.04
20	0.833	21.5	1.10	1.05	2.01	97.99
40	0.420	21.5	5.00	4.78	6.78	93.22
60	0.246	21.5	8.10	7.74	14.52	85.48
100	0.147	21.5	10.40	9.93	24.45	75.55
200	0.074	21.5	11.00	10.51	34.96	65.04
PASA MALLA 200			36.60	34.96		65.04



D<sub>10</sub>: \_\_\_\_\_ GRAVA (%): 0.00  
 D<sub>30</sub>: \_\_\_\_\_ ARENA (%): 34.96  
 D<sub>60</sub>: \_\_\_\_\_ FINOS (%): 65.04  
 C<sub>u</sub>: \_\_\_\_\_  
 C<sub>c</sub>: \_\_\_\_\_

TABLA 37 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SM-10



**ÍNDICE DE CONSISTENCIA**

TULA, HIDALGO  
LOCALIZACION

SM - 10  
SONDEO

28  
MUESTRA

**LIMITE LIQUIDO**

CÁPSULA No.	8	24	23	60	
PESO DE LA CÁPSULA (gr.)	7.52	7.59	7.94	7.61	
No. DE GOLPES	45	28	14	7	
PESO MUESTRA HÚMEDA + CÁPSULA (gr.)	25.64	26.69	28.54	31.69	
PESO MUESTRA SECA + CÁPSULA (gr.)	20.32	20.95	22.15	24.00	
PESO DEL AGUA (gr.)	5.32	5.74	6.39	7.69	
PESO DEL SUELO SECO (gr.)	12.80	13.36	14.21	16.39	
CONTENIDO DE AGUA	41.56	42.96	44.97	46.92	

**LIMITE PLÁSTICO**

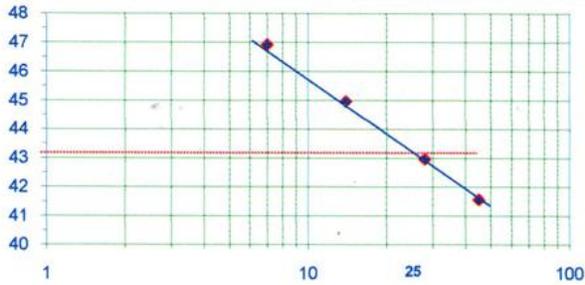
CÁPSULA No.	16	
PESO DE LA CÁPSULA (gr.)	7.32	
PESO MUESTRA HÚMEDA + CÁPSULA (gr.)	17.55	
PESO MUESTRA SECA + CÁPSULA (gr.)	16.54	
PESO DEL AGUA (gr.)	1.01	
PESO DEL SUELO SECO (gr.)	9.22	
CONTENIDO DE AGUA	10.95	

**LIMITE LIQUIDO**  
43.1

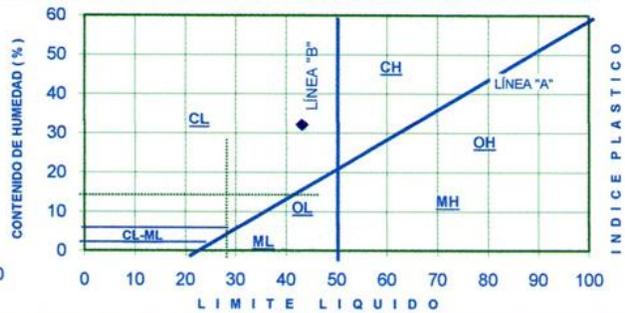
**LIMITE PLASTICO**  
11.0

**INDICE DE PLASTICIDAD**  
32.1

**GRAFICA DE LIMITE LIQUIDO**



**CARTA DE PLASTICIDAD**



**CONTRACCIÓN LINEAL**

LECTURA INICIAL (mm) =
LECTURA FINAL (mm) =
% DE CONTRACCIÓN. LINEAL

**CLASIFICACIÓN S.U.C.S.**

**CL**

**OBSERVACIONES:**

ARCILLA INORGANICA DE BAJA PLASTICIDAD

TABLA 38 LÍMITES DE CONSISTENCIA SM-10



Universidad Nacional  
Autónoma de México



# ANEXO 5

## (Peso volumétrico)



**PESO VOLUMETRICO NATURAL**

LOCALIZACION: REFINERIA, TULA HIDALGO

SONDEO: SM - 2

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA			P E S O S				V O L U M E N E S			
No. DE MUESTRA	PROF INICIAL	PROF FINAL	PESO ESPECIFICO EN AIRE	PESO ESPECIFICO EN AIRE + PARAFINA	PESO ESPECIFICO EN AGUA	PESO PARAFINA	VOL. DE ESP. CON PARAFINA	DENSIDAD DE PARAFINA	VOLUMEN DE ESPECIMEN	PESO VOLUMETRICO
	m	m	gr	gr	gr	gr	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
3	1.20	1.70	69.55	73.70	10.09	4.15	63.61	4.72	58.89	1.181
7	3.50	3.90	59.00	63.80	10.03	4.80	53.77	5.46	48.31	1.221
25	14.10	14.40	45.90	53.22	16.50	7.32	36.72	8.33	28.39	1.617
28	15.60	15.80	65.40	71.10	12.50	5.70	58.60	6.49	52.11	1.255

TABLA 39 PESO VOLUMETRICO SM-2

**PESO VOLUMETRICO NATURAL**

LOCALIZACION: REFINERIA, TULA HIDALGO

SONDEO: SM - 4

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA			P E S O S				V O L U M E N E S			
No. DE MUESTRA	PROF INICIAL	PROF FINAL	PESO ESPECIFICO EN AIRE	PESO ESPECIFICO EN AIRE + PARAFINA	PESO ESPECIFICO EN AGUA	PESO PARAFINA	VOL. DE ESP. CON PARAFINA	DENSIDAD DE PARAFINA	VOLUMEN DE ESPECIMEN	PESO VOLUMETRICO
	m	m	gr	gr	gr	gr	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
6	3.00	3.30	55.21	60.00	8.60	4.79	51.40	5.45	45.95	1.202
13	6.90	7.30	56.70	58.83	24.50	2.13	34.33	2.42	31.91	1.777
16	8.50	8.90	69.20	71.80	30.06	2.60	41.74	2.96	38.78	1.784
19	10.10	10.50	38.30	41.90	10.09	3.60	31.81	4.10	27.71	1.382
24	12.90	13.70	109.53	109.80	50.80	0.27	59.00	0.31	58.69	1.866

TABLA 40 PESO VOLUMETRICO SM-4

**PESO VOLUMETRICO NATURAL**

LOCALIZACION: REFINERIA, TULA HIDALGO

SONDEO: SM - 10

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA			P E S O S				V O L U M E N E S			
No. DE MUESTRA	PROF INICIAL	PROF FINAL	PESO ESPECIFICO EN AIRE	PESO ESPECIFICO EN AIRE + PARAFINA	PESO ESPECIFICO EN AGUA	PESO PARAFINA	VOL. DE ESP. CON PARAFINA	DENSIDAD DE PARAFINA	VOLUMEN DE ESPECIMEN	PESO VOLUMETRICO
	m	m	gr	gr	gr	gr	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
2	0.60	1.40	56.84	58.60	23.70	1.96	34.90	2.23	32.67	1.734
10	5.60	6.10	105.30	106.85	48.70	1.55	58.15	1.76	56.39	1.867
28	16.00	16.70	69.61	71.40	28.30	1.79	43.10	2.04	41.06	1.695
32	18.50	19.20	83.10	83.70	3.60	0.60	80.10	0.68	79.42	1.046

TABLA 41 PESO VOLUMETRICO SM-10



Universidad Nacional  
Autónoma de México



# ANEXO 6

## (Prueba de Compresión Simple)



SONDEO: SM - 2  
MUESTRA: 28  
PROF: 15.60 - 15.80 m

LOCALIZACION: TULA, HIDALGO  
ENSAYE: COMPRESION SIMPLE

DESCRIPCION:

MEDIDAS DE LA MUESTRA

Ds= 3.78 cm	As= 11.22 cm <sup>2</sup>	Wm= 157.46 gr
Dm= 3.76 cm	Ac= 11.10 cm <sup>2</sup>	Vm= 92.35 cm <sup>3</sup>
Di= 3.75 cm	Ai= 11.04 cm <sup>2</sup>	gama= 1.705 ton/m <sup>3</sup>
hi= 8.31 cm	Am= (As+4Ac+ Ai) = 11.114 cm <sup>2</sup>	

CONSTANTE DE ANILLO: 0.182

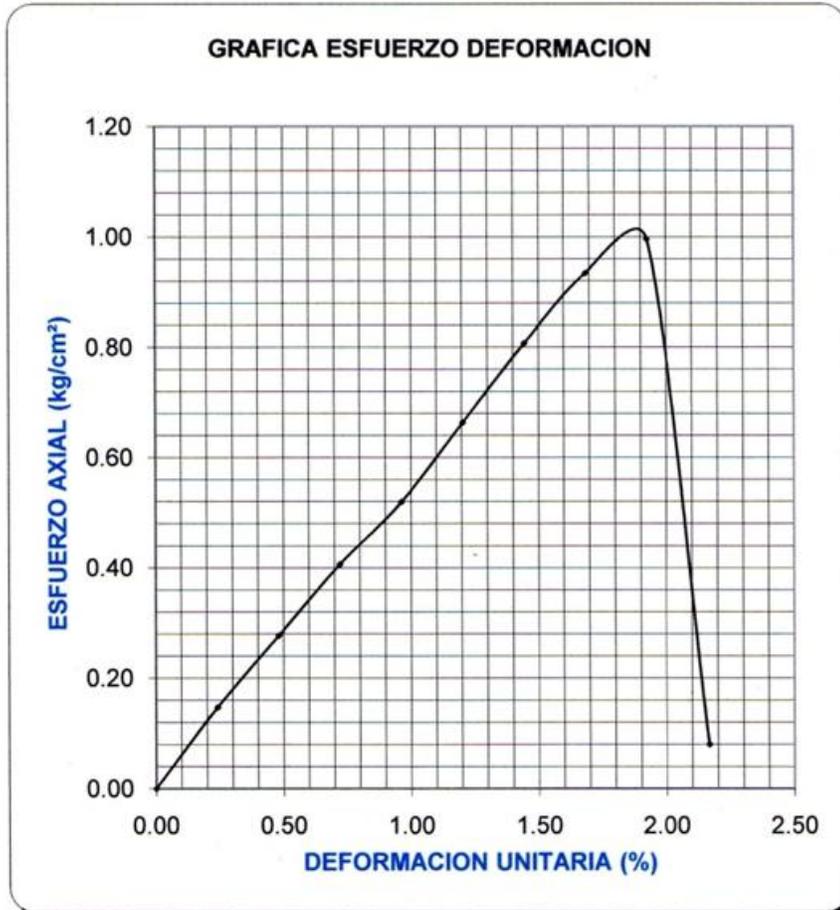
TESTIGO			
N° CAP.	87	gr	Ss= 2.411
Wcap+Wh=	178.95	gr	Vs (cm <sup>3</sup> )= 53.06
Wcap+Ws=	149.40	gr	Vv (cm <sup>3</sup> )= 39.30
Ww=	29.55	gr	e= 0.74
Wcap=	21.46	gr	Gs(%)= 75.18
Ws=	127.94	gr	
w=	23.1	%	

CARGA	CARGA CORREG. (kg)	MICROM. (mm)	DEFOR. (mm)	DEFOR. UNIT. (%)	1-DEFOR. UNIT. (-)	AREA CORREG. Cm <sup>2</sup>	ESFUERZO kg/cm <sup>2</sup>
0	0.000	0	0.000	0.000	1.000	11.114	0.000
9	1.638	0.20	0.200	0.241	0.998	11.140	0.147
17	3.094	0.40	0.400	0.481	0.995	11.167	0.277
25	4.550	0.60	0.600	0.722	0.993	11.194	0.406
32	5.824	0.80	0.800	0.963	0.990	11.222	0.519
41	7.462	1.00	1.000	1.203	0.988	11.249	0.663
50	9.100	1.20	1.200	1.444	0.986	11.276	0.807
58	10.556	1.40	1.400	1.685	0.983	11.304	0.934
62	11.284	1.60	1.600	1.925	0.981	11.332	0.996
5	0.910	1.80	1.800	2.166	0.978	11.360	0.080

CARGA MAXIMA 0.996

TABLA 42 Ensaye de Compresión Simple SM-2

**PRUEBA DE COMPRESION SIMPLE**



CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS (-)	RELACION DE VACIOS (-)	PESO VOLUMETRICO (ton/m <sup>3</sup> )	CARGA ULTIMA (Kg/cm <sup>2</sup> )
23.1	2.411	0.741	1.705	0.996

COMPRESION SIMPLE	
OBRA:	
LUGAR: <b>TULA, HIDALGO</b>	SONDEO: <b>SM - 2</b>
MUESTRA <b>28</b>	PROFUNDIDAD <b>15.60 - 15.80 m</b>

**TABLA 43** Ensaye de Compresión Simple SM-2



SONDEO: SM - 4  
MUESTRA: 6  
PROF: 3.00 - 3.30 m

LOCALIZACION: TULA, HIDALGO  
ENSAYE: COMPRESION SIMPLE

DESCRIPCION:

MEDIDAS DE LA MUESTRA

Ds= 3.73 cm	As= 10.93 cm <sup>2</sup>	Wm= 167.1 gr
Dm= 3.74 cm	Ac= 10.99 cm <sup>2</sup>	Vm= 101.46 cm <sup>3</sup>
Di= 3.72 cm	Ai= 10.87 cm <sup>2</sup>	gama= 1.647 ton/m <sup>3</sup>
hi= 9.26 cm	Am= (As+4Ac+ Ai) 10.957 cm <sup>2</sup>	

CONSTANTE DE ANILLO: 0.182

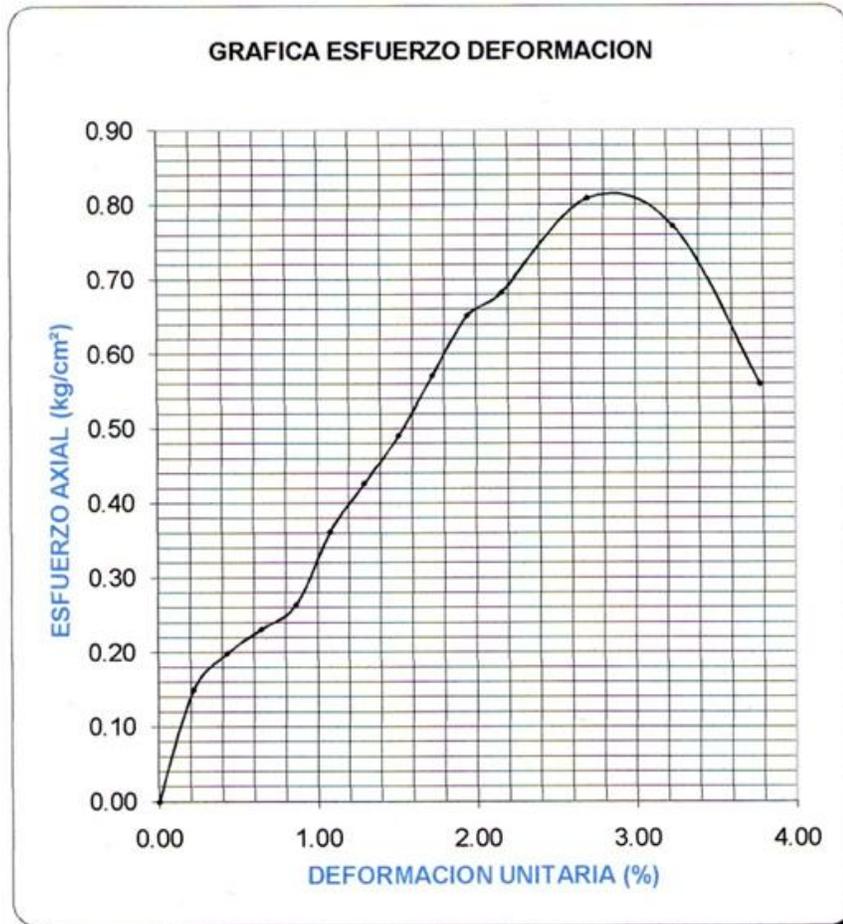
TESTIGO			
N° CAP.	101	gr	Ss= 2.505
Wcap+Wh	185.8	gr	Vs (cm <sup>3</sup> )= 51.58
Wcap+Ws	147.90	gr	Vv (cm <sup>3</sup> )= 49.88
Ww	37.90	gr	e= 0.97
Wcap	18.70	gr	Gs(%)= 75.98
Ws	129.2	gr	
w	29.3	%	

CARGA	CARGA CORREG. (kg)	MICROM. (mm)	DEFOR. (mm)	DEFOR. UNIT. (%)	1-DEFOR. UNIT. (-)	AREA CORREG. Cm <sup>2</sup>	ESFUERZO kg/cm <sup>2</sup>
0	0.000	0	0.000	0.000	1.000	10.957	0.000
9	1.638	0.20	0.200	0.216	0.998	10.980	0.149
12	2.184	0.40	0.400	0.432	0.996	11.004	0.198
14	2.548	0.60	0.600	0.648	0.994	11.028	0.231
16	2.912	0.80	0.800	0.864	0.991	11.052	0.263
22	4.004	1.00	1.000	1.080	0.989	11.076	0.361
26	4.732	1.20	1.200	1.296	0.987	11.100	0.426
30	5.460	1.40	1.400	1.512	0.985	11.125	0.491
35	6.370	1.60	1.600	1.728	0.983	11.149	0.571
40	7.280	1.80	1.800	1.944	0.981	11.174	0.652
42	7.644	2.00	2.000	2.160	0.978	11.198	0.683
50	9.100	2.50	2.500	2.700	0.973	11.261	0.808
48	8.736	3.00	3.000	3.240	0.968	11.323	0.771
35	6.370	3.50	3.500	3.780	0.962	11.387	0.559
CARGA MAXIMA							0.808

TABLA 44 Ensaye de Compresión Simple SM-4



PRUEBA DE COMPRESION SIMPLE



CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS (-)	RELACION DE VACIOS (-)	PESO VOLUMETRICO (ton/m <sup>3</sup> )	CARGA ULTIMA (Kg/cm <sup>2</sup> )
29.3	2.505	0.967	1.647	0.808

COMPRESION SIMPLE	
OBRA:	
LUGAR: TULA, HIDALGO	SONDEO: SM - 4
MUESTRA 6	PROFUNDIDAD 3.00 - 3.30 m

TABLA 45 Ensaye de Compresión Simple SM-4



SONDEO: SM - 10  
MUESTRA: 28  
PROF: 16.00-16.70

**LOCALIZACION:** TULA, HIDALGO  
**ENSAYE:** COMPRESION SIMPLE

**DESCRIPCION:**

**MEDIDAS DE LA MUESTRA**

Ds=	3.9	cm	As=	11.95	cm <sup>2</sup>	Wm=	153.9	gr
Dm=	3.9	cm	Ac=	11.95	cm <sup>2</sup>	Vm=	101.87	cm <sup>3</sup>
Di=	3.8	cm	Ai=	11.34	cm <sup>2</sup>	gamma=	1.511	ton/m <sup>3</sup>
hi=	8.60	cm	Am=	(As+4Ac+Ai)	11.845	cm <sup>2</sup>		

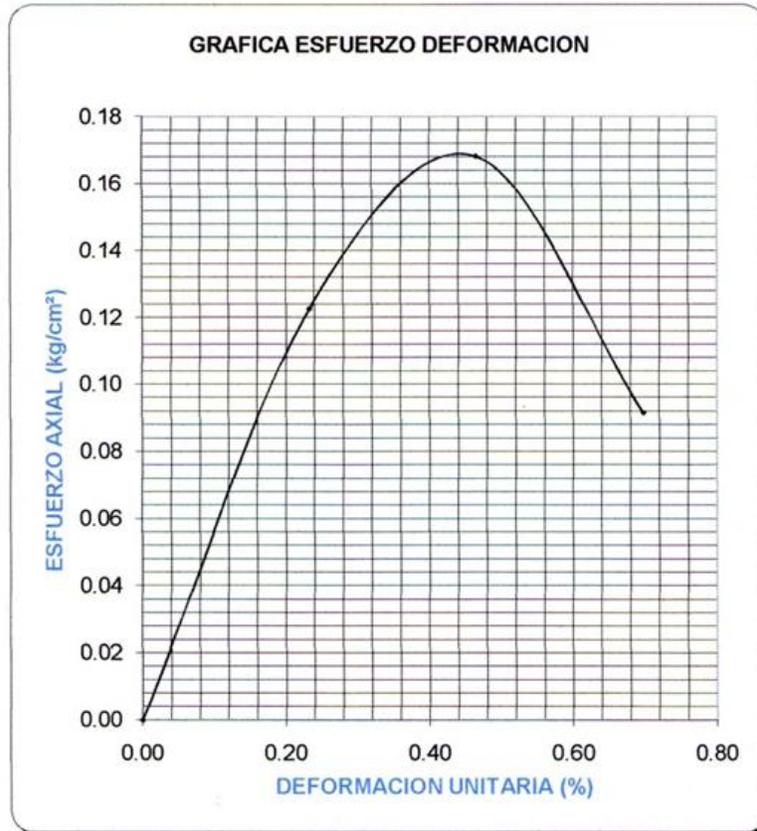
CONSTANTE DE ANILLO: 0.182

TESTIGO			
N° CAP.	50	gr	Ss= 2.676
Wcap+Wh=	175.9	gr	Vs (cm <sup>3</sup> )= 40.73
Wcap+Ws=	74.00	gr	Vv (cm <sup>3</sup> )= 61.14
Ww=	22	gr	e= 1.50
Wcap=	20.60	gr	Gs(%)= 73.45
Ws=	53.4	gr	
w=	41.2	%	

CARGA	CARGA CORREG. (kg)	MICROM. (mm)	DEFOR. (mm)	DEFOR. UNIT. (%)	1-DEFOR. UNIT. (-)	AREA CORREG. Cm <sup>2</sup>	ESFUERZO kg/cm <sup>2</sup>
0	0.000	0	0.000	0.000	1.000	11.845	0.000
8	1.456	0.20	0.200	0.233	0.998	11.873	0.123
11	2.002	0.40	0.400	0.465	0.995	11.900	0.168
6	1.092	0.60	0.600	0.698	0.993	11.928	0.092
<b>CARGA MAXIMA</b>							<b>0.168</b>

**TABLA 46** Ensaye de Compresión Simple SM-10

PRUEBA DE COMPRESION SIMPLE



CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS (-)	RELACION DE VACIOS (-)	PESO VOLUMETRICO (ton/m³)	CARGA ULTIMA (Kg/cm²)
41.2	2.676	1.501	1.511	0.168

COMPRESION SIMPLE	
OBRA:	
LUGAR: TULA, HIDALGO	SONDEO: SM - 10
MUESTRA 28	PROFUNDIDAD 16.00-16.70

TABLA 47 Ensaye de Compresión Simple SM-10