



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN

PROGRAMA DE POSGRADO

ESPECIALIZACIÓN EN GEOTECNIA

DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA DEL TÚNEL EMISOR PONIENTE II

TESINA

Que para obtener el título de
Especialista en Geotecnia

P R E S E N T A

Ing. Miguel Ángel Ávila Martínez

DIRECTOR DE TESINA

Dr. José María Chávez Aguirre



Cd. Mx. Agosto 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

A mis maravillosos padres Patricia Martínez y Miguel Ávila que gracias a ellos soy quien soy, a mis ambos brazos quienes brindan la fuerza cada día. Gracias por estar incondicionalmente conmigo, por mostrarme el camino, por su sustento, apoyo y cariño. A ti mamá que día con día me apoyas, que desde pequeño me has brindado tu amor y comprensión. A ti papá que siempre has luchado por darme lo mejor, que siempre buscas la manera de que no me falte nada. A ustedes los mejores papás que la vida y Dios me pudieron dar, todo lo que soy es gracias a ustedes, los amo.

A mi gran ángel Fernando que siempre está conmigo y a dónde quiera que vaya me ilumina con sus bendiciones, quien ha sido motivo de esfuerzo, dedicación y entrega para lograr lo que he logrado, por su gran enseñanza que me impartió de *“Nunca rendirme y luchar hasta el final”*, a ti mi querido y entrañable hermano, esto es para ti y va hasta el cielo.

A mi hermosa novia Rubí Vélez que me apoya en todo momento, la ayuda que me has brindado es de suma importancia para mí, estuviste en los peores momentos, siempre estuviste ahí, animándome y motivándome para poder realizar este logro, eres motivo de superación, determinación y dedicación, gracias por alentarme a seguir hacia adelante para superarme como persona y no darme por vencido, gracias por tu amor y comprensión, te amo.

A mi hermano Jonathan Martínez que ha estado conmigo en las circunstancias que la vida nos ha presentado, por brindarme su apoyo y brindarme trabajo. A mis tíos John y Zareth que siempre me han procurado en momentos buenos y malos, los quiero mucho.

A mi tío Óscar Ávila y familia, que siempre me ha motivado y apoyado en el ámbito académico y ahora en el ámbito profesional, gracias por llevarme a la escuela durante la licenciatura, por apoyarme, guiarme, motivarme y despertar en mí el interés por realizar un posgrado e incitarme a superarme, seguir creciendo y no ser conformista, los quiero.

A mi tío Arturo Ávila por motivarme y mostrarme que las cosas son posibles con esfuerzo y dedicación, por darme la oportunidad de conocer otros horizontes, te quiero tío.

A mi mami Estela Pérez que siempre me ha cuidado, orientado y brindado su cariño, a ti que desde pequeño me has dado todo lo que está y lo que no está a tu alcance. A ti papá manolo que desde el cielo también me cuidas y siempre me demostraste que por más difícil que parezca una situación siempre hay que ser feliz, los amo.

A mi abue Rosa Vázquez que siempre creyó en mí y me llenaba de aliento para que fuera un profesionista, a ti que también desde el cielo me bendices. A mi abuelito Porfirio Ávila que me enseñó que la vida nunca es fácil pero siempre se puede salir adelante, los amo.

A toda mi familia en general que me aprecia, gracias por su apoyo.

A mis profesores que compartieron su conocimiento para así obtener una buena preparación académica, en especial a ustedes Dr Ricardo Ortiz por despertar mi gusto hacia la geotecnia, Dr Chávez Aguirre, gracias por su asesoría, dedicación y disposición para que dicho trabajo se realizara.

Objetivo	1
Metodología	1
Simbología	2
CÁPITULO 1. Generalidades	3
1.1.Historia de los túneles	3
1.2. Geotecnia aplicada a túneles	9
1.2.1. Definición y tipo de túneles	10
1.2.2. Métodos de Excavación.....	11
1.2.3. Definición de fases y secuencia de excavación.....	14
1.3.Problemas geotécnicos en túneles.....	16
1.3.1. Fallas.....	16
1.3.2. Estratificación.....	17
1.3.3. Anticlinales y sinclinales.....	19
1.3.4. Filtraciones.....	19
1.3.5. Rocas sometidas a esfuerzos (bufamientos y reventones)	19
1.3.6. Altas temperaturas y gases.....	20
CÁPITULO 2. Introducción	21
CÁPITULO 3. Antecedentes	23
3.1. Geología de México.....	23
3.2. Cuenca de México.....	32
CÁPITULO 4. Relevancia del TEP II	39
4.1.Obras hidráulicas de la cuenca de México.....	42
CÁPITULO 5. Descripción del TEP II	51
CÁPITULO 6. Construcción del TEP II	57
6.1. Estructuras de captación Rio San Javier y Xochimanga.....	57
6.2. Cajón de conducción de 8.00m x 5.00m.....	59
6.3. Cajón de transición 3.....	61
6.4. Túnel de 7.20m de diámetro terminado.....	62
6.4.1. Estratigrafía.....	62
6.4.2. Tuneladora TBM con escudo EPB.....	64
6.4.3. Excavación.....	66
6.4.4. Revestimiento primario.....	68
6.5. Cavidad durante la excavación del TEP II.....	70
6.6. Lumbrera única del TEP II.....	75
Conclusiones	77
Anexos	81
Bibliografía	95

OBJETIVO.

Lograr una descripción de la hidrología e hidráulica de la cuenca y del Valle de México con énfasis en el traslado de las aguas residuales de la Ciudad de México mediante obras hidráulicas como los túneles emisores, principalmente el Túnel Emisor Poniente II ubicado en los municipios de Atizapán y Cuautitlán, en el Estado de México.

METODOLOGÍA.

Para el desarrollo de este trabajo se ha implementado una metodología de investigación no experimental mixta ya que se obtuvo información en un momento específico, es decir delimitada por cortes de tiempo y aunado a ello se abarcó todo el proceso histórico del Túnel Emisor Poniente II de tal manera que se estudió la evolución del mismo.

La investigación se basa en una recopilación, interpretación y análisis tanto de artículos de carácter geológico y geotécnico, así como journals, e incluso información directa de la ejecución del proyecto.

SIMBOLOGÍA.

ENT → Eje Neovolcánico Transmexicano.

EPB → Earth Pressure Balance

E.T.S.E.C.C.P.B. → Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

N.A.F → Nivel de Aguas Freáticas.

NE-SW → Orientación Nor-Este, Sur-Oeste.

RPM → Revoluciones por minuto.

SCT → Secretaria de Comunicaciones y Transportes en México.

SE → Orientación Sur-Este

T.E.C → Túnel Emisor Central.

T.E.P → Túnel Emisor Poniente.

T.E.P-II → Túnel Emisor Poniente II.

T.E.O. → Túnel Emisor Oriente.

U.P.C. → Universidad Politécnica de Cataluña.

W-E → Orientación Oeste-Este.

CÁPITULO 1. GENERALIDADES.

1.1. Historia de los túneles

El túnel surge de la necesidad de superar un obstáculo natural con la finalidad de reducir las distancias de traslado entre las antiguas civilizaciones, generalmente el obstáculo natural a superar era un macizo rocoso. Además de ciertos obstáculos naturales, en tales civilizaciones existieron una serie de necesidades primordiales de carácter hidráulico y sanitario por lo cual condujo a la implementación de túneles subterráneos a través de los cuáles se transportaron cursos de aguas pluviales, fluviales o marinas. Posteriormente conforme a las necesidades que se presentaron conforme al crecimiento y desarrollo de las diferentes urbes da como resultado la versatilidad de los túneles, dentro de los cuales destacan los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o Metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de servicio y para almacenamiento de residuos.

El arte de los túneles se funde en sus orígenes con el arte de la minería. La mina más antigua que se conoce en el mundo se localiza en el cerro de Bomvu, en Swazilandia, y data del año 40.000 a.C.; en ella el hombre de Neandertal minaba hematites (roca desangre), muy apreciada para ritos mortuorios; las herramientas no eran otras que piedras afiladas y sus manos desnudas (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

El primer método de perforación de galerías mineras y, con posterioridad, de túneles es la técnica del fuego, consistente en provocar un incendio en el frente de ataque para luego sofocarlo bruscamente con agua fría produciendo un brusco gradiente térmico queda lugar al resquebrajamiento de la roca; pero esta técnica también provocaba, como no es difícil imaginar, una atmósfera viciada, irrespirable, generando gases a menudo venenosos, convirtiendo el trabajo del minero en una trampa mortal a la que sólo unos pocos afortunados sobrevivían (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

Inicialmente; los egipcios, indios, aztecas, griegos y romanos, fueron famosos por sus trabajos subterráneos. Por otra parte, el primer túnel de la historia fue “El túnel del Éufrates” construido en Babilonia por los años 2200 a.C, las construcciones parecen

imposibles, cuando se piensa que solo disponían de herramienta manual, no contaban con perforación, compresores de aire, dinamitas y maquinaria e inventos de la ingeniería moderna por tanto “El primer túnel de la historia, allá donde ésta se difumina con el territorio del mito, fue el que la leyenda dice mandara construir Semiramis bajo el Éufrates para comunicar el Palacio y el Templo de Belos en Babilonia” (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

Posteriormente alrededor de 530 a.C en la Isla de Samos (Grecia) el ingeniero Eupalinos de Megaracon la finalidad de satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua a la capital de la isla, propone y construye un túnel de un kilómetro de longitud. La obra mejor conocida como “El túnel de Eupalino” fue considerada como una de las tres maravillas del mundo Heleno y estuvo en funcionamiento durante un milenio (figs 1.1 y 1.2).

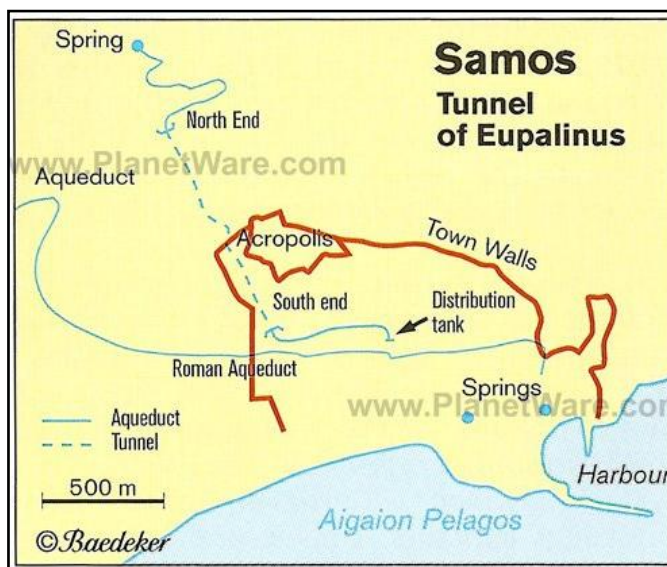


Figura 1.1. Mapa del Túnel de Eupalino en Isla de Samos, Grecia (Travel Zone Greece, 2017)



Figura 1.2. Interior Túnel de Eupalino en Isla de Samos, Grecia (Panorama Griego 2021)

Por otra parte cabe destacar la ingeniería en túneles que desarrolló el Imperio Romano, ya que construyeron una serie de versatilidades de túneles, dentro de los cuales destacan túneles para alcantarillado, abastecimiento de agua, galerías mineras, incluso implementaron un drenaje para los diversos lagos volcánicos que comprendía dicho

imperio. Aunado a ello no está de más resaltar la cantidad de túneles que realizaron con propósito militar, así como las catacumbas.

En otro contexto, durante la Edad Media los túneles pierden ese auge como obras relevantes de ingeniería civil y derivan en pasadizos de castillos y fortalezas, así como galerías. Esto dando como resultado obras menores, es decir pasaron de ser obras civiles a obras de carácter militar. Es durante este período, cuando la minería se fortalece y se consolida, fundamentalmente en Centroeuropa.

Años después durante la etapa de El Renacimiento, sabemos que esta época marca el resurgir del hombre, sin embargo también marcó un punto de partida para el desarrollo e innovación en el ámbito de los túneles. Leonardo da Vinci toma en cuenta niveles subterráneos en sus proyectos para el desarrollo de ciudades y opta por proponer la posibilidad de perforar túneles dónde los canales se encuentran con barreras montañosas.

El primer túnel del Renacimiento es la Mina de Daroca en la provincia de Teruel (España). Cuenta con 600 metros de longitud, 6 metros de anchura y una altura variable entre los 7 y 8 metros. Fue construido entre 1555 y 1570 por Pierres Bedel para reconducir y desviar las aguas torrenciales que venían castigando la villa aragonesa (fig. 1.3) (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

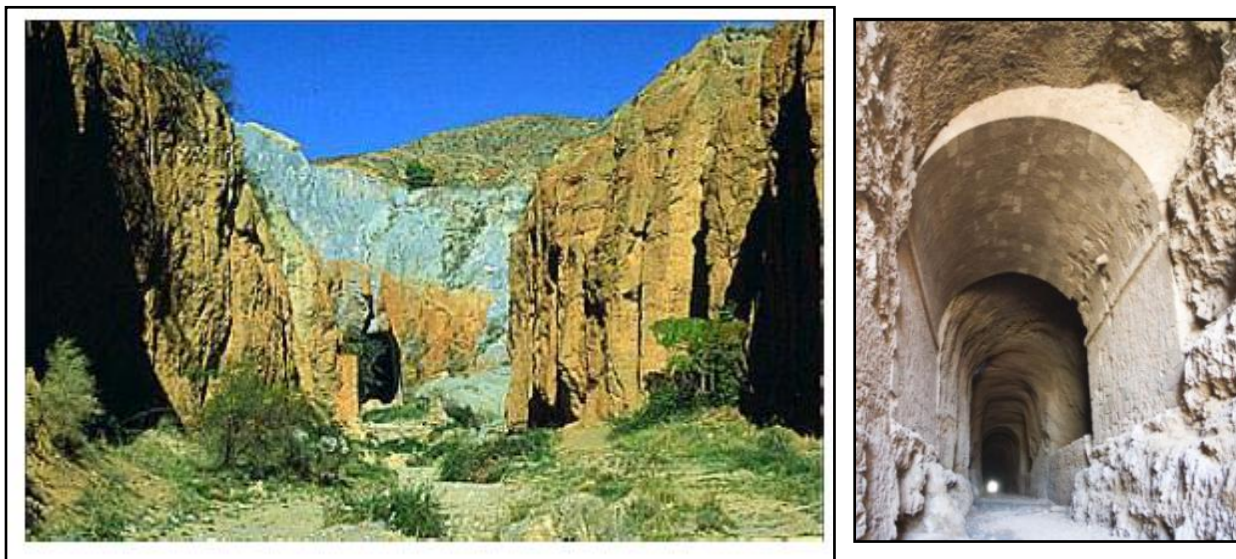


Figura 1.3. Antigua Mina de Daroca, España (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C.).

Posteriormente a El Renacimiento, durante el siglo XVIII surge la Era de los Canales y a consecuencia de esto los túneles se desarrollan potencialmente. Un claro ejemplo de ello es el Túnel de Malpas (fig 1.4), el cual se construyó cerca de Beziers (Francia) en el Canal de Midi, con la finalidad de unir el mar Atlántico con el Mediterráneo. Esta obra resultó ser el primer túnel para canal. Con 155 m de longitud, 6,5 m de altura y 8m de anchura, fue perforado empleando pólvora por primera vez.



Figura 1.4. Túnel de Malpas, Beziers, Francia (IMAGO,2021).

La experiencia adquirida con la construcción de túneles para canal resultaría de alto valor en el período siguiente, ya que superado en el corazón de Europa el umbral de la Revolución Industrial, surge la Era de los Ferrocarriles. Esta era se desarrolla a partir del siglo XIX, por lo tanto, los túneles tuvieron gran apogeo; en la historia de los túneles de ferrocarril se agolpan grandes hazañas en una demandada lucha del hombre por dominar el arte de perforar la tierra; incorporando progresivamente maquinaria y procedimientos constructivos a partir de los cuales el esfuerzo manual va cediendo en pro de una incipiente mecanización (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

El primer túnel de ferrocarril fue el de Terre-Noir en Francia, de la línea Roanne-Andrezieux, camino de carriles traccionado por caballos, construido en 1826, con 1476 m de longitud, 5 m de altura y cerca de 3m de anchura (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

Cuatro mil años después de la construcción del túnel del Éufrates, entre los años 1825 y 1850 los Brunel padre e hijo propusieron y construyeron el siguiente túnel bajo el cauce de un río (fig. 1.5). Después de veinte años lograron concluir esta obra mejor conocida como “El túnel del Tamesis”. Este túnel presentó un gran avance en la ingeniería geotécnica ya que es el primero que se construyó en terreno blando y con enorme presencia de agua y en el que por primera vez se aplica la técnica del escudo, mismo que fue patentado por Marc Brunel.

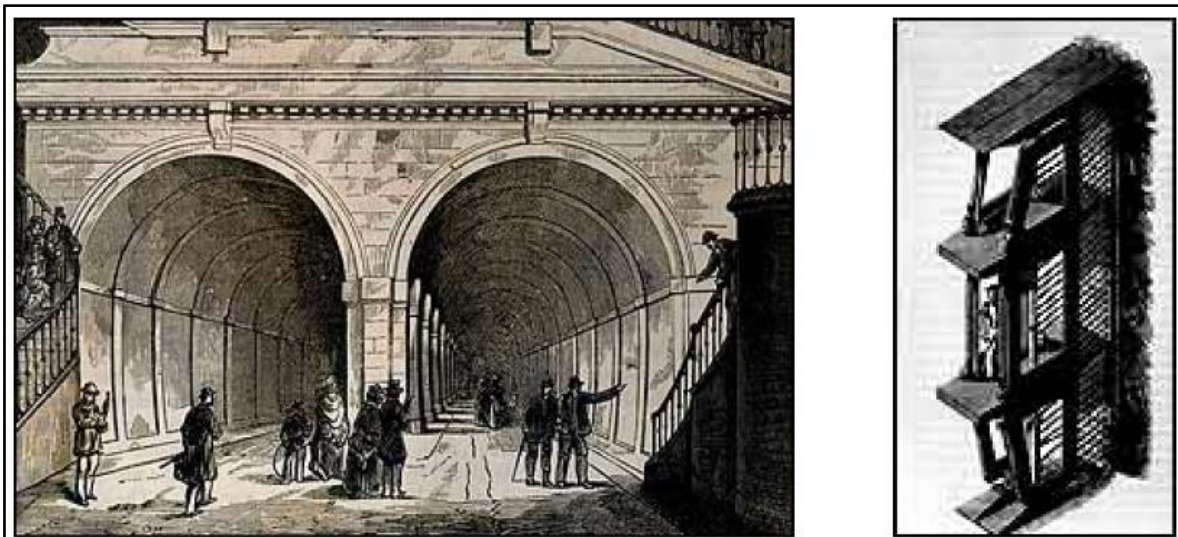


Figura1.5. A la izquierda una imagen de época del túnel construido bajo las aguas del río Támesis y a la derecha se muestra el escudo utilizado y patentado por Brunel para este mismo proyecto en 1843
(E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C, s/f)

En la segunda mitad del siglo XIX se produce un avance impresionante con la construcción de los grandes túneles alpinos de ferrocarril. Los nombres de MontCenis, San Gotardo y Simplón constituyen la triada en la titánica lucha por perforar los Alpes y que marca el punto de mayor tensión en la historia de los túneles: basta recordar que la longitud respectiva de estas galerías es de 12.6 km, 15.2 km y 19.7 km. Los medios disponibles eran todavía modestos, si bien la incorporación de máquinas taladradoras accionadas por aire comprimido, obra de Sommeiller, marca un salto cualitativo en los rendimientos alcanzados. Por otra parte cabe mencionar que a causa de una ambición desmedida, las condiciones de trabajo resultaban inhumanas, destacando la negra historia de Louis Favre y el túnel de San Gotardo, el compromiso de un plazo de ejecución imposible de cumplir con

duras penalizaciones por cada día de retraso condujo a Favre primero a la ruina, luego a la muerte y a sus trabajadores a unas condiciones laborales y sanitarias infernales, estimándose en cerca de doscientos el número de muertos durante las obras; un precio muy elevado (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

Actualmente El Túnel de Base de San Gotardo en Suiza tiene 57 km. de largo y cuenta con 152 km de sistemas de galerías excavadas en roca. Sus dos vías se conectan cada 325 m, abriéndose camino a través de Los Alpes. Gracias a esta obra los trenes pueden desplazarse a través de cierta cadena montañosa sin apenas ascender en altura, a razón de ello cada día pueden transitar por esta obra de ingeniería hasta 260 trenes de carga con una velocidad máxima de 160 km por hora y 65 trenes de pasajeros, que pueden alcanzar hasta los 250 km por hora, esta nueva línea reduce el tiempo de viaje desde Zúrich a Milán en aproximadamente una hora. Atravesando uno de los macizos de Los Alpes más altos, el túnel se extiende unos 2.000 metros bajo la roca y alcanza en su cumbre los 550 m sobre el nivel del mar (SIKA,2016).

De igual manera a mediados del siglo XIX pero en el continente americano, en Estados Unidos se van implementando los túneles. Cabe resaltar un par de túneles ubicados bajo el río Chicago abiertos en 1869 y 1871 (fig 1.7), que sirvieron como la única vía de escape para los habitantes de la ciudad durante el feroz incendio que redujo la ciudad a cenizas en octubre de 1871. El túnel Hoosac (fig 1.6), marca también sin duda un hito a nivel de avances tecnológicos, como el de la utilización por primera vez de la nitroglicerina en este tipo de obras, y el túnel de Saint Clair construido a finales del XIX bajo el río que le da nombre entre EE.UU y Canadá mediante un escudo de 6.45 m de diámetro (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

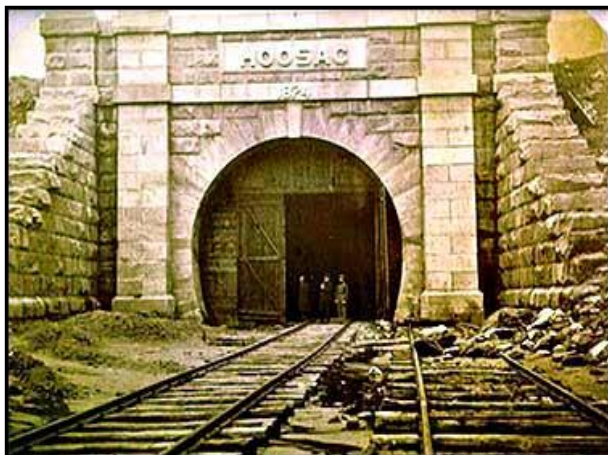


Figura 1.6. Túnel Hoosac, Massachusetts, Estados Unidos (La Galería de Ideas, 2015).



Figura 1.7. Túnel de Saint Clair, Michigan y Ontario, EUA y Canadá (Michigan, 2021).

Tal como nos hemos percatado con lo mencionado en los párrafos anteriores, el desarrollo, impulso y resurgimiento de los túneles surgió como consecuencia de la Revolución Industrial con la implementación de la máquina de vapor y los ferrocarriles. Esta serie de inventos marcaron un acontecimiento significativo tanto en el diseño como en la construcción de los mismos. Con el paso de los años, los siguientes avances fueron debidos a diversas necesidades e innovaciones tanto en la investigación como en las tecnologías. Tal es el caso de la electricidad y la potencia eléctrica que dio como consecuencia a la aparición de los ferrocarriles subterráneos, así como el metro. Además, con llegada de las centrales de energía surgió la necesidad de construir túneles para conducción de cables y enfriamiento de agua. Aunado a ello, la máquina de combustión interna, al ampliar la potencia de la ingeniería, dio lugar al motor de explosión, lo que dio como resultado al desarrollo de vehículos de motor de tal manera que se optó por la implementación de carreteras y por ende a la demanda de un número creciente de túneles para dichos vehículos, cabe aclarar que ciertos túneles ahora no sólo serían perforados bajo montañas sino también bajo los cauces de los ríos, mares o colinas menores.

Es evidente que las necesidades sanitarias, hidráulicas y de transporte son directamente proporcionales al crecimiento demográfico, por lo cual resulta que a través de los años se han construido una serie innumerable de túneles hasta la actualidad. A razón de ello se ha implementado un desarrollo tanto científico como práctico con la finalidad de implementar mejoras en las técnicas y elementos constructivos de tal manera que se ha alcanzado un grado de eficacia inimaginable dando como resultado el desarrollo de proyectos que presentan una serie de retos para la ingeniería geotécnica.

1.2. Geotecnia Aplicada a Túneles.

Es indudable que no existe obra ingenieril que necesite más de la geología y la geotecnia que un túnel. Cuanto mayor complejidad y profundidad tenga el túnel mayores análisis geotécnicos y exploraciones geológicas serán requeridas para su ejecución. Aunado a ello cabe resaltar que la construcción de un túnel requiere de la geología tanto en la etapa de estudios preliminares como en la construcción e incluso en la operación. Esto a razón de que se necesita de una geología que no se pierda en análisis que lleven al conocimiento de la petrogénesis, estratigrafía, sino de una geología ingenieril a gran escala que exprese

información alguna sobre el comportamiento presente y a futuro del macizo rocoso ya que este será modificado con la construcción del túnel.

1.2.1 Definición y Tipos de Túneles.

“Los túneles son excavaciones lineales subterráneas, de pequeña altura y anchura en comparación con su longitud” (Whalstrom (1973) in Ruíz González, 2000)

De acuerdo al uso que tienen, se clasifican de la siguiente forma:

- a) Túneles de acceso a minas, útiles para desalojar los materiales extraídos para desalojar las aguas subterráneas o para proporcionar ventilación.
- b) Túneles para transportes: carreteros, para peatones, para navegación o ferrocarriles. Estos son los más largos y en ocasiones los más difíciles de excavar.
- c) Túneles para conducción de agua; que pueden ser vertedores, de desfogue o de desvío.
- d) Túneles militares.
- e) Túneles de acceso a cámaras o bóvedas subterráneas.
- f) Túneles de utilidad pública, construidos para llevar cables, gas, agua.

(Whalstrom (1973) in Ruíz González, 2000).

Las partes de un túnel pueden verse en la siguiente figura.

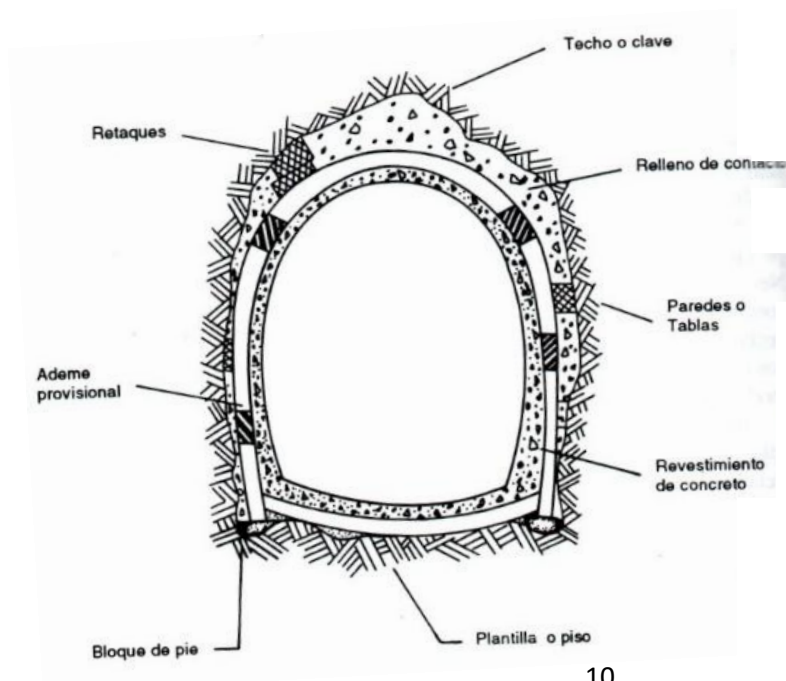


Figura 1.8. Partes de un Túnel según Wahlstrom (Ruíz, González, 2000).

1.2.2. Métodos de Excavación.

Los métodos convencionales de túneleo son mejor conocidos como métodos clásicos, son operaciones cíclicas que en general tienen esta secuencia: perforación, carga, explosión, rezagado e instalación de soportes si son necesarios (Ruíz, González, 2000).

Existe una serie de métodos nacionales de construcción de túneles que con el paso de los años y conforme la innovación tecnológica fueron propuestos (fig. 1.9). Tal como se mencionó en párrafos anteriores, a partir de la Era de los Ferrocarriles y de los Canales hasta la actualidad se ha innovado por completo el campo de los túneles. Sin embargo a pesar de ello han de considerarse los sistemas: Inglés, Belga, Alemán y Austriaco. Enseguida se describen dichos métodos, los cuales se centran principalmente en las diferentes secuencias de excavación.

El *Método Inglés*: recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arcillas y areniscas. Siguiendo el ejemplo establecido en la construcción del primer túnel bajo el Támesis, su principal característica es proceder el avance de la perforación a sección completa del túnel, en una sola operación (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

El *Método Belga*: se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828 del túnel de Charleroi en el Canal que enlaza Bruselas y Charleroi. En terreno firme se excava a la mitad superior del túnel, comenzando con una galería central desde el coronamiento hasta el arranque del arco. Esto se amplía en ambos lados, y el terreno se mantiene en su lugar con estacas transversales. Es posible avanzar con la excavación a una distancia considerable antes de continuar con el revestimiento del túnel (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

El *Método Alemán*: este sistema fue utilizado por primera vez en 1803 para construir el túnel en el Canal de San Quintín, y desarrollado por Wiebeking en 1814, siguiendo el sistema de núcleo central, también empleado en la construcción de las amplias bóvedas de cerveza de Baviera. Se hacen avanzar dos galerías inferiores, una en cada muro lateral. En estas galerías se construyen los muros hasta llegar al techo de las mismas. Sobre esto se excavan otras dos galerías y se continúan la construcción de los muros. Se añade una

galería central superior que se ensancha hasta alcanzar las galerías laterales; el terreno sobre el arco queda apuntalado por maderos longitudinales y estacas transversales. Después de terminado el revestimiento de arco se remueve del resto del terreno (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

El *Método Alemán Modificado*: se aplica en el caso en que durante la operación de perforación del túnel, a través de un terreno bastante firme, surja la aparición de agua, lo que origina una alteración en el Método Clásico Alemán en cuanto a las etapas sucesivas de ataque del frente (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

El *Método Austriaco*: los austriacos desarrollaron un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación, procedimiento aplicado en las minas de Friburgo y que fue aplicado por primera vez por Meisner en la construcción del túnel de Oberau, en el ferrocarril entre Leipzig y Dresden, en Sajonia en el año 1837. En 1839 Keissler lo empleó en el túnel de Gumpoldskirch, cerca de Viena-Neustadt (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C., s/f).

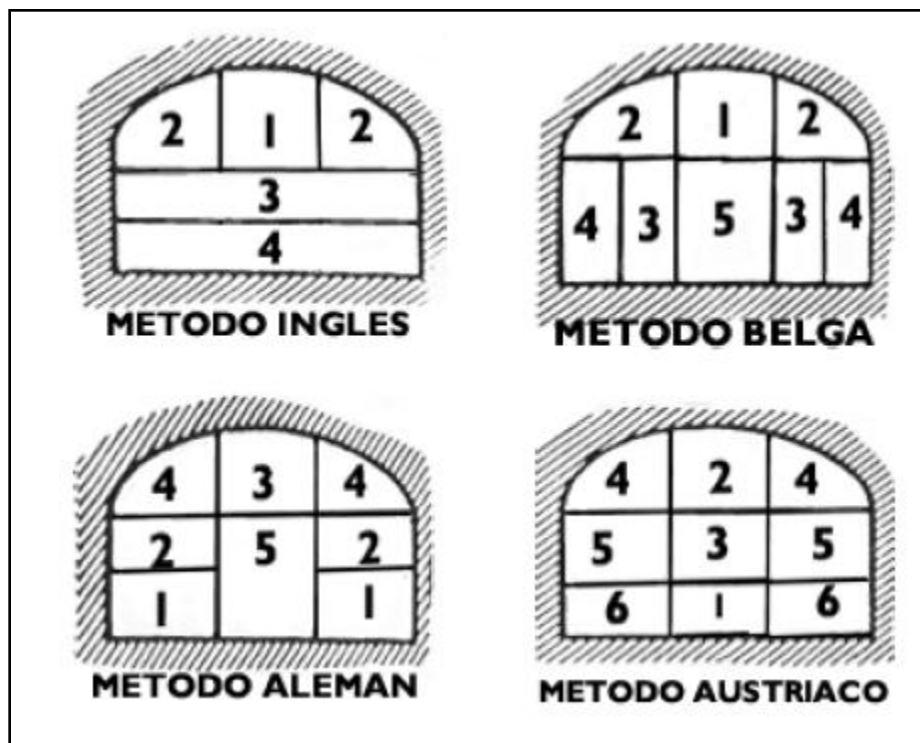


Figura1.9. Esquema de diferentes métodos constructivos nacionales (E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C. s/f).

La elección del método de excavación de un túnel depende de varios factores dentro de los que destacan el tipo de terreno a excavar y su longitud. Hasta ahora la construcción de túneles carreteros en México se ha realizado con los métodos de excavación convencional con perforación y voladura utilizando explosivos y la excavación mecánica mediante máquinas de ataque puntual como rozadoras, martillos hidráulicos, etc. Otro método de excavación de túneles corresponde con la utilización de máquinas tuneladoras TBM (*Tunnel Boring Machine*), Es importante mencionar que cada método de excavación tiene ventajas y desventajas por lo que se deberá hacer un análisis y una evaluación de cada proyecto en particular, para determinar el más conveniente (SCT,2016).

El método de excavación con TBM permite excavar la sección completa del túnel al mismo tiempo que se realiza la colocación del sostenimiento o un revestimiento. Para elegir este método y para que la obra resulte un éxito, el túnel debe contar con la longitud suficiente y la máquina debe ser seleccionada con base en las condiciones geológico geotécnicas específicas y a detalle del sitio donde se pretenda construir el túnel (SCT,2016).

La excavación con método convencional empleando equipos mecánicos con tecnología de punta y la ayuda de técnicas constructivas complementarias, es capaz de conseguir además de rendimientos óptimos, un alto nivel de seguridad, aportando grados de mecanización y automatización considerables. La limitación más importante de la excavación convencional mecánica está en la dureza, tenacidad y abrasividad de las rocas, que repercute en rendimientos muy bajos elevando el costo de la obra hasta llegar al punto de volverla totalmente inviable. Cuando se presentan estos casos es necesario el empleo de explosivos con los cuales se pueden conseguir avances importantes excavando a sección completa o en fases, ya sea en roca muy dura y altamente abrasiva o roca poco fracturada (SCT,2016).

Para elegir el método de excavación a emplear durante la construcción de un túnel, se deben tomar en cuenta varios factores; algunos de índole técnico, económicos y de tiempo de ejecución. Cuando la roca tiene una resistencia alta, es necesario emplear excavación mediante explosivos, mientras que si la resistencia es media o baja puede emplearse indistintamente la voladura o la excavación por medios mecánicos. La manera de excavación en roca tiene una considerable influencia sobre el desgaste producido en las herramientas de corte o excavación; aunque existe una interrelación entre la calidad, la

dureza y la abrasividad de las rocas, en determinadas formaciones blandas, si la excavación se realiza con equipos continuos por el sistema de corte y rozado, los desgastes pueden llegar a elevar el costo de la excavación. Aunado a ello se debe tomar en cuenta que sección del túnel puede ser una condicionante importante (SCT,2016).

1.2.3. Definición de Fases y Secuencia de Excavación.

La excavación por fases se emplea tanto en el método de perforación y voladura como en la excavación mecánicas de ataque puntual (martillos, rozadoras, palas, etc) (fig. 1.10 y 1.11). El método mecanizado no requiere de fases ya que la tuneladora ataca toda la sección del túnel (SCT,2016).

Los criterios técnicos de la excavación de un túnel por fases, se resumen en los siguientes puntos:

- Una excavación de dimensiones pequeñas presenta menos problemas en cuanto a estabilidad del terreno que otro de mayor tamaño. Por lo tanto, si se excava una primera fase de dimensiones reducidas pero suficientes para que entren los equipos, los problemas que puede dar el material serán menores y más fáciles de solucionar. Además al excavar las fases restantes, se habrán mapeado las zonas de mala calidad del macizo rocoso o del suelo, por lo que se podrán implementar el tipo de sostenimiento adecuado para cada caso (SCT,2016).
- El alcance y dimensiones de la maquinaria y equipo (excavadoras, jumbos, rozadoras, Manipuladores, etc.) está limitado a unos 6-8 metros de altura, aunque existen modelos especiales que alcanzan mayores dimensiones. El excavar secciones de más altura dificultaría enormemente las labores de excavación y sobre todo al implementar el sostenimiento: concreto lanzado, marcos metálicos, anclas, etc. Por lo anterior se recomienda diseñar la excavación de la media sección superior no mayor de 6.5 m de altura (SCT,2016).
- Mediante la excavación por fases pueden conseguirse mayores rendimientos, ya que distintos equipos pueden trabajar simultáneamente en fases distintas a una cierta distancia, logrando avances superiores a los que se conseguirían a media sección superior o a sección

completa. Aunque en ocasiones se prefiere acortar los avances y excavar a media sección superior completa, que dividirla en fases con avances largos. Al final el diseño de la excavación estará regida por las dimensiones del túnel, la calidad del material y el tipo de sostenimiento (SCT,2016).

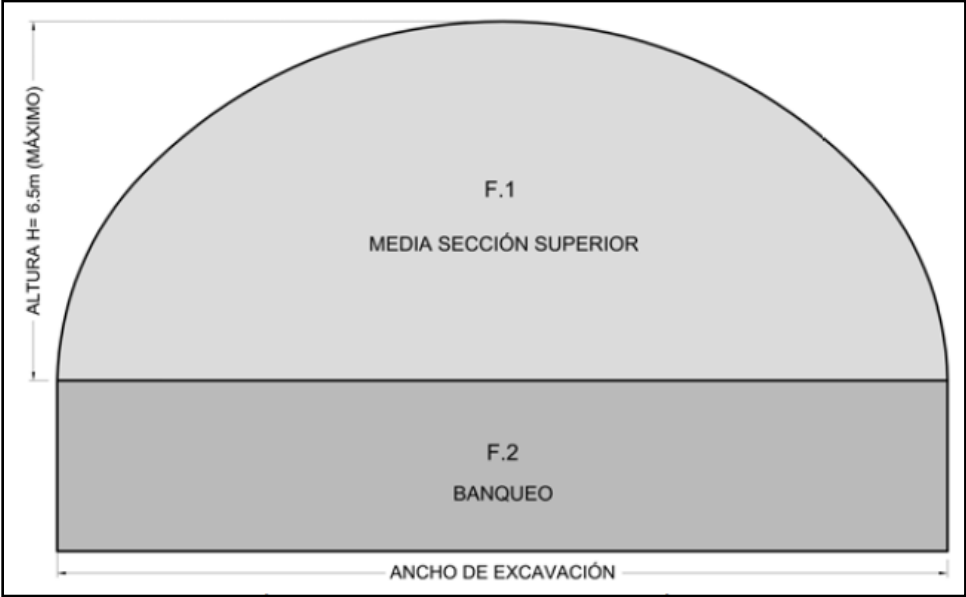


Figura1.10. Excavación en dos fases (Media Sección Superior y Banqueo).(SCT,2016).

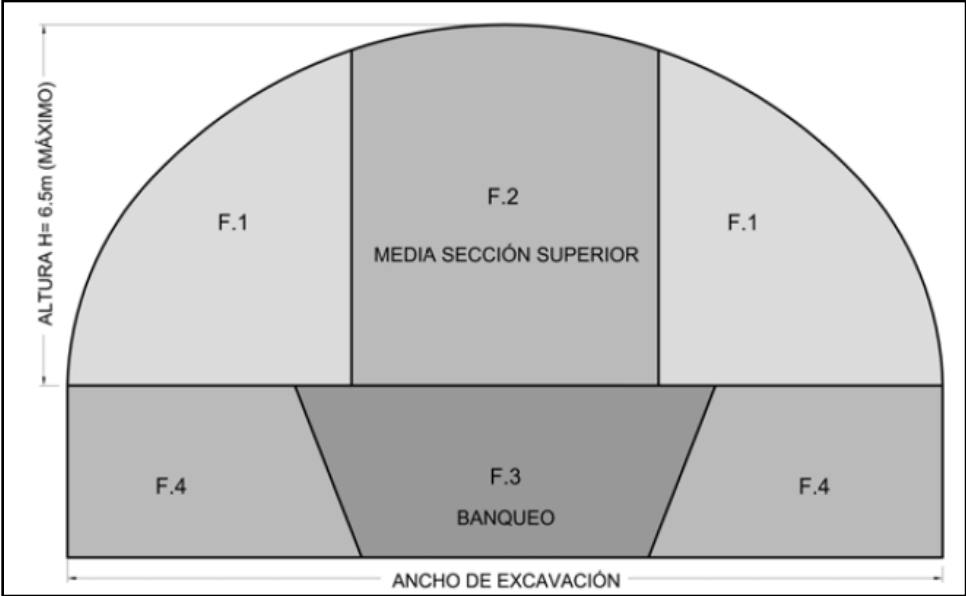


Figura1.11. Excavación en etapas.(SCT,2016).

En ocasiones se presentan situaciones en las que se tienen materiales de mala calidad, muy deformables o materiales expansivos que requerirán la excavación y construcción de una tercera fase denominada contraboveda (fig. 1.12) (SCT,2016).

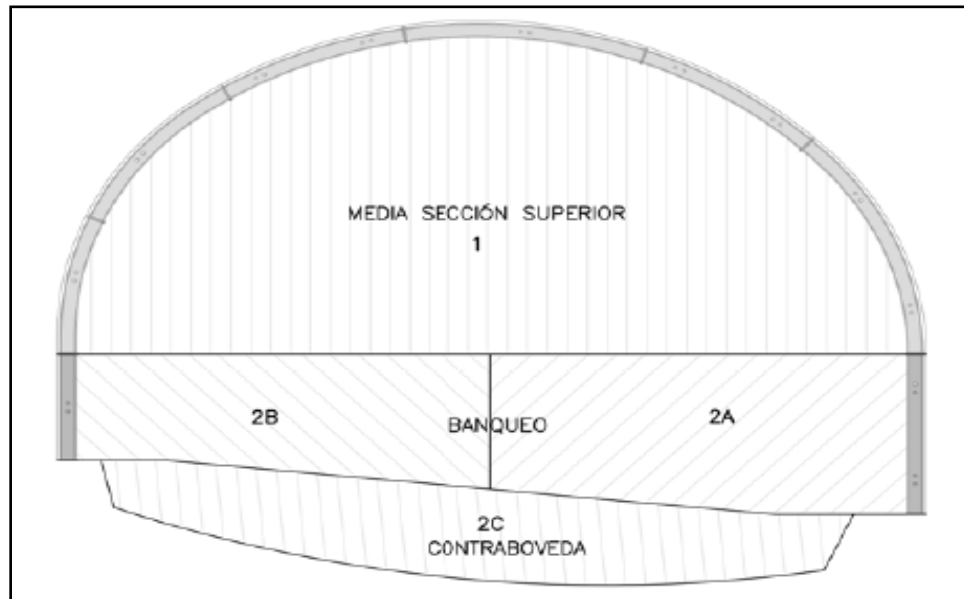


Figura1.12. Sección de excavación con contrabóveda. (SCT,2016).

1.3. Problemas Geotécnicos en Túneles.

1.3.1 Fallas.

El cuerpo de ingenieros a cargo del proyecto de un túnel debe ser sumamente cuidadoso con la presencia de fallas, es por ello que se debe conocer la posición que guardan éstas con respecto al eje del túnel así como la longitud que lo afectan. Además se determinará si tales fallas son activas o no junto con la magnitud que tienen, esto con el objetivo de tener noción si se encontrará roca triturada en la zona de estudio del túnel.

Dado el caso en que se cruce una falla activa, el túnel puede verse sometido repentinamente a grandes esfuerzos cortantes de gran peligro. Por otra parte el deslizamiento puede ocurrir en cualquier dirección de acuerdo con el sentido de los esfuerzos y la orientación de la superficie de deslizamiento, respecto al túnel. A razón de lo anterior es recomendable que al momento del trazo del túnel se pretenda tratar de atravesar las fallas perpendicularmente.

Esto disminuirá el área que genere problemas (deslizamientos o caídos), si por circunstancias alternas el proyecto no puede presentarse de esta manera resulta conveniente seguir las fallas de manera paralela siempre y cuando la obra se encuentre lo más alejada posible de las fallas.

1.3.2. Estratificación.

En la selección de la localización y profundidad del eje del túnel, la posición relativa de la estratificación debe ser estudiada cuidadosamente. La presión total sobre un túnel y la forma como ésta se distribuye a lo largo de él en rocas sedimentarias, depende principalmente de la estratificación. En las figuras 1.13 *a*, *b* y *c*, el revestimiento experimenta presiones verticales más o menos uniformes; en *d* y *f*, los estratos oblicuos producen una concentración de presiones en uno de los lados del túnel, en la figura *e*, la presión se concentra en la clave del arco (Ruíz, González, 2000).

Las rocas con estratificación inclinada pueden presentar problemas de estabilidad, sobre todo si se encuentran alteradas, falladas o fisuradas. Además pueden ocasionar deslizamientos, por lo cual hay que seleccionar correctamente el sentido de ataque y el método de excavación o perforación (Ruíz, González, 2000).

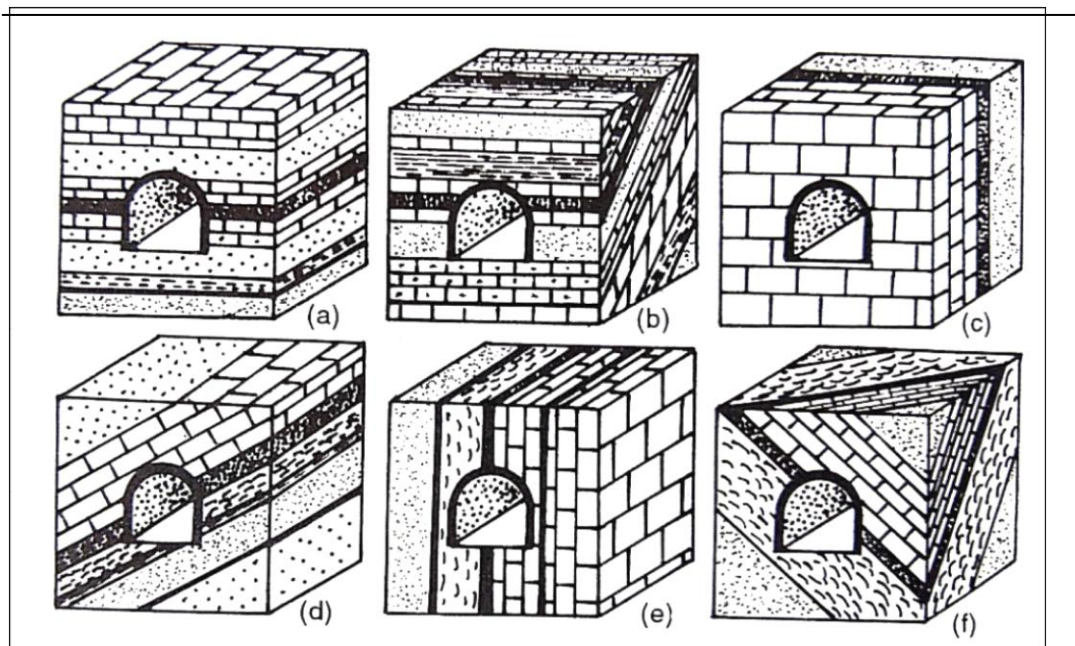


Figura 1.13. Influencia de la estratificación en el revestimiento de un túnel (Krynine, D.P. y Judd, R, Principios de geología y geotecnia para ingenieros, 1957) in (Ruíz, González, 2000).

Si el eje del túnel es llevado perpendicularmente al rumbo de rocas que tienen un echado fuerte (véase figura 1.14b) se hallarán varios contactos de rocas con diferentes propiedades, lo cual puede ocasionar problemas de permeabilidad o de estabilidad. Por esto es conveniente, si las condiciones del proyecto lo permiten, llevar el túnel paralelo al rumbo de una sola formación con propiedades adecuadas (figura 1.14a). Si los estratos son verticales y se construye un túnel perpendicular al rumbo, cada estrato puede actuar como una viga, lo cual brinda mayor estabilidad (figura 1.14c); la desventaja es que puede filtrarse mucha agua, o bien por su posición, si se emplean explosivos para la perforación, su efectividad de estos será menor. En el caso de que el túnel sea paralelo al rumbo de los estratos verticales (figura 1.14d) estos pueden separarse en bloques y deslizarse sobre todo en los portales de entrada y salida (Ruíz, González, 2000).

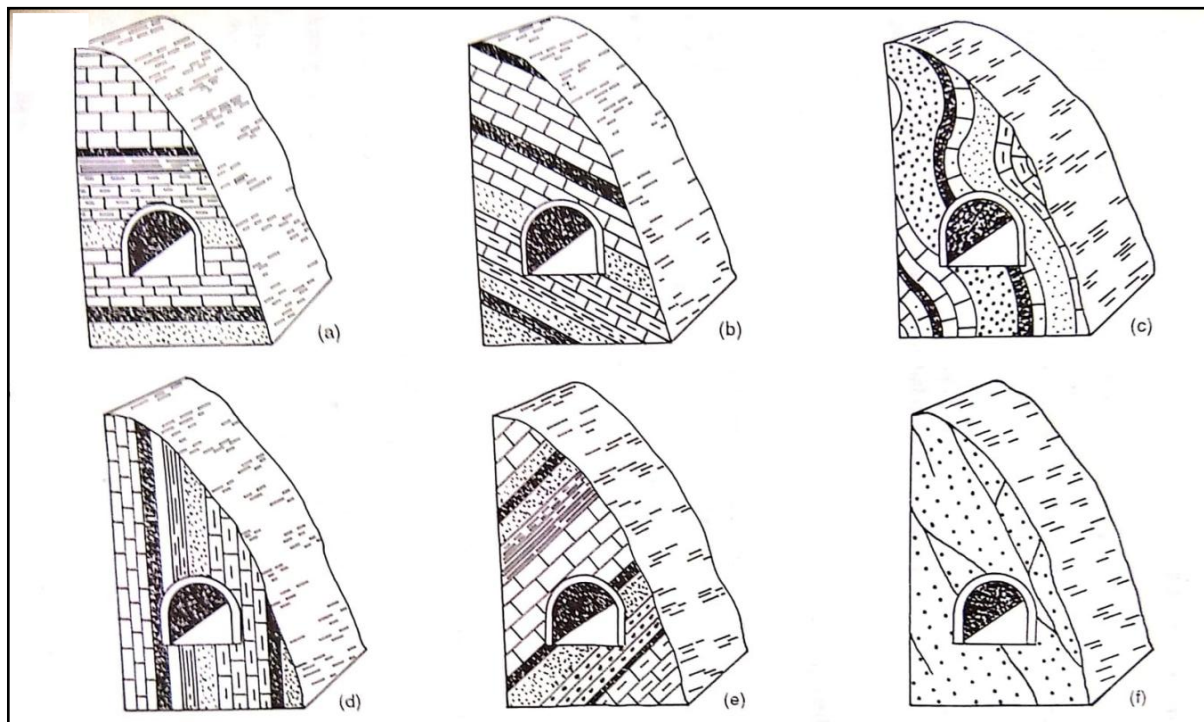


Figura 1.14. Ejemplos de la localización de túneles Adecuados: a,d,e ; Inadecuados: b,f (Ruíz, González, 2000).

1.3.3. Anticlinales y Sinclinales.

Los anticlinales presentan condiciones más favorables para ubicar un túnel, en primer lugar porque la presión que existe en el centro de éste es menor que en un sinclinal y en segundo porque si la formación es permeable, en un anticlinal el agua tiende a escurrir, mientras que en los sinclinales se acumula en el centro. Hay que tener en cuenta que en los anticlinales los estratos superiores están más deformados debido al plegamiento y por tanto más fisurados que los estratos inferiores de la estructura, por lo que es aconsejable tratar de situar el túnel a una profundidad en la cual el fracturamiento no tenga consecuencias (Ruíz, González, 2000).

1.3.4. Filtraciones.

Resulta de suma importancia el hecho de tratar de conocer la posición del nivel freático dentro del macizo rocoso sobre el cual se pretenda construir un túnel, esto debido a que durante la construcción del mismo las condiciones hidrológicas pueden variar. La presencia de agua dentro del túnel ocasiona problemas en los trabajos de construcción ya que puede penetrar de diferentes modos, ya sea por goteo, como corriente continua a través de las paredes de la perforación o bien a gran presión si está confinada. En cuanto a las zonas de falla, pueden presentar diferente comportamiento con base a sus características, es decir si se presentan en un relleno arcilloso o roca triturada, en otras palabras se pueden comportar como un umbral impermeable que impida el paso del agua, o como un buen acuífero. Por otra parte las discordancias o el contacto con rocas impermeables son también zonas con grandes posibilidades de presentar agua.

1.3.5. Rocas sometidas a esfuerzos (bufamientos y reventones).

En el caso de túneles profundos y en terrenos donde hay rocas de naturaleza arcillosa como tobas, lutitas, esquistos micáceos y pizarras, llegan a presentarse deformaciones poco tiempo o inmediatamente después de excavada la obra, estas deformaciones tienen relación con la liberación de presiones del macizo rocoso. Dichas deformaciones son conocidas como bufamientos y son notables hacia el interior de la obra sobre todo cuando las rocas arcillosas tienen entre sus componentes, minerales bentoníticos y estos se ponen en contacto con agua o humedad proveniente de la misma formación rocosa. A veces dichos materiales

corresponden con sitios muy localizados como el caso de zonas de fallas, donde al bufamiento de los materiales se presenta un volumen considerable de agua. Un ejemplo claro de lo mencionado es la anhidrita ya que dicho mineral en presencia de agua se transforma en yeso, con un aumento de volumen de hasta el 20 por ciento, lo cual genera presiones sobre el ademe o revestimiento definitivo y lo lleva a su destrucción.

El caso de los reventones ocurre también en túneles con una profundidad mayor de 150 metros cuando se trata de rocas duras, quebradizas, de grano fino como el granito o la diabasa. Estos reventones suelen presentarse en las paredes del túnel en forma violenta de tal manera que acarrea en ocasiones un volumen considerable de roca (Ruíz, González, 2000).

1.3.6. Altas temperaturas y gases.

El trabajo de túneles profundos puede dificultarse a razón de las altas temperaturas que dependen en gran parte del gradiente geotérmico, el cuál es en promedio de 1°C por cada 30 a 35 metros, aunque puede ser modificada por la acción o proximidad de cuerpos intrusivos cercanos, por acción volcánica reciente o bien de acuerdo con Krynine, “La presencia de rocas fisuradas o muy porosas aumenta el valor del gradiente”. Cuando en un área se realizan exploraciones por medio de perforaciones, es recomendable que se hagan determinaciones de temperatura, particularmente si se presume que pudieran existir temperaturas altas. Algunas veces la elevación de la temperatura está asociada con la presencia de gases que pueden ser tóxicos, estos gases son comunes en regiones de actividad volcánica. (Ruíz, González, 2000)

Lutitas carbonosas o capas de carbón pueden originar la producción de metano, gas que si bien no es tóxico es explosivo e inflamable. Entre los gases que se pueden considerar tóxicos se encuentra el bióxido de carbono que en cantidades de 15 a 20 por ciento llega a ser mortal. Este gas se encuentra en regiones de actividad volcánica reciente aunque también es el producto de la oxidación de materiales carbonosos. (Ruíz, González, 2000)

CÁPITULO 2.INTRODUCCIÓN.

Durante los últimos años el impulso que ha tenido la infraestructura hidráulica en México así como las obras subterráneas ha contribuido a un desarrollo muy importante del país. Por otra parte ha dado soluciones a las problemáticas hidráulicas originadas a causa de la geología y estratigrafía heterogénea de la Ciudad de México.

La Ciudad de México además de ser una de las ciudades con mayor reconocimiento a nivel mundial, se cimenta sobre una serie de estratificaciones particulares. Es decir que en gran parte dicha urbe se encuentra desplantada sobre arcillas sumamente singulares. Estas tienen la particularidad de tener propiedades índice únicas, dentro de las cuales destacan altos contenidos de humedad, alto índice de compresión y alto índice de plasticidad.

Dado lo anterior, cabe mencionar que la Ciudad de México se sitúa en una planicie lacustre, la cual está definida por la cuenca de México. La cuenca de México posee alrededor de 125km de largo y 75 km de ancho, con una superficie de 9600 Km², se sitúa entre una altitud mínima de 2,150 m.s.n.m. a 2,390 m.s.n.m., está rodeada por altas montañas y limitada al norte por las sierras: Pachuca, Tepotzotlán, Guadalupe, Platachique y Tepozán. Al sur por la Sierra Chichinautzín. En cambio al este por las sierras: Nevada y los incomparables conos volcánicos Iztaccíhuatl y Popocatepetl con una altura media de 5300 m.s.n.m. Finalmente al oeste por las sierras: Monte Alto y de las Cruces.

A consecuencia de la geología y estratigrafía mencionada anteriormente, a través del tiempo las inundaciones han sido un tema recurrente en la Ciudad de México, para mitigar dicha problemática se ha buscado una solución que no implique detener el crecimiento urbano en dicha metrópoli, ya que la zona lacustre sobre la cual se asentó la Ciudad de México se ha estado reduciendo para dar lugar a una ciudad cada vez más grande y con un mayor número de habitantes.

Como una alternativa de prevención se han construido obras hidráulicas de gran eficacia para drenar la cuenca, ya que al quedar cerrada hace 700,000 años la única manera de desalojar el agua de las lluvias era mediante la vía de evaporación. Desafortunadamente con el transcurso de los años se presentó un gran rezago en las obras, particularmente en lo relativo a la capacidad de descarga del Túnel Emisor Central, el cual originalmente se

diseñó para desalojar las aguas pluviales y que más tarde fue utilizado para transportar aguas residuales.

Por otra parte, en las últimas 10 décadas, algunas partes de la Ciudad de México se han hundido aproximadamente 12m. La parte de la ciudad que ha resultado con mayor afectación es aquella que está desplantada sobre subsuelo lacustre ya que a medida que se extrae más agua subterránea de la que puede ser reemplazada por la precipitación, el terreno se vuelve cada vez más compacto dando como resultado una serie de asentamientos diferenciales, los cuales se traducen a hundimientos regionales.

El "Túnel Emisor Central" y el "Canal del Desagüe", solían ser los principales colectores de aguas residuales de la Ciudad de México en la década de los 70^{as}, sin embargo a consecuencia del desarrollo demográfico que se presentó en dicha urbe y a la alta demanda por la extracción de aguas subterráneas optó por presentar asentamientos, lo cual con el paso del tiempo dio como resultado un hundimiento crucial. Su pendiente fue cada vez más desfavorable, de modo que llegó a perder alrededor del 40% de su capacidad original de 170 m³/s. En algunas partes, dicho gradiente resultó invertido, por lo que se optó por la aplicación de bombas para transportar las aguas residuales. Año tras año se producían graves inundaciones a razón de que dicho sistema de aguas residuales no era capaz de mitigar las masas de lluvia.

Dada la problemática que se menciona anteriormente, surge la necesidad de realizar un proyecto que sirva como alternativa al Túnel Emisor Central (T.E.C.) dicho proyecto resultó ser el Túnel Emisor Oriente, el cuál apoya al T.E.C. en épocas de mantenimiento y que permite mantener la capacidad de operación del sistema durante todo el año, a su vez ha sido catalogado como una de las obras hidráulicas más importantes del mundo ya que cuenta con 62 kilómetros de longitud y 7 metros de diámetro, además de 25 lumbreras ubicadas entre 25 y 120 metros de profundidad. El proyecto, cuya construcción tomó más de una década, forma parte del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México y tiene como finalidad el desalojo de las aguas residuales y de lluvia de la capital y la zona conurbada, mitigando así el riesgo de inundaciones.

Por otra parte en el norponiente se contaba con el Túnel Emisor Poniente (TEP). Sin embargo con el paso de los años, a casi cuatro décadas de la construcción TEP debido al incremento desordenado de asentamientos urbanos en la zona, la demanda rebasó su capacidad de desalojo, en condiciones de precipitaciones extraordinarias, cuya evidencia es su ruptura en septiembre de 2009. A consecuencia de ello se optó por ejecutar el proyecto Túnel Emisor Poniente II, cuyo objetivo principal fue el beneficiar a 2.13 millones de habitantes de los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán Izcalli y Atizapan de Zaragoza.

CÁPITULO 3.ANTECEDENTES.

3.1. Geología de México.

México con una extensión territorial de 2, 000,000 km², considerando las características geomorfológicas se ha dividido en 15 provincias fisiográficas de acuerdo al INEGI (2005). Cada una de estas provincias está delimitada como una región con características propias, tales como: morfología y origen. En la figura 3.1 se muestran las 15 provincias fisiográficas en las que se ha dividido el país.



Figura 3.1. Carta de las Provincias Fisiográficas de México. Escala 1:1,000,000 (Fuente: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Dirección General de Geografía). (2005).

El mapa geológico (carta geológica) (Fig. 3.2) está subdividido en 76 unidades estratigráficas en que se integró la geología de México, fijando la distribución geográfica y su relación litoestratigráfica. Litológicamente del total de unidades, predominan las rocas sedimentarias y el 80% del total se halla en el Cenozoico o Mesozoico, y solo el 7% concierne al Precámbrico. En la Tabla 1 se muestra esta relación. Esta situación indica que casi tres cuartas partes del país exhiben rocas relativamente jóvenes, es decir de los últimos 225 millones de años, mientras que las rocas Precámbricas (2600 a 4000 millones de años) corresponden al 12%. (De la Llata , 2011)

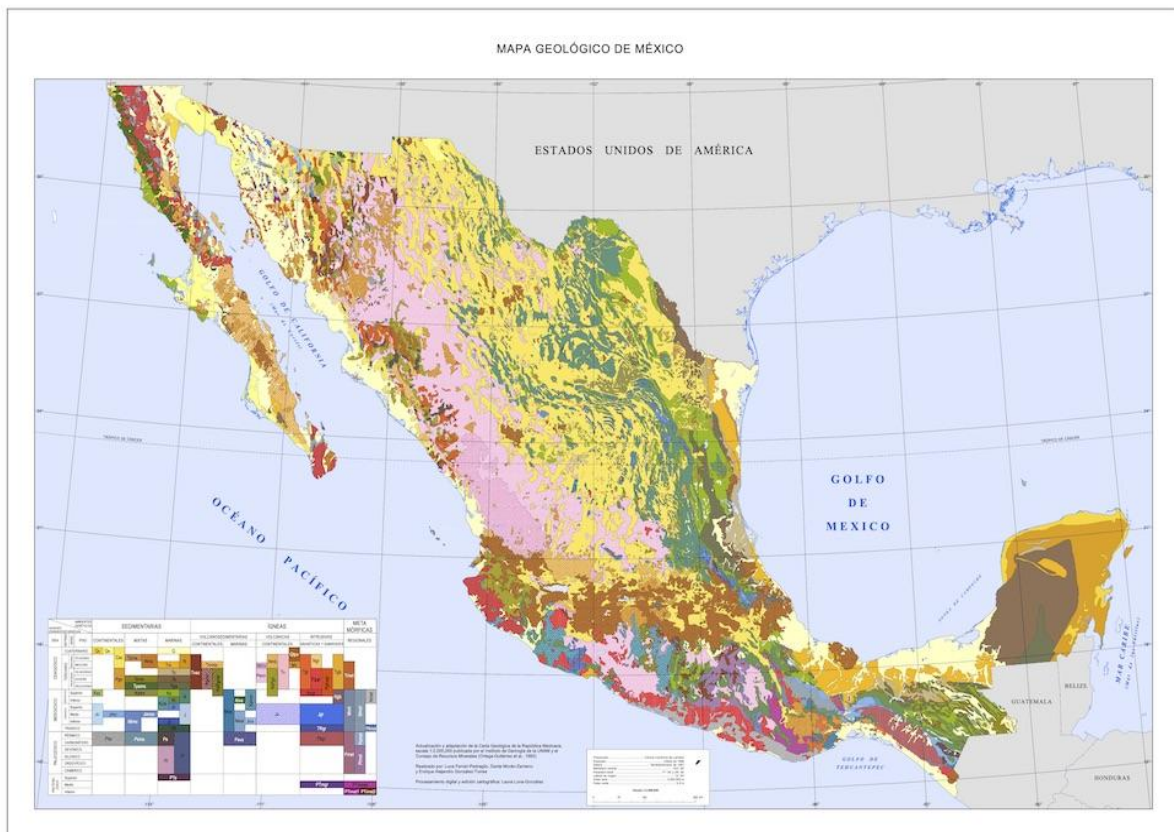


Figura 3.2 Mapa Geológico de México. Instituto de Ingeniería UNAM (2007).

Unidades Sedimentarias	34	-	-	-	-	34
Unidades sedimentarias de origen continentales	8	-	-	-	-	-
Unidades sedimentarias de origen mixto	8	-	-	-	-	-
Unidades sedimentarias de origen marino	18	-	-	-	-	-
Vulcano sedimentarias	-	9	-	-	-	9
Volcánicas Continentales	-	3	-	-	-	-
Volcánicas Marinas	-	6	-	-	-	-
Volcánicas	-	-	12	-	-	12
Intrusivas	-	-	-	10	-	10
Metamórficas	-	-	-	-	11	11
Total						76

Tabla 1. Unidades litológicas identificadas por tipo litológico (modificado de Ortega Gutierrez, *et al.*) (1992). En De la Llata (2011).

A grandes rasgos podemos mencionar que la geología de México se divide en “Provincias Geológicas”, término que de acuerdo con Ortega-Gutiérrez *et al* (1992): “... Toda parte cartografiable de la superficie sólida del planeta, de centenares a millones de kilómetros cuadrados de extensión, caracterizada por sus rocas, por su estructura y por una secuencia de eventos tal que integre una historia evolutiva singular diferente a la de las áreas adyacentes, de las cuales está separada por límites estratigráficos, tectónicos o por ambos” (Chávez Aguirre, 2006).

Con base a Chávez Aguirre, “Geotecnia” (2006), la geología de México se divide en seis provincias geológicas principales:

- Península de Baja California.
- Sierra Madre Occidental.
- Sierra Madre Oriental.
- Eje Neovolcánico.
- Sierra Madre del Sur.
- Sureste de México (Chiapas, Tabasco y Península de Yucatán)

Península de Baja California.

La península de Baja California (fig. 3.3) ofrece una alta complejidad estructural y de afloramientos rocosos. En la porción norte de Baja California la secuencia estratigráfica varía desde el Paleozoico hasta el Reciente. La configuración de las diferentes unidades se puede definir según tres fajas preterciarias que corren a lo largo de esta porción de la península y que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables. Estas fajas se encuentran cubiertas de manera independiente por cuerpos volcánicos y depósitos sedimentarios del Terciario y Cuaternario (Chávez Aguirre, 2006).



Figura 3.3. Detalle de la Carta Geológica de la República Mexicana que muestra a la Península de Baja California. (Instituto de Ingeniería, UNAM 2007).

La primera faja, ubicada en el extremo occidental de la península, está representada por una secuencia de sedimentos marinos y continentales del Cretácico Superior que se presentan poco consolidados y sin fuertes perturbaciones tectónicas. La secuencia consiste de estratos sub horizontales de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados con presencia, tanto de fósiles marinos como de huesos de saurios (Chávez Aguirre, 2006).

La faja siguiente está ubicada al este de la anterior; la constituyen secuencias de rocas volcánicas, volcano clásticas y sedimentarias, cuya edad corresponde principalmente al Cretácico Inferior. La secuencia superior está constituida sobre todo por rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y el Albiano, así como por rocas elásticas derivadas de rocas volcánicas (Chávez Aguirre, 2006).

La tercera faja está constituida por el "Arco Alisitos" (Gastil, 1975), representado por una serie volcano clástica andesítica-dacítica de edad Jurásico-Cretácico Inferior, metamorfizada y de gran extensión. Después de estos derrames tuvo lugar la intrusión de

los grandes batolitos que forman la Sierra de San Pedro Mártir. Desde la parte central hasta casi el extremo sur de la Península destaca una gran masa de rocas volcánicas terciarias que constituyen la Sierra de La Giganta. El conjunto es de composición riolítica, andesítica y piroclástica, de 1 200m de espesor y geomorfología variada (Chávez Aguirre, 2006).

Sierra Madre Occidental.

Con desniveles de más de dos mil metros se sitúa al noroeste del país, alargándose desde Cananea, en la frontera con los Estados Unidos, hasta Guadalajara, Jalisco. Se divide en tres zonas: la de altas mesetas, la de barrancas y la de montañas y valles paralelos. Se divide en tres zonas: la de altas mesetas, la de barrancas y la de montañas y valles paralelos (Chávez Aguirre, 2006).

Lo que distingue a la Sierra Madre Occidental (fig 3.4) de las demás provincias geológicas es la abundancia de rocas ígneas, tanto intrusivas como extrusivas y piroclásticas, pero también existen, aunque en menor proporción, rocas sedimentarias y metamórficas. Las rocas metamórficas son las más antiguas, de ellas pueden encontrarse vestigios tanto en Sonora y Sinaloa como en Chihuahua, representadas generalmente por esquistos y gneises del Precámbrico (Chávez Aguirre, 2006).

En general, las rocas sedimentarias y metamórficas están intrusionadas o cubiertas por grandes cuerpos intrusivos o derrames de lava, que se emplazaron en la corteza como respuesta a los fenómenos tectónicos de cada periodo o etapa geológica. Por ejemplo, es frecuente encontrarlos florando en los cañones más profundos o en la cima de las más altas montañas grandes cuerpos de granito o granodiorita, que constituyen las estructuras ígneas que conocemos como batolitos o stocks y apófisis más pequeñas. Entre los derrames de lava predominan los de andesita y dacita, pero también es común encontrar de riolita y basalto (Chávez Aguirre, 2006).

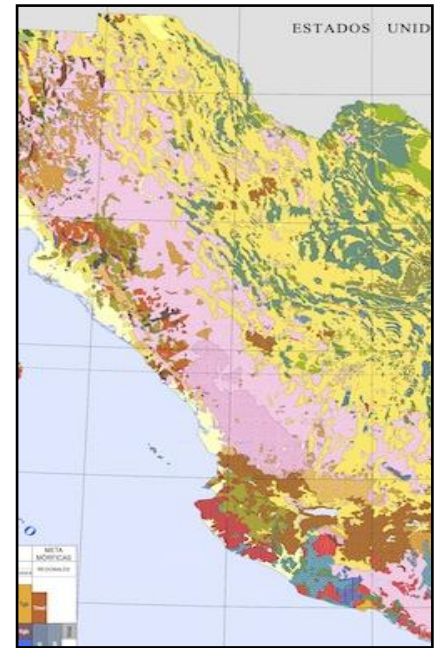


Figura 3.4. Detalle de la Carta Geológica de la República Mexicana que muestra a la Sierra Madre Occidental. (Instituto de Ingeniería, UNAM 2007)

Sierra Madre Oriental.

La Sierra Madre Oriental (fig. 3.5) se extiende desde Monterrey, N. L. hasta Jalapa, Veracruz. Está formada por sedimentos del Cretácico y Jurásico, principalmente calizas, plegados en sinclinales y anticlinales que forman cordilleras alargadas y uniformemente esculpidas. La elevación de las montañas disminuye hacia el sur y en la parte suroccidental el paisaje es más irregular, las cordilleras son más bajas y están parcialmente enterradas por detritos aluviales y localmente afectadas por actividad volcánica. En muchos lugares se encuentran promontorios y sumideros típicos de paisajes cársticos (Chávez Aguirre, 2006).



Figura 3.5. Detalle de la Carta Geológica de la República Mexicana que muestra a la Sierra Madre Oriental. (Instituto de Ingeniería, UNAM 2007)

En las partes más elevadas de la Sierra Madre Oriental, entre Tamaulipas y San Luis Potosí afloran rocas metamórficas del Precámbrico y Paleozoico, y rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico, principalmente calizas y después lutitas y areniscas de estratificación variable (Chávez Aguirre, 2006).

En la parte norte la Sierra es más compleja y las estructuras están orientadas casi de norte a sur, mientras que en la parte meridional, dichas estructuras se van flexionando de oriente a poniente hasta alcanzar una orientación franca de NW a SE. En la parte suroccidental afloran rocas sedimentarias plegadas, representadas por calizas y lutitas del Cretácico, que forman anticlinales, sinclinales y fallas orientadas de NW a SE. En el extremo occidental afloran calizas, yesos y lutitas del Jurásico y Cretácico, que por efectos tectónicos han formado un sistema de sierras plegadas y fallas orientadas por lo general de norte a sur, con variantes tanto de NW a SE como de NE a SW (Chávez Aguirre, 2006).

El estilo estructural de la Sierra Madre Oriental se caracteriza por una serie de pliegues, orientados en forma general de NNW a SSE, que se extienden desde Monterrey, N. L., hasta Teziutlán, Puebla. Las estructuras son anticlinales y sinclinales simétricos y

asimétricos, amplios y cerrados, que ocasionalmente son muy estrechos y recumbentes, asociados al fallamiento inverso (Chávez Aguirre, 2006).

Eje Neovolcánico.

El Eje Neovolcánico Transmexicano (fig. 3.6) constituye una franja volcánica del Cenozoico Superior que cruza transversalmente la República Mexicana a la altura del paralelo 20. Está formado por una gran variedad de rocas volcánicas que fueron emitidas a través de un importante número de aparatos volcánicos, algunos de los cuales constituyen las principales alturas del país (Chávez Aguirre, 2006).

Los principales aparatos volcánicos son estratovolcanes de dimensiones muy variables, como el Pico de Orizaba, el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, el Nevado de Toluca, y el Nevado de Colima; todos ellos fueron edificados por emisiones alternantes de productos piroclásticos y derrames lávicos. Existen, además, aparatos del tipo de conos cineríticos generalmente pequeños, como el Parícutín y los aparatos dómicos riolíticos que se encuentran ubicados al suroeste de Guadalajara (Chávez Aguirre, 2006).

En la porción central del eje se han reconocido siete fases de volcanismo que tuvieron lugar a partir del Oligoceno; la más importante de ellas es la quinta, ocurrida a fines del Mioceno, la que dio origen a las sierras de Las Cruces, de *Río Frío* y Nevada. Durante la sexta fase se desarrollaron los conos y domos del Iztaccíhuatl y el cono activo del Popocatepetl. La última fase, al igual que la anterior, se desarrolló en el Cuaternario y es responsable de la actividad volcánica que interrumpió el drenaje de la Cuenca de México hacia la Cuenca del Río Balsas, lo que originó el carácter endorreico de aquélla (Chávez Aguirre, 2006).

La mayor parte de los autores coinciden en que la actividad del Eje Neovolcánico se inició en el Oligoceno y ha continuado hasta el Reciente. El origen del Eje Neovolcánico ha sido relacionado principalmente con la subducción de la Placa de Cocos, debajo de la corteza continental de México, que al nivel de la astenosfera sufre fusión parcial y origina los magmas del eje. La subducción comenzó a desarrollarse progresivamente en el Oligoceno (Chávez Aguirre, 2006).



Figura 3.6. Extensión territorial del Eje Neovolcánico. (Modificado a partir de: Rhoda, Richard; Burton, Tony. The volcanic calderas of Mexico's Volcanic Axis. Recuperado de: geo-mexico.com, 2013)

Sierra Madre Sur.

La Sierra Madre del Sur, que bordea el Océano Pacífico en los estados de Michoacán, Morelos, Guerrero y Oaxaca, consiste principalmente de varios complejos de rocas metamórfica se intrusiones ígneas. Estas rocas se dividen en tres complejos caracterizados por sulitología, edad y estilo estructural. La secuencia más antigua la constituye el Complejo Oaxaca que aflora extensamente, formado principalmente por gneisses pero que también incluye charnockitas, anortositas y pegmatitas complejas, de edad Precámbrica (1 050 ± 20 m.a.) (Chávez Aguirre, 2006).

Al noroeste del Complejo Oaxaca se extiende otra serie de rocas metamórficas consistentes en orto y para-gneisses cuarzo feldespáticos y migmatitas con características de metamorfismo de la facies anfíbolita y a la cual se le da el nombre de Complejo Acatlán. La edad de estas rocas se considera pre-Misisípico. Un tercer complejo metamórfico, denominado Xolapa aflora en los estados de Guerrero y Oaxaca, por más de 600 km,

paralelo a la costa del Pacífico. Presenta una litología muy variada de esquistos, migmatitas gneises además rocas metamórficas de tipo ofiolítico, las cuales podrían ser el resultado de acreción de una paleozona de subducción (Chávez Aguirre, 2006).

El sur de México y América Central están afectados por una actividad tectónica denominada Faja Circum pacífica, en la que se encuentran los agentes tectónicos que generan gran cantidad de sismos de muy diversas magnitudes y profundidades. (Chávez Aguirre, 2006)



Figura 3.7. Detalle de la Carta Geológica de la República Mexicana que muestra a la Sierra Madre del Sur. (Instituto de Ingeniería, UNAM 2007)

Sureste de México (Chiapas, Tabasco y Península de Yucatán).



En la región que comprende los estados de Chiapas y Tabasco aflora una amplia secuencia del Mesozoico y Cenozoico, constituida principalmente por rocas sedimentarias marinas que se encuentran plegadas y afalladas. Esta secuencia descansa sobre un basamento cristalino del Precámbrico y Paleozoico que aflora al suroeste de la misma región, en donde las rocas cristalinas de estas eras forman un complejo batolítico y metamórfico que constituye el núcleo de la Sierra de Soconusco. En la Península de Yucatán y en gran parte del estado de Chiapas se instaura un gran banco calcáreo

Figura 3.8. Detalle de la Carta Geológica de la República Mexicana que muestra el Sureste de México. (Instituto de Ingeniería, UNAM 2007)

correspondiente a la transgresión marina de inicios del Cretácico, lo que da como resultado la sedimentación de carbonatos y anhidritas en estas regiones (Chávez Aguirre, 2006).

Al final del Cretácico, un asteroide de 10 km de diámetro chocó contra el planeta precisamente en el límite norte de lo que actualmente es la Península de Yucatán. Este impacto en el fondo marino provocó la formación de una ola de gran altura que transportó material en suspensión hacia la planicie costera actual del Golfo de México, inundando casi la mitad del país de sur a norte y depositando en algunos lugares las partículas que constituyen la base de los sedimentos detríticos de esa zona. Los fenómenos catastróficos que sucedieron al impacto del asteroide contribuyeron en gran medida a la extinción de las especies de dinosaurios, ya para esa época debilitados por la escasez cada vez mayor del alimento que requerían en grandes cantidades. Los restos del asteroide y el cráter de cerca de 200 km de diámetro formado por el impacto en el fondo marino, fueron cubiertos lentamente por sedimentos calcáreos y terrígenos del Terciario. A partir de este momento, la península en su forma actual comenzó a emerger (Chávez Aguirre, 2006).

La secuencia cretácica está constituida principalmente por anhidritas, calizas, dolomías e intercalaciones de bentonitas y algunos materiales piroclásticos. Los depósitos cenozoicos de la Península de Yucatán están representados principalmente por secuencias calcáreas y dolomíticas con intercalaciones de evaporitas (Chávez Aguirre, 2006).

3.2 Cuenca De México.

La Cuenca de México con 9600 Km², es una formación endorreica y se sitúa entre una altitud mínima de 2,150 m.s.n.m. a 2,390 m.s.n.m., está rodeada por altas montañas y limitada al norte por las sierras: Pachuca, Tepetzotlán, Guadalupe, Platachique y Tepozán (fig. 3.9). Al sur por la Sierra Chichinautzín. En cambio al este por las sierras: Nevada y los incomparables conos volcánicos Iztaccíhuatl y Popocatepetl con una



Figura 3.9. Orografía de la Cuenca de México. (Chávez Aguirre, 2012)

altura media de 5300 m.s.n.m. Finalmente al oeste por las sierras: Monte Alto y de las Cruces (fig. 3.9). Cabe mencionar que dicha cuenca se ubica dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano (figura 3.10), tal como se mencionó anteriormente, ésta provincia geológica se caracteriza por un relevante número de aparatos volcánicos, algunos de los cuales se encuentran dentro de la propia cuenca de México.

En general, la cuenca de México se divide en 4 valles:

- Valle de México: Región geográfica que se localiza en el centro sur de la República Mexicana. La Región Valle de México se integra por municipios de tres estados (México, Hidalgo y Tlaxcala) y por las 16 delegaciones de la Ciudad de México. La subregión Valle de México, con una superficie de 9.7 mil km² y 19.6 millones de habitantes, se integra por 85 municipios.
- Valle de Cuautitlán: Ubicado dentro de la región hidrológica No. 28 llamada Pánuco y la región XIII llamada Valle de México del Sistema Cutzamala, con elevaciones mínimas entre 2150 m.s.n.m. a 2250 m.s.n.m. en sus valles y en las sierras de Monte Alto y Tepotzotlán de unos 3000 m.s.n.m. como máximo, es esta una cuenca abierta al oriente y norte por donde descarga sus afluentes hidrológicos en la región hidrológica No. 28.
- Valle de Apan: Principalmente comprende municipios del sur del Estado de Hidalgo, parte del altiplano del mismo e incluso algunos municipios del estado de Puebla, Tlaxcala y Estado de México.
- Valle de Tizayuca: Es un valle a las orillas del Valle de Cuautitlán y el Valle de Apan, delimitado por la Sierra de Pachuca, este valle forma parte de la Cuenca de México; ubicado en el Estado de Hidalgo, comprendiendo parte de los municipios de Pachuca de Soto, Zapotlán de Juárez, Tolcayuca, Tizayuca y Villa de Tezontepec. Este valle está orientado en dirección noreste-suroeste y presenta una longitud aproximada de 35 km por un ancho que va de 15 a 20 km.

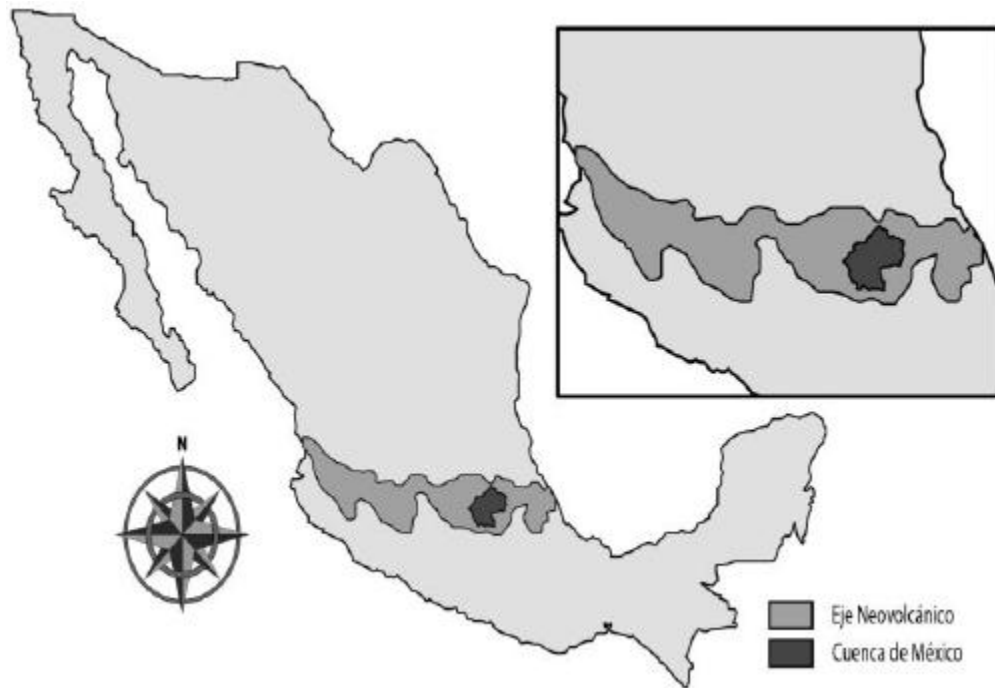


Figura 3.10. Eje Volcánico Transmexicano y la Cuenca de México (Chávez Aguirre 2012).

Formación.

El origen de la Cuenca de México guarda estrecha relación con el Eje Volcánico Transmexicano (EVT); esta importante estructura geológica está ligada a la subducción de la Placa de Cocos en el Océano Pacífico y a un sistema de fracturas que corta nuestro país de Este a Oeste, desde la costa del Pacífico hasta el Golfo de México. A través de estas fracturas fluyó hacia la superficie material magmático que fue creando un cinturón de volcanes que perduran activos, como el Volcán de Colima al Oeste, el Popocatepetl en el centro y el Pico de Orizaba en el Este, pasando por gran cantidad de pequeños edificios volcánicos, el más reciente, el Parícutín, que nació en 1943 en Michoacán. El material que fluyó hacia la superficie, se derramó en forma de lava y construyó los volcanes del Eje, atravesó una secuencia de rocas de varios tipos, principalmente sedimentarias calcáreas, depositándose sobre ellas para constituir finalmente un espesor considerable de rocas volcánicas sobre ese basamento de rocas sedimentarias. El conjunto fue automáticamente

fracturado; por estas fracturas resultantes continúa la emanación del magma que caracteriza las erupciones lávicas actuales (Chávez Aguirre, 2012).

El Eje Volcánico Transmexicano ha estado en constante actividad, la cual se manifiesta claramente en la formación de los límites de la Cuenca de México, cuyo inicio se remonta al Mioceno Medio, hace 14 millones de años, cuando se formaron las sierras de Pachuca, Guadalupe, Tepetzotlán, Tepozán y Las Pilas en la mitad norte de la cuenca (figura 3.2.1), aunque algunos autores sugieren que el vulcanismo que afectó a la parte central de México es únicamente plio-cuaternario (Plioceno-Pleistoceno, menos de 2 millones de años), como lo indican las edades de algunos volcanes: Ajusco (10,000 años), Malinche (9 500 años), Iztaccíhuatl (7500 años), Nevado de Toluca (7000 años), Popocatepetl (5000 años). Tomando en cuenta esta observación y en un intento de reconstruir los eventos volcánicos que limitaron la cuenca, podríamos decir que durante el Plioceno Tardío- Pleistoceno, se limitó la mitad sur con la aparición de la Sierra de Las Cruces, al occidente, y las sierras Nevada y Río Frío, al oriente (Chávez Aguirre, 2012).

Hasta el Plioceno la cuenca estaba abierta en el sur, permitiendo el drenaje de sus ríos, pero a la mitad del Pleistoceno, hace seiscientos mil años, surgió la sierra de Chichinautzin que se extiende entre la sierra de Zempoala en el oeste y las bases del Popocatepetl en el este, vulcanismo que surgió por fracturas orientadas W-E en la zona de Puebla y al sur de Toluca, lo que bloqueó el drenaje de los valles hacia el sur, hacia el Amacuzac para definir una cuenca cerrada, cuyos ríos drenarían hacia su interior, permitiendo la creación de grandes lagos. La gran sedimentación clástica aluvial del Plio-Cuaternario en la Cuenca de México, estuvo supeditada al bloqueo parcial del desagüe, causado por el fallamiento normal y/o por el emplazamiento de derrames lávicos basálticos. El régimen endorreico y consecuente sedimentación lacustre del Pleistoceno-Holoceno, se originó como consecuencia del intenso vulcanismo que edificó la Sierra Chichinautzin. (Chávez Aguirre, 2012)

Existen en el Valle de México una red de valles sepultados, erosionados en una Serie Estratificada, correlacionable con la Formación Tepozteco. Estos valles acusan profundidades de 200 a 300m debajo de la Alameda y el Zócalo. Fueron rellenados al

obstruir la sierra del Chichinautzin el antiguo desagüe al Alto Amacuzac. Debajo de la Serie Estratificada se encuentran depósitos lacustres del Plioceno (Chávez Aguirre, 2012).

La actividad ígnea y los sistemas complejos de fallas y fracturas conjugadas, actualmente activas, formaron sistemas de fosas y pilares en la Cuenca. Las fosas están azolvadas con espesores potentes de sedimentos lacustres intercalados con lavas y piroclastos, lo que indica que el hundimiento del basamento, debido a la emersión regional del EVT, está acompañado por la actividad magmática de la placa oceánica de Cocos (Chávez Aguirre, 2012).

Los ríos que descendían de las sierras circundantes depositaron en potentes conos de deyección, materiales muy diversos al confluir en los lagos. La parte central de la cuenca se fue llenando con acarreo limo-arenoso, limo-arcilloso y emisiones de cenizas y pómez provenientes de los volcanes del sur. Al pie de las sierras y por el brusco cambio de pendiente de los ríos, se localizan grandes depósitos aluviales de composición muy variable y estratificación cruzada o lenticular, evidencia de una dinámica erosiva debido a periodos de lluvia intensa. De acuerdo a la composición de los materiales, se definen tres zonas en la ciudad de México: la del Lago, la de Transición y la de Lomas. La primera es la zona lacustre; la segunda es de material predominantemente arenoso y la tercera corresponde a tobas y rocas volcánicas (Chávez Aguirre, 2012).

Según Díaz - Rodriguez, J. A. (2006), los principales eventos geológicos en la cuenca de México se pueden resumir en la siguiente tabla.

PRINCIPALES EVENTOS GEOLÓGICOS EN LA CUENCA DE MÉXICO
•Depósito de aproximadamente 2,000 m de calizas, areniscas y lutitas en un ambiente marino durante el Cretácico
•Plegamiento y fallamiento normal de las rocas marinas durante el Terciario temprano, dando origen a un sistema tectónico regional de graben centrado en la Cuenca
-•Depósito de sedimentos volcánicos, fluviales y lacustres en el graben durante el Plioceno-Eoceno
•Depósito de flujos de lava y materiales piroclásticos durante el Oligoceno, Mioceno y Pleistoceno.
•Depósito de abanicos aluviales y de piamonte en las regiones del este y oeste, durante el Plioceno superior y el Pleistoceno.
•Erupciones volcánicas de basalto y pómez durante el Pleistoceno, en la parte central y sur de la cuenca. Las más importantes efusiones del Cinturón volcánico del Chichinautzin, lo que causó el cierre de la cuenca.
•Desarrollo del ambiente lacustre como una consecuencia del cierre de la cuenca.
•Desarrollo de un conjunto de fallas NE-SW, a través del piso de la cuenca, bajo los depósitos lacustres.

Tabla 2. Principales eventos geológicos en la cuenca de México de acuerdo con Díaz - Rodriguez, J. A. (2006), en Chávez Aguirre, (2012).

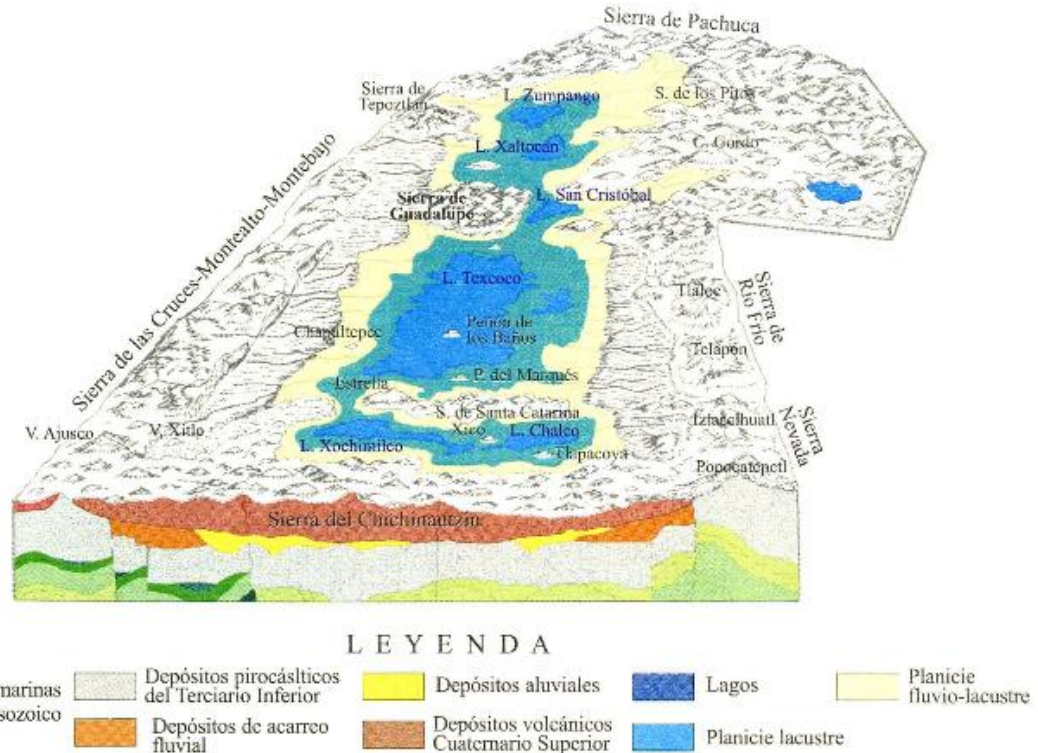


Figura 3.11. Cuenca de México en el Cuaternario Superior (de acuerdo con Moser 1975, modificado por Zamorano Orozco) en Aguilar (2011).

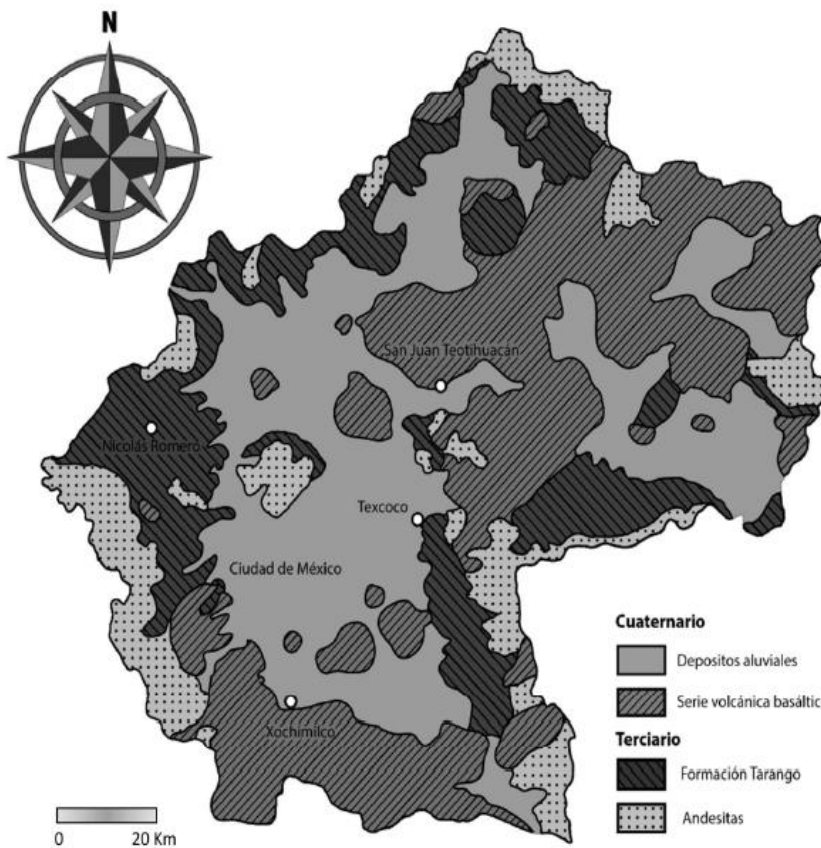


Figura 3.12. Geología de la Cuenca de México modificado de Moser, 1963 en Chávez Aguirre (2012).

CÁPITULO 4. RELEVANCIA DEL TÚNEL EMISOR PONIENTE II.

El Túnel Emisor Poniente II presenta gran relevancia debido a los retos geotécnicos a los que se enfrentó durante su planeación y construcción. Uno de ellos radica en el tipo de estratigrafía que poseen los municipios de Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán Izcalli y Tlalnepantla.

De acuerdo a (Chávez Aguirre, 2008), Atizapán de Zaragoza está expuesto a los fenómenos de tipo geológico (minas, sismicidad, agrietamiento de suelos, colapsos, inestabilidad de suelos). No obstante cabe mencionar que también se expone a fenómenos de carácter hidrometeorológicos (inundaciones pluviales, granizadas, heladas), químico-tecnológicos (incendios de todo tipo, explosiones, fugas y derrames de sustancias peligrosas) y sanitario-ecológicos. Aunado a ello cabe resaltar que en dicho municipio existen zonas con presencia de cavidades, principalmente la zona de lomas, conformada por depósitos de materiales de origen volcánico.

Por otra parte Acorde con INEGI (2010), en Cuautitlán Izcalli cruza la provincia del Eje Neovolcánico (100%), una subprovincia: Lagos y Volcanes de Anáhuac (100%), así como un sistema de toposformas constituido por un lomerío de tobas (68.72%), y un Vaso lacustre con lomerío (31.28%). El análisis de los aspectos topográficos, edafológicos y geológicos determina que en las zonas planas la aptitud principal del suelo es la agricultura. Sin embargo, el crecimiento de las áreas urbanas ha desplazado su aptitud originaria .La aptitud del suelo para el uso urbano se encuentra condicionado debido a las características propias del suelo, los suelos tipo vertisol son expansivos, condición que hace que debido al contenido de humedad, aumente o disminuya su volumen por lo que se forman grietas en las construcciones (INAFED, 2020).

En Tlalnepantla el uso de suelo se divide en dos grandes rubros: urbano y no urbanizable. Dentro del primero se contempla la diversidad de usos, siendo el principal uso del suelo el habitacional. En lo que respecta a la zona no urbanizable, se consideran dentro de ésta a las zonas de preservación ecológica, principalmente la Sierra de Guadalupe, así como las zonas de restricción federal. Las elevaciones que se extienden por la parte noroeste de este municipio tienen de los 2,300 a 2,700 metros de altitud y corresponden a las estribaciones

de la Sierra de Monte Alto, prolongación de la Sierra de las Cruces, límite occidental de la Cuenca de México. Las principales elevaciones son los cerros del Tenayo, Tianguillo, Santa Cecilia, Tlayapa, Barrientos, Cerro Grande, Puerto, Tequesquináhuac, Atlalco y Cerro de la Cruz.

Durante décadas se ha presentado la preocupación tanto por la distribución de aguas residuales y el suministro de agua potable. A pesar de las fuentes de agua existentes tanto subterráneas como superficiales, en gran parte de la ciudad se tienen escasez de agua o una carente infraestructura sanitaria, sin embargo la escasez existente en ciertas regiones de la ciudad se debe más a la escasa distribución que al déficit de dicho recurso. Inclusive, la afluencia de agua suele ser problemática, ya que a razón de la deficiente infraestructura hidráulica y sanitaria de dicha metrópoli durante el paso de los años se han presentado una serie de inundaciones.

El problema de la Ciudad de México y el Estado de México es complicado independientemente del ángulo desde el que se aborde. Sus consecuencias se extienden a los dominios económico, sanitario, político y medioambiental. La creciente desigualdad, combinada con la mala calidad del agua, ha puesto en riesgo la vida de millones de personas. La aplicación insuficiente de la planificación urbana y el mercado inmobiliario informal creó un proceso de crecimiento espacial caótico y casi anárquico, lo que hizo que la provisión de un suministro de agua eficiente y equitativo, así como el desalojo de aguas residuales fuera un serio desafío para la gestión y la inversión (Tortajada, 2008, Jordan et al, 2011).

Cualquier alternativa o solución en relación a la infraestructura hidráulica y sanitaria debe ser coherente y tener en cuenta los problemas de gestión del agua, urbanismo y suelo. Es difícil clasificarlos en orden de gravedad, ya que todos son de igual preocupación y contribuyen de algún modo a la subsidencia. Durante las últimas décadas las agencias federales de gestión del agua enfatizaron en soluciones a corto plazo que respondieron solo a problemas inmediatos. Por obvias razones estas soluciones no resultaron efectivas a largo plazo, a razón de que no fueron respaldadas por las alternativas necesarias para dar solución al problema.

Las soluciones a largo plazo son extremadamente intensivas en capital, ya que requieren un inmenso grado de planificación centralizada y deben implementarse a escala regional para ser efectivas (Tortajada & Castelán, 2006). Esto resulta evidente ya que la mayoría de los proyectos que contribuirían tanto al desalojo de aguas residuales como el abastecimiento de agua potable no continuaban más allá de la etapa de propuesta. Esto debido a las limitaciones en relación al presupuesto ya que un proyecto a largo plazo requiere de distintas etapas las cuales se valúan en millones de pesos. Es por ello que el Túnel Emisor Oriente posee una gran importancia a nivel mundial ya que contribuyó al desarrollo del país debido a que al ser un proyecto de alcantarillado está sumamente destinado a abordar los problemas mencionados anteriormente.

El proyecto “Túnel Emisor Poniente II” se enmarca dentro del programa de desarrollo hídrico del año 2013 dicho programa resultó ser sumamente prometedor. El éxito del programa condujo a avances considerables en esta área, ya que aumentó la capacidad de drenaje de aguas residuales, redujo el riesgo de inundaciones y contribuyó a mitigar el problema de la subsidencia ya que con ello se logró disminuir la sobreexplotación de los mantos acuíferos. El 30 de Agosto del año 2013 se estableció mediante el Diario Oficial de la Federación el Convenio de Coordinación que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Estado de México, el objeto de construir el Túnel Emisor Poniente II Primera Etapa. El proyecto del Túnel Emisor Poniente II (TEP II) fue asignado a Aldesa Construcciones por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) del Gobierno mexicano. Consistió en la construcción de un túnel de 7 metros de diámetro interior y 5.956,23 metros de longitud con profundidad de 12 a 110 metros, con una lumbrera de 12 metros de diámetro interior a 67 metros de profundidad, para conectar el Río San Javier - Xochimanga con el Túnel Emisor Poniente en Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

Para la construcción del TEP II, se tuvieron en cuenta la versatilidad del tipo de suelo existente en la zona que abarca dicho túnel. Por otra parte cabe destacar que para la excavación se utilizó una moderna tuneladora dual capaz de excavar tanto en roca como suelo, lo que representó un desafío técnico importante. La construcción a través de la tuneladora permitió el cumplimiento de los plazos comprometidos, gracias a los altos rendimientos de este sistema.

4.1. Obras Hidráulicas en la Cuenca de México.

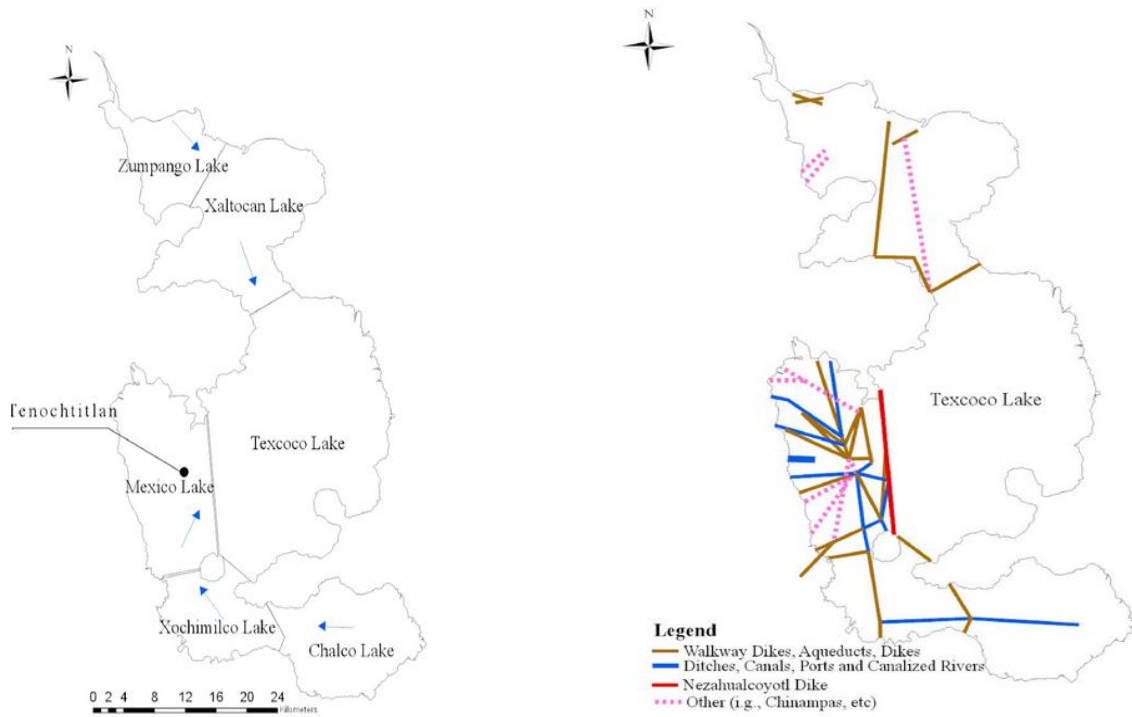
Tanto en la antigüedad como en la época actual, el territorio en donde se asientan los pueblos origina muchos de los retos que deben enfrentar sus habitantes para alcanzar el desarrollo; tal es el caso de la Ciudad de México que, por su ubicación, tuvo que hacer frente, durante varios siglos, al problema de las inundaciones. (Montoya, s/f)

Fue en la época prehispánica, en el siglo XIV, cuando los mexicas llegaron al Valle de México y se establecieron en el islote de Tenochtitlán. Como sabemos éste se encontraba en uno de los cinco lagos que formaban la zona lacustre de lo que es hoy el Valle de México. La cuenca de México de carácter endorreico se alimentaba de las lluvias, de los ríos procedentes de las sierras y de pequeños manantiales, tales características ocasionaron desde entonces una serie de inundaciones constantes en las épocas de continuas precipitaciones. Es por ello que ante semejantes contingencias nuestros antepasados dieron muestra de sus conocimientos de ingeniería al desarrollar obras con el fin de evitar inundaciones, regular los niveles de agua en los lagos, controlar el drenaje en la cuenca, riego, navegación, transporte, abastecimiento de agua e incluso la guerra; principalmente construyeron diques, pasarelas-diques, ríos canalizados, canales, acueductos, acequias, puentes, muelles, estanques, pozas, chinampas (Jardines flotantes y canales de navegación). La figura 4.1 presenta algunas de las principales estructuras que se sabe que existieron en Tenochtitlán.

Dentro de las obras mencionadas anteriormente, destaca el dique de Nezahualcoyotl, catalogada como la construcción hidráulica más impresionante de la época (construido alrededor de 1450). Dividió el lago Texcoco de norte a sur, formando el lago México en su lado oeste e impidió el traspaso de las aguas salinas del lago Texcoco hacia el lago México donde se ubicaba la ciudad de Tenochtitlán. El dique tenía una longitud aproximada de 16 km, una altura de 8 m y una anchura de 3,5 m. Se cimentaron al suelo gruesos pilotes de madera formando una cerca hueca, dentro de la cerca se depositaron grandes rocas y arena entre las pilas (Torres, 2020).

Desde la época de la construcción del dique Netzahualcóyotl hasta la llegada de los conquistadores españoles (70 años aproximadamente) no hay mención en los registros

históricos de inundaciones en la ciudad de Tenochtitlán por aumento del nivel de agua en el lago de Texcoco. Sin embargo, después de la conquista, el dique Netzahualcóyotl fue dañado y luego destruido y la ciudad se inundó en numerosas ocasiones durante los siguientes 350 años. Simultáneamente, se realizaron varios esfuerzos para drenar los lagos con el fin de evitar inundaciones. En la figura 4.2 se muestra una representación en sección transversal de esta descripción (Torres, 2020).



(a) Sistema de Alimentación de Agua.

(b) Estructuras Hidráulicas en la Cuenca de México.

Figura 4.1. Sistema lacustre en el Valle de México en la época prehispánica. (Torres, 2020).

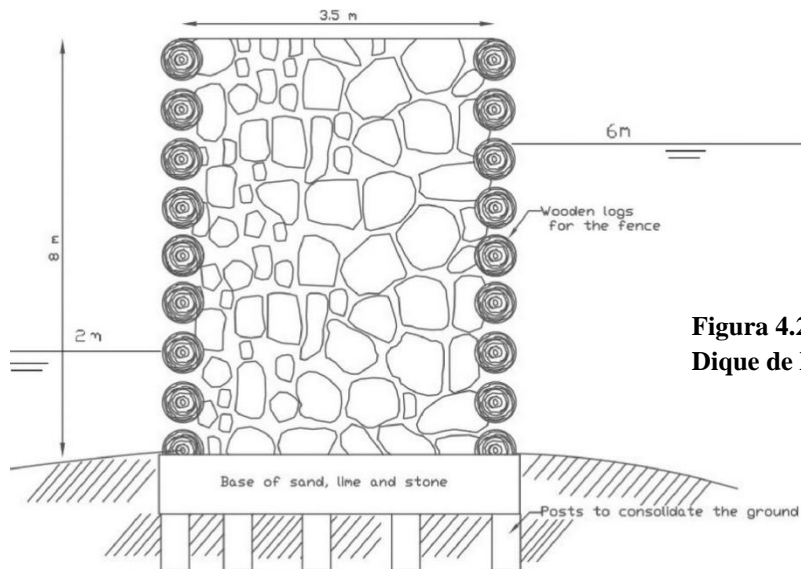


Figura 4.2. Sección transversal del Dique de Nezahualcoyotl. (Torres, 2020)

En 1521 ocurre el acontecimiento histórico mejor conocido como “La Conquista de México” a consecuencia de ello México Tenochtitlán cae en poder de los españoles, tal suceso fue el comienzo de una nueva etapa, que se culminaría hasta 1821. Una de las primeras ideas del conquistador Cortés fue indagar en un sitio nuevo para fundar la capital de la Nueva España, sin embargo se optó por tomar la decisión de reconstruir sobre la ciudad azteca. Cabe aclarar que a pesar del peligro al cual se enfrentarían las futuras construcciones debido al suelo lacustre así como las constantes inundaciones del sitio consecuencia de que todas las corrientes se dirigían hacia el valle, los españoles tomaron cierta decisión. Con el paso de los años los constructores se vieron en la necesidad de buscar soluciones. En 1555 ocurrió la primera gran inundación del México colonial y, entre otras medidas, siguiendo las técnicas indígenas, se reconstruyó el albarradón prehispánico, que, aunque brindó cierta ayuda, no bastó para solucionar del todo dicho problema.

A consecuencia de las series de inundaciones que sufrió la capital mexicana, en 1607 durante el mandato de Luis de Velasco, se opta por construir un drenaje artificial, el cual consistía en un canal en Huehuetoca con el fin de drenar el lago de Zumpango e interceptar el río Cuautitlán, para dirigir sus aguas hacia el río Tula. En tal proyecto resultó de gran relevancia el Tajo de Nochistongo (fig 4.3). Con la finalidad de cumplir el objetivo mencionado anteriormente, las aguas del lago se vaciarían por medio de una zanja que uniría las cuencas de Xacoltan con la de Zumpango y a su vez hacia el río Tula a través del tajo artificial abierto en Nochistongo para llegar finalmente al Golfo de México. El proyecto consistió en la construcción de un túnel de 13 km de longitud, teniendo que perforar las montañas para desalojar las aguas y verterlas en el río Tula. La obra terminó aproximadamente ciento ochenta años después del inicio de su construcción, en 1789.



Figura 4.3. Tajo de Nochistongo en 1963 (Schalkwijk,1963) En (Hernández, *et al*, 2021)

Tras una serie de años de lucha armada fue el 27 de septiembre de 1821 cuando México se convirtió en una nación independiente, sin embargo entre los principales problemas que heredó el virreinato estuvo el del desagüe de la capital. Después de una serie de juntas y congresos se propuso la construcción de un gran canal que terminaría en Tequisquiac: las obras comprendían un tajo, un túnel y un canal, sin embargo por cuestiones políticas se detuvieron los trabajos, fue hasta 1867 durante el gobierno juarista que se retomaron los trabajos en la zona de Tequisquiac, sin embargo al finalizar el gobierno de Juárez, las obras se volvieron a detener, a consecuencia de ello y del crecimiento demográfico la ciudad sufrió de nueva cuenta una serie de inundaciones. Fue hasta 1884 en el gobierno de Porfirio Díaz cuando se reanudaron los trabajos del túnel de Tequisquiac (fig 4.4 y 4.5) y el Gran Canal. Sin embargo fue en 1895 que se terminaron los trabajos del túnel de Tequisquiac, no obstante en 1900 se inauguró el gran proyecto, el Gran Canal del desagüe que constituyó una longitud de 47.5 km, por otra parte el Túnel de Tequisquiac se caracterizó por sus 10 km de longitud.



Figura 4.4. Vista general de la caja colectora del túnel de Tequisquiac, hacia aguas abajo. Estado de México. Archivo histórico del agua 1973. (Aguilar. *et.al*, 2011)



Figura 4.5. Tajo de Tequisquiac, contigua al desembarcadero del túnel (al fondo) en el año 1945 (Casasola, 1945). En (Hernández, *et al*, 2021)

En 1951 y 1952 fuertes precipitaciones pluviales hicieron evidente el hundimiento de la ciudad, cubrieron por varias semanas gran parte del centro histórico de la Ciudad de México (Aguilar. 2011).

A consecuencia de una serie de circunstancias desfavorables tales como las fuertes inundaciones y la subsidencia que se presentó en la capital, las respectivas autoridades

optaron por implementar el drenaje profundo en la capital. Esto se logró con el Emisor Poniente, el cual se puso en servicio en 1962, años después se puso en servicio el Túnel Emisor Central en 1975.

A partir de la década de los años veinte se construyó el sistema de presas del poniente; y desde 1962 la obra Interceptor Poniente, el cuál fue destinado para recibir descargas de caudales de dichas presas. Entre 1963 y 1964 la obra se amplió con el Emisor Poniente, con la operación del túnel se evitó que las aguas del poniente descargaran en la ciudad sin ningún control, dicho proyecto se amplió a 32.3 km, de los cuales 12,3 km son en conducto cerrado de sección elíptica (4,1 km en túnel y 8,2 km construidos a cielo abierto) y 20 km en canal de sección trapezoidal, con una capacidad de conducción creciente de 30 a 80 m³/s para captar los escurrimientos del río Tlalnepantla y el río San Javier. Las aguas de este emisor se llevan por el Canal a cielo abierto para juntarse con el río Cuautitlán, posteriormente a la laguna de Zumpango y/o al Tajo de Nochistongo, según la operación del sistema. El trazo del interceptor va de Naucalpan a Tepotzotlán en el Estado de México, recibe las descargas de los ríos Tlalnepantla, San Javier, Cuautitlán y Hondo de Tepotzotlán, los cuales son regulados previamente por las presas Madín, San Juan, Las Ruinas, Guadalupe y La Concepción, en el Estado de México.

No obstante cabe resaltar que el drenaje profundo comenzó a construirse en 1967 integrado por un Túnel Emisor Central (fig 4.6) y nueve interceptores. Fue en 1975 cuando finalmente concluyó la obra del Emisor Central, la componente principal del actual drenaje profundo. Su trazo inicia en Cuautepec y concluye en el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, el túnel descarga en el río El Salto y continúa hasta el Distrito de Riego 3 del Valle del Mezquital, cuenta con una capacidad máxima de 220 m³/s. En una segunda etapa se construyeron los interceptores oriente y central, túneles que confluyen en el Emisor Central.



Figura 4.6 Túnel Emisor Central en 1975 (ICA, 2018)

La conducción del drenaje se hace por gravedad a través de túneles desde la Ciudad de México hasta el desagüe del sistema en el río El Salto. Desde su origen el drenaje maneja aguas pluviales, sin embargo, en 1992 como resultado de la pérdida de nivel del Gran Canal se empezó a conducir aguas negras que recibe del Interceptor Oriente y del Central (Muñoz, 2016).

El sistema de drenaje profundo está integrado por un conjunto de interceptores (túneles ramales secundarios) que captan las descargas de una red de colectores o cañerías. Esta red envía continuamente las aguas residuales municipales y las pluviales fuera de la Ciudad de México por medio del Túnel Emisor Central. Actualmente tiene una longitud de 50 km y una profundidad que va de los 40 a los 220 m; un diámetro de 6.5 m y capacidad de desalojo de 220 m³/s (CONAGUA, 2018).

El "Túnel Emisor Central", solía ser el principal colector de aguas residuales de la Ciudad de México. Sin embargo como consecuencia de la subsidencia, su pendiente fue cada vez más desfavorable, de modo que llegó a perder alrededor del 40% de su capacidad original de 170 m³/s. En algunas partes, dicho gradiente resultó invertido, por lo que se optó por aplicarse bombas para transportar las aguas residuales (fig 4.7). Año tras año se producían graves inundaciones a razón de que el sistema de aguas residuales no era capaz de hacer frente a las masas de lluvia. Aunado a ello, la capacidad de desagüe en general disminuyó 40%, de 280 (1975) a 165 m³/s (2007), mientras que la población aumentó de 10 a 19 millones en ese mismo periodo.

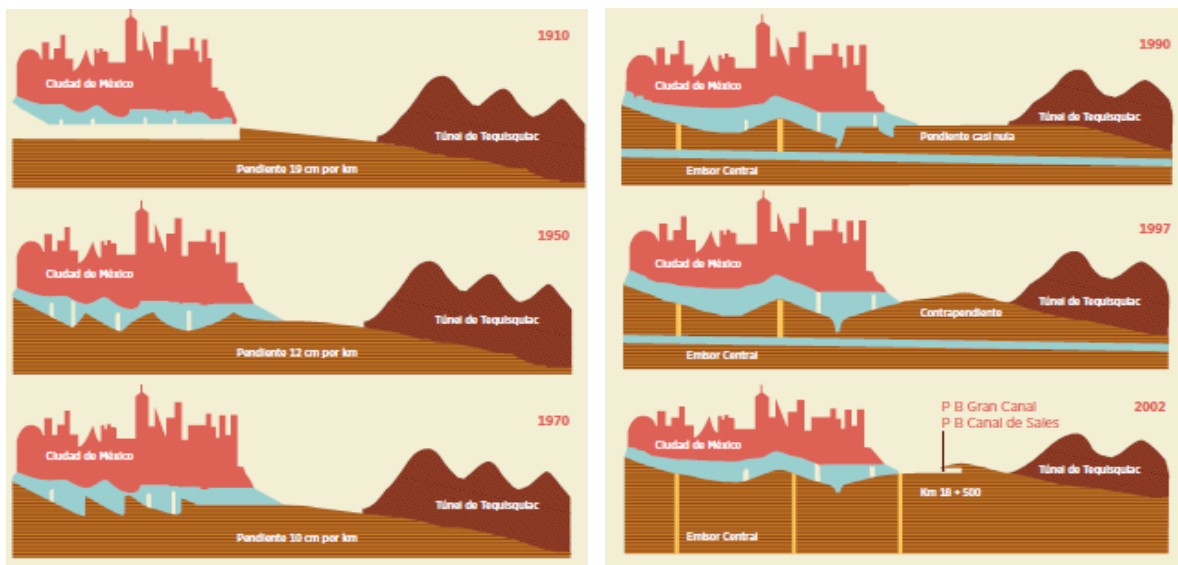


Figura 4.7. Pérdida de pendiente hidráulica en el drenaje profundo de la CDMX. (SACMEX, 2013)

A consecuencia de la subsidencia y el desarrollo demográfico en la capital, el sistema de drenaje profundo se vio sumamente afectado en cuanto a su capacidad de tal manera que el TEC requirió de un mantenimiento total. Como solución a lo mencionado anteriormente en el año de 2008 CONAGUA, la junta nacional del agua de la Secretaría de Medio Ambiente de México, inició la construcción del “Túnel Emisor Oriente”. Con un diámetro interno de 7 m, transporta hasta 150 m³ de aguas residuales por segundo a una distancia de 63 km bajo la capital y la región federal de México hacia la región federal de Hidalgo. Esta obra permite contar con una salida complementaria y alterna al Emisor Central disminuyendo el riesgo de inundación de la Ciudad de México y su zona conurbada, dando seguridad a 20 millones de habitantes y funciona en temporada de lluvias de manera simultánea con el actual Túnel Emisor Central y alternadamente en época de estiaje, para facilitar su mantenimiento.

Con la construcción del Túnel Emisor Oriente en el año 2018, se permitió mitigar el riesgo de inundación en la Zona Metropolitana del Valle de México, al aumentar la capacidad de desalojo de las aguas residuales, a pesar de que el Emisor Central es el ducto del cual depende la seguridad del desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle, existe la necesidad de cerrarlo durante los meses de estiaje para su reparación y mantenimiento. Esto crea la necesidad de disponer de un emisor alternativo que permita mantener la capacidad de operación del sistema durante todo el año.

Podemos percatarnos que la mayor parte de problemáticas hidráulicas fueron atendidas con proyectos que se ubicaron en el Valle de México. Sin embargo a casi cuarenta años de la construcción del Túnel Emisor Poniente, debido al incremento sin planeación alguna de asentamientos urbanos en la zona, la demanda excedió su capacidad de desalojo, en condiciones de precipitaciones extraordinarias, cuya evidencia es su ruptura en septiembre de 2009. Para resolverlo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) llevó a cabo el Proyecto Ejecutivo del Túnel Emisor Poniente II (TEP II), concebido como un elemento alternativo dentro del sistema de desalojo que permita una operación confiable a través de un mantenimiento regular que elimine definitivamente cualquier riesgo de inundación en forma permanente al incrementar sustancialmente la capacidad de drenaje general, para satisfacer las condiciones actuales y futuras en un horizonte de 50 años.

La propuesta de construcción del TEP-II como drenaje alternativo, además de ampliar la capacidad de desagüe del Valle de México en la zona norponiente, permitió realizar trabajos de mantenimiento necesarios para una adecuada operación del sistema. Pese a que la población en Ciudad de México y el área metropolitana continúa incrementando adicionando más desarrollos habitacionales en el Norponiente del Valle de México, lo anterior ocasionó que el Gobierno Federal atacara los problemas hídricos de la Ciudad. Dentro de los alcances de esta obra de infraestructura se benefician a 2,13 millones de habitantes de los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán Izcalli y Atizapán de Zaragoza con la plena seguridad de que el TEP II permitirá disminuir los niveles de los ríos Tlalnepantla y San Javier evitando su desborde en temporada de lluvias. (Ingeopres, 2019)

Actualmente, el sistema de drenaje profundo cuenta con el Emisor Central, Emisor Oriente, Emisor Poniente y Emisor Poniente II, Interceptor Central, Interceptor Centro-Centro, Interceptor Oriente, Interceptor Centro-Oriente, Interceptor del Poniente, Interceptor Iztapalapa, Interceptor Obrero Mundial, Interceptor Oriente Sur, Canal Nacional-Canal Chalco.

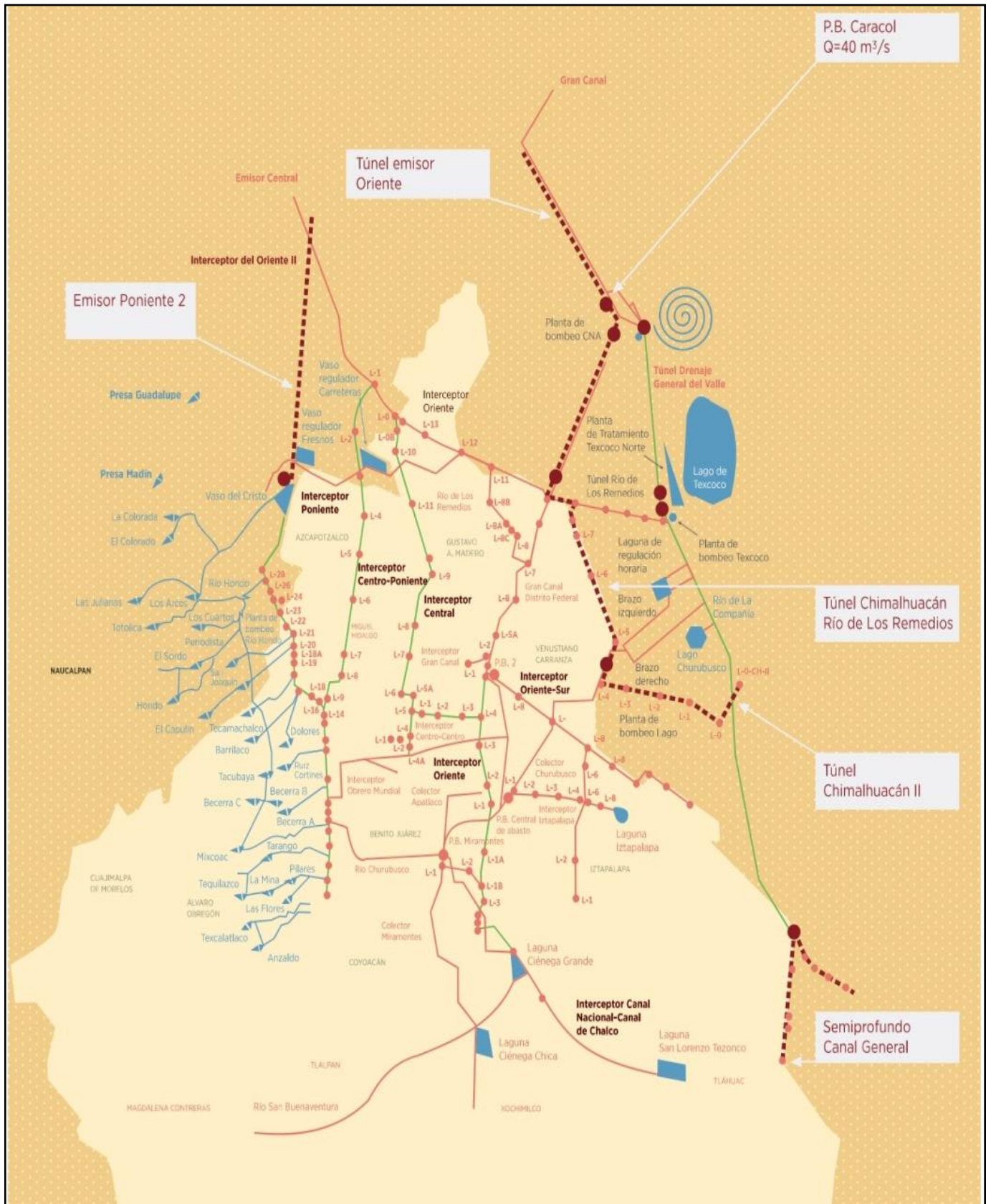


Figura 4.8 Drenaje general de la CDMX. (SACMEX, 2013)

CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN TUNEL EMISOR PONIENTE II.

El TEP II es un proyecto único, con un trazo de 5,9 km (5,956.23 metros) que se desarrolla entre dos municipios del Estado de México (Atizapán de Zaragoza y Cuautitlán Izcalli), dicho proyecto se divide en 5 tramos (ver figura 5.1), el túnel cuenta con una sección de 7 metros de diámetro interior revestido y una capacidad de desagüe de 112 metros cúbicos por segundo. Se encuentra flanqueado en sus extremos por las secciones de captación de los ríos San Javier y Xochimanga y el canal de descarga hacia el antiguo Túnel Emisor Poniente.

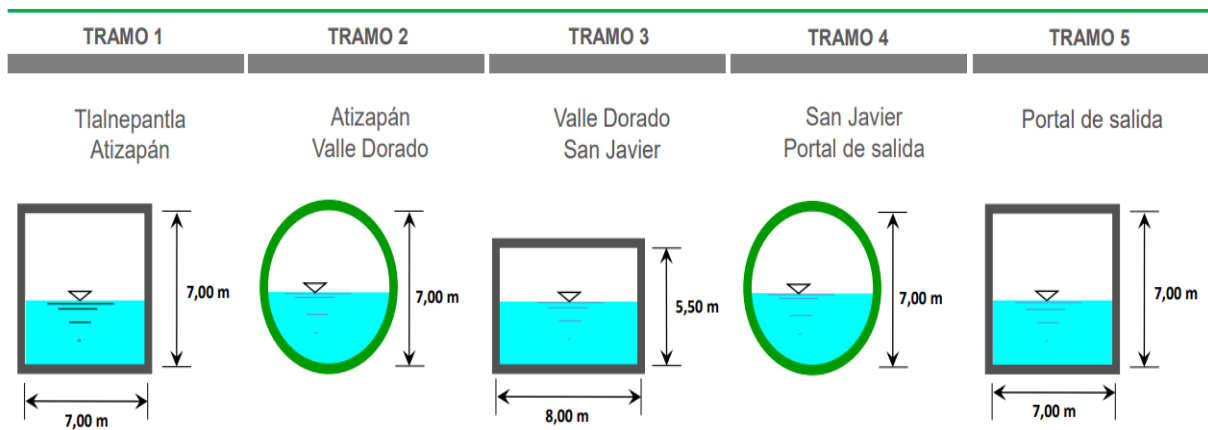


Figura 5.1 Sección transversal de los cinco tramos principales del TEP II.(CONAGUA, 2016)

En términos generales el Túnel Emisor Poniente II, en su recorrido de oriente a poniente consiste en:

- 1- Estructura de captación de los ríos San Javier y Xochimanga en el Municipio Tlalnepantla de Baz.
- 2- Cajón de conducción de 8 x 5.5m de sección útil y 90m de longitud entre la estructura de captación de los ríos San Javier-Xochimanga y la “Caja de Transición 3”.
- 3- Caja de Transición 3 entre el cajón de conducción de 8 x 5.5m y el túnel de 7.2m de diámetro terminado con una longitud de aproximadamente 20m.

4.- Túnel de 7.2m de diámetro y 112 m³/seg de capacidad, que inicia en el extremo poniente de la “Caja de Transición 3”, en el municipio de Atizapán y concluye 5,616 metros aguas abajo donde descarga en la “Caja de Transición 4” en el municipio de Cuautitlán Izcalli.

5.- Lumbreira Única de 12m de diámetro interior y 67 metros de profundidad a 3,476m aguas abajo donde descarga en la “Caja de Transición 4” en el municipio de Cuautitlán Izcalli.

6.- Caja de Transición 4 entre el extremo poniente del túnel de 7.2m de diámetro terminado y el cajón de conducción de 7x7m, con longitud de aproximadamente 115m.

7.- Cajón de conducción de 7x7m de sección útil y 140m de longitud, a partir del extremo poniente de la “Caja de Transición 4” (Av Lanzarote) y la estructura de descarga al Emisor Poniente a cielo abierto en el municipio de Cuautitlán Izcalli.

8.-By Pass del acueducto de agua potable Teoloyucan de 72 pulgadas de diámetro sobre el cajón de conducción de 7m x 7m.

9.- Estructura de descarga al Emisor Poniente a cielo abierto en el municipio de Cuautitlán Izcalli, con aproximadamente 70m de longitud.

El túnel posee un revestimiento primario formado por anillos de dovelas de 35 cm de espesor (figs. 5.2 y 5.3) y un revestimiento secundario o definitivo de 25 cm de espesor que permite proteger el revestimiento primario de la corrosión producida por el agua y los gases que circulan por el túnel. Para su ejecución, se contó con un sistema de cimbra telescópica de 54 metros de longitud con el que se procedió a la colocación y fraguado del mismo. El hormigón empleado en el revestimiento fue complementado con fibras sintéticas. El rendimiento de ejecución de fue de aproximadamente 22,5 metros lineales por día.



Figura 5.2 Dovelas empleadas en TEP II. (Cortesía Dr J.Ma Chávez, 2022)

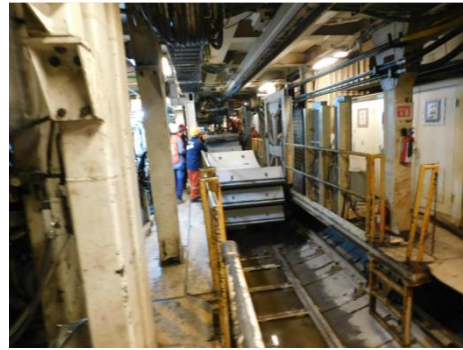


Figura 5.3 Dovelas empleadas en TEP II. (Cortesía Dr J.Ma Chávez, 2022)

En términos relevantes para la excavación del túnel, los estudios geológicos realizados indicaron ocho tipos de suelos a lo largo del trazo del proyecto. La tuneladora que se empleó fue de tipo dual, por lo cual estaba constituida por una gran rueda de corte encargada de excavar el frente del terreno. Al mismo momento de excavar extraía el material resultante y lo depositaba en un sistema de bandas transportadoras hasta el depósito final en la fosa de rezago. Para la excavación en roca se utilizó una rueda de corte abierta que tritura el material y lo deposita directamente en las bandas transportadoras. Por otra parte, para la excavación en suelos se presurizó la cámara de excavación para igualar las presiones que ejerce el terreno blando hacia la rueda de corte, modo EPB (Earth Pressure Balance). En este caso, al material excavado se le agregó un desestructurante de carácter bentonítico para permitir la extracción mediante el tornillo sin fin y su transporte después mediante el sistema de bandas.

En cuanto a las medidas de protección, se presentó el riesgo de la estabilidad del suelo sobre el cuál se desplantan las viviendas circundantes al TEP II. Cabe destacar que en la

avenida de las Manzanas (Tlalnepantla) se implementaron unas pantallas de micropilotes. La estabilidad se logró al aplicar micropilotes de acero, los cuales se colocaron de sur a norte a lo largo de la avenida para, posteriormente, unir cada pantalla mediante una viga de atado de hormigón reforzado. Cabe destacar que en general se colocaron más de 800 micropilotes para abarcar un total de 25.600 metros lineales.

Se construyeron dos estructuras de control tipo cajón, la primera se localiza en la captación del Río San Javier y Xochimanga (cadenamiento 3+960) dicha estructura es de concreto reforzado, de sección rectangular interior de 8.0 x 5.5 metros de ancho y altura respectivamente y con longitud de 180 metros aproximadamente. Cabe aclarar que al finalizar la estructura de cajón, ésta conecta con el túnel de sección circular de 7.0 metros de diámetro interior y longitud aproximada de 5,503 metros con una estructura a base de recubrimientos primario y secundario. Por otra parte la otra estructura de cajón tiene una sección de 7.0 x 7.0 metros y una longitud de 271 metros, dicho cajón desemboca con el canal de descarga al Emisor Poniente a Cielo Abierto de concreto armado.

Desde el punto de vista geohidrológico el trazo del túnel se encuentra dentro de dos acuíferos los cuales son el Acuífero de la Ciudad de México (alcance de 73%) y el Acuífero de Cuautitlán-Pachuca (alcance de 27%). El acuífero de la Ciudad de México se encuentra ubicado en el centro del país, en la zona suroeste de la Cuenca del Valle de México, abarca totalmente a la Ciudad de México y parte del Estado de México, y comprende una superficie de 2,103 kilómetros cuadrados. El acuífero abarca totalmente a las delegaciones Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco, de la Ciudad de México, y al Municipio de Tlalnepantla de Baz del Estado de México, así como parcialmente a los municipios de Naucalpan de Juárez, Jilotzingo, Cuautitlán Izcalli, Nicolás Romero, Coacalco de Berriozábal, Tultitlán, Ecatepec de Morelos, Atizapán de Zaragoza, Atenco, Isidro Fabela, Tlalnepantla de Baz, Nezahualcóyotl, Xonacatlán, Huixquilucan, Lerma, Ixtapaluca, La Paz, Valle de Chalco Solidaridad, Chalco, Ocoyoacac, Xalatlaxco, Juchitepec, Huitzilac (Diario Oficial de la Federación,2016).

Por otra parte, el acuífero de Cuautitlán-Pachuca se localiza al norte de la Ciudad de México, en el límite sureste del Estado de Hidalgo, comprendiendo alrededor de un 10% de su superficie total al Estado de México. El acuífero cubre una superficie 2850 kilómetros cuadrados. La zona está comprendida en 38 municipios, dentro de los cuales, en función del número de habitantes los de mayor importancia en el Estado de México son: Cuautitlán Izcalli, Tultitlán, Nicolás Romero, Coacalco, Tecámac, Zumpango, Tultepec y Cuautitlán; ahora bien en el Estado de Hidalgo los municipios más importantes en función del número de habitantes, son: Pachuca, Tizayuca, Tezontepec de Aldama, Mineral de Reforma y Zempoala (CONAGUA, 2020).

En cuanto a la formulación de la propuesta tanto técnica como económica del proyecto del TEP II, cabe resaltar que se mantuvo una sostenibilidad integral de tal manera que se respetaron y cumplieron los lineamientos decretados en las disposiciones normativas, vigentes y aplicables según fuera el caso, esto en materia de impacto ambiental. Es por ello que en todas las actividades que involucraron la construcción del proyecto se contó con personal especializado en materia ambiental. Por otra parte los recursos empleados en dicho proyecto al igual que las actividades realizadas para la construcción del mismo cumplieron con la legislación vigente y aplicable en materia de impacto ambiental.

En términos generales la sostenibilidad integral se logró mediante:

- Respeto e intervención adecuada en el medio ambiente.
- Adaptación con el entorno urbano y el contexto social.
- Accesibilidad e integración de todo tipo de usuarios.
- Congruencia Económica para el aprovechamiento de la obra.

(Ingeopres,2019)

El TEP II es un proyecto que ha mejorado evidentemente la calidad de vida de la comunidad, generando un bienestar y entorno seguro para el ser humano. Con el proyecto se eliminaron los riesgos de inundación y desborde de los ríos circundantes. El TEP II es una obra indispensable para más de 2.1 millones de habitantes de la zona Norponiente (municipios de Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán Izcalli y Atizapán de Zaragoza) derivado de que por más de 30 años los gobiernos locales del Norponiente del Valle de

México permitieron el crecimiento urbano en áreas donde no podían ser garantizados los servicios básicos hídricos, afectando las obras de infraestructura construidas años atrás, que se encuentran rebasadas y que deben ser aumentadas para subsanar y garantizar los servicios requeridos. El proyecto brinda seguridad permitiendo bajarlos niveles de los ríos Xochimanga y San Javier evitando su desborde en temporada de lluvias como fue el caso particular de las inundaciones ocurridas en 2009 y que afectaron tanto económicamente como la calidad del aire en la zona, siendo una obra de gran impacto social sin importar las condiciones socioeconómicas de los pobladores.

A grandes rasgos el proceso constructivo del TEP II se dividió por etapas, las cuales se enlistan a continuación:

- I. Trabajos iniciales para la construcción del Túnel Emisor Poniente II (Despalme).
- II. Obras inducidas.
- III. Construcción del cajón de 7,00 x 7,00 m, 240,30 m de longitud.
- IV. Construcción del túnel con equipo tunelador TBM.
- V. Caja de transición 4 de túnel de 7,00 m de Ø interior a cajón de 7,00 x 7,00 m.
- VI. Construcción de lumbrera por método convencional.
- VII. Construcción del canal de descarga al canal abierto poniente.
- VIII. Caja de transición 3, de 8,00 x 5,50 m a túnel de 7,00 m de Ø interior.
- IX. Construcción del cajón de 8,00 x 5,50 m de 151,60 m de longitud.
- X. Construcción captación río San Javier.
- XI. Desvío del acueducto Teoloyucan de 72" de Ø interior de concreto presforzado

CAPÍTULO 6. CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR PONIENTE II.

6.1. Estructura de captación de los ríos San Javier y Xochimanga.

La primera estructura con la cual se iniciaron los trabajos del TEP II fue la de captación de los ríos San Javier y Xochimanga y se localiza en la Avenida de las Torres, Tlanepantla de Baz, Estado de México (figs. 6.1 a 6.4). El río San Javier es una corriente natural localizada al poniente del Área Metropolitana de la Ciudad de México y su sentido de escurrimiento es de poniente a oriente; nace en el municipio de Atizapán de Zaragoza y cruza por el municipio de Tlanepantla para finalmente descargar al Río de Los Remedios en la CDMX.



Figura 6.1. Ubicación Río San Javier (Roadonmap, 2022)

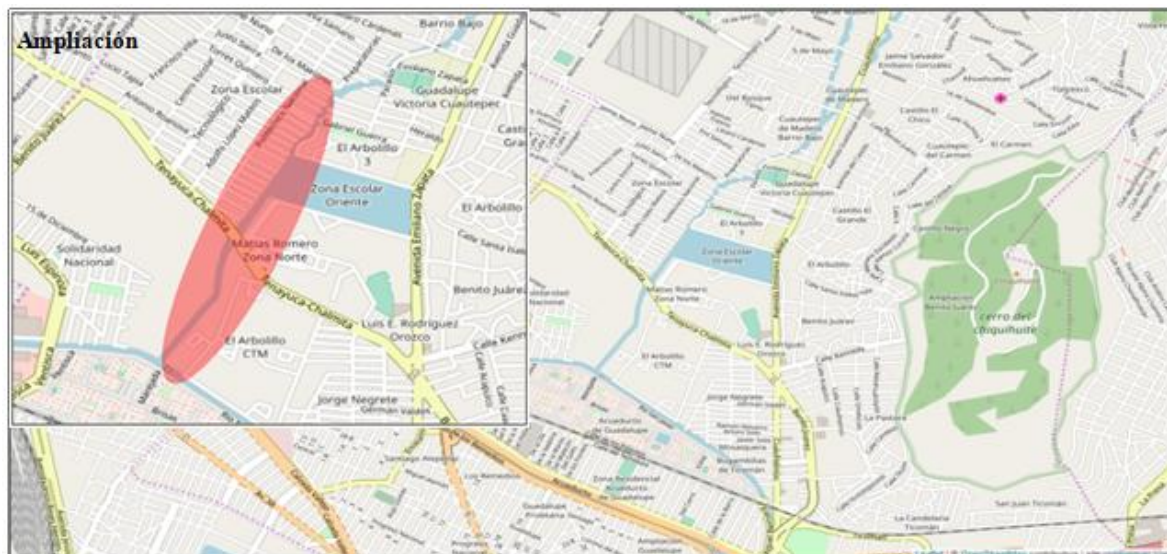


Figura 6.2. Ubicación Río Xochimanga (Roadonmap, 2022)

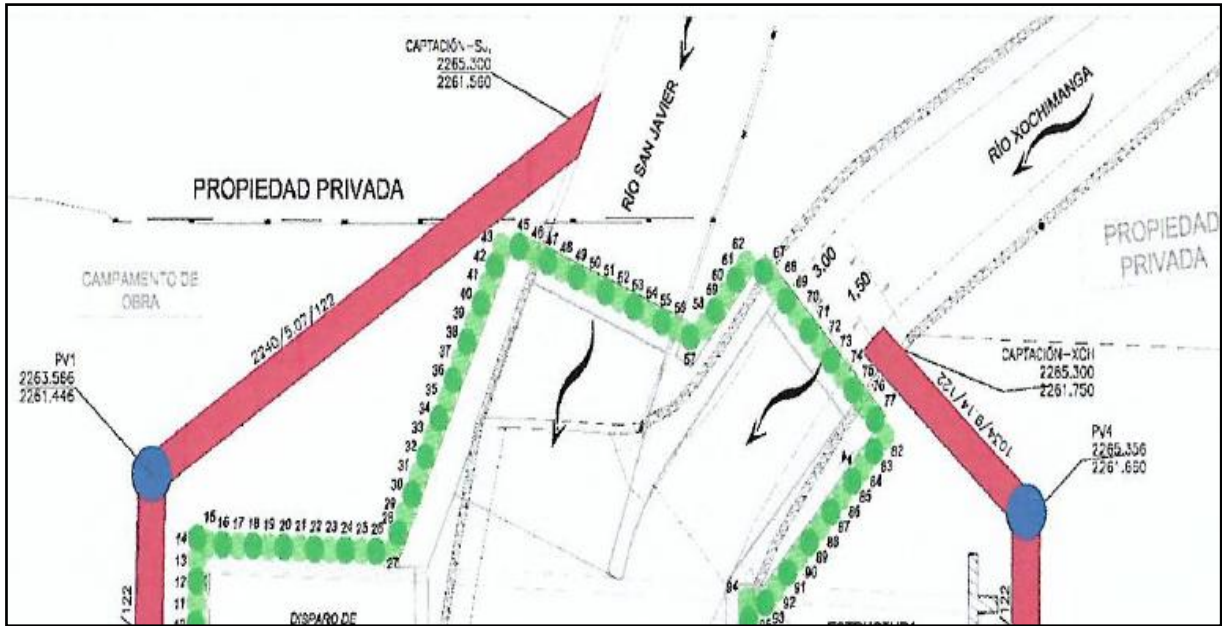


Figura 6.3 Estructura de Captación de los ríos San Javier y Xochimanga (CONAGUA, 2017)

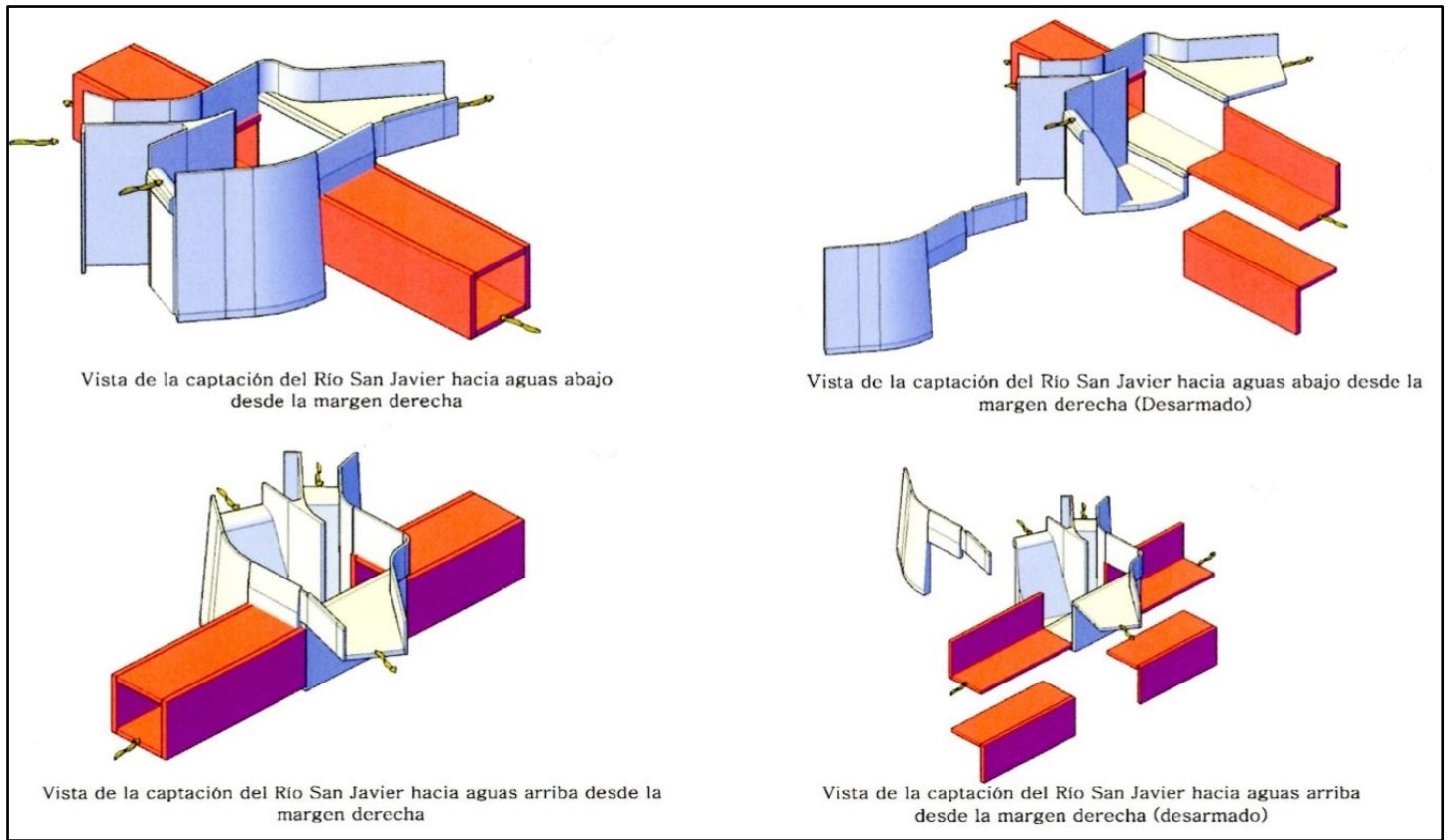


Figura 6.4. Captación de los ríos San Javier y Xochimanga (CONAGUA 2017)

La estructura de captación se basa en un sistema de ademe, el cual debido a la profundidad de las excavaciones que se requieren para construir la captación se realizó a base de pilas secantes desplantadas a 22.50m de profundidad respecto al nivel de terreno natural de los bordos de los ríos San Javier y Xochimanga. Se emplearon un total de 132 pilas, las cuales fueron de dos tipos: pilas de mortero (66 pilas) y pilas de concreto armado (66 pilas). Aunado a ello se construyeron 5 pozos de visita en los cuales se conectaron 100.31m de tubería de concreto reforzado de 48” de diámetro (1.22m). En general la estructura de captación se compone de un vertedor de “15 metros de altura” conformado por concreto ciclópeo, en dicho vertedor se aplicó un recubrimiento de concreto armado de 40cm de espesor con varillas del número 6 colocadas a cada 20 cm en ambos sentidos, posteriormente al vertedor se encuentra un muro en el cual se colocaron grapas para lograr la estabilidad de la excavación debido a que cabe aclarar que la excavación tiene un total de 19 metros. Aunado a ello para que la estructura de captación cumpliera con las necesidades estructurales, se emplearon traveses de concreto armado de sección rectangular (90cm x 100cm), el armado de dichas traveses consta de 10 varillas del número 5 con estribos de varilla del número 3 colocados a cada 25 cm (Descripción personal del plano “Estructura de Captación de los ríos San Javier y Xochimanga” de CONAGUA, 2017).

Posteriormente al vertedor con la finalidad de evitar filtraciones así como movimientos laterales y transversales, se colocó una junta asfáltica de 2cm de espesor con sello de cloruro de polivinilo. Enseguida de dicha junta se da paso a la estructura de cajón de 8.00m x 5.50m en dicha estructura se construyó un muro de concreto armado, el cual consta de una altura de 5 metros y su armado es con varillas del número 4 a cada 15cm. (Ver Anexo Figura 3) (Descripción personal del plano “Estructura de Captación de los ríos San Javier y Xochimanga” de CONAGUA, 2017).

6.2. Cajón de Conducción de 8.00m x 5.50m.

Entre los cadenamientos 3+984.360 y 4+074.360 se construyó un cajón de conducción. Las dimensiones interiores del cajón son de 8.00m x 5.50m, estas dimensiones son a partir de la captación de los ríos San Javier y Xochimanga hasta llegar aguas abajo a la Caja de Transición 3. El procedimiento de construcción enmarca lo siguiente:

- Excavación a cielo abierto en cajón en la zona del trazo con taludes 10:1.
- Excavación mecánica del núcleo del cajón por etapas.
- Alcanzado el nivel máximo de excavación se construyó la losa de fondo, muros estructurales y la losa tapa del cajón.
- Finalmente se restituyeron los niveles originales del terreno.

El Cajón de conducción (fig. 6.5) consta de un sistema de compuertas tipo deslizante para abertura y cierre del área total del canal para flujo libre. aunado a ello cuenta con un sistema estructural de muros estructurales así como dados y losas. Los dados se colocaron a cada paño de los muros, la dimensión de dichos dados son de 1.20m x 1.00m, estos dados se construyeron con la finalidad alojar los sistemas de guía para control del flujo. Los muros cumplen con la finalidad de alojar el sistema de guía para operación de compuertas, los muros centrales tienen una dimensión de 1m de espesor y 5m de largo. En cambio los muros laterales tienen dimensiones de 0.80m de espesor y 5m de largo. Cabe mencionar que cada muro se encuentra a cada 3.50m de distancia (Descripción personal del plano de CONAGUA, 2017).

Posteriormente a los muros se colocó un sistema de limpieza a base de una rejilla fija, rejilla autilimpiable y una banda de transportación de basura. Enseguida a lo antes mencionado se empleó un covertedizo de 0.60m de ancho por 0.20m de altura sobre el nivel del predio.

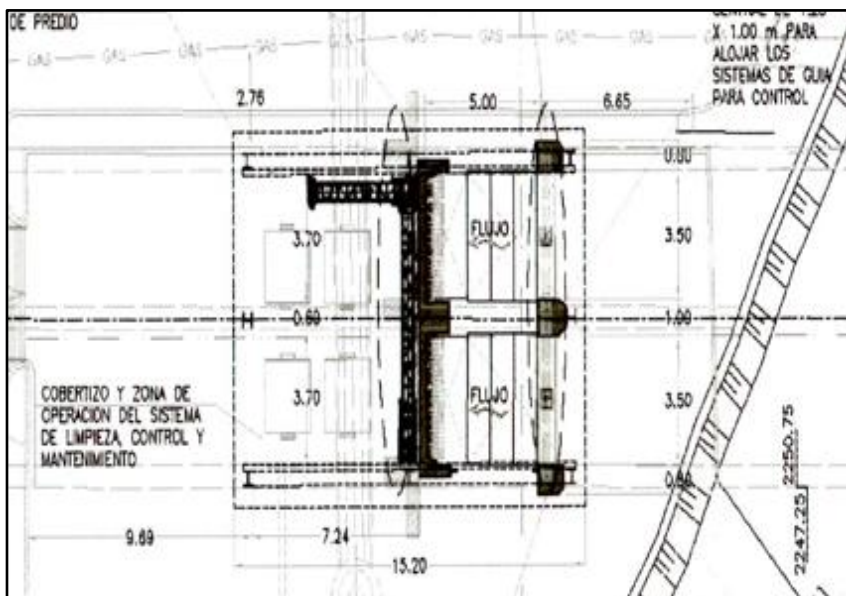


Figura 6.5. Cajón de conducción de 8.00 x 5.50m (CONAGUA 2017)

6.3. Caja de Transición 3.

Este elemento tiene como función principal proporcionar la transición suave del flujo entre el cajón de conducción de 8.00m x 5.50m y el túnel de 7.20m de diámetro terminado (fig. 6.6). La zona de transición tiene una longitud de 10m de largo y 8.40m de ancho, se construyeron 3 tipos de muros (2 laterales y 1 central), estos muros con un ancho de 0.70m. En general la Caja de transición se dividió en cinco secciones (Secciones: A, B, C, D, E), cabe mencionar que cada sección es de 2m de longitud. En cuanto al arreglo estructural de los muros, en las secciones A y B se empleó acero de refuerzo del número 6 a cada 15cm, mientras que para las otras secciones se empleó acero de refuerzo del número 4 a cada 15cm (Descripción personal del plano de CONAGUA, 2017).

En la conexión entre la zona de transición y el túnel de 7.20m se construyó una trabe circular de 1.00m x 0.70m el arreglo estructural fue de 20 varillas del número 5 y estribos dobles con varilla del número 3 a cada 25cm. Por otra parte la cubierta de la zona de transición se basa en un sistema de distribución de travesaños, cada trabe tiene una sección de 1.20m x 0.50m, el armado de las travesaños abarcan varilla del número 10,4 y 5. (Ver Anexo figuras 7 y 8) (Descripción personal del plano Caja de Transición 3 CONAGUA, 2017).

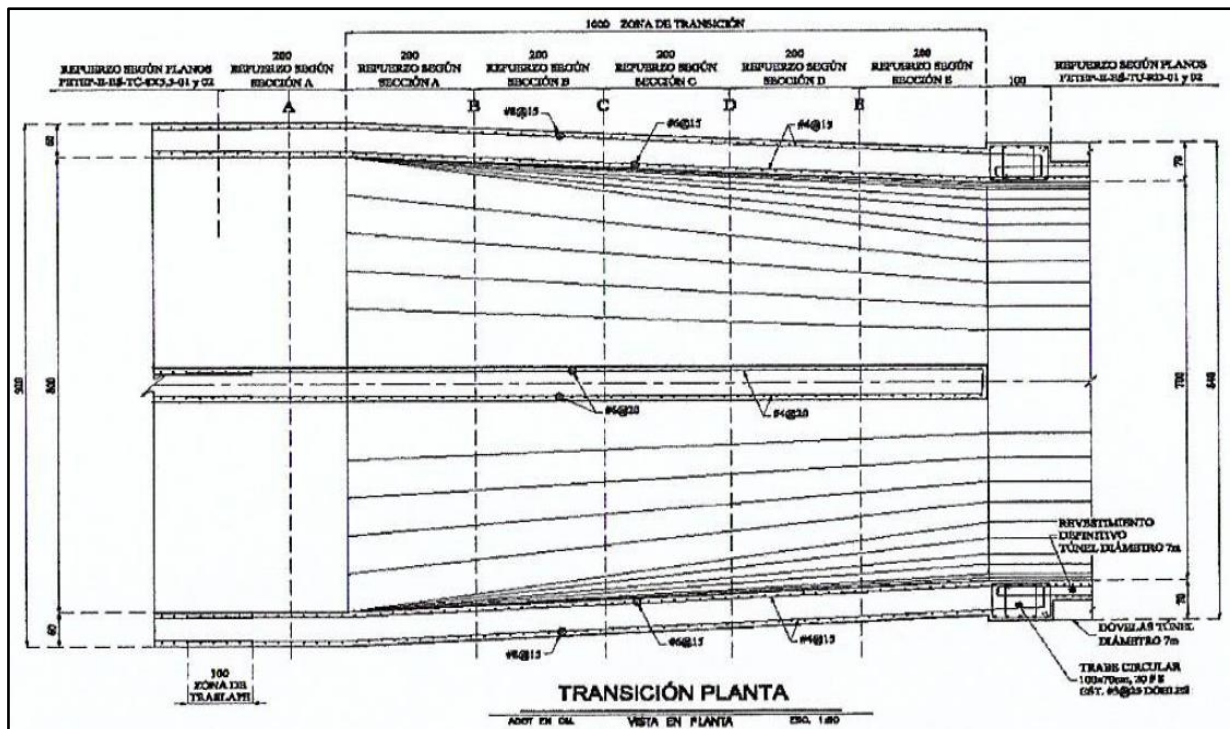


Figura 6.6. Planta de Caja de Transición 3 (CONAGUA 2017)

6.4. Túnel de 7.2m de Diámetro Terminado.

El túnel se localiza entre los cadenamientos 4+074.060 al 9+653.866 con una lumbrera de 12m de diámetro terminado en el cadenamiento 7+513.360. El revestimiento primario se conforma con 3,730 anillos de concreto reforzado configurados por 7 dovelas de 35cm de espesor y 1.5m de longitud. El equipo tunelador empleado para lograr la excavación fue de tipo TBM (Tunnel Boring Machine) con 8.72m de diámetro de excavación. (CONAGUA, 2017)

6.4.1Estratigrafía.

La estratigrafía del túnel obtenida mediante la exploración geotécnica es la siguiente (fig. 6.7) :

- *Aluvión (Qal)*: Depósitos poco consolidados de suelos y paleosuelos limoarcillosos a veces arcillosos; contienen intercalaciones fluviales lenticulares de arenas, muy raras veces de gravas.

Tarango (T): Secuencia de brechas piroclásticas en matriz arenosa; forman cuerpos poco cementados.

- *Toba (Qito)*: Secuencia de erupciones pumíticas. Forman importantes espesores de partículas arenosas medianamente consolidadas y horizontalmente estratificadas.

-*Talud (Tqt)*: Secuencia de bloques y brechas en matriz de arenas y tobas limoarcillosas y paleosuelos; cubren los flancos de elevaciones rocosas. Forman taludes de reducida y variable consolidación.

-*Dique*: Porción de roca intrusiva que invade las rocas preexistentes, normalmente de forma tabular, que atraviesa en sentido vertical o casi vertical las capas preexistentes.

-*Lahar (Tml)*: Depósitos de brechas piroclásticas en matriz arenosa; forman cuerpos potentes de mediana a buena consolidación.

-Domas (Tmv): Cuerpos lávicos grandes con estructura de coliflor y composición dacítica. Su roca es dura, fluidal, mayoritariamente sana, aunque a veces brechoide y muy raras veces algo alterada. Ha sufrido fracturamiento general por enfriamiento y por tectónica, arrojando para ello un RQD medio de 50 a 60%, pero una recuperación generalmente buena de 70 a 80%.

-Domo y Cono del Cerro del Tigre (Tomv): Lavas dacíticas de caldera y domo mayoritariamente sanas; de buena recuperación para el domo; de mediana recuperación para el cono, debido al pronunciado fracturamiento tectónico. El domo tiene estructura de coliflor, el cono consiste de una secuencia horizontal de lavas y brechas de flujo. (CONAGUA, 2017)

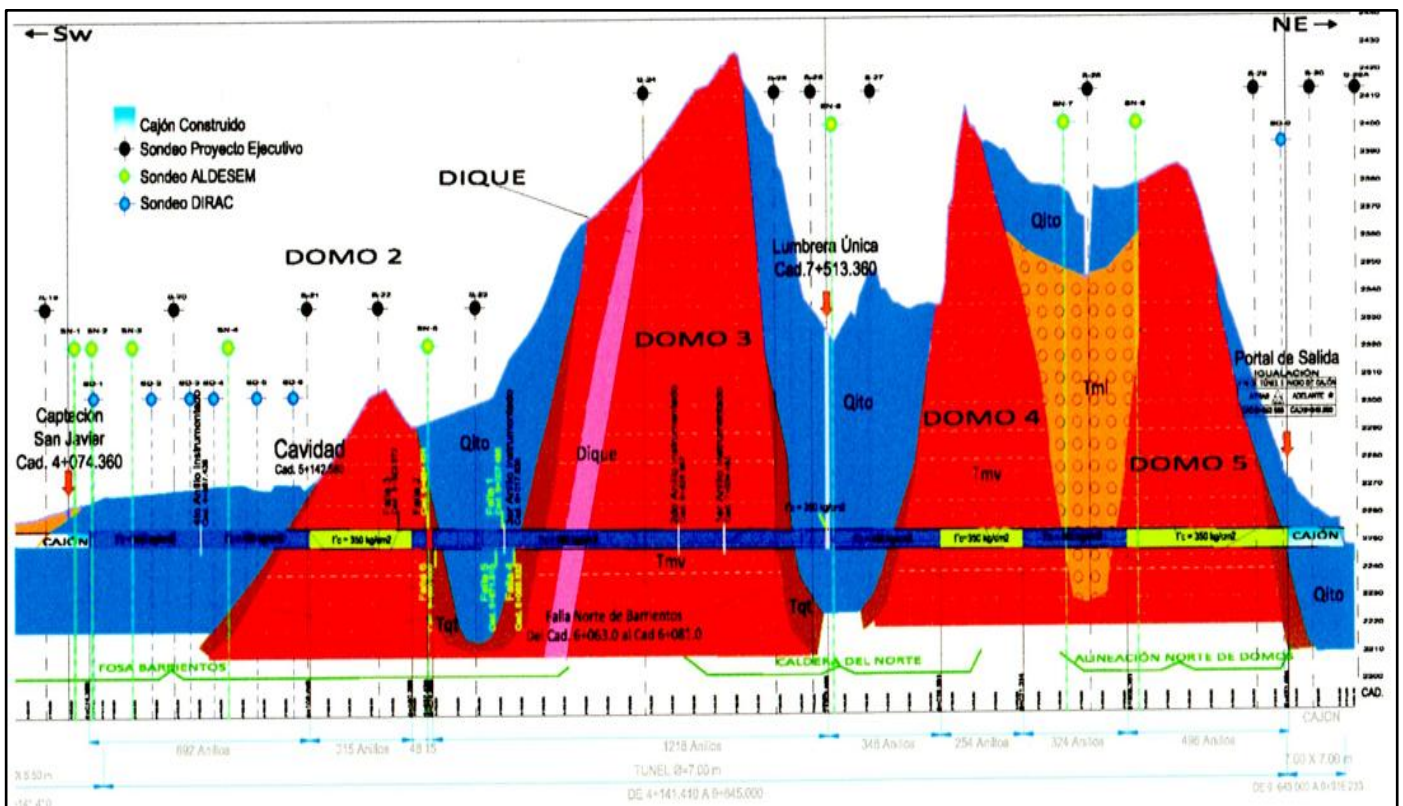


Figura 6.7 Perfil Geológico TEP II (CONAGUA 2017)

6.4.2 Tuneladora TBM con escudo EPB.

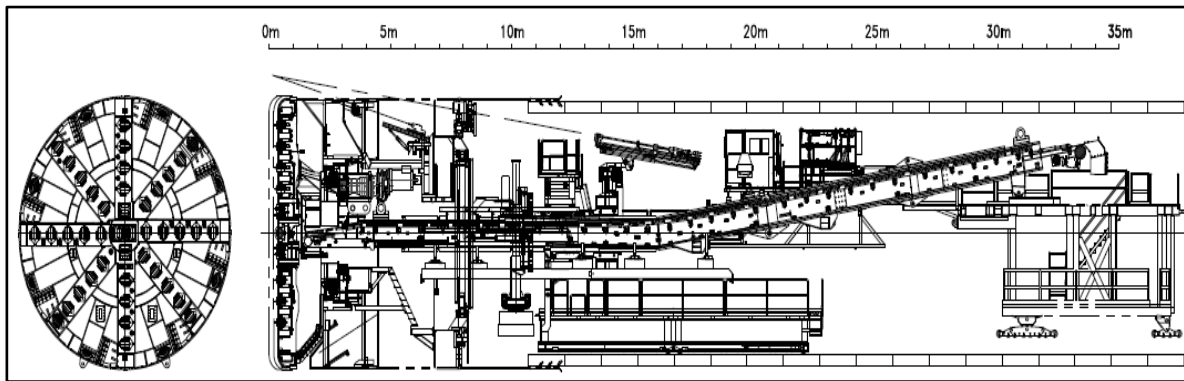
Con la tuneladora tipo TBM con escudo EPB dual se alcanzaron varios records en excavación en el país, dentro de ellos destaca el excavar 54 metros lineales en 24 horas, 229 en una semana y 702 en un mes (figs. 6.8 y 6.9). La tuneladora colocó un anillo de hormigón reforzado cada 1,5 metros. Estos anillos están conformados por siete dovelas prefabricadas que constituyen el revestimiento primario del túnel. La máquina tuneladora de 8,7 m (28,5 pies) de diámetro incluye características de un solo escudo de roca dura y un EPB para "cruzar" en tipos de suelo muy diferentes.

La TBM Crossover empleada en el proyecto es patentada por la empresa Robbins, cuenta con componentes como un cabezal de corte convertible que se puede cambiar de un diseño Hard Rock a EPB, una cinta transportadora extraíble y un transportador de tornillo, y cajas de engranajes de varias velocidades para aumentar el par para excavar túneles en terrenos difíciles. El par de arranque es una forma en que la tuneladora blindada puede impulsarse a sí misma a través de las zonas de fractura sin atascarse: las cajas de engranajes de varias velocidades se pueden activar para lograr un alto par a baja velocidad, de forma similar a como funciona un EPB. Con cajas de engranajes de varias velocidades, el cabezal de corte se puede liberar en terrenos en mal estado donde, de lo contrario, podría atascarse. En roca dura, la tuneladora puede operar en un modo estándar de bajo torque y altas RPM (Robbins, 2019).

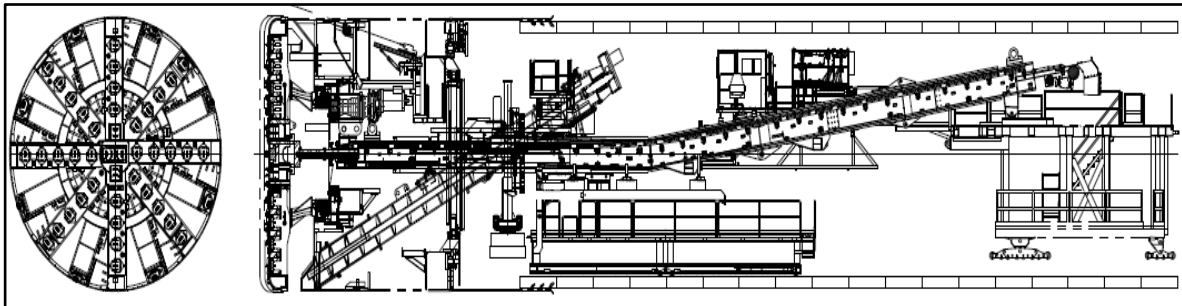
La tuneladora única fue diseñada para perforar debajo de varios valles con entradas de agua esperadas. En el caso de una alta entrada de agua, una compuerta de guillotina ubicada en el conducto de lodo es capaz de sellar la cámara de mezcla del resto de la máquina. De esta manera, la tuneladora puede mantener pasivamente altas presiones de agua mientras la tripulación toma medidas para deshidratar y consolidar el suelo. La máquina está equipada con perforación continua con sonda, con un amplio rango de perforación para investigar el terreno delante de la máquina. Además del taladro de sonda estándar, cuenta con un taladro de cubierta proporciona otro anillo para perforar lechada o para perforar cerca del cabezal de corte y en los 120 grados superiores del túnel, mientras que un segundo taladro de sonda/lechada está ubicado más atrás en la máquina, lo que permite dos diferentes patrones de agujeros.



Figura 6.8 Interior de Tuneladora TBM TEP II (Cortesía Dr J.Ma Chávez, 2022)



TBM Modo Corte de Roca



TBM Modo EPB

Figura 6.9. Esquema Tuneladora TBM (Robbins, 2019)

6.4.3. Excavación.

La tuneladora TBM Crossover comenzó la excavación en agosto de 2015 en una configuración de roca dura y se montó con cortadores de disco de 20 pulgadas (0.508m) de diámetro, un movimiento arriesgado dado que las primeras secciones del túnel estaban en suelos más blandos antes de que la tuneladora golpeará la roca más sólida (fig. 6.10). En Diciembre, las tasas de avance de la máquina aumentaron rápidamente, con récords del proyecto y nuevamente en enero después de que la máquina logró un rendimiento por día de 42.8 m (140 pies) y una rendimiento semanal de 185.1 m (607 pies). A principios de 2016, la tuneladora golpeó la primera de varias zonas de contacto, una falla de 30 m (98,4 pies) de ancho de roca fracturada y bloqueada. Si bien la excavación a través de la zona de contacto fue lenta, el progreso se recuperó nuevamente en la roca andesita más competente. Después de un avance intermedio en marzo de 2016 en un eje de 80 m (262,5 pies) de profundidad seguido de inspección y mantenimiento, la tuneladora continuó (Robbins, 2019).

En junio de 2016, la tuneladora estaba perforando en roca bastante competente y había logrado dos récords nacionales para el avance de la tuneladora: uno por excavar 57 m (187 pies) en un día y otro por perforar 702.2 m (2,303.8 pies) en un mes. Mientras perforaba en roca de andesita fracturada en otoño de 2016, la tuneladora se encontró con una caverna natural que se cree que es el resultado de una caída de roca en una zona de transición o de un viejo cuerpo de lago subterráneo que había erosionado la roca. La caverna tenía aproximadamente 90 metros cúbicos de tamaño, incluyendo unos 57 metros cúbicos de superficie inestable. La tuneladora se detuvo y se tomaron medidas inmediatas para llenar la caverna (Robbins, 2019).

A finales de octubre de 2016, la tuneladora había llegado a la sección final de terreno blando. En esta zona final de cubierta baja, la distancia desde la parte superior del túnel hasta la superficie es inferior era de 1.5 veces el diámetro de la máquina, y el suelo tuvo la consistencia de un suelo preconsolidado. El área residencial que se encontraba en dicha zona del túnel requirió que el hundimiento tenía que mantenerse al mínimo, a consecuencia de ello se tomó la decisión de convertir la máquina Crossover al modo EPB (Robbins, 2019).

El proceso de conversión del modo TBM al modo EPB comenzó con las modificaciones del cabezal de corte, agregando las tuberías para las nuevas líneas de espuma, cambiando la cuchara para roca dura por raspadores de suelo blando EPB y retirando las cucharas para residuos propios de una tuneladora para roca dura. Las placas removibles en el cabezal de corte se cambiaron para alterar la relación de apertura de Hard Rock optimizada a EPB optimizada (de 7,9 % a 18,95 %). Otros pasos incluyen la instalación de barras mezcladoras en el mamparo, el cambio de la cinta transportadora TBM a un transportador de tornillo, la alteración del sistema de fluidos para los aditivos EPB y la instalación de sellos de articulación para la perforación presurizada. La máquina se convirtió por completo y estuvo lista para perforar a principios de 2017, la máquina comenzó su última sección con aproximadamente 18 m (59 pies) de cobertura, que se redujo debido a la pendiente del suelo a solo 12 a 14 m (39 a 46 pies) (Robbins, 2019).

Para marzo de 2017, la TBM había funcionado bien, con solo 517 anillos (alrededor de 775 m, 2,543 pies) por perforar. Cabe mencionar que el mejor día de producción de la tuneladora en suelo blando fue de 13 anillos (19,5 m, 64 pies) en un solo turno de 12 horas: resultados impresionantes a pesar de las limitadas horas de perforación debido al área residencial de arriba. El avance final se produjo a finales de mayo de 2017 (Robbins, 2019).

La fecha de inicio de excavación fue el 15 de Agosto del 2015 (fig 6.10.) y el primer punto a excavar fue en el cadenamiento 9+653.866. El último punto a excavar se completó a finales de Mayo del 2017 en el cadenamiento 4+074.060. En general la excavación se realizó cruzando materiales dacíticos, lahares. Durante el mes de Agosto del año 2017 se cruzó por la Formación Qito y la zona de fallas de Barrientos, aunado a ello al frente de la excavación se tuvieron infiltraciones de agua debido a las lluvias de temporada (CONAGUA, 2017).

Para los mantenimientos diversos se emplearon 219 días tales como la instalación de la banda transportadora, reparaciones de la TBM, prolongaciones del cable de energía y conversión de la TBM a EPB. Para la conversión a EPB se utilizaron 82 días, los cuales iniciaron en paralelo con los trabajos de remediación de la cavidad detectada sobre el eje de trazo al frente del EPB. El promedio general de excavación por día hábil fu de 15.3m lineales lo que corresponde a la colocación de 10.2 anillos, cabe mencionar que esto en

modo TBM, por otra parte en modo EPB el promedio fue de 8.47m lo que corresponde a 5.63 anillos.

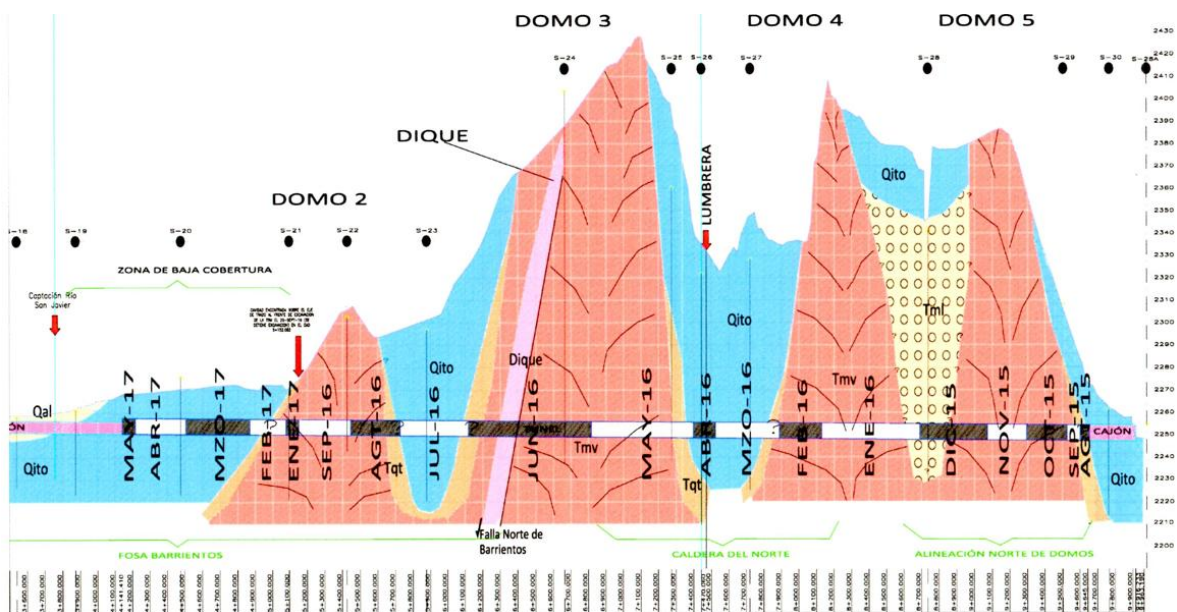


Figura 6.10 Gráfico de Excavación del TEP II (CONAGUA 2017)

6.4.4 Revestimiento Primario.

El revestimiento primario está construido a base de dovelas de concreto formadas por anillos de 35cm de espesor. Cabe mencionar que los anillos colocados fueron de diferente resistencia (350 Kg/cm^2 , 450 Kg/cm^2 y 650 Kg/cm^2), esto con base a las variantes geotécnicas que tuvo cada zona del túnel. (Ver anexo fig 9). A continuación se describe el revestimiento primario:

- Cadenamiento 4+074.360 al 5+106.758 se colocaron 692 Anillos con $f'c: 450 \text{ kg/cm}^2$.
- Cadenamiento 5+106.758 al 5+580.266 se colocaron 315 Anillos con $f'c: 350 \text{ kg/cm}^2$.
- Cadenamiento 5+580.266 al 5+652.420 se colocaron 48 Anillos con $f'c: 450 \text{ kg/cm}^2$.
- Cadenamiento 5+652.420 al 5+674.968 se colocaron 15 Anillos con $f'c: 650 \text{ kg/cm}^2$.
- Cadenamiento 5+674.968 al 7+505.865 se colocaron 1218 Anillos con $f'c: 450 \text{ kg/cm}^2$.
- Cadenamiento 7+505.865 al 7+516.388 en el paso de la lumbrera se colocaron 7 Anillos con $f'c: 350 \text{ kg/cm}^2$.

- Cadenamiento 7+516.388 al 8+039.501 se colocaron 348 Anillos con $f'c$: 450 kg/cm².
- Cadenamiento 8+039.501 al 8+421.314 se colocaron 254 Anillos con $f'c$: 350 kg/cm².
- Cadenamiento 8+421.314 al 8+908.351 se colocaron 324 Anillos con $f'c$: 350 kg/cm².
- Cadenamiento 8+908.351 al 9+653.866 se colocaron 496 Anillos con $f'c$: 350 kg/cm².

Por otra parte tal como se mencionó en párrafos anteriores, se colocaron micropilotes, esto con el objetivo de proteger la infraestructura de los predios aledaños al proyecto (fig. 6.11). En general se colocaron un total de 890 pilotes. Cada pilote es de 8^{5/8"} x 25 m de profundidad promedio. Cabe mencionar que este arreglo de micropilotes abarca del cadenamiento 5+070 al 4+130. Aunado a ello se construyeron 882 metros lineales de trabes de liga de micropilotes con una sección de 0.75m x 0.75m con una resistencia $f'c$: 250 kg/cm².

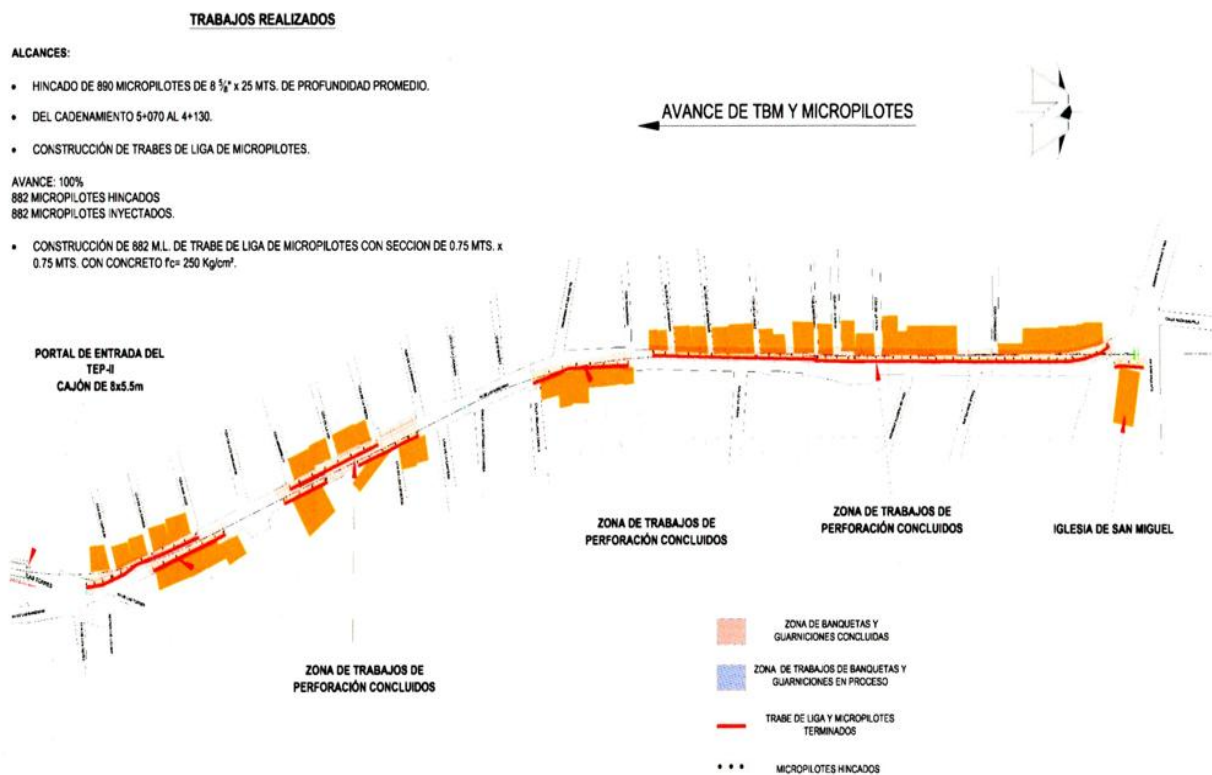


Figura 6.11. Gráfico de Trabajos de Micropilotes del TEP II (CONAGUA 2017)

6.5. Cavidad Durante la Excavación del TEP II.

El 25 de Septiembre de 2016, durante el turno nocturno, la constructora realizó un paro para dar mantenimiento y limpiar la rueda de corte de la TBM, ubicada en el cadenamiento 5+142.585(bajo la calle 1ª cerrada de Nezahualpilli), colonia San Miguel Xochimanga, municipio de Atizapán de Zaragoza. Este punto está aproximadamente a 90 m de la parroquia de San Miguel Arcángel, que se considera el inicio de la zona de baja cobertura hacia la captación de los ríos San Javier-Xochimanga, que se encuentra aproximadamente a 1 km de distancia. Durante la limpieza de la rueda de corte, se detectó a la altura de la clave una cavidad con tendencia ascendente hacia la superficie (fig.6.12), por lo que la Constructora, utilizando lámparas desde dentro de la cabeza de corte, hizo una evaluación preliminar de las dimensiones de la oquedad, estimando 6 m de altura por encima de la cabeza de corte y 5 m de ancho. Mientras esta contingencia se solucionaba, la TBM suspendería sus trabajos hasta que las actividades a seguir se definieran, sin poner en riesgo los inmuebles asentados en la superficie directamente sobre el eje de trazo del túnel, a saber tres casas habitación y una nave industrial que contenía las instalaciones de un verificentro (Rivas, 2017).

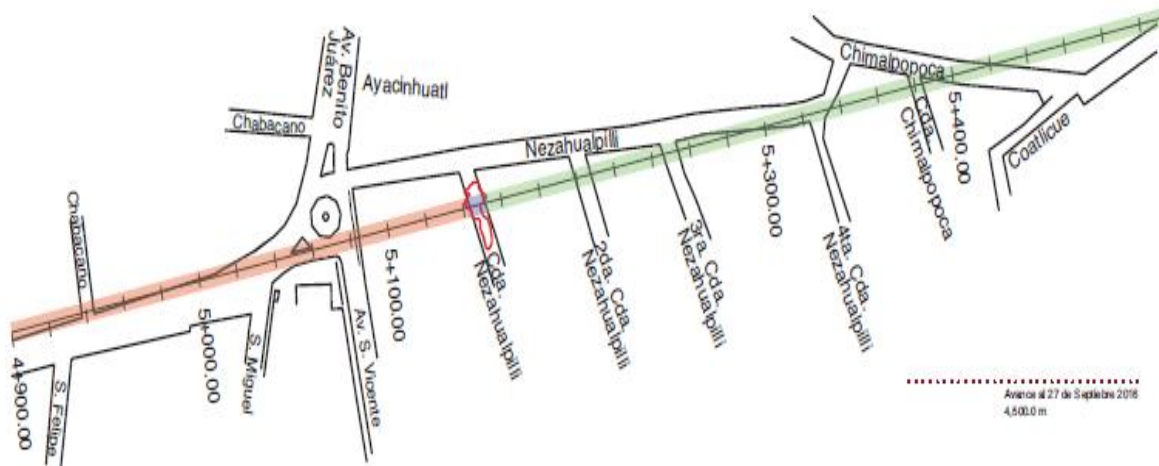


Figura 6.12 Localización de la Cavidad Sobre el Eje del Trazo del TEP II (Rivas, 2017)



Figura 6.13 Distribución de Calas Virtuales (Rivas, 2017)

Se realizó un estudio de Georadar que dio información a una profundidad máxima promedio de 20 m, efectuándose ocho calas virtuales para definir el entorno de la cavidad (fig. 6.13). Cada una de las calas se definió por medio de líneas paralelas de Georadar, con una separación de 0.2 m. Los resultados obtenidos permitieron suponer que la presencia de las cavidades, que coincidían con el eje de trazo del túnel, se ubicaban con las calas virtuales “1” y 4”. Se interpretó la existencia de fracturamiento intenso en la roca, probablemente relacionado con asentamientos diferenciales asociados con los depósitos de materiales volcánicos acumulados en el área (Rivas, 2017).

Con el análisis detallado de las condiciones físicas del subsuelo en el área estudiada, se localizó con la “CALA 1” una oquedad en el área de la perforación que definía claramente la parte superior de la cavidad bajo la calle 1ª Cerrada de Nezahualpilli. Con la “CALA 4” se interpretó la presencia de dos cavidades localizadas en la zona del hastial derecho de la TBM en el sentido de avance de la misma, asociadas probablemente con la cavidad detectada de igual manera bajo la 1ª Cerrada de Nezahualpilli (Rivas, 2017).

Como complemento al estudio de Georadar, se efectuó un estudio con el método geofísico denominado Tomografía Eléctrica, a una profundidad de 28 m, con el objeto de determinar las características estratigráficas de la zona. Dicho estudio permitió determinar las características geométricas de la cavidad donde se ubicaba la máquina perforadora, así como cuantificar el volumen necesario para estabilizar el subsuelo y evitar afectaciones tanto a la máquina como a la superficie urbana en la zona. El método de prospección de tomografía eléctrica utilizado, correspondió a un arreglo de 28 electrodos tipo dipolo-dipolo simétrico, con espaciamiento máximo entre electrodos de 5 m, se realizaron 6 líneas paralelas con separación de 1 m entre ellas. Con los resultados de este estudio, se llegó a las siguientes conclusiones:

A. Geológicamente la zona presenta una predominancia de tobas arenosas; en la superficie se encuentra una toba arenosa de relleno que cubre una capa de arcilla que llega a una profundidad de 6 m; subyacente a esta capa de arcilla se encuentra otra toba arenosa, en donde se detectó la anomalía geológica.

B. La anomalía geológica comienza a los 9 m de profundidad (fig. 6.14), debajo del electrodo 3 y terminando bajo el electrodo 11, a una profundidad máxima de 27 m. Conforme a los valores eléctricos obtenidos, se pudo correlacionar esta anomalía como una

oquedad o material arenoso muy poco consolidado. Su volumen aproximado es de 3,600 m³.

Las profundidades mínimas y máximas de la parte alta de la anomalía son de 9 m y 12 m respectivamente; mientras que aquéllas de la base de la anomalía son de 2 m y 27 m respectivamente (Rivas, 2017).

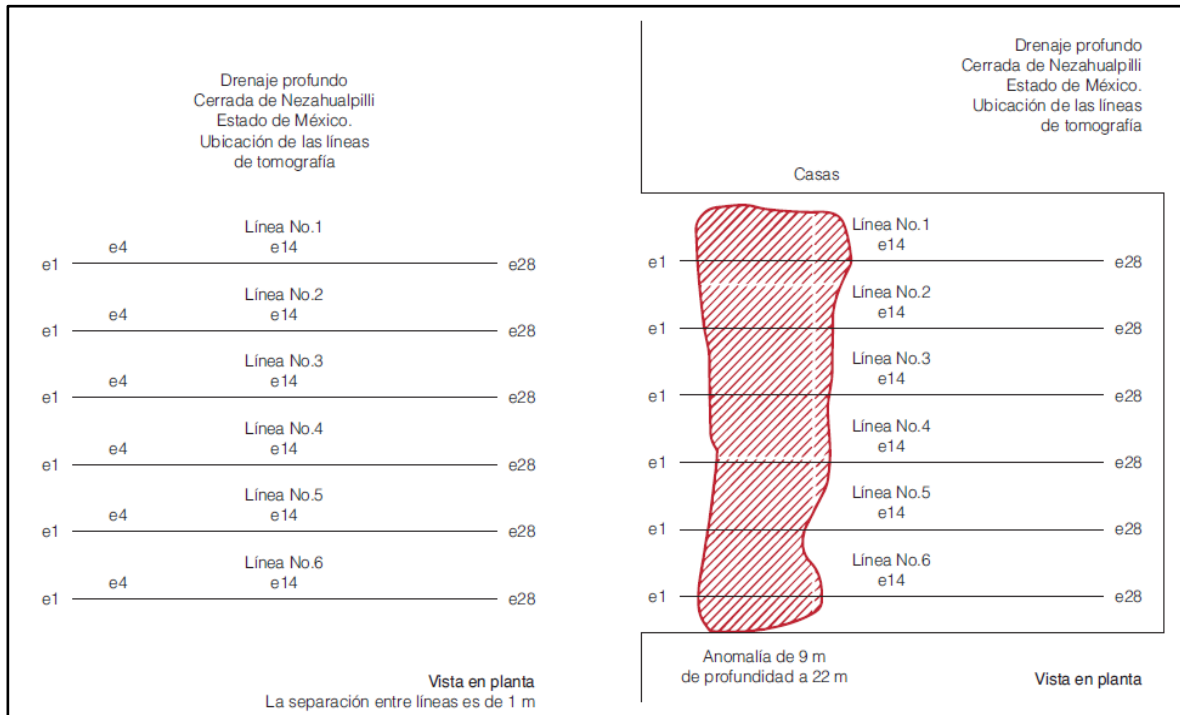


Figura 6.14. Ubicación de Anomalía y Ubicación de líneas de tomografía (Rivas, 2017)

La sección geoelectrica obtenida con los datos de los cuatro sondeos eléctricos verticales indica una estratigrafía que se identifica como tobas arenosas poco arcillosas de granulometría fina; no se observa la presencia de roca (fig. 6.15). De los 0 a 2 m de profundidad se observa material de relleno, arenas y algunas gravas; subyacente a esta capa, entre los 2 m y los 6 m de profundidad se detecta arcilla arenosa; por debajo de esta capa se tiene toba arenosa.

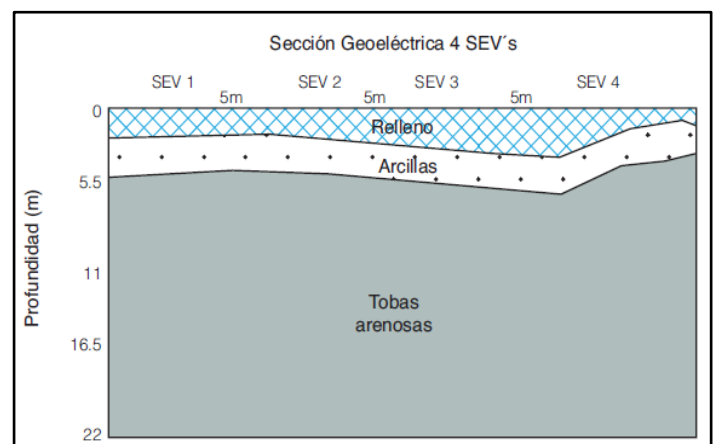


Figura 6.15. Sección Geoelectrica (Rivas. 2017)

La cavidad descubierta durante el proceso de excavación se detectó en las inmediaciones de la zona de transición entre el relicto rocoso (Tmv) y el material de pie de monte o detritos

rocosos (Tqt) en una paleo-ladera que conforma la prominencia topográfica actual y que se formó aproximadamente desde el periodo Terciario; la cual, con el depósito de los materiales volcánicos, quedó sepultada en el sitio (fig.6.16) (Rivas, 2017).

De acuerdo al lugar de emplazamiento de los depósitos detríticos, la cavidad constituye un hueco que los clastos y peñascos conformaron durante su proceso de depósito o colapso hacia el pie de la antigua ladera. El espacio de la cavidad se conservó abierto debido a las grandes dimensiones de los bloques deslizados de las partes altas del cerro y su apilamiento por gravedad, lo que formó huecos amorfos, tal y como se muestra en la siguiente figura.

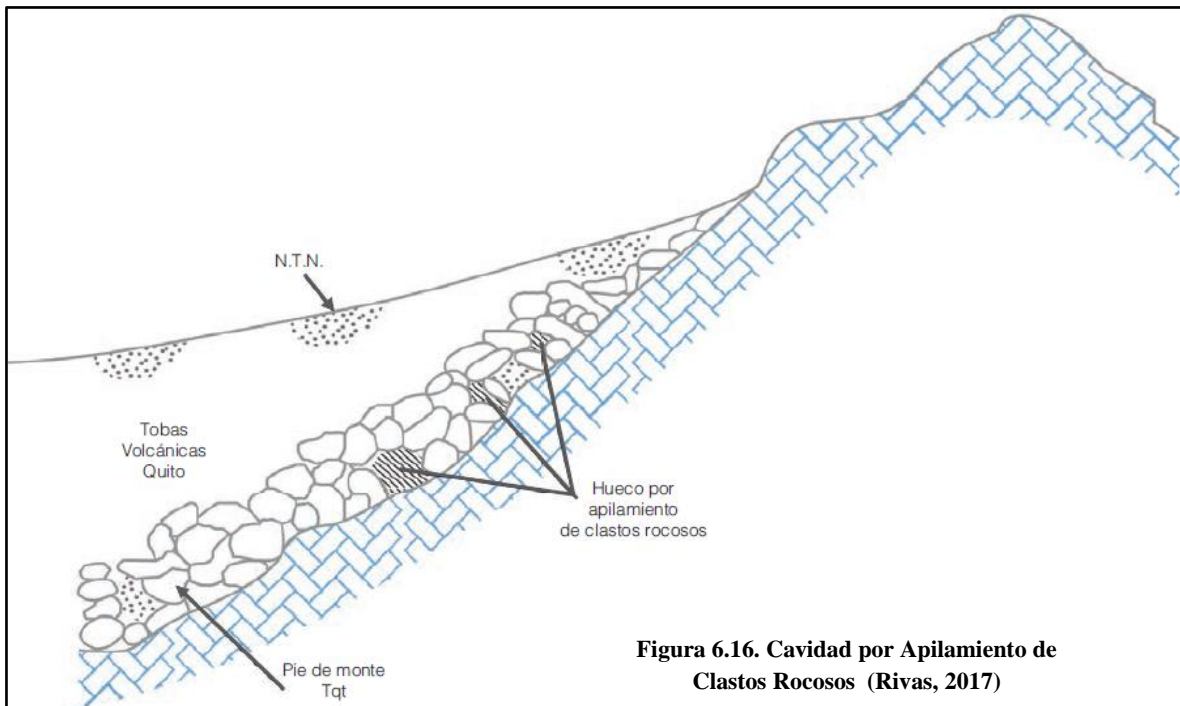


Figura 6.16. Cavidad por Apilamiento de Clastos Rocosos (Rivas, 2017)

Con base en los estudios de campo, la constructora presentó un procedimiento para el relleno desde la superficie de la cavidad, el cual se describe a continuación:

A. Trabajos desde el interior de la TBM: para evitar que la máquina quede atrapada por los trabajos de remediación, se creará una capa lubricante alrededor del cuerpo del escudo y de la rueda de corte, inyectando una mezcla de agua-bentonita. Este lodo se inyectará por los puertos existentes en los escudos delantero y trasero, así como por el faldón decola por los puertos que se utilizan para la inyección del mortero de relleno, introduciendo previamente grasa WR-89 para sobrellenar los cepillos y garantizar que el lodo no se introduzca en el túnel.

B. Una vez ejecutada la inyección de bentonita desde el interior de la TBM, se ejecutarán barrenos de 4" desde la superficie del terreno, sobre la calle 1ª Cerrada de Nezahualpilli. En estos barrenos se instalará tubería para inyectar directamente el material de relleno, a la cavidad detectada sobre el cuerpo del escudo.

La cavidad se rellenó con grava de entre un cuarto a tres cuartos de pulgada, de manera a crear un filtro para que la máquina no quede atrapada. Posteriormente, se inyecta lechada agua-cemento con un aditivo acelerante de silicato, mediante tubos manguito a diferentes niveles. Los manguitos se instalarán aproximadamente en cuadrícula de 1.5 x 1.5 m con la finalidad de garantizarla consolidación de la grava inyectada y la homogenización de la grava-lechada.

C. Para llegar a la cavidad delante de la rueda de corte, se ejecutaron barrenos inclinados desde la superficie del terreno. Una vez finalizados los trabajos de remediación de oquedades, se verificó su llenado mediante estudios indirectos (fig. 6.17) (Rivas, 2017).

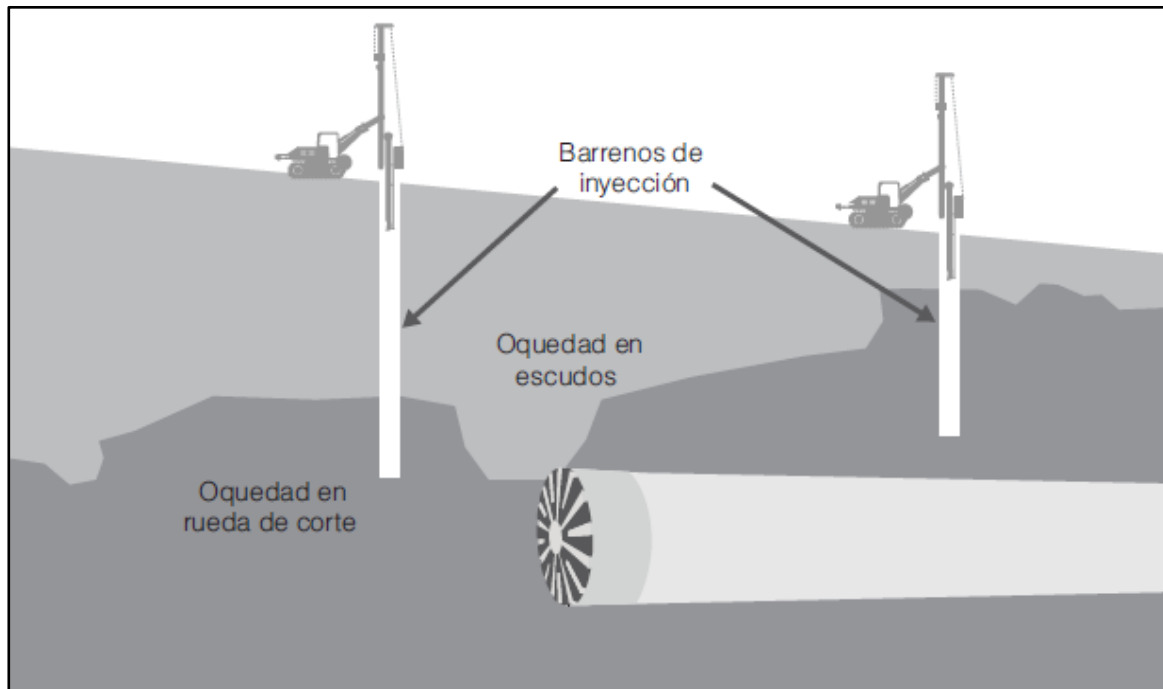


Figura 6.17. Esquema General de Barrenos Para Inyección Desde la Superficie (Rivas, 2017)

6.6. Lumbreira única del TEP II.

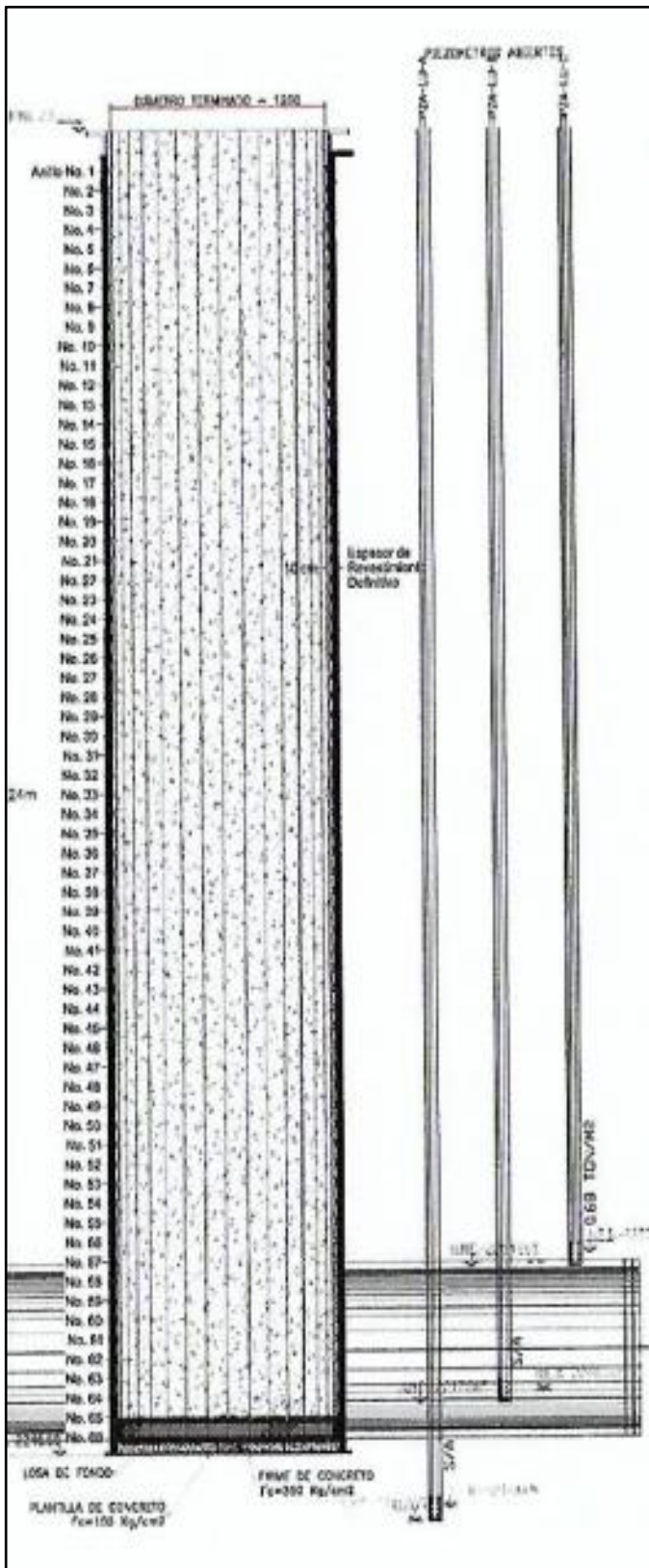


Figura 6.18 Vista general de la lumbreira única del TEP II (Conagua, 2017)

El diámetro inicial de la lumbreira fue de 13.10m, la excavación para realizar dicha lumbreira fue de un total de 67.22m de tal manera que el volumen total de excavación extraído fue de 9500m³(fig. 6.18). Para el revestimiento primario se colocaron marcos de acero estructural, con 7 segmentos cada uno, cabe mencionar que en total se colocaron 68 piezas. El revestimiento fue de 0.45m de espesor y el volumen total de concreto empleado en él fue de 1252m³. Es evidente que el revestimiento fue colado mediante concreto lanzado en el cual se aplicaron fibras de acero, la porción empleada durante toda la lumbreira fue de 50 toneladas (CONAGUA, 2017).

En cuanto al revestimiento definitivo, este fue de 0.10m de espesor, lo que equivale a 260m³ de concreto, el volumen de acero fue de 40 toneladas. Por otra parte se construyeron portales de ingreso y de salida de la TBM con vigas de acero de 12". La losa de fondo de la lumbreira cuenta con una resistencia de 350 kg/cm². Aunado a ello cabe mencionar que se colocaron 4 inclinómetros y 3 piezómetros abiertos.(Ver Anexo Figura 15) (CONAGUA, 2017)

La estratigrafía de la zona dónde se construyó la lumbrera del TEP es la siguiente:

- 0.00m a 6.00m: Terraplén conformado a base de arena limosa color café amarillento.
- 6.00m a 13.00m: Material de relleno formado por arcilla color negro, limo café obscuro y arcilla arenosa color café.
- 13.00m a 18.00m: Toba limosa color café obscuro alterada de consistencia muy firme.
- 18.00 a 24.00m: Toba color café amarillento y café obscuro de consistencia muy firme.
- 24.00m a 34.00m: Toba limo-arenosa color café amarillento y café obscuro de consistencia dura con gravas y gravillas de pómez en proporción baja.
- 34.00m a 36.00m: Toba limo-arenosa color café amarillento con gravillas de andesita, dacita y pómez.
- 36.00m a 38.00m: Arena pumítica color café claro de grano fino a grueso de compacidad alta con gravillas.
- 38.00m a 43.00m: Toba limo-arenosa pumítica color café amarillento, de consistencia dura con gravas y gravillas.
- 43.00m a 47.00m: Horizonte de arena pumítica color café claro de grano fino a grueso de compacidad alta
- 47.00m a 49.00m: Toba limosa café amarillento de consistencia dura con gravillas de andesita y pómez.
- 49.00m a 62.00m: Toba limo-arenosa color café amarillento de consistencia dura con gravas y gravillas de andesita, dacita y pómez.
- 62.00 a 71.00m: Arena limo-arenosa vítrea color café grisáceo y café amarillento, cementada de consistencia dura con gravas y gravillas de andesita, dacita y pómez.
- 71.00m a 75.00m: Toba limo-arenosa color café amarillento y café obscuro de consistencia dura con gravas, gravillas y algunos boleos.

(CONAGUA, 2017)

CONCLUSIONES.

El túnel surge de la necesidad de superar un obstáculo natural con la finalidad de reducir las distancias de traslado entre las antiguas civilizaciones, generalmente el obstáculo natural a superar era un macizo rocoso. Además de ciertos obstáculos naturales, en tales civilizaciones existió una serie de necesidades primordiales de carácter hidráulico y sanitario, por lo cual condujo a la implementación de túneles subterráneos a través de los cuales se transportaron cursos de aguas pluviales, fluviales o marinas. Posteriormente, conforme a las necesidades que se presentaron, debido al crecimiento y desarrollo de las diferentes urbes da como resultado la versatilidad de los túneles, dentro de los cuales destacan los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de servicio y para almacenamiento de residuos.

No existe obra ingenieril que necesite más de la geología y la geotecnia que un túnel. Cuanto mayor complejidad y profundidad tenga el túnel mayores análisis geotécnicos y exploraciones geológicas serán requeridas para su ejecución. Aunado a ello cabe resaltar que la construcción de un túnel requiere de la geología y geotecnia tanto en la etapa de estudios preliminares como en la construcción e incluso en la operación. Esto a razón de que se necesita de una geología que no se pierda en análisis que lleven al conocimiento de la petrogénesis, estratigrafía, sino de una geología ingenieril a gran escala que exprese información sobre el comportamiento presente y a futuro del macizo rocoso ya que este será modificado con la construcción del túnel.

Para la proyección y construcción de un túnel se debe tomar en cuenta una serie de aspectos, dentro de ellos destaca: el método de excavación que se pretenda emplear, la definición de fases de excavación. En adición a lo anterior es importante mencionar que también se deben considerar los posibles problemas geotécnicos que se pudiesen presentar previamente y durante el proceso de la construcción del túnel, entre este tipo de consideraciones destaca: la presencia de fallas geológicas, la posición relativa de la estratificación, los posibles tipos de pliegues (anticlinales y sinclinales), la posición del nivel freático dentro del macizo rocoso, esfuerzos sometidos a los cuales se encuentran las rocas del macizo rocoso (bufamientos o reventones) y las altas temperaturas y gases que se desarrollan al interior del túnel.

Durante los últimos años el impulso que ha tenido la infraestructura hidráulica en México, así como las obras subterráneas ha contribuido a un desarrollo muy importante del país. Por otra parte ha dado soluciones a las problemáticas hidráulicas originadas a causa de la geología y estratigrafía heterogénea de la Ciudad de México. A consecuencia de la geología y estratigrafía, a través del tiempo las inundaciones han sido un tema recurrente en la Ciudad de México, para mitigar dicha problemática se ha buscado una solución que no implique detener el crecimiento urbano en dicha metrópoli, ya que la zona lacustre sobre la

cual se asentó la Ciudad de México se ha estado reduciendo para dar lugar a una ciudad cada vez más grande y con un mayor número de habitantes. Como una alternativa de prevención se han construido obras hidráulicas de gran eficacia para drenar la cuenca, ya que al quedar cerrada hace 700,000 años la única manera de desalojar el agua de las lluvias era mediante la vía de evaporación.

Tanto en la antigüedad como en la época actual, el territorio en donde se asientan las civilizaciones origina muchos de los retos que deben enfrentar sus habitantes para alcanzar el desarrollo, a través de los años la Ciudad de México y el Estado de México debido a su hidrología han presentado una serie de problemas en cuanto a las inundaciones. Ante semejantes contingencias nuestros antepasados dieron muestra de sus conocimientos de ingeniería al desarrollar obras con el fin de evitar inundaciones, regular los niveles de agua en los lagos, controlar el drenaje en la cuenca, riego, navegación, transporte, abastecimiento de agua e incluso la guerra; principalmente construyeron diques, pasarelas-diques, ríos canalizados, canales, acueductos, acequias, puentes, muelles, estanques, pozas y chinampas. Dentro de las obras destaca el dique de Nezahualcóyotl (1450), Tajo de Tequisquiac (1945), Interceptor Poniente (1962), Tajo de Nochistongo (1963), Túnel Emisor Poniente (1964), Colector del Túnel de Tequisquiac (1973), Túnel Emisor Central (1975), Túnel Emisor Oriente (2008), Túnel Emisor Poniente II (2018).

El "Túnel Emisor Central" y el "Canal del Desagüe", solían ser los principales colectores de aguas residuales de la Ciudad de México en la década de los 70's, sin embargo a consecuencia del desarrollo demográfico que se presentó en dicha urbe y a la alta demanda por la extracción de aguas subterráneas optó por presentar asentamientos, lo cual con el paso del tiempo dio como resultado un hundimiento crucial y una serie de dificultades de carácter hidráulico. Dada la problemática que se menciona anteriormente, surge la necesidad de realizar un proyecto que sirva como alternativa al Túnel Emisor Central (T.E.C.) dicho proyecto resultó ser el Túnel Emisor Oriente, el cuál apoya al T.E.C. en épocas de mantenimiento y que permite mantener la capacidad de operación del sistema durante todo el año. Por otra parte en el norponiente se contaba con el Túnel Emisor Poniente (TEP). Sin embargo con el paso de los años, a casi cuatro décadas de la construcción TEP debido al incremento desordenado de asentamientos urbanos en la zona, la demanda rebasó su capacidad de desalojo, en condiciones de precipitaciones extraordinarias, cuya evidencia es su ruptura en septiembre de 2009. A consecuencia de ello se optó por ejecutar el proyecto Túnel Emisor Poniente II, cuyo objetivo principal fue el beneficiar a 2.13 millones de habitantes de los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán Izcalli y Atizapán de Zaragoza.

El Túnel Emisor Poniente II presenta gran relevancia debido a los retos geotécnicos a los que se enfrentó durante su planeación y construcción. Uno de ellos radica en el tipo de estratigrafía que poseen los municipios de Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán Izcalli y Tlalnepantla. En Atizapán de Zaragoza se presentan fenómenos de tipo geológico tales

como minas, agrietamientos e inestabilidad de suelos. Por otra parte en Cuautitlán Izcalli se presenta una subprovincia de lagos y volcanes de Anáhuac, así como un lomerío de tobas y un vaso lacustre con lomerío. En Tlalnepantla el principal uso de suelo es de uso habitacional, por lo que podemos percatarnos que fue una limitante para las excavaciones del TEP II.

El proyecto “Túnel Emisor Poniente II” se enmarca dentro del programa de desarrollo hídrico del año 2013, dicho programa resultó ser sumamente prometedor. Su éxito condujo a avances considerables en esta área, ya que aumentó la capacidad de drenaje de aguas residuales, redujo el riesgo de inundaciones y contribuyó a mitigar el problema de la subsidencia ya que con ello se logró disminuir la sobreexplotación de los mantos acuíferos. La propuesta de construcción del TEP-II como drenaje alternativo, además amplió la capacidad de desagüe del Valle de México en la zona norponiente, permitió realizar trabajos de mantenimiento necesarios para una adecuada operación del sistema. Pese a que la población en Ciudad de México y el área metropolitana continúa incrementando, adicionando más desarrollos habitacionales en el Norponiente del Valle de México, lo anterior ocasionó que el Gobierno Federal atacara los problemas hídricos de la Ciudad.

El TEP II es un proyecto único, con un trazo de 5,9 km (5,956.23 metros) que se desarrolla entre dos municipios del Estado de México (Atizapán de Zaragoza y Cuautitlán Izcalli), dicho proyecto se divide en 5 tramos, el túnel cuenta con una sección de 7 metros de diámetro interior revestido y una capacidad de desagüe de 112 metros cúbicos por segundo. Se encuentra flanqueado en sus extremos por las secciones de captación de los ríos San Javier y Xochimanga y el canal de descarga hacia el antiguo Túnel Emisor Poniente. El túnel posee un revestimiento primario formado por anillos de dovelas de 35 cm de espesor y un revestimiento secundario o definitivo de 25 cm de espesor que permite proteger el revestimiento primario de la corrosión producida por el agua y los gases que circulen por el túnel. Para su ejecución, se contó con un sistema de cimbra telescópica de 54 metros de longitud con el que se procedió a la colocación y fraguado del mismo. El hormigón empleado en el revestimiento fue complementado con fibras sintéticas. El rendimiento de ejecución fue de aproximadamente 22,5 metros lineales por día.

El TEP II es un proyecto que ha mejorado evidentemente la calidad de vida de la comunidad, generando un bienestar y entorno seguro para el ser humano. Con el proyecto se eliminaron los riesgos de inundación y desborde de los ríos circundantes. El proyecto brinda seguridad permitiendo bajar los niveles de los ríos Xochimanga y San Javier evitando su desborde en temporada de lluvias. El proyecto presentó una serie de retos para la ingeniería geotécnica mexicana, es por ello que se cataloga como una de las obras de mayor importancia en el país.

ANEXOS.

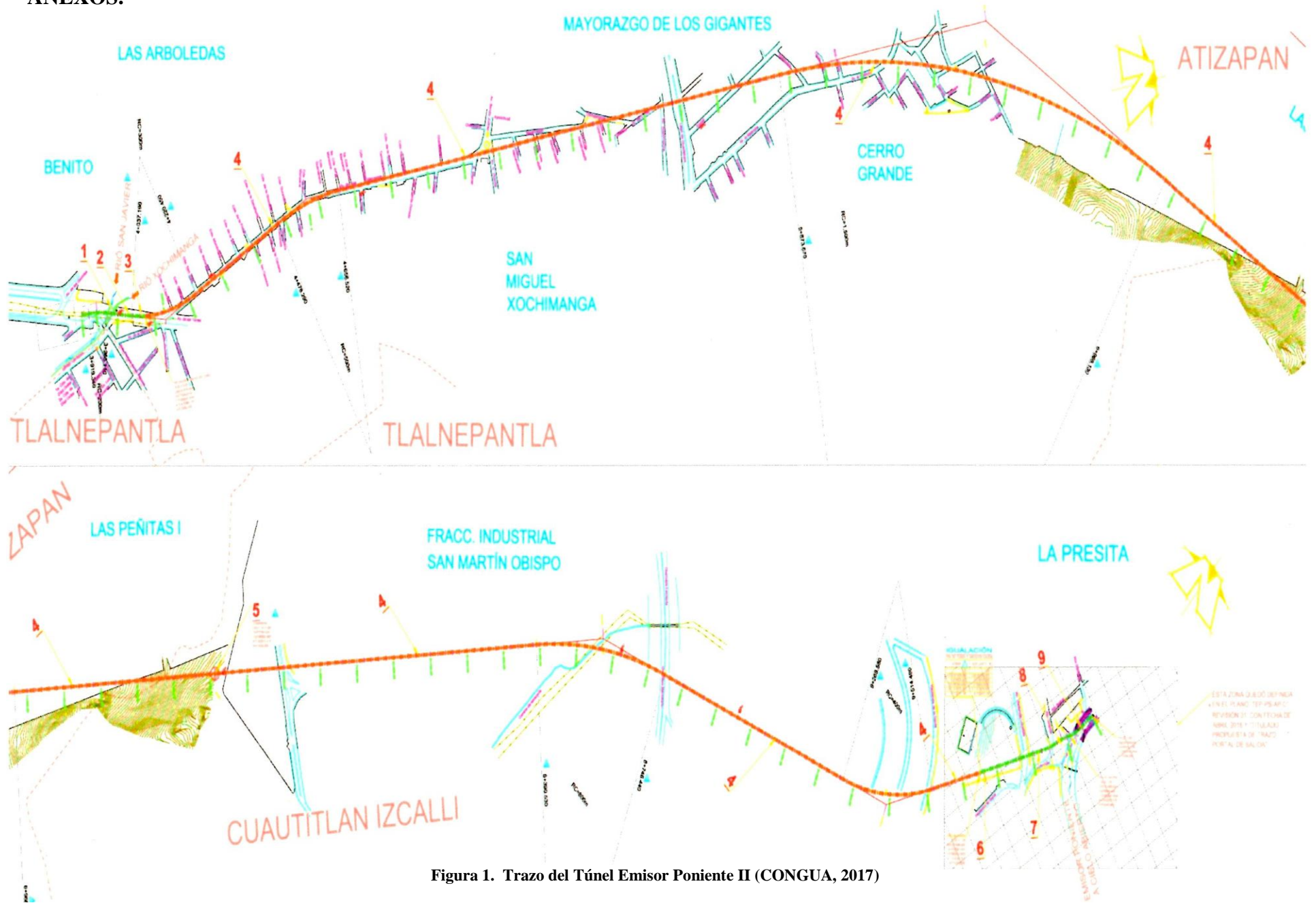


Figura 1. Trazo del Túnel Emisor Poniente II (CONGUA, 2017)

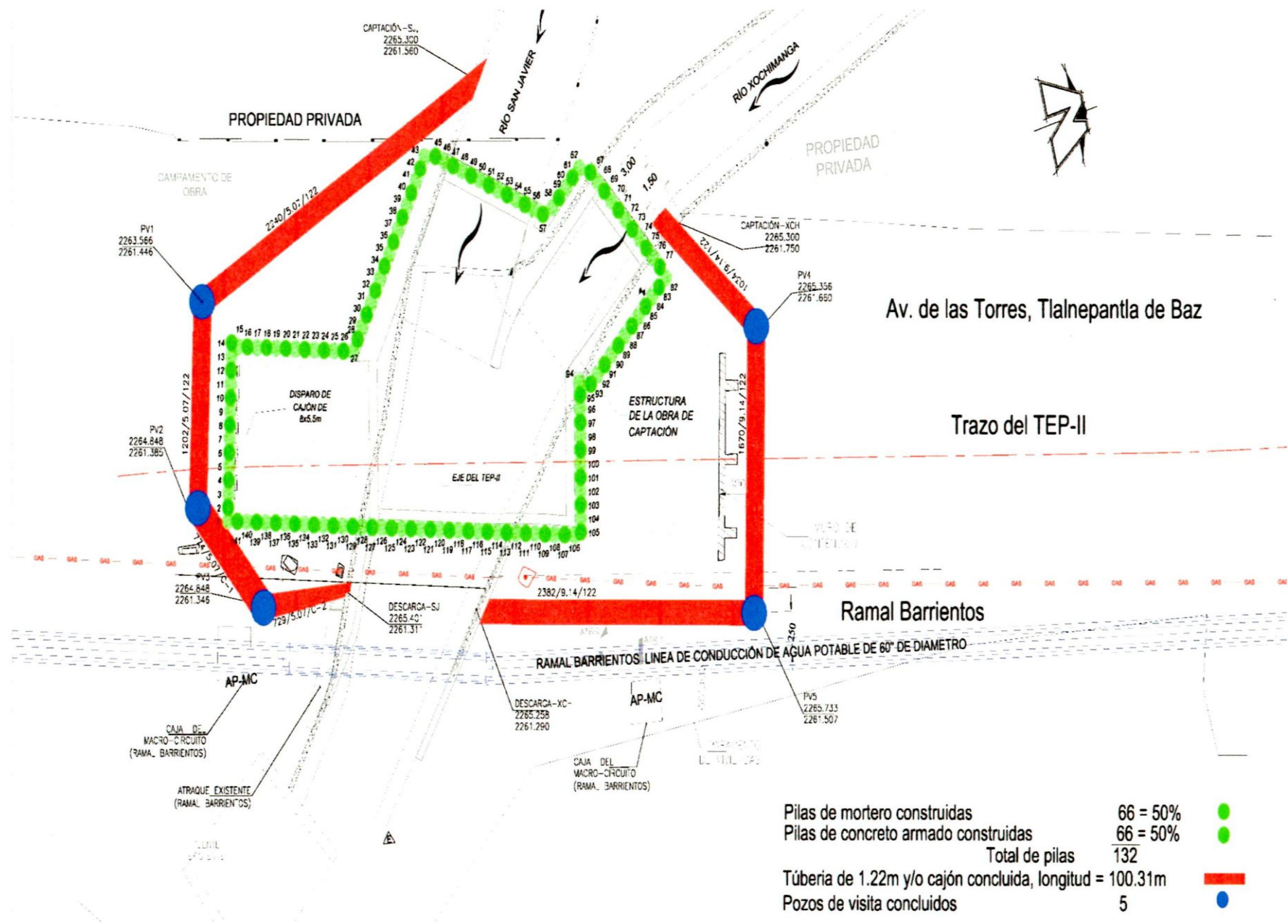


Figura 2. Estructura de captación de los ríos San Javier y Xochimanga (CONGUA, 2017)

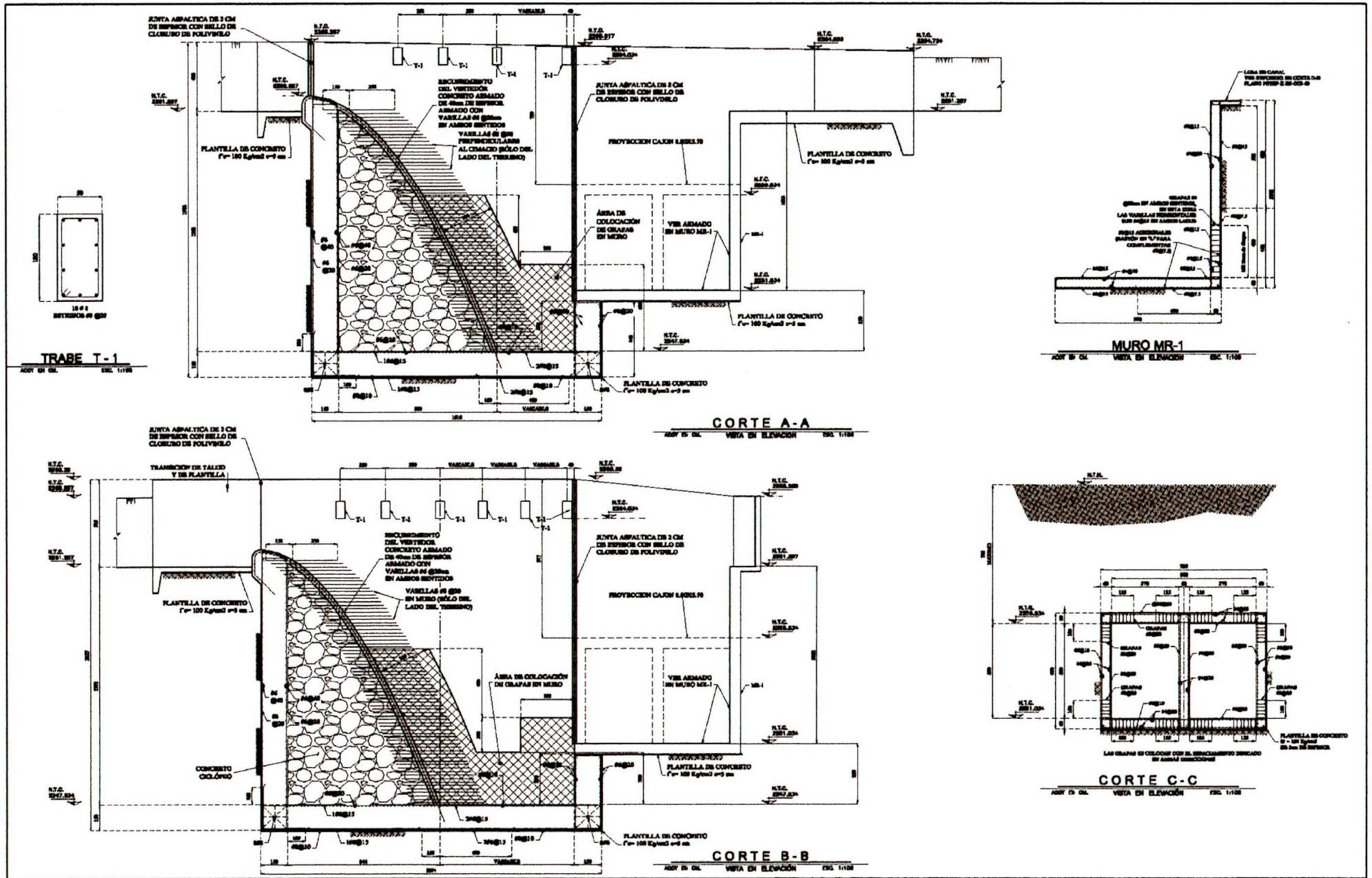
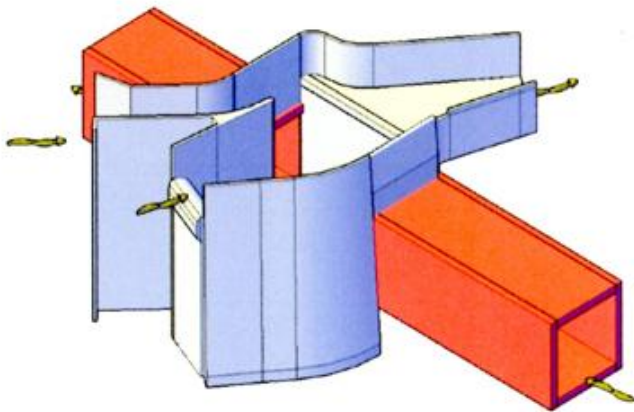
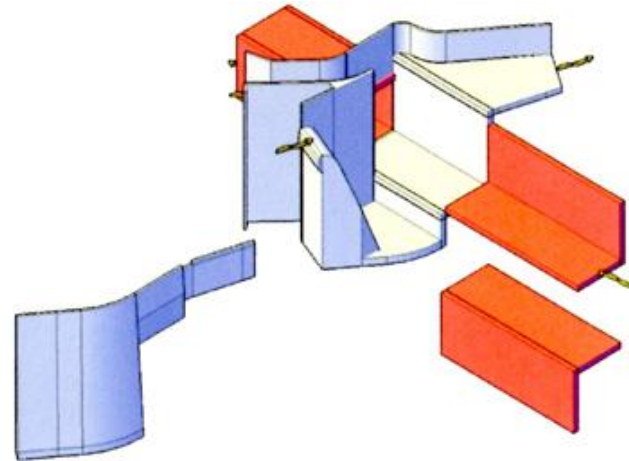


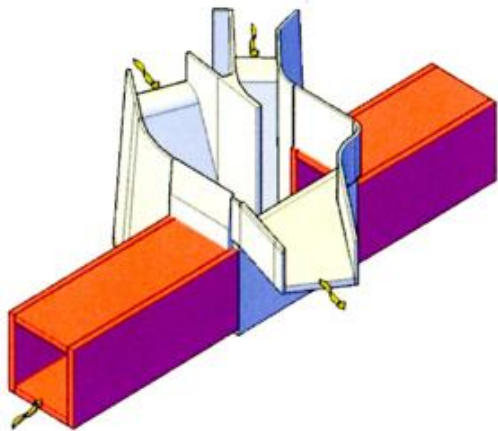
Figura 3. Detalle de estructura de captación de los ríos San Javier y Xochimanga (CONGUA, 2017)



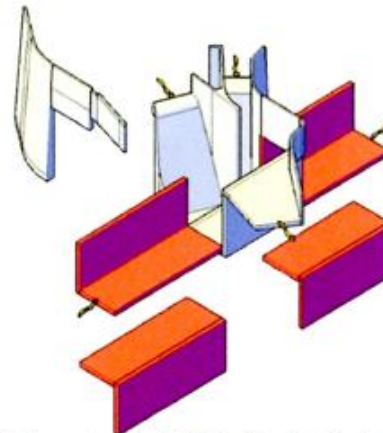
Vista de la captación del Río San Javier hacia aguas abajo desde la margen derecha



Vista de la captación del Río San Javier hacia aguas abajo desde la margen derecha (Desarmado)



Vista de la captación del Río San Javier hacia aguas arriba desde la margen derecha



Vista de la captación del Río San Javier hacia aguas arriba desde la margen derecha (desarmado)

Figura 4. Captación de los ríos San Javier y Xochimanga (CONGUA, 2017)

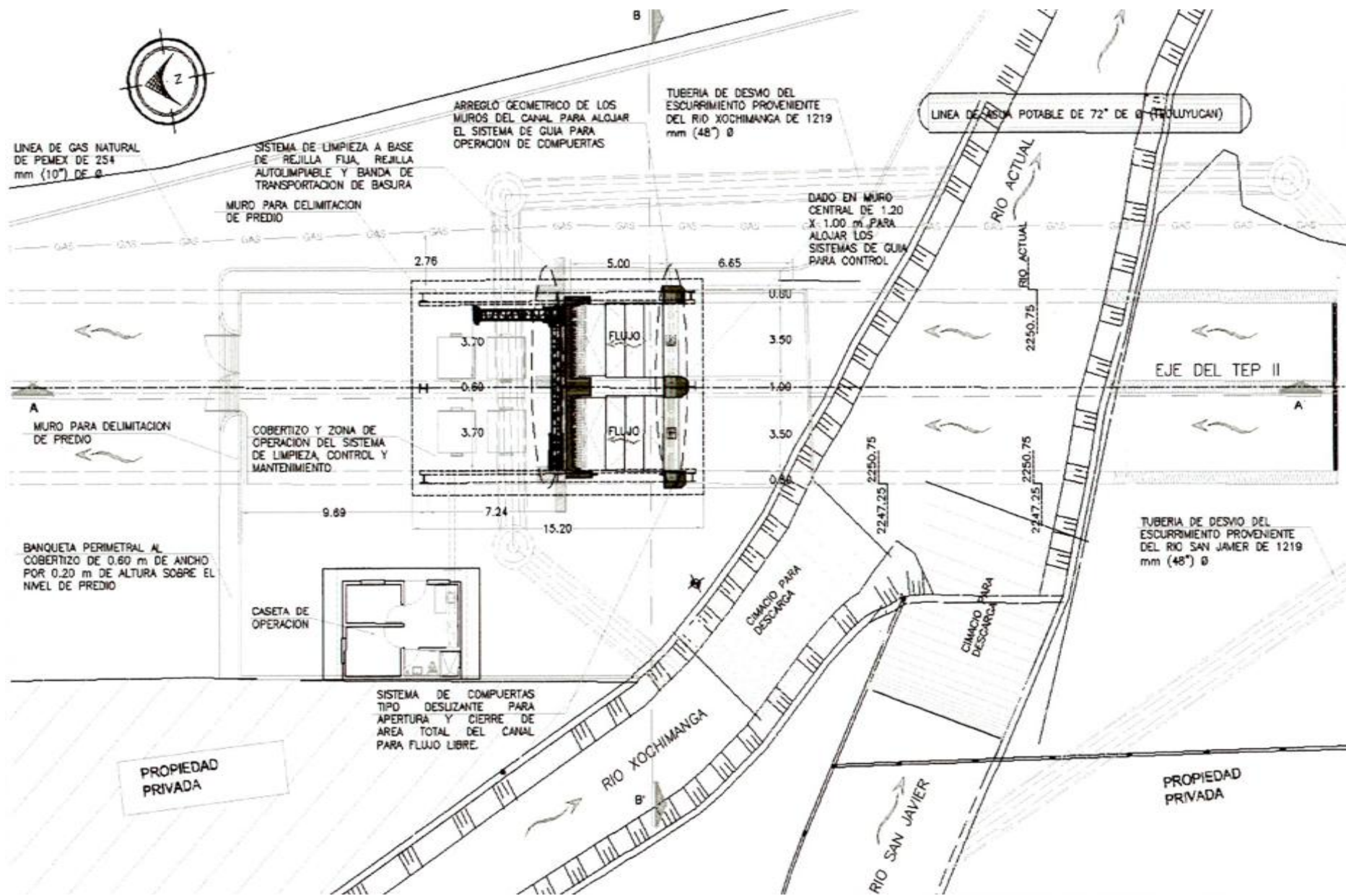


Figura 5. Cajón de conducción de 8.00m x 5.50m (CONGUA, 2017)

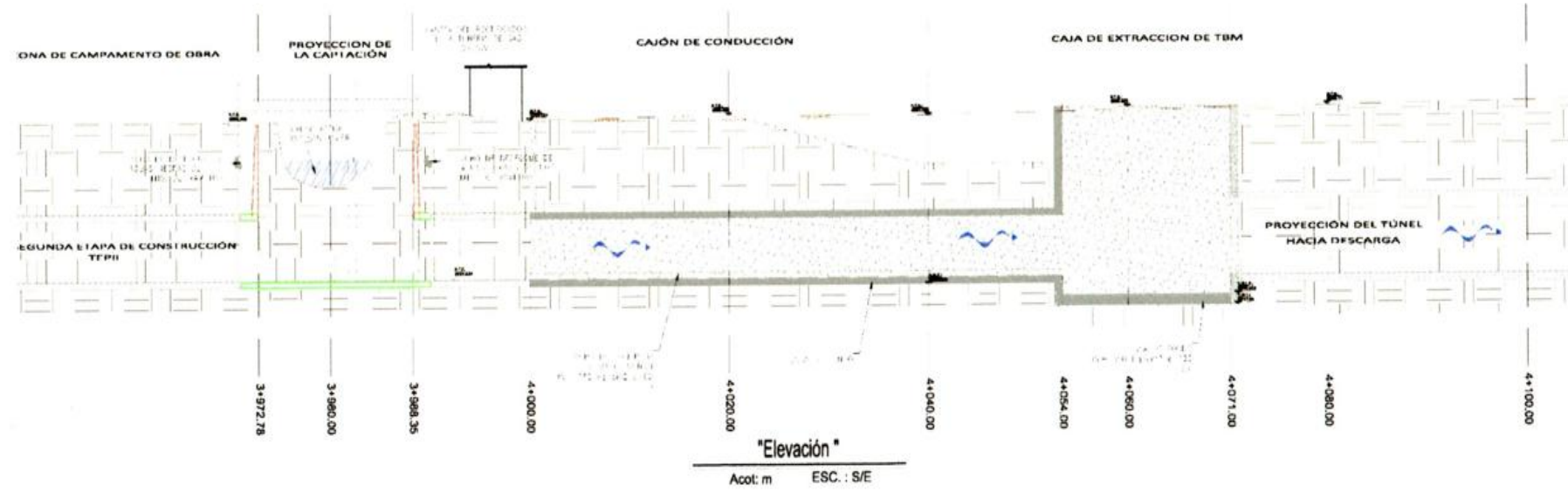
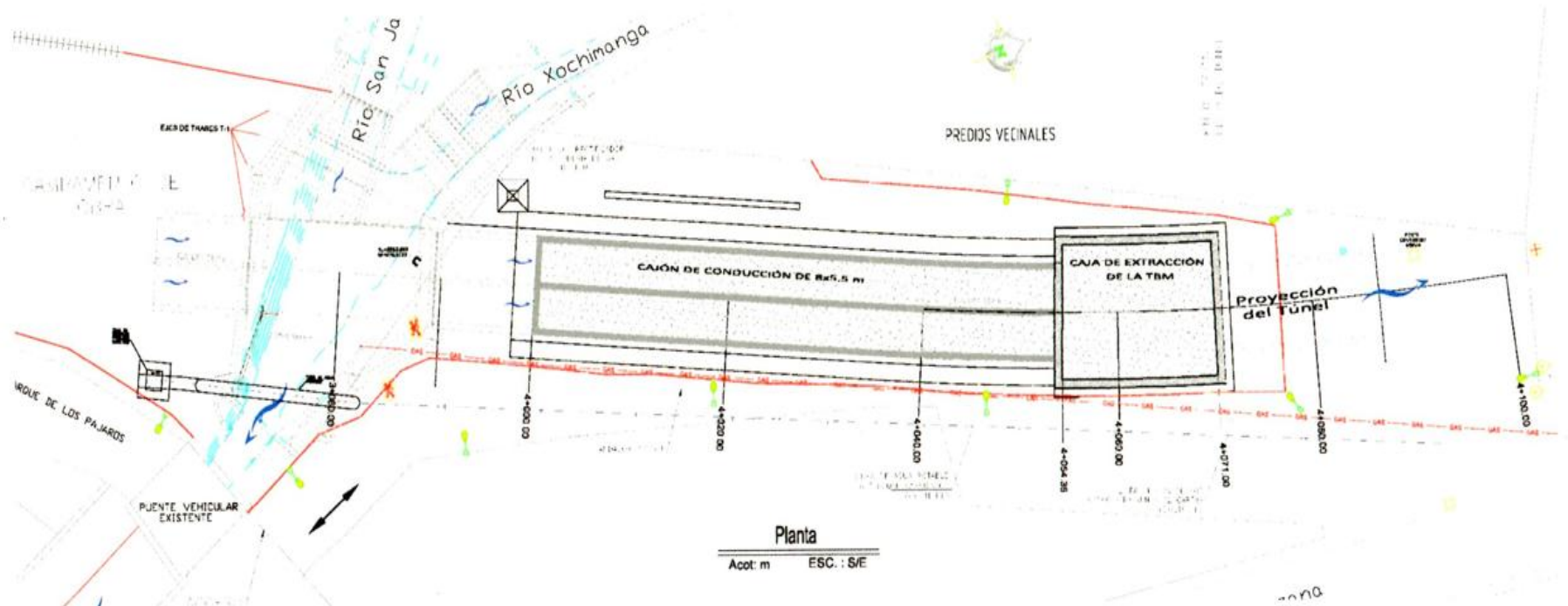


Figura 6. Cajón de conducción de 8.00m x 5.5 y zona para caja de transición (CONAGUA, 2017)

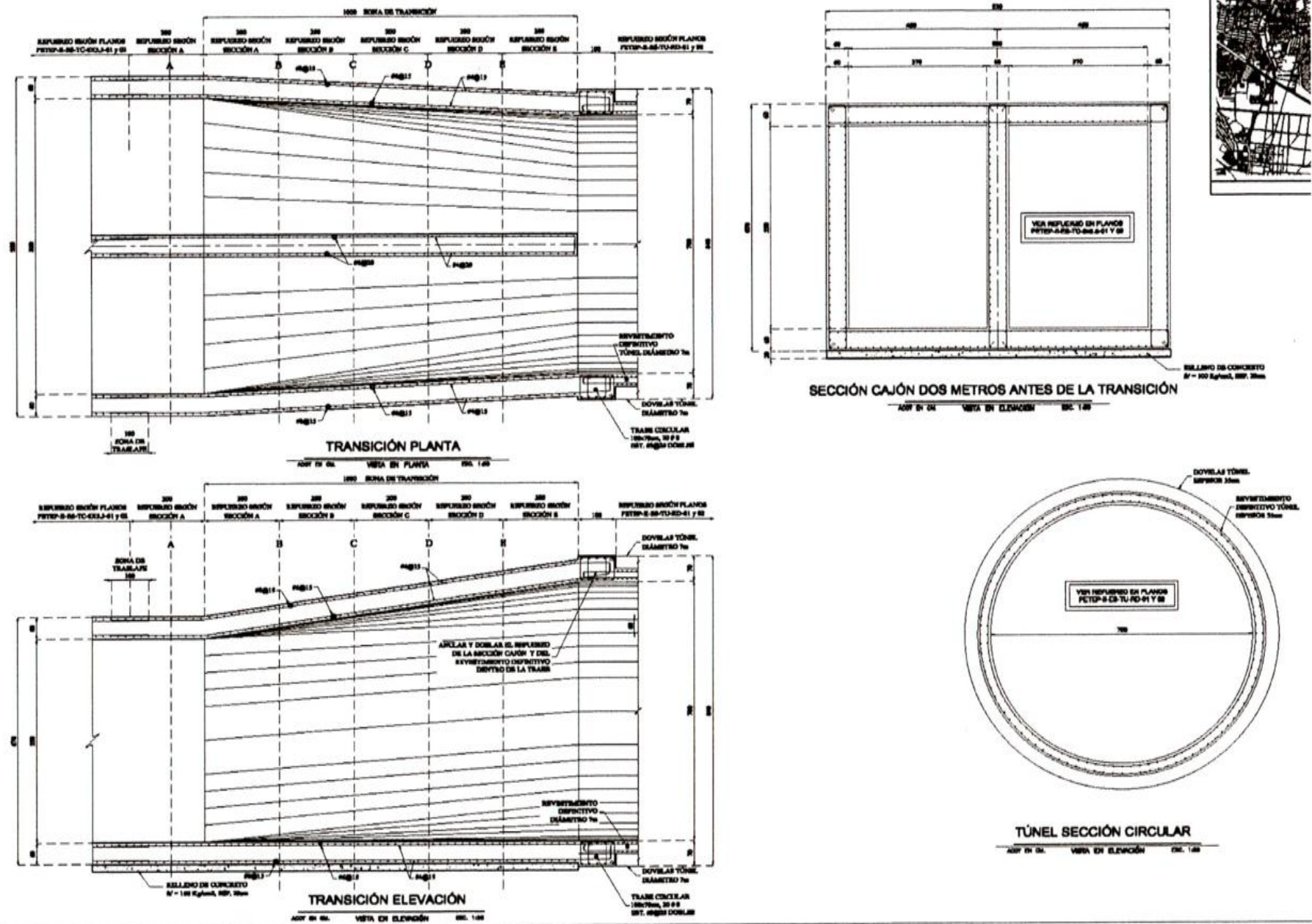


Figura 7. Caja de transición 3 (CONAGUA, 2017)

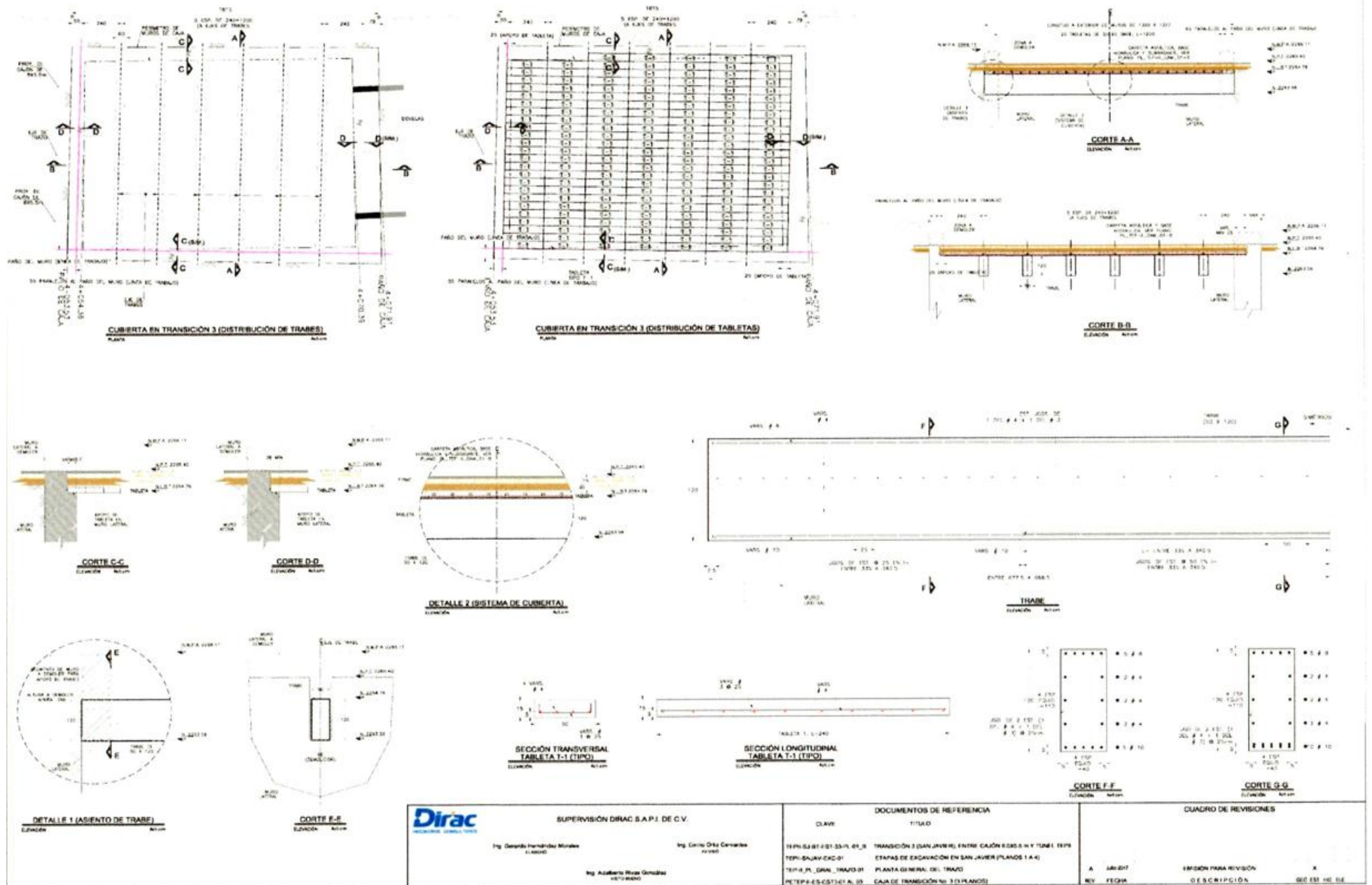


Figura 8. Caja de transición 3. Losa tapa a nivel de calle (CONAGUA, 2017)

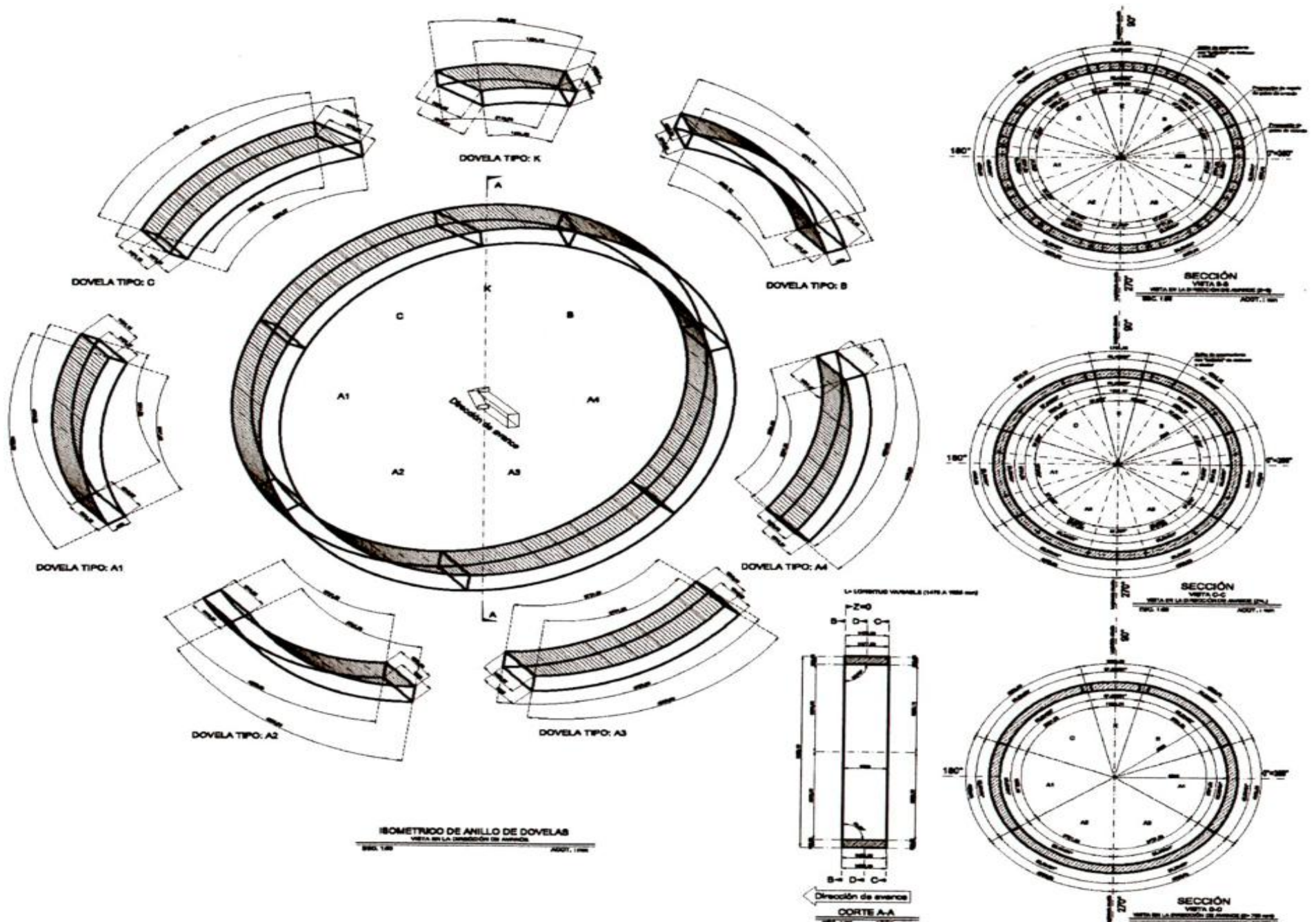


Figura 9. Túnel de 7.2m de diámetro terminado (CONAGUA, 2017)

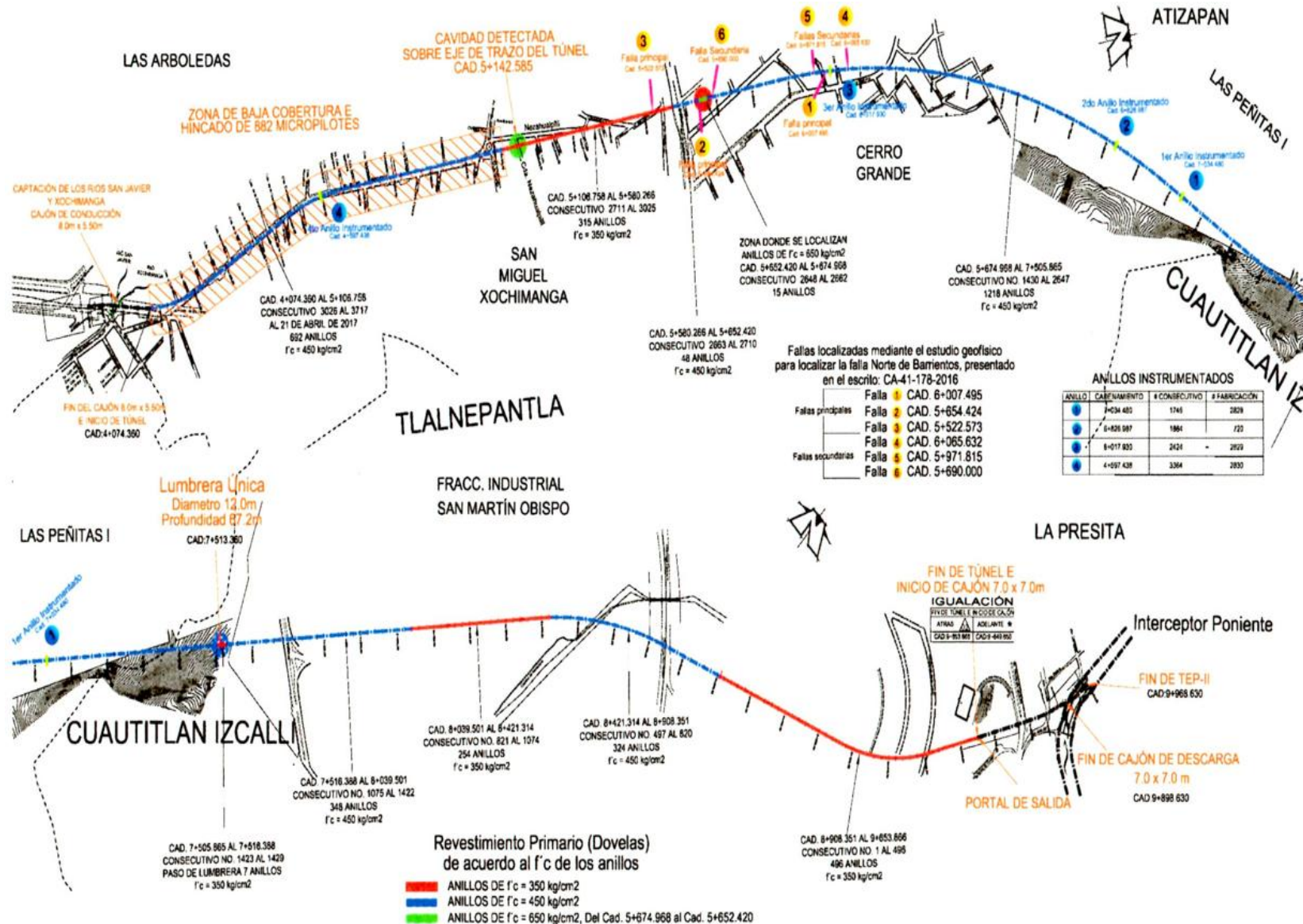


Figura 10. Revestimiento primario TEP II (GONAGUA, 2017)

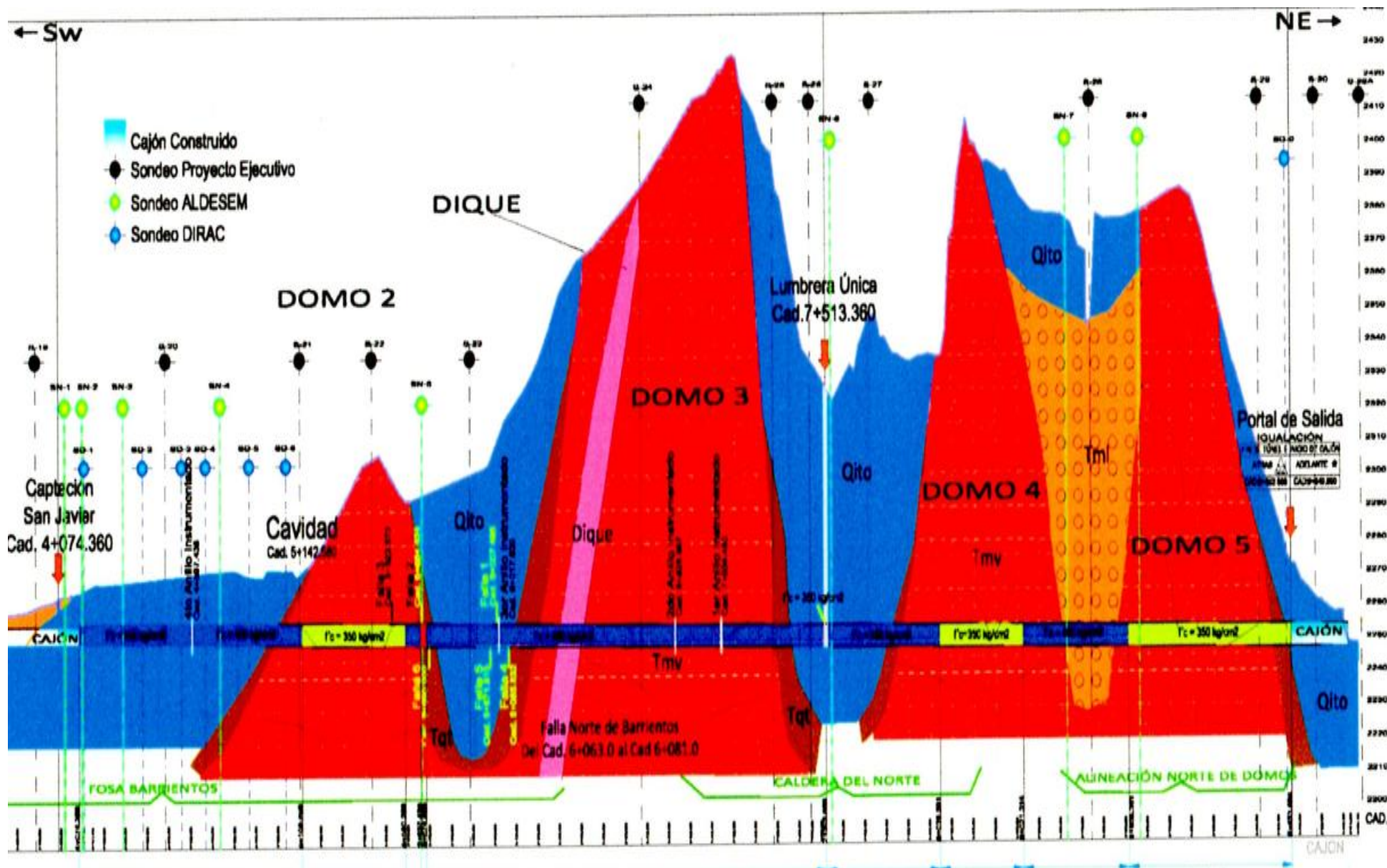


Figura 11. Perfil Geológico TEP II (GONAGUA, 2017)

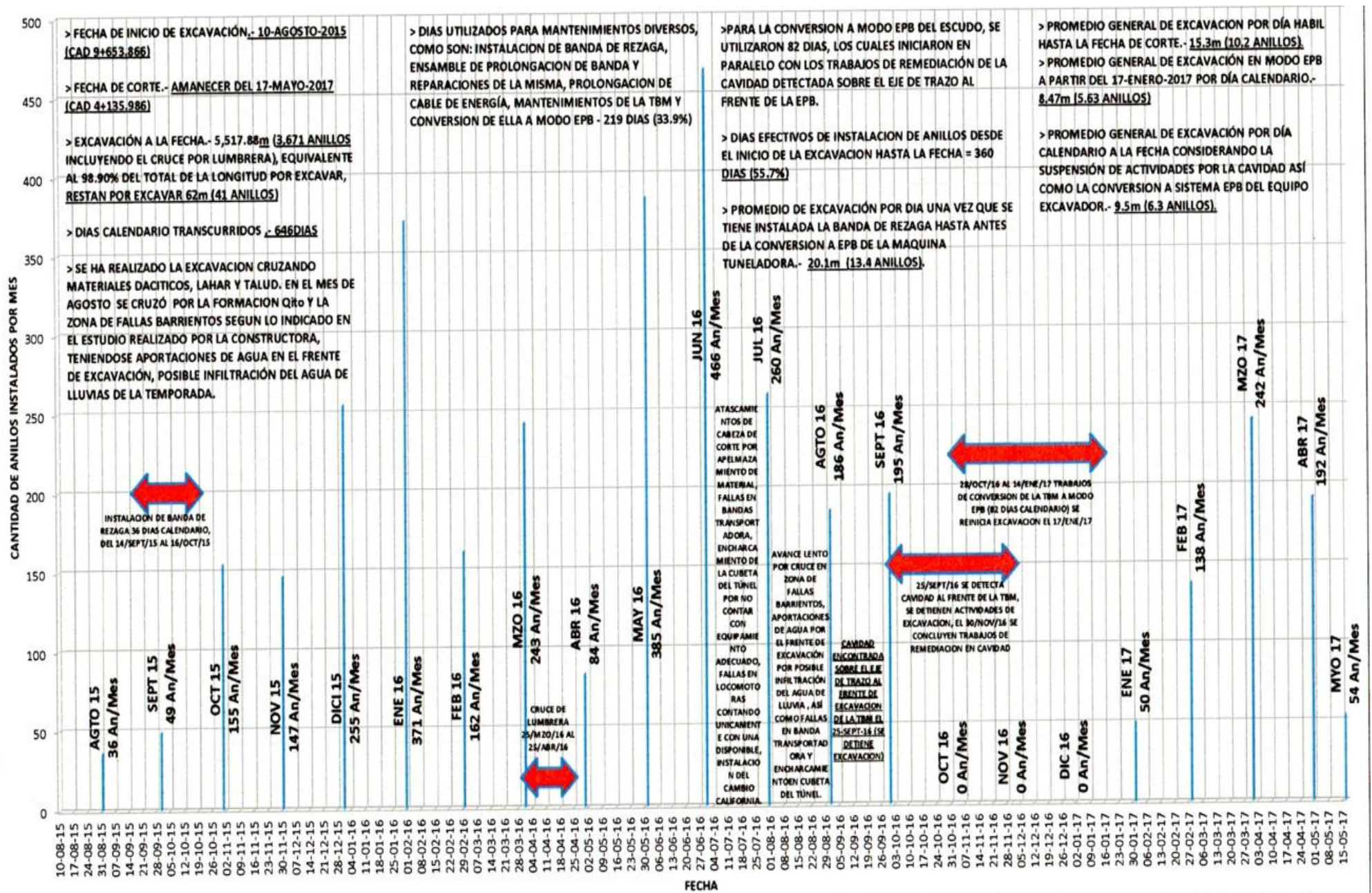


Figura 12. Rendimiento promedio de excavación mensual durante la excavación del TEP II (GONAGUA, 2017)

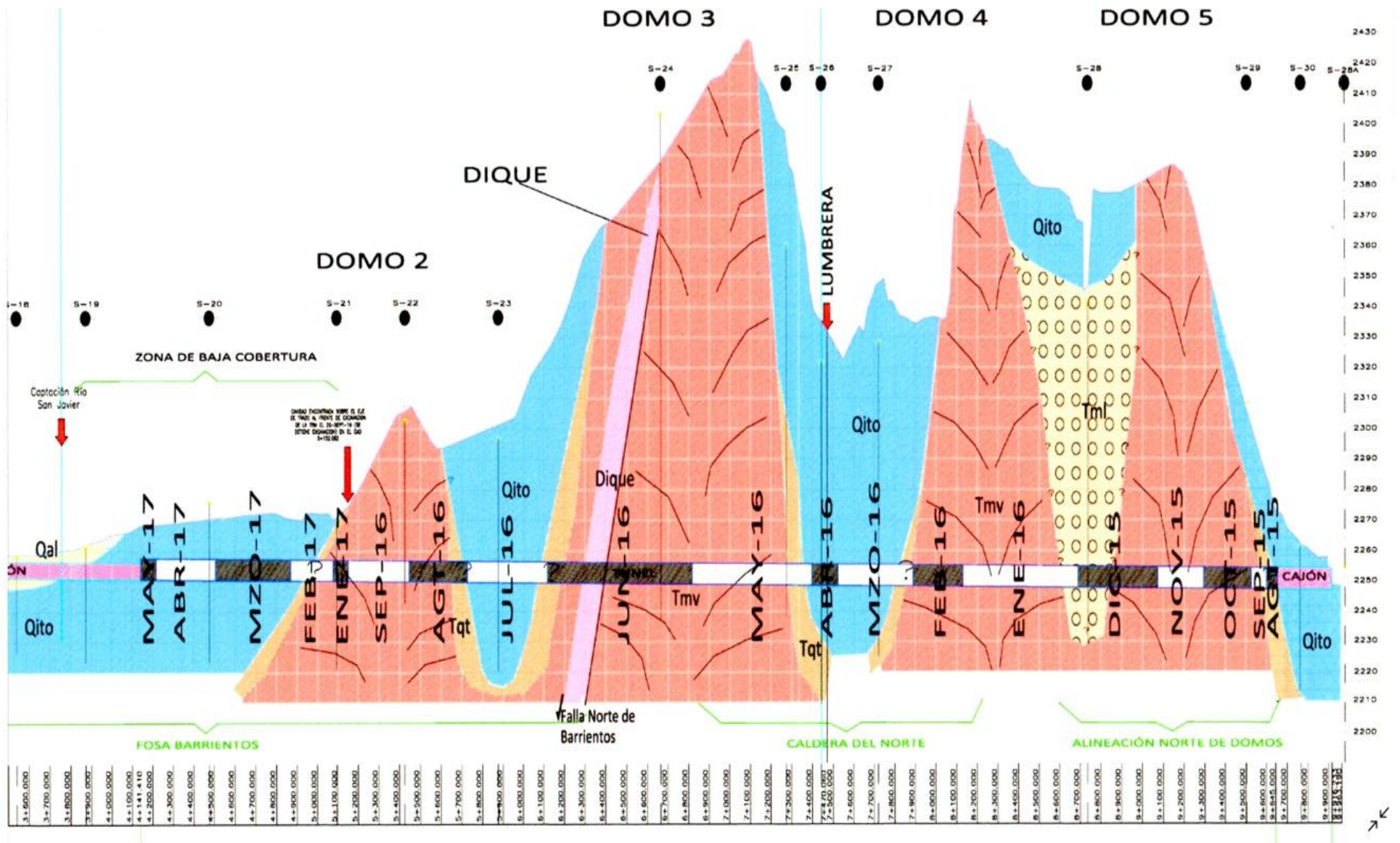


Figura 13. Rendimiento promedio de excavación mensual durante la excavación del TEP II (GONAGUA, 2017)

TRABAJOS REALIZADOS

ALCANCES:

- HINCADO DE 890 MICROPILOTES DE $8 \frac{5}{8}$ " x 25 MTS. DE PROFUNDIDAD PROMEDIO.
- DEL CADENAMIENTO 5+070 AL 4+130.
- CONSTRUCCIÓN DE TRABES DE LIGA DE MICROPILOTES.

AVANCE: 100%

882 MICROPILOTES HINCADOS
882 MICROPILOTES INYECTADOS.

- CONSTRUCCIÓN DE 882 M.L. DE TRABE DE LIGA DE MICROPILOTES CON SECCION DE 0.75 MTS. x 0.75 MTS. CON CONCRETO $f_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$.

AVANCE DE TBM Y MICROPILOTES

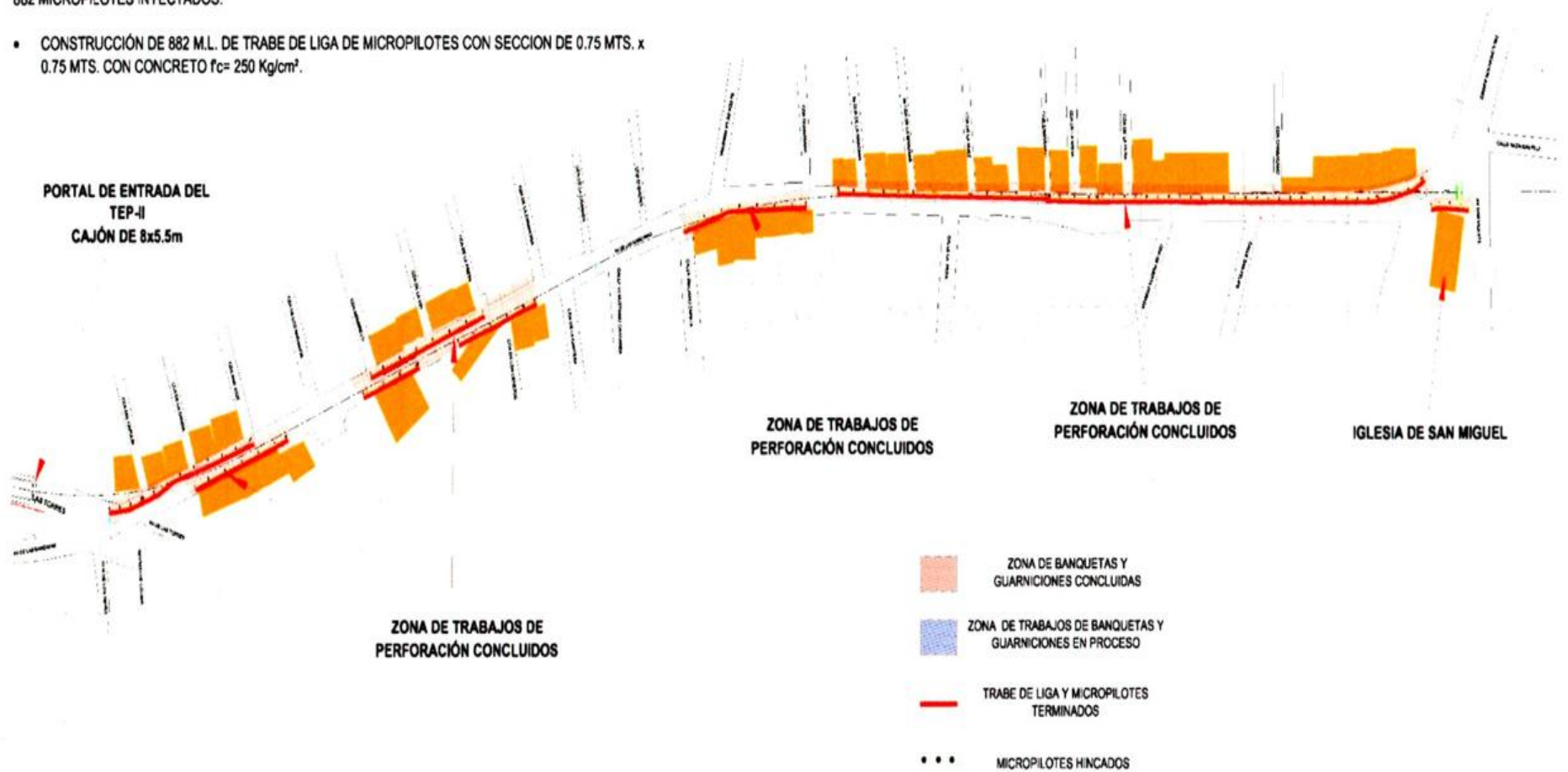


Figura 14. Trabajo de hincado de micropilotes en Av de la Manzana para protección de inmuebles e infraestructura (GONAGUA, 2017)

REFERENCIAS.

- Aguilar, Rangel, Mooser. (2011). “Geotencia del Túnel Emisor Oriente”. Ingenieros Civiles Asociados, S.A de C. V; ICA , Universidad Autónoma Metropolitana, UAM. Jornada Técnica Túneles en México, Barcelona, España.
- Burton, (2013). “The volcanic calderas of Mexico’s Volcanic Axis”. Recuperado de: geo-mexico.com.
- Charlotte. (2021). “Going Down. Doomed Mexico City now ‘unstoppably sinking’ with some parts now falling half a METRE a year”. The Sun Journal. London England.
- Chávez Aguirre. (2008). “Atlas Multidisciplinario Y De Riesgo Geotécnico de la Zona Conurbada al Norponiente Del Valle De México”. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Acatlán. México. Pp (24).
- Chávez Aguirre. (2006). “Geotecnia”. Comisión Federal de Electricidad: Gerencia de Estudios en Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Acatlán. México. Pp (127-140).
- Chengyu, *et.al* (2020). “Shield Tunneling under Railway Station Throats in Soft Soil Areas: A Case Study”. Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2020, Tongji University, Shanghai China.
- Comunicación Sika (2016) “San Gotardo: El túnel ferroviario más largo del mundo ya está en funcionamiento”. Nota de Prensa. Alcobendas, Madrid. España. Pp (1-3). PDF Disponible en: <https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/bf9d6fbc-c72d-3161-8cc8-3d8fdb82bd6e/Nota%20T%C3%BAnel%20Gotardo%20larga.pdf>.
- Conagua. (2020). “Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Cuautitlán-Pachuca (1508), Estado De México”. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México. Pp(2-5). PDF Disponible en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1508.pdf
- Conagua (2016). “Proyectos Estratégicos: Agua Potable, Drenaje, Saneamiento”. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Gerencia de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. México Pp(25-28).
- De la Llata. (2011). “Síntesis de la Geología de México”. UNAM, Facultad de Ingeniería. Jornada Técnica: Túneles en México. Barcelona España.

- De la Parra. (2016). “Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México, clave 0901, en la Ciudad de México, Región Hidrológico-Administrativa Aguas del Valle de México. Diario Oficial de la Federación. México.
- E.T.S.E.C.C.P.B.-U.P.C. (Sin fecha) “Historia de los túneles y su evolución histórica”. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. UPC (Universidad Politécnica de Cataluña).
- Helios MX (2015). “El Tajo de Nochistongo”. *Ingeniería Civil CICM*. Volumen 559. Pp 45-46.
- Montoya (1999) “Del desagüe del Valle de México al drenaje profundo”. *México en el tiempo*. Volumen No 30.
- Muñoz, (2016). “Túnel Emisor Oriente (TEO): Procedimiento constructivo de una galería de montaje para ensamble de una máquinatuneladora. UNAM. México. Pp 15.
- Rivas Gonzáles (2017). “Obras Subterráneas. Hallazgo de cavidad durante la construcción del Túnel Emisor Poniente II”. Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, Ac (AMITOS). Pp (7-18)
- Ruiz, Gonzáles (2000). “Geología Aplicada a la Ingeniería Civil”. Limusa. Noriega Editores, Ciudad de México. Pp (189-200)
- Santoyo (Sin fecha). “Historia y Actualidad del Hundimiento Regional de la ciudad de México”.
- SIKKA (2016). “San Gotardo: El túnel ferroviario más largo del mundo ya está en funcionamiento”. Sika at work. Suiza.
- SCT, Dirección General de Servicios Técnicos (2016). “Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera”. Capítulo 7: Métodos de Excavación. México. Pp(1-6).
- Stronach, Jia, Uribe, Richter. (2005). “The case of Mexico DF: A sinking city”. The Department of Geography - Environment and Sustainability Program Vancouver Campus. Canadá.
PDF Disponible en : <http://edwardwimberley.com/courses/EnviroPol/sinkingcity.pdf>

- Tortajada & Castelan. (2006). “Water Management in Mexico City Metropolitan Area”. *International Journal of Water Resources Development*, 22(2), Pp 353-376. doi:10.1080/07900620600671367
- Tortajada , C. (2008). “Challenges and realities of water management of megacities: the case of Mexico City Metropolitan Area. *Journal of International Affairs*”. 61(2): 147–166. <https://www.questia.com/library/journal/1G1-179134867/challenges-and-realities-of-water-management-of-megacities>.

Páginas Web Consultadas.

- <https://www.geologia.unam.mx/contenido/carta-geologica-mexicana>
- <http://www.travel-zone-greece.com.ar/blog/tunel-eupalinos-la-antigua-maravilla-samos-vuelve-abrirse-al-publico/>
- <https://www.panoramagriego.gr/secciones/innovaci%C3%B3n/2000-el-t%C3%BAnel-de-eupalino-una-obra-maestra-de-la-antigua-grecia>
- <https://www.imago-images.de/fotos-bilder/malpas-tunnel>
- https://www.michigan.gov/som/0,4669,7-192-29938_68915-54627--,00.html
- <http://lagaleriadeideas.blogspot.com/2015/09/el-tunel-hoosac-la-mina-sangrienta.html>
- <https://geo-mexico.com/?p=9437>
- <https://www.thesun.co.uk/tech/14881201/mexico-city-sinking-unstoppable/>
- <https://www.teamgroup.co.th/en/portfolio/construction-project-of-a-drainage-tunnel-from-nong-bon-swamp-to-the-chao-phraya-river/>
- <https://www.mexicodesconocido.com.mx/del-desague-del-valle-de-mexico-al-drenaje-profundo.html>
- https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/ic559_ok/48

- https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5453759#:~:text=El%20acu%C3%ADfero%20Zona%20Metropolitana%20de%20la%20Cd.%20de,y%20comprende%20una%20superficie%20de%202%2C103%20kil%C3%B3metros%20cuadrados
- https://www.roadonmap.com/mx/donde-est%C3%A1/Rio_San_Javier-Tlalnepantla_de_Baz,estado_de_mexico
- https://www.roadonmap.com/mx/dondeest%C3%A1/Atizapan_de_Zaragoza,estado_de_mexico
- https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152418/Estrat_gicos_-_octubre_-_2016.pdf