



Parte II · La línea de construcción del TEO

9

Descripción y ubicación del proyecto

Un túnel de 62 km para que el agua salga del valle por gravedad

El Túnel Emisor Oriente (TEO) corre desde la Ciudad de México a Atotonilco de Tula, Hidalgo, a entre 25 y 150 m de profundidad y desaloja hasta 150 m³s de aguas pluviales y residuales sin una sola bomba en su recorrido principal. Se construyó porque el drenaje del Valle perdía capacidad cada año y dependía de un solo conducto profundo.

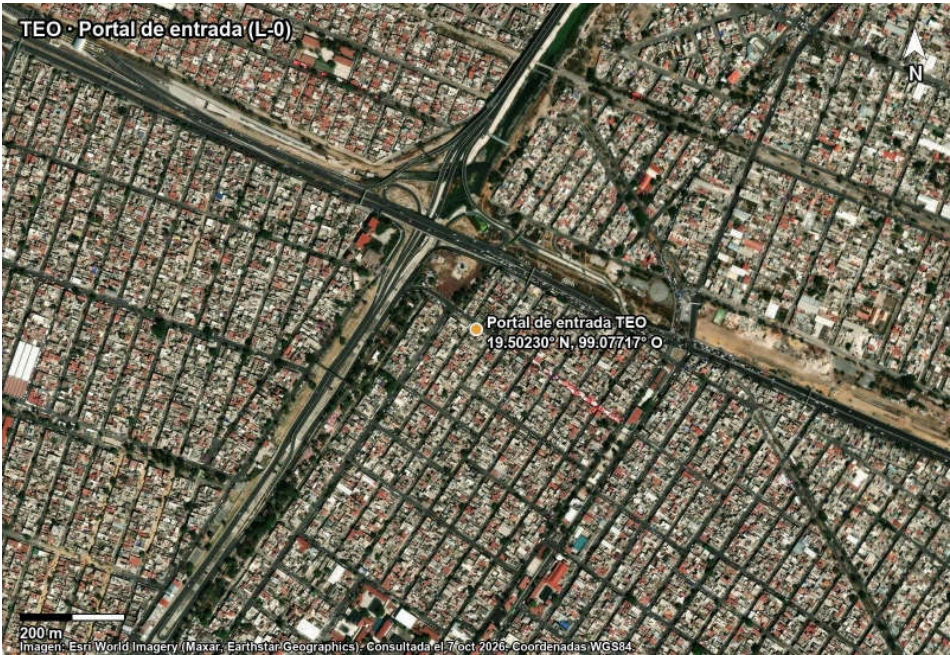


Figura 9.21. Portal de entrada (L-0) en zona urbana junto a Periférico y Gran Canal

01

Ficha técnica del TEO

TABLA 9.1. FICHA TÉCNICA DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE.

CONCEPTO	DATO
Tipo de obra	Drenaje subterráneo (túnel) por gravedad
Dueño	Comisión Nacional del Agua (Conagua), con recursos federales y del Fideicomiso 1928
Contratista	Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea (COMISSA), en participación conjunta con Ingenieros Civiles Asociados, Carso Infraestructura y Construcción, Construcciones y Trituraciones, Constructora Estrella y Lombardo Construcciones; contrato 08-008 por adjudicación directa
Supervisión	Contrato 08-011 con Dirac y asociadas; 651.4 millones de pesos originales y 1,737.9 ejercidos
Longitud	62.4 km, en seis tramos
Diámetro interior	7.0 m

CONCEPTO	DATO
Gasto de diseño	150 m ³ /s
Pendiente	0.0016 (1.6 m/km)
Profundidad	25 a 150 m
Lumbreras	25: 15 de 12 m, 9 de 16 m y 1 de 18 m de diámetro (clasificación de la ASF; la tabla lumbrera por lumbrera del capítulo 11 da 18 de 12 m y 7 de 16 m)
Portal de entrada	L-0, límite Ciudad de México y Estado de México (19.50230° N, 99.07717° O)
Portal de salida	Río El Salto, Atotonilco de Tula, Hidalgo (19.94819° N, 99.29565° O)
Tuneladoras	Seis EPB: tres Herrenknecht de 8.7 m y tres Robbins de 8.93 m
Revestimiento	Primario de anillos de dovelas prefabricadas de 1.50 m de ancho; definitivo de concreto reforzado de al menos 0.35 m, $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$
Cantidades de obra	4.7 millones de m ³ excavados, 1.3 millones de m ³ de concreto y 142,226 t de acero
Costo del contrato de obra	9,595.6 millones de pesos originales; 20,702.8 millones finales
Costo total estimado del proyecto	46,263.9 millones de pesos
Plazo del contrato de obra	1,402 días originales; 3,911 finales
Fechas clave	Contrato, 14 de noviembre de 2008; tramo 1 (10.1 km) en operación, 2013; fin de la excavación, 23 de mayo de 2019; fin de la construcción, 4 de diciembre de 2019; inauguración, 23 de diciembre de 2019
Población beneficiada	Casi 21.2 millones de habitantes del área metropolitana

El costo del contrato de obra y el costo total del proyecto miden alcances distintos y no deben compararse entre sí (capítulo 20).



Figura 9.1. Trazo del Túnel Emisor Oriente, de la L-0 al portal de salida

02

Descripción del proyecto

QUÉ ES EL TEO Y PARA QUÉ SIRVE

Este capítulo presenta el TEO como obra: qué es, para qué se hizo, de qué se compone y dónde está. Qué es una línea de conducción y cómo se clasifica se explica en los capítulos 1 y 2, y la topografía y los sistemas de coordenadas, en el 4; aquí esos conceptos solo se aplican al TEO.

El Túnel Emisor Oriente es un drenaje subterráneo por gravedad, de 62.4 km de longitud y 7.0 m de diámetro interior, que lleva el agua de la lumbrera L-0, en el límite entre la Ciudad de México y el Estado de México, al río El Salto, en Atotonilco de Tula, Hidalgo. Sirve para desalojar del Valle de México hasta 150 m³/s de aguas pluviales y residuales y beneficia a casi 21.2 millones de habitantes del área metropolitana. Se hizo para dar al sistema un segundo emisor profundo: el drenaje del Valle perdía capacidad cada año por

el hundimiento del terreno y dependía de un solo conducto, el Emisor Central, que además no podía cerrarse para su mantenimiento. Los argumentos completos están en el capítulo 10. La publicación conmemorativa de ICA, integrante del consorcio constructor, resume la obra con las mismas cifras (siete metros de diámetro, 62.4 km y 150 m³/s) y afirma que duplica la capacidad de desfogue del sistema; es una descripción corporativa y se toma solo como coincidencia con las fuentes oficiales.

Hitos del TEO, 2007-2019

En rojo, el contrato de obra y sus convenios; en azul, la puesta en operación

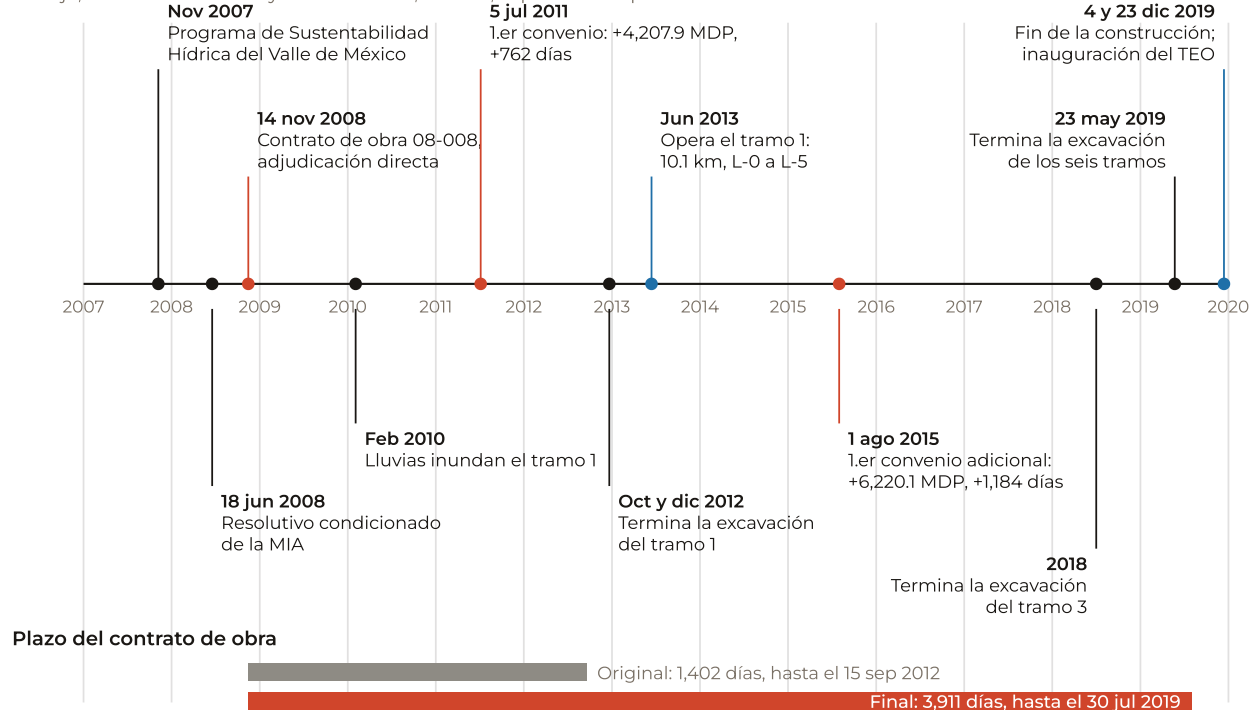


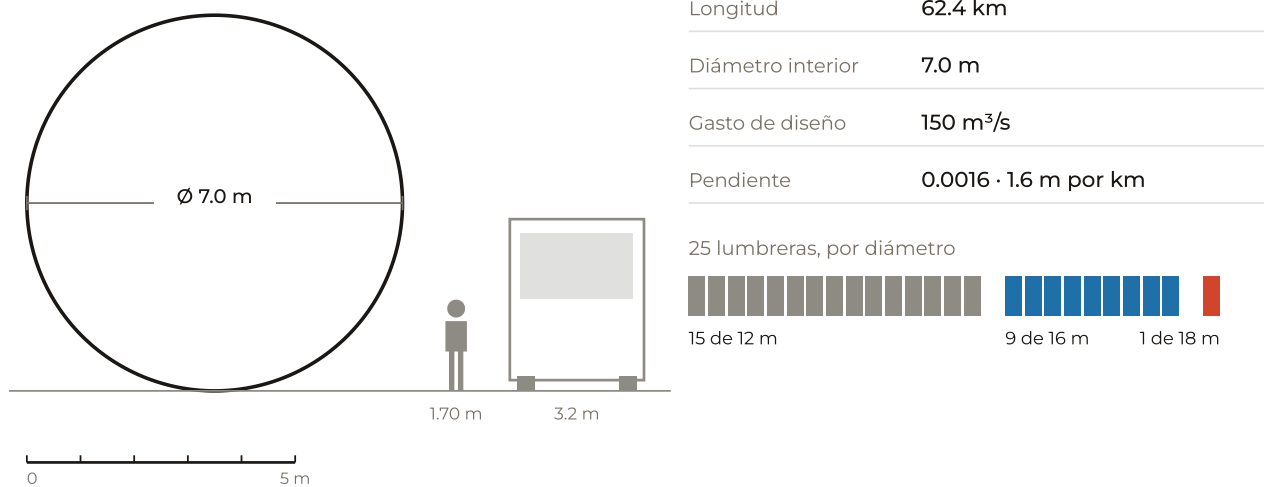
Figura 9.2. Hitos del TEO de 2007 a 2019 y plazo del contrato de obra

DATOS GENERALES

El proyecto arrancó a finales de 2008. Los primeros 10.1 km, de la L-0 a la L-5, entraron en operación en 2013. La excavación terminó el 23 de mayo de 2019, la construcción quedó concluida el 4 de diciembre de 2019 y los 52.3 km restantes se pusieron en servicio el 23 de diciembre de 2019. La ficha técnica del inicio reúne las cifras generales; las diferencias entre documentos se explican en el recuadro de la sección 1.3.

El túnel a escala

sección interior de 7.0 m frente a una persona y el frente de un autobús



Persona y frente de autobús como referencia de tamaño; misma escala que la sección.

Figura 9.3. El túnel de 7.0 m contra una persona y un autobús

La pendiente de 0.0016 sale de dividir la caída entre la L-0 y el portal entre la longitud del túnel:

$$S = \frac{\Delta z}{L}$$

donde S es la pendiente (m/m), Δz es la diferencia de cota de la plantilla (m) y L es la longitud (m). Con las cotas en la L-0 y 2,106 msnm en el portal, a lo largo de 62,000 m:

$$S = \frac{2\,203 - 2\,106}{62\,000} = \frac{97}{62\,000} = 0.00156 \approx 0.0016$$

Son 1.56 m por kilómetro, igual a la pendiente oficial.

COMPONENTES

La obra se compone del túnel, dividido en seis tramos que se excavaron al mismo tiempo; de 25 lumbreras, que sirvieron para armar las tuneladoras y dan acceso al túnel; del portal de entrada en la L-0, con sus compuertas de regulación; de la planta de bombeo El Caracol, que mantiene el nivel del agua en el tramo inicial, y de la obra de descarga en el río El Salto.

La obra se partió en seis tramos independientes, de modo que seis cuadrillas avanzaran al mismo tiempo. El anteproyecto de 2008 preveía cinco etapas con cinco frentes simultáneos; la obra final quedó en seis tramos. Sumados, los tramos dan 62,417 m (cálculo propio), que coincide con los 62.4 km de la ASF.

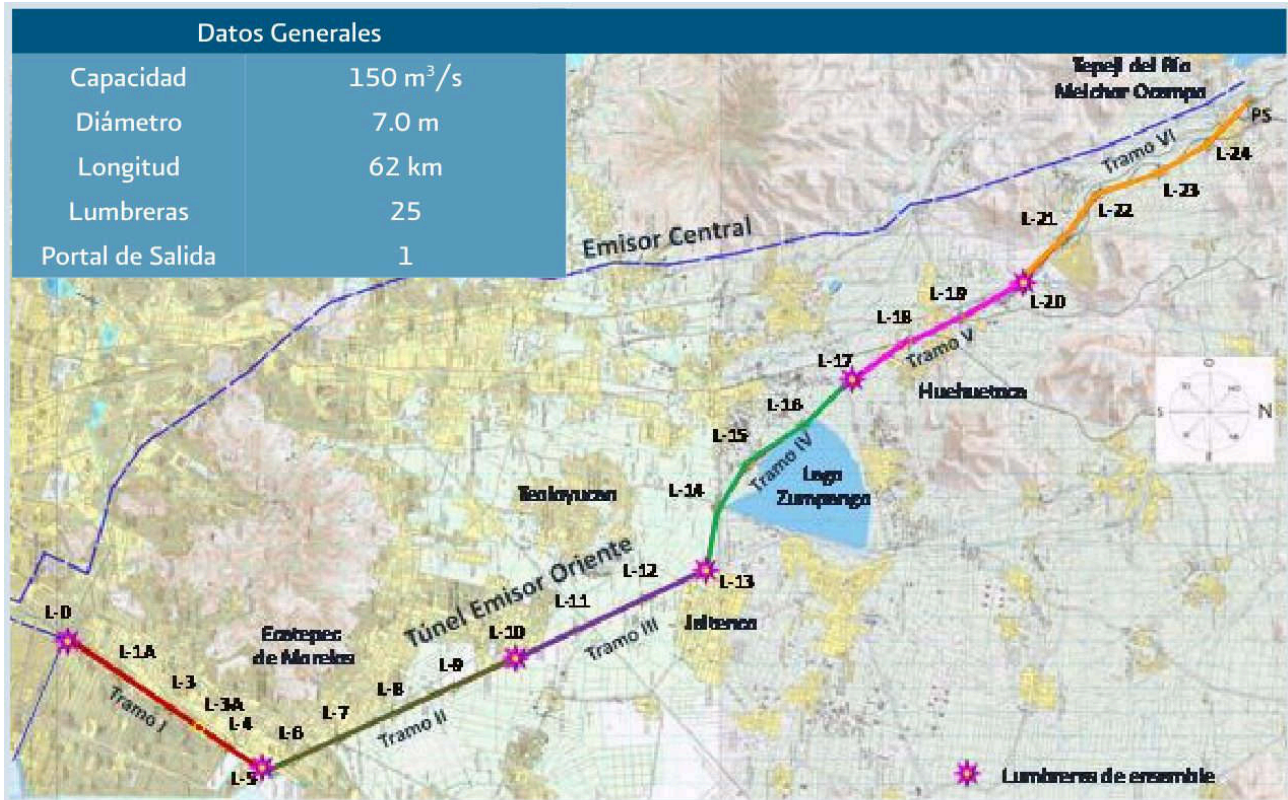


Figura 25. Trazo del Túnel Emisor Oriente.

Figura 9.4. Los seis tramos del TEO y su profundidad creciente

TABLA 9.2. FRENTES DE TRABAJO DEL TEO

TRAMO	CADENAMIENTO	LUMBRERAS	LONGITUD (M)
1	00+000 a 10+050	L-0 a L-5	10,050
2	10+050 a 21+632	L-5 a L-10	11,582
3	21+632 a 30+790	L-10 a L-13	9,158
4	30+790 a 40+992	L-13 a L-17	10,202
5	40+992 a 49+762	L-17 a L-20	8,770
6	49+762 a 62+417	L-20 a portal de salida	12,655
Suma			62,417

DATO	CIFRA ADOPTADA	VARIACIÓN EN OTROS DOCUMENTOS
Longitud	62.4 km	De 60 a 64 km
Capacidad	150 m ³ /s	170 y 180 m ³ /s en el anteproyecto y en una tesis
Número de lumbreras	25	24 en el anteproyecto, sin contar la L-0 (que era la L-2 del Interceptor Río de los Remedios)
Lumbreras de gran sección	9 de 16 m y 1 de 18 m	De 4 a 7 según la etapa y el criterio de "montaje" (L-0, L-3A, L-5, L-10, L-13, L-17 y L-20)
Profundidad de lumbreras	Túnel a 25-150 m	De 25 a 200 m según la etapa y si se mide al terreno o a la plantilla
Costo	20,702.8 millones de pesos (contrato)	12,000 y 13,000 millones en el anteproyecto (capítulo 20)

El anteproyecto de 2008 es el más holgado en capacidad y profundidad, y la ASF refleja lo construido. Los diámetros y profundidades de cada lumbrera, con su tabla completa, están en el capítulo 15.

El Libro Blanco precisa tres datos de proyecto. Las lumbreras eran 24 y se sumó una adicional, la L-3A, de ahí las 25; la figura anterior rotula seis lumbreras de ensamble y la L-3A es la séptima. El revestimiento primario se diseñó con 41,334 anillos de dovelas de 1.50 m de ancho, 7.70 m de diámetro interior y 8.40 m de exterior, con espesores de 0.35 y 0.40 m; esa cifra de proyecto difiere de los 41,352 anillos colocados que cuenta la ASF (capítulo 16). El revestimiento definitivo es de concreto reforzado de al menos 0.35 m de espesor y resistencia $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$. La población protegida es de 21,800,320 habitantes en el Libro Blanco y de casi 21.2 millones en la ASF; se conserva la segunda por ser posterior y de auditoría, y la diferencia se explica por el año de la estimación.

El TEO no funciona solo. Recibe agua en la L-0 por el Túnel Interceptor Río de los Remedios (compuerta de $5 \times 5 \text{ m}$) y por el Gran Canal (dos compuertas de $4.5 \times 4.5 \text{ m}$), y una compuerta de $7 \times 7 \text{ m}$ regula el paso al túnel. En la L-5, otra de $7 \times 7 \text{ m}$ controla el gasto y la altura de agua que enfrenta la planta de bombeo El Caracol, de 40 m³/s de capacidad instalada.

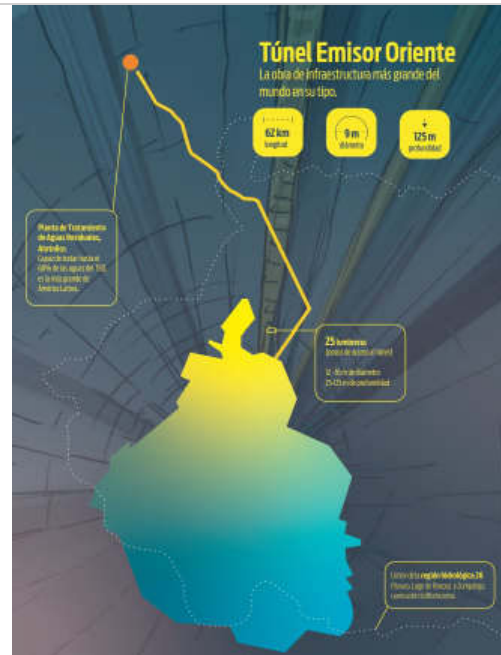


Figura 9.5. Por qué el valle necesita desaguar 315 m³/s, según un cómic de divulgación

Figura 9.6. El TEO en cifras

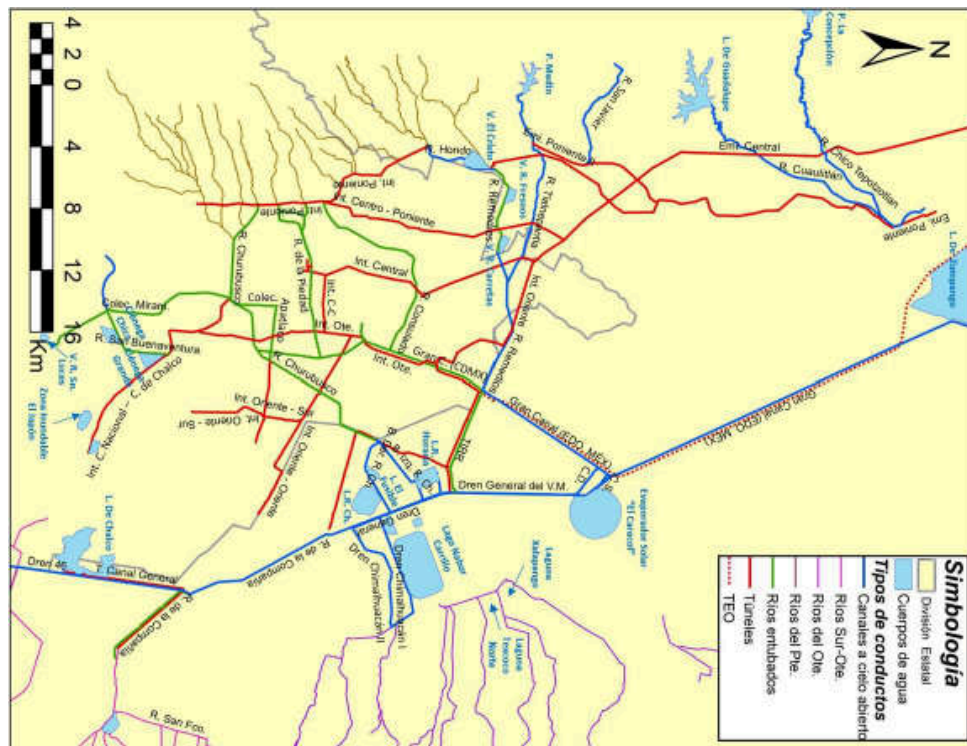


Figura 9.7. Sistema principal de drenaje del Valle de México con el TEO

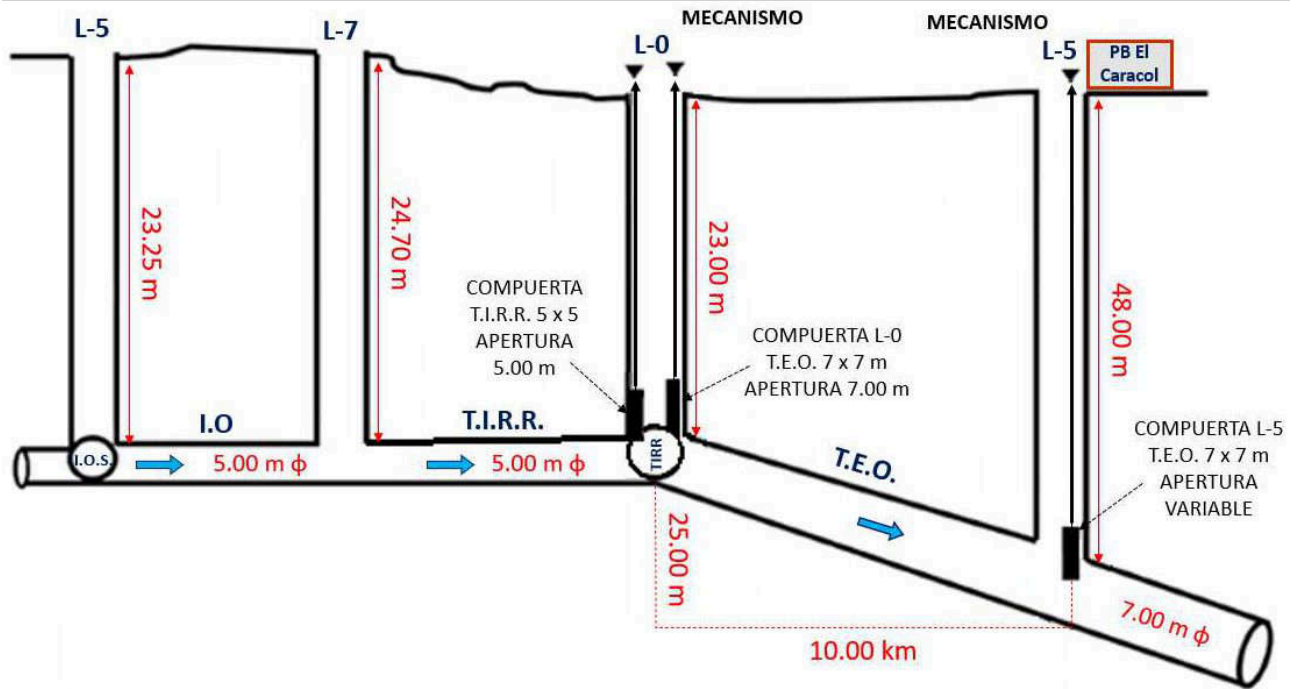


Figura 9.8. Compuertas y planta de bombeo El Caracol en los primeros 10 km del TEO

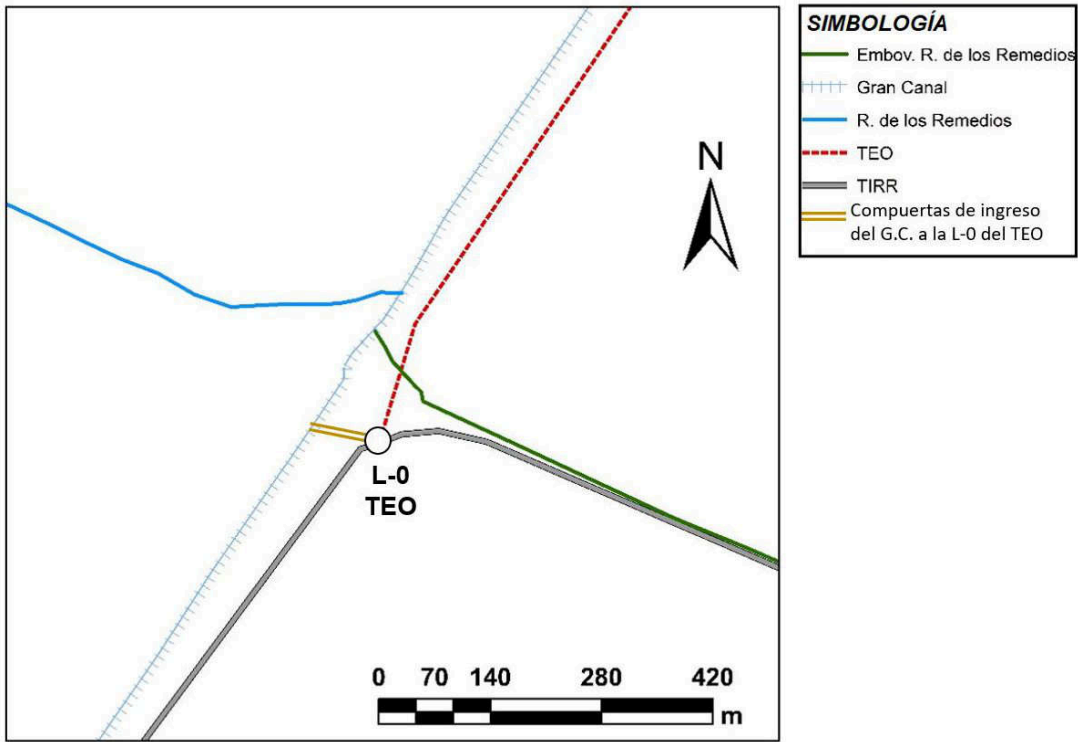


Figura 9.9. Confluencia de Gran Canal, TIRR, río de los Remedios y L-0

03

Ubicación

LOCALIZACIÓN GENERAL

El túnel va de sur-sureste a norte-noroeste. Sale de la alcaldía Gustavo A. Madero, en el límite con Ecatepec de Morelos, Estado de México, y sube hasta El Salto, en Atotonilco de Tula, Hidalgo. La entrada se ubica en la esquina sureste del cruce de la avenida Gran Canal y el Anillo Periférico, colonia 25 de Julio, y el trazo cruza los municipios de Ecatepec de Morelos, Coacalco, Tecámac, Tonanitla, Nextlalpan, Jaltenco, Zumpango, Teoloyucan, Huehuetoca, Tepeji del Río y Atotonilco de Tula. Pasa a un costado de la laguna de Zumpango. Las vías principales de la zona son el Circuito Exterior Mexiquense, la autopista México-Querétaro y la carretera federal libre Tula-Jorobas.



Figura 9.10. Planta general del TEO y sus lumbreras sobre carta topográfica

COORDENADAS TERRESTRES

El proyecto se georreferencia con inicio en 19.50230° N, 99.07717° O y término en 19.94819° N, 99.29565° O. Para un trabajo de topografía conviene la versión en UTM zona 14 Norte: las coordenadas del anteproyecto de cada lumbrera están en la MIA-P y las del portal de salida en el plano de la obra de derivación. La tabla 9.3 reúne los dos portales y las lumbreras de ensamble de cada tramo.

TABLA 9.3. COORDENADAS DE LOS PORTALES Y DE LAS LUMBRERAS DE ENSAMBLE. SISTEMA UTM ZONA 14 NORTE**

PUNTO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	UTM E (M)	UTM N (M)	CADENAMIENTO
L-0 (entrada)	19.50230° N, 99.07717° O	491,877.707	2,156,503.63	0+000
L-5		497,363.112	2,164,948.12	10+100
L-10		492,710	2,175,464	21+627
L-13		488,900	2,183,552	30+567
L-17		480,935	2,189,634	41+007
L-20		476,842	2,196,388	49+064
L-24		469,749	2,205,176	60+574
Portal de salida	19.94819° N, 99.29565° O	469,052.293	2,205,777.523	61+802.948

Las coordenadas de la MIA-P son de anteproyecto y los cadenamientos de proyecto ejecutivo difieren de ellos en decenas o cientos de metros, de modo que la tabla sirve para ubicar los puntos y no para replantearlos. El Sistema de Información Geográfica del TEO (CFE) trabajó en UTM zona 14 Norte, con datum ITRF92 en la etapa inicial y WGS84 después, porque los equipos GPS se refieren a él; qué significa ese cambio para la medición se explica en el capítulo 4.

Las imágenes satelitales siguientes muestran los dos extremos del túnel y su entorno. La línea recta que los une es esquemática y no corresponde al trazo real.

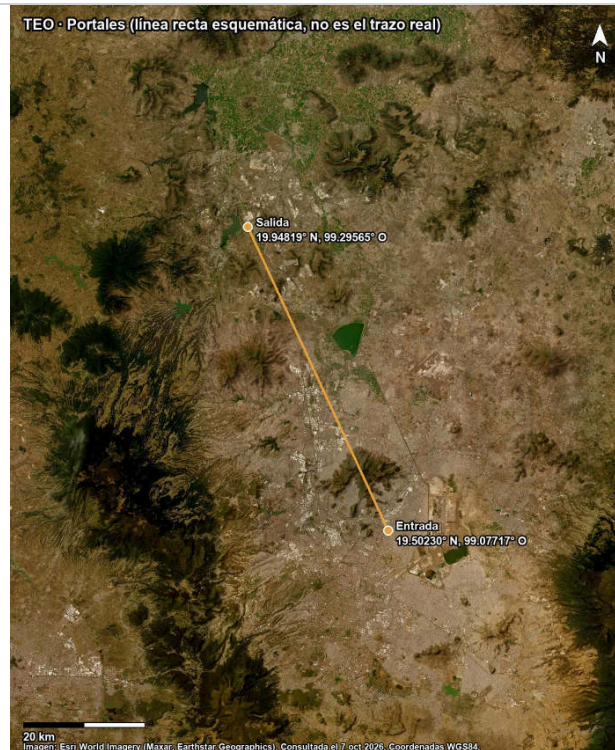


Figura 9.11. Portales de entrada y salida sobre imagen satelital

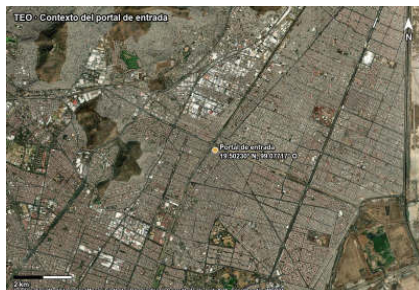


Figura 9.12. Contexto de la L-0 en el oriente del valle



Figura 9.13. Portal de salida del TEO rodeado de parcelas de riego



Figura 9.14. Contexto del portal de salida con la presa Requena al poniente

COORDENADAS HIDRÁULICAS

Se entiende aquí por coordenadas hidráulicas la posición del túnel dentro de la red de drenaje y su cota hidráulica (no existe una definición oficial). La entrada es la L-0, que era la L-2 del Túnel Interceptor Río de los Remedios, en la confluencia del Gran Canal con el río de los Remedios; ahí el TEO recibe el gasto de la zona oriente. La salida es el río El

Salto, cerca de la salida del Emisor Central: el túnel pasa de la cuenca del Valle de México a la del río El Salto, y el agua llega por el río Tula a la presa Endhó y sigue hacia el Moctezuma y el Pánuco.

La plantilla baja 97 m entre la L-0 y el portal, desnivel que mueve el agua sin bombeo (sección 3.2). Casi todo el trazo queda por debajo del nivel freático, de modo que el túnel trabaja bajo la carga del agua del subsuelo, que aumenta de sur a norte (sección 3.2). La sección 3.4 describe los cuerpos de agua con los que el túnel se relaciona.

04

El trazo en detalle

LONGITUD EN PLANTA Y SINUOSIDAD

La longitud de la línea recta entre la entrada y el portal sale de las coordenadas UTM:

$$d = \sqrt{(E_2 - E_1)^2 + (N_2 - N_1)^2}$$

donde d es la distancia en planta (m), E la coordenada Este (m) y N la coordenada Norte (m) de los puntos 1 (L-0) y 2 (portal). Sustituyendo:

$$d = \sqrt{(491\,877.7 - 469\,052.3)^2 + (2\,156\,503.6 - 2\,205\,777.5)^2} = \sqrt{22\,825.4^2 + 49\,273.9^2} = 54\,304 \text{ m}$$

La distancia en línea recta entre los portales es de unos 54.3 km en el mapa y de 54.6 km con las coordenadas decimales de la ASF sobre la esfera (cálculo propio). El túnel mide entre 7.8 y 8.1 km más que la línea recta, porque su trazo no lo es: la sinuosidad es de $62.4 / 54.3 = 1.15$.

COTAS, PROFUNDIDAD Y PRESIÓN DEL AGUA

El túnel baja de la cota 2,203 msnm en la L-0 a 2,106 msnm en el portal de salida, a lo largo de 62+000: 97 m de desnivel, unos 1.56 m/km, consistentes con la pendiente de 0.0016 de la sección 1.2.

La profundidad de proyecto de cada lumbrera hasta la plantilla hidráulica crece de 23.29 m en la L-0 a 144.96 m en la L-20 (con 50.22 m en la L-5, 80 m en la L-11 y 116.29 m en la L-17) y es de 23.19 m en el portal de salida. La tabla completa de las 25 lumbreras, con diámetro, profundidad, función y método, está en el capítulo 15.

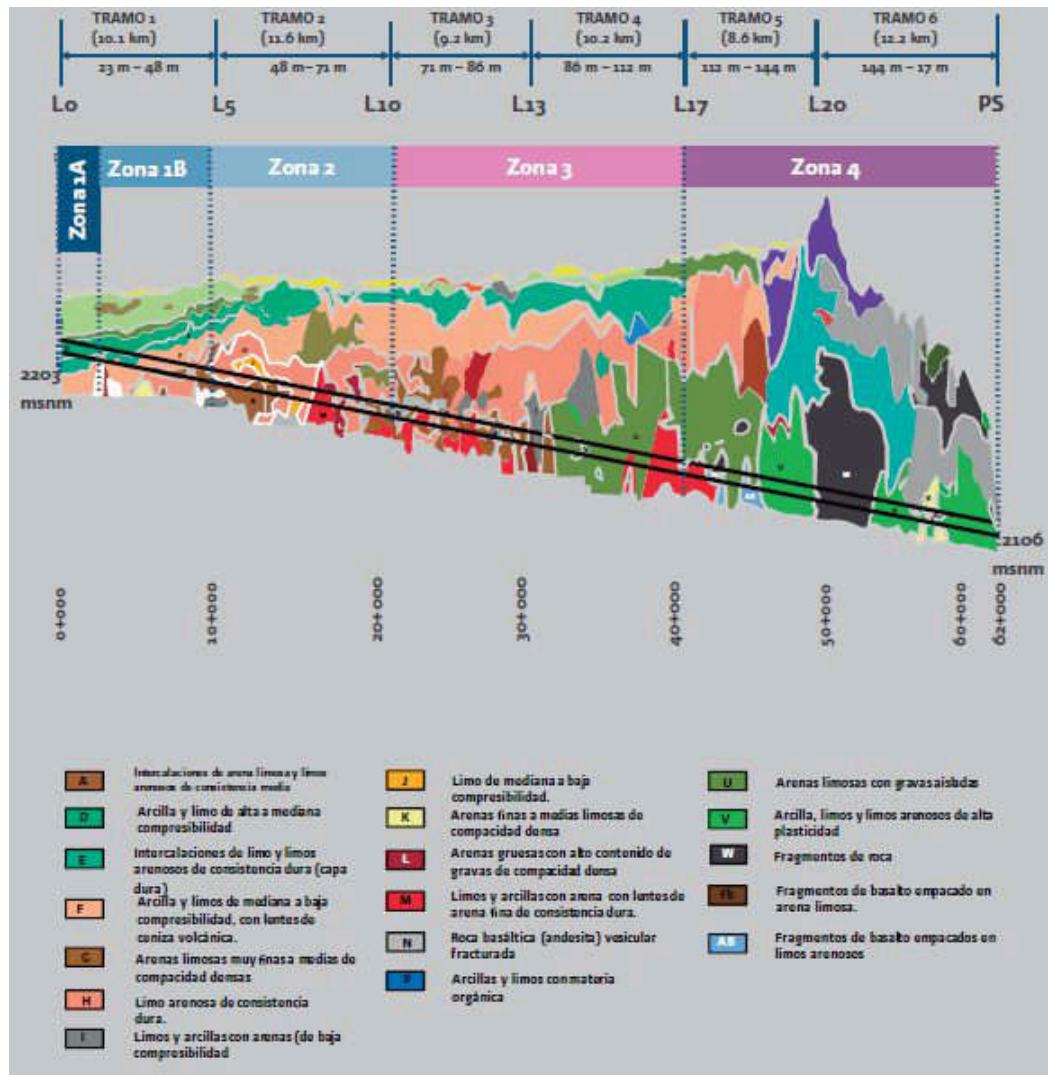


Figura 9.15. Perfil longitudinal del TEO por tramos y zonas geotécnicas

El túnel está casi todo por debajo del nivel freático. No es una obra sumergida en un cuerpo de agua, sino que trabaja bajo la carga de agua del subsuelo, que aumenta de sur a norte. La línea piezométrica permite ubicar la presión de agua sobre el túnel por tramo.

TABLA 9.4. PRESIÓN PIEZOMÉTRICA SOBRE EL TÚNEL EN PUNTOS REPRESENTATIVOS (BAR)

ZONA DEL TRAZO	LECTURA DE LA FIGURA
L-0 a L-5 (tramo 1)	1.2 a 1.6 bar
L-10 (inicio del tramo 3)	0.5 a 1.3 bar
L-13 a L-17 (tramo 4)	alrededor de 4.0 a 4.2 y 3.6 bar
L-17 a L-20 (tramos 5 y 6)	hasta 6.8 bar cerca de la L-20
Cerca del portal de salida	4.4 a 4.8 bar

El texto de la fuente lo confirma en parte. Se detectaron acuíferos con aportaciones importantes entre las lumbreras 12 y 15, y acuíferos confinados con artesianismo en Huehuetoca (lumbreras 18 a 21), con mediciones piezométricas cercanas a 7 bar sobre el túnel. Entre la L-22 y la L-24 hay 4.2 bar, equivalentes a 42 m de columna de agua. La conversión es:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} = \frac{4.2 \times 10^5 \text{ Pa}}{9\,810 \text{ N/m}^3} = 42.8 \text{ m}$$

donde h es la carga de agua (m de columna), p la presión (Pa; 1 bar = 10^5 Pa) y γ_w el peso volumétrico del agua (9,810 N/m³). Los 6.8 bar de la figura y los "cercanos a 7 bar" del texto son consistentes.

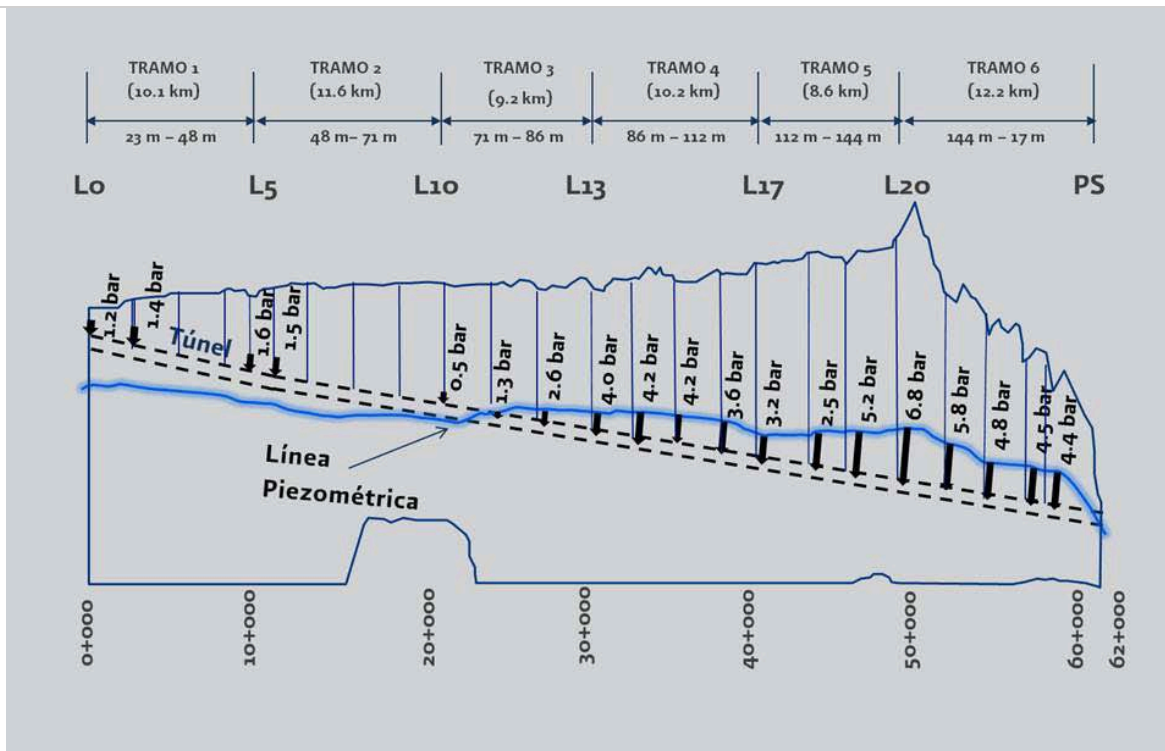


Figura 9.16. Presión de agua sobre el túnel por tramo, de la L-0 al portal

RECORRIDO Y GEOLOGÍA POR ZONAS

El trazo se describe por tramos con los documentos del proyecto. El túnel nace en la intersección de la avenida Gran Canal con el río de los Remedios y corre casi paralelo a la margen izquierda del Gran Canal unos 10 km; después cambia a la margen derecha y cruza Ecatepec, Coacalco y Tultepec en unos 20 km. Allí se separa del Gran Canal, cruza al poniente de la laguna de Zumpango y atraviesa Teoloyucan y Huehuetoca en otros 20 km; sigue la margen derecha del tajo de Nochistongo, cruza Melchor Ocampo y llega al portal en el ejido de Conejos, ya en Hidalgo. De la L-19 a la L-24 el trazo va por la margen izquierda de los ríos Cuautitlán y El Salto y termina en la margen derecha del río El Salto-Tlamaco.

La geología cambia por zonas:

1. Primeros 3 km: arcillas lacustres con 100 a 300 % de humedad.
2. Sigüientes 31 km: arcillas limo-arenosas con 50 a 100 % de agua e intercalaciones de basalto y ceniza.

-
3. Del km 34 al 39: arenas aluviales con gravas.
 4. Del km 39 al 46: abanicos aluviales y vulcanitas.
 5. Hacia el portal: arcillas, lavas y tobas.

DESCARGAS Y CUERPOS DE AGUA QUE CRUZA

En los primeros 10 km el TEO recibe aportaciones urbanas en las lumbreras L-1A, L-3 y L-4, y el Gran Canal, en el tramo que recibe las descargas del oriente, conduce solo hasta 50 m³/s.

El TEO se relaciona con el agua superficial en cuatro puntos del trazo, que se leen con la descripción de tramos de Contreras et al. (2011, p. 2) y con la ubicación de las coordenadas hidráulicas de la sección 2.3.

1. En la entrada recibe el Gran Canal y el río de los Remedios, a través del Túnel Interceptor Río de los Remedios.
2. Durante los primeros 10 km corre casi paralelo a la margen izquierda del Gran Canal, que en ese tramo solo conduce 50 m³/s; por eso recibe aportaciones urbanas en las lumbreras L-1A, L-3 y L-4.
3. En el tramo medio pasa al poniente de la laguna de Zumpango y sigue la margen derecha del tajo de Nochistongo. El túnel va a decenas de metros bajo esos cuerpos de agua, dentro de acuíferos en carga, y no los intercepta.
4. En la salida pasa bajo los basaltos del río El Salto y descarga en él, cerca de la salida del Emisor Central; el agua sigue por el río Tula hasta la presa Endhó.

La descarga de proyecto es de 150 m³/s en el portal, con plantilla en la cota 2,106 msnm, a 23.19 m de profundidad. El cauce receptor admite menos de 200 m³/s, y esa cifra explica las decisiones de descarga de los capítulos 13 y 17.

05

Antecedentes

ANTECEDENTES INMEDIATOS

La cuenca del Valle de México es cerrada y su único desagüe es artificial; los cuatro siglos de obras de salida que lo muestran se cuentan en el capítulo 3. Lo que interesa aquí es el punto de partida del TEO: un valle que se hundió sobre sus lagos y un drenaje que ya no alcanzaba.



Figura 9.17. Lagos del Valle de México en el siglo XVI y ríos que los alimentaban

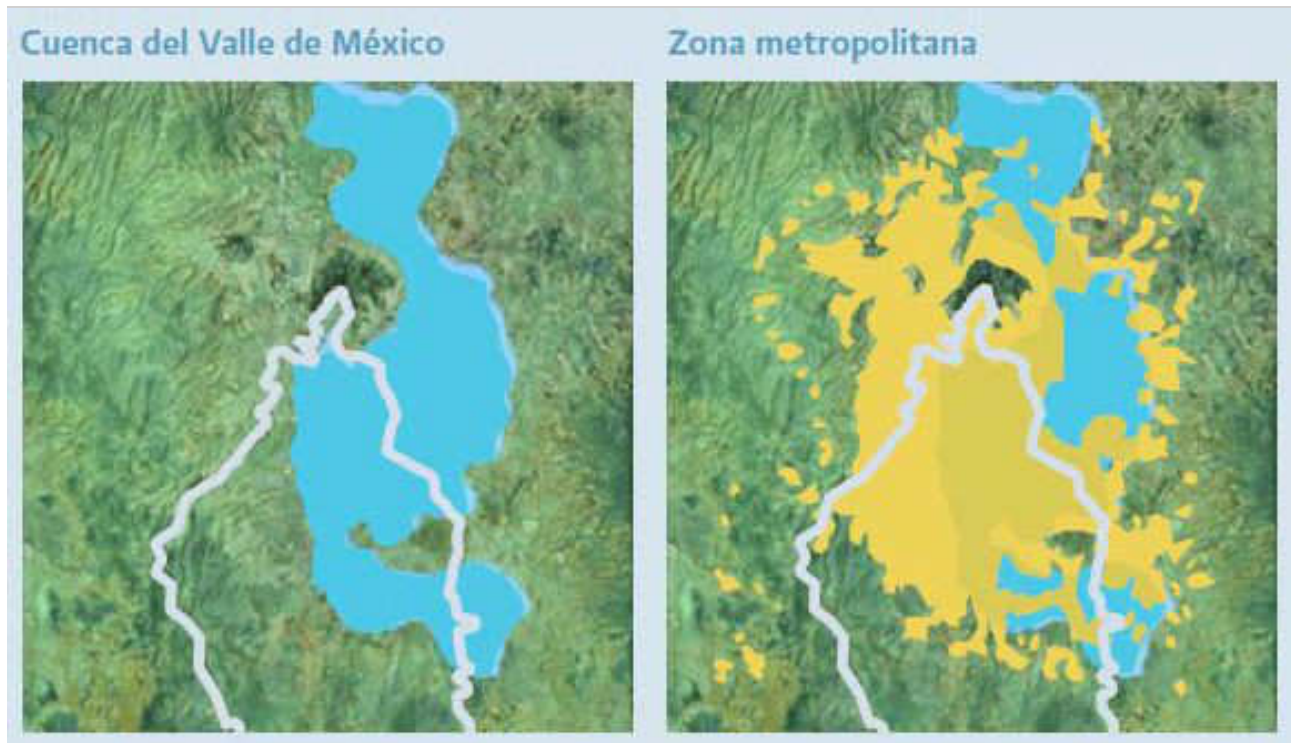


Figura 9.18. Lagos originales y crecimiento de la zona metropolitana sobre ellos

El Emisor Central, inaugurado en 1975, mide 49.7 km, tiene 6.5 m de diámetro y 200 m³/s. Después de 1975 la ciudad creció y el suelo se hundió. La capacidad de desalojo cayó de 280 m³/s en 1975 a 165 m³/s en 2007, con casi el doble de población. En porcentaje:

$$\text{Pérdida} = \frac{Q_{1975} - Q_{2007}}{Q_{1975}} \times 100 = \frac{280 - 165}{280} \times 100 = 41 \%$$

donde Q_{1975} y Q_{2007} son las capacidades de desalojo del sistema (m³/s) en cada año. La causa de fondo es el hundimiento por sobreexplotación del acuífero. Los argumentos completos están en el capítulo 10.

Dato técnico: con K131 la caída es de 280 a 195 m³/s entre 1975 y 2010, es decir 30 % (capítulo 10). La diferencia con el 41 % de arriba viene de que cada fuente toma un año y unos supuestos distintos; este capítulo usa la serie de 2007 (Bautista y Vargas) y el capítulo 10 la evaluación oficial K131.

La decisión fue construir un segundo emisor profundo y no solo reparar el existente: sumar 150 m³/s a la capacidad del sistema en 2007 da 315 m³/s, capaces de absorber una tormenta con recurrencia de 50 años, y permite alternar el mantenimiento:

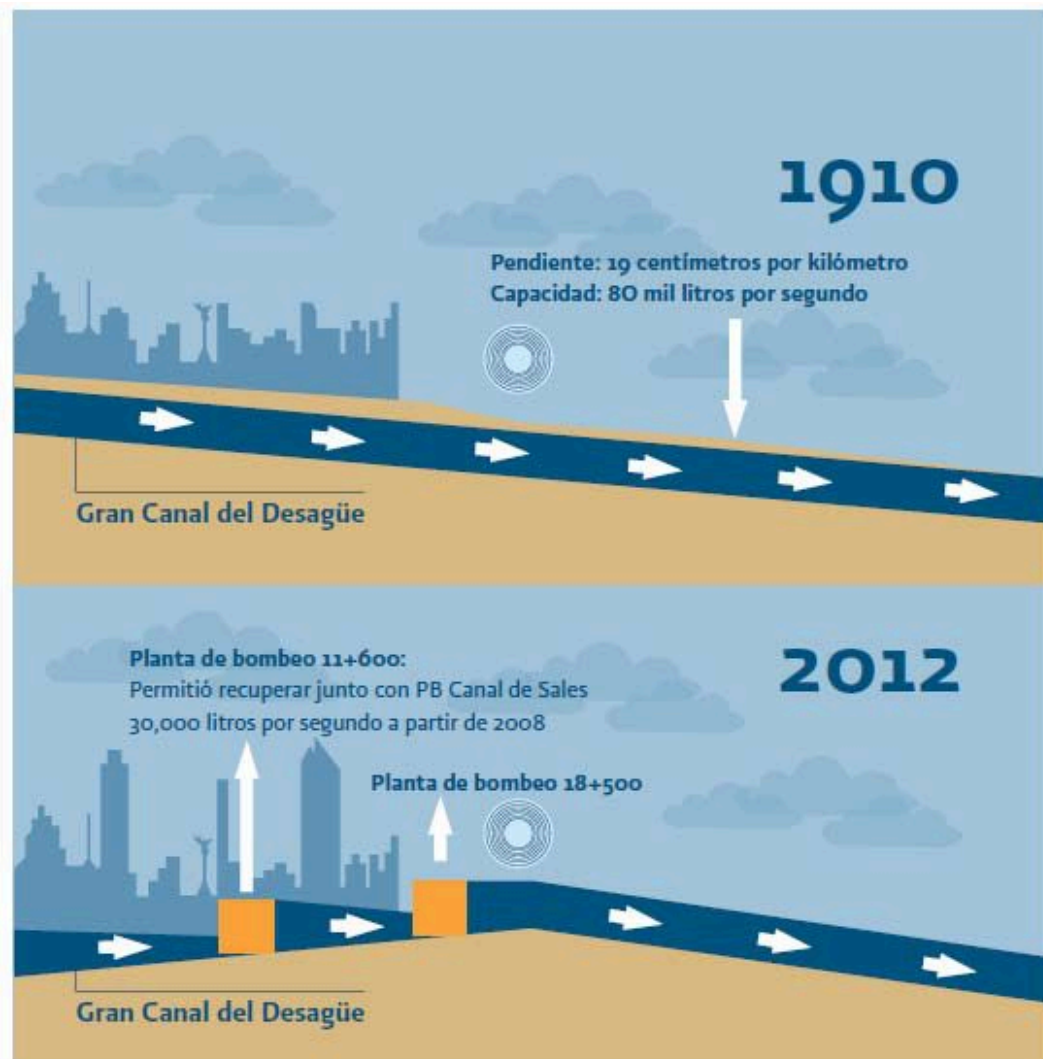


Figura 9.19. Pendiente del Gran Canal

$$Q_{total} = Q_{2007} + Q_{TEO} = 165 + 150 = 315 \text{ m}^3/\text{s}$$

donde Q_{total} es la capacidad conjunta del sistema (m³/s), Q_{2007} la capacidad de 2007 y Q_{TEO} el gasto de diseño del TEO.

Las alternativas que existían eran dos. Una fueron las obras emergentes de 2007: cuatro plantas de bombeo (PB Gran Canal km 11+600, Casa Colorada, Canal de Sales y Vaso del Cristo) que eran provisionales y de vida útil reducida. La otra fue el segundo túnel que Conagua comparó con el TEO, el Túnel Emisor Central II, de la misma capacidad y casi la misma longitud; el desempate fue el trazo, como se explica en el capítulo 10.

LA DESCARGA Y LAS PRESAS DEL RÍO TULA

El TEO es un túnel, no una presa, pero descarga en un sistema de ríos y presas cuya operación condiciona cuánta agua puede entregar. La clasificación de las presas por material y funcionamiento se trata en el capítulo 2 y las presas del río Tula en el 3; aquí se anota lo que importa para el portal de salida.

El agua del TEO sale al río El Salto, cerca de la salida del Emisor Central. Va a la presa Requena, al canal El Salto-Tlamaco y de ahí al río Tula y a la presa Endhó, que satisface la demanda de riego de la zona. Las aguas siguen hacia el Moctezuma y el Pánuco. Requena almacena 51.57 millones de m^3 al nivel máximo y su cauce aguas abajo admite $240 m^3/s$ hacia Tula de Allende; Endhó almacena 182.90 millones de m^3 y riega 13,000 ha del Distrito de Riego 003 Tula. La cortina de Requena mide 37.40 m de altura y 230 m de corona.

Aquí aparece un límite del sistema. Del portal al vaso de Endhó hay 24.2 km de río Tula. Entre el Emisor Central, el Emisor Poniente y el TEO, la descarga potencial supera $300 m^3/s$, mientras la capacidad del Tula en su primer tramo se estima menor de $200 m^3/s$. Por eso en 2020 se limitaron las descargas del TEO a $30 m^3/s$.

La capacidad de desalojo del túnel ($150 m^3/s$) es mayor que lo que el río Tula puede recibir sin desbordarse. La obra resuelve el problema de la cuenca del Valle, pero traslada el riesgo aguas abajo, donde las presas funcionan como regulación y almacenamiento para riego, no como control de avenidas dedicado. Es un tema de capacidad del cauce, no de la cortina de las presas, y por eso se trata en el capítulo 17 (descarga y vertedor).

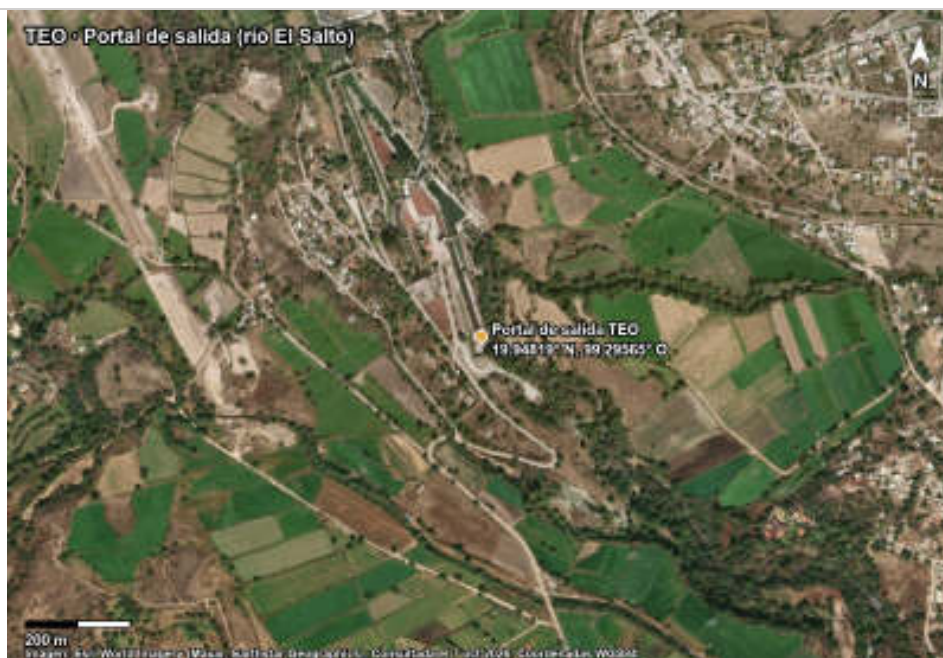


Figura 9.20. 300 m³/s de descarga potencial contra 200 m³/s de capacidad del río Tula

ANTECEDENTES DE LA PLANEACIÓN DEL TEO

El 8 de noviembre de 2007 el presidente Felipe Calderón impulsó el Programa de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México, que incluía el TEO y plantas de tratamiento. El Fideicomiso 1928 fue el vehículo para contratar obras, adquisiciones y servicios.

La ingeniería básica incluyó un estudio hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM que dio un diámetro de 7.00 m para una tormenta de diseño de 50 años de periodo de retorno. La CFE elaboró, a solicitud de Conagua, los estudios de factibilidad de la trayectoria. Los contratos, convenios y actores están en el capítulo 20.

06

Importancia regional

La justificación detallada está en los capítulos 10 (hundimiento y alternativas), 20 (costos) y 21 (historia política y efectos sociales en el oriente del valle y en el Valle del Mezquital). Esta parte reúne los argumentos regionales de carácter técnico y de escala.

ESCALA DE LA ZONA PROTEGIDA

La Zona Metropolitana del Valle de México ocupa 1,894 km², cerca del 22 % de la cuenca y el 95 % de la superficie que cubrían los lagos en el siglo XVI. Produce 32 % del PIB nacional y concentra 20 % de la población. Otra fuente da 1,800 km², unas 16 delegaciones del Distrito Federal y 18 municipios conurbados, con población repartida casi en mitades. La población beneficiada es de casi 21.2 millones de habitantes.

BENEFICIOS TÉCNICOS Y DAÑOS EVITADOS

Los beneficios son: capacidad conjunta con el sistema de 315 m³/s, capaz de absorber una tormenta de 50 años de recurrencia; flexibilidad de operación y mantenimiento del drenaje profundo; y daños evitados a viviendas, a infraestructura pública (aeropuerto, Metro, subestaciones, vialidades) y al sector económico, pues una inundación podría abarcar 9 delegaciones del Distrito Federal y 4 municipios del Estado de México. El origen de esas cifras, ocho manchas de inundación por cota, se describe en el capítulo 10.

TABLA 9.5. IMPORTANCIA REGIONAL DEL TEO: ARGUMENTOS Y DÓNDE SE DESARROLLAN.

ARGUMENTO	CAPÍTULO
La capacidad de desalojo había caído de 280 a 165 m ³ /s entre 1975 y 2007	10
El TEO añade 150 m ³ /s y permite alternar el mantenimiento	10
Opera 10.1 km desde 2013 y el resto desde el 23 de diciembre de 2019	9 (sección 1.2)
La tasa de tratamiento del Valle de México era de solo 6 % antes de la PTAR	19
Conduce las aguas a la PTAR Atotonilco	19
El río Tula no soporta más de unos 200 m ³ /s	17

IMPORTANCIA HIDROLÓGICA Y AMBIENTAL PARA EL VALLE DEL MEZQUITAL

El argumento oficial de la época fue que, tras un siglo de verter más de 725 millones de m³ anuales de aguas negras en Hidalgo, con más de 180 mil toneladas anuales de sólidos suspendidos totales e igual cantidad de DBO₅, se construiría la PTAR de Atotonilco para que los distritos de riego usen agua tratada. La percepción de las comunidades y los efectos de la PTAR se analizan en los capítulos 19 y 21.

Vázquez (2021, p. 16) añade la crítica: el proceso histórico "ha consistido en atender las necesidades de la Ciudad de México" y ha trasladado costos sanitarios, ambientales y sociales a la población de Hidalgo.

SÍNTESIS

Tres aspectos del trazo y de la zona protegida destacan al reunir los datos del capítulo.

El primero es la escala vertical. La L-0 tiene 23 m de profundidad y la L-20, 145 m, seis veces más. Para la supervisión de una excavación, eso significa que las lumbreras de los tramos 5 y 6 son obras de naturaleza distinta a las del tramo 1, con otros muros, otro bombeo y otros riesgos, aunque la ficha las agrupe como "lumbreras".

El segundo es que seis frentes simultáneos no son solo una forma de ganar tiempo: implican seis residencias, seis plantas de lodo y seis programas de rezaga. Lo que se gana en plazo se paga en coordinación.

El tercero es el río Tula. Los 150 m³/s que se desalojan son un éxito visto desde el Valle y un problema de aguas abajo visto desde Hidalgo, porque el cauce receptor admite menos de 200 m³/s y por eso hubo que limitar las descargas a 30 m³/s en 2020. Un proyecto de esta escala debió presentar la descarga, y no solo la entrada, como parte de su justificación.

DÓNDE SE JUSTIFICA CADA DECISIÓN DE LA OBRA

Cada decisión grande del TEO se apoya en un estudio, y la justificación completa está en el capítulo que la trata. Este cuadro las reúne para que se pueda ir del estudio a la decisión.

TABLA 9.6. DECISIONES PRINCIPALES DEL TEO Y DATO QUE LAS RESPALDA.

DECISIÓN	DATO QUE LA RESPALDA	CAPÍTULO
Túnel profundo por gravedad, de 62 km, con pendiente mínima	Pérdida de capacidad de 280 a 165 m ³ /s y desnivel de 97 m entre entrada y salida (sección 3.2)	10
Seis tramos atacados al mismo tiempo	Plazo de obra y variación del terreno por tramo	13 y 14

DECISIÓN	DATO QUE LA RESPALDA	CAPÍTULO
Tuneladoras EPB con acondicionamiento de espuma	Suelos blandos y saturados bajo el nivel freático, sin planta de lodos	14
Muro Milán e hidrofresa en las lumbreras	Profundidades de 40 a 150 m, muy por encima de los 30 m que alcanza la flotación	15
Bombeo profundo antes del núcleo de la lumbrera	Factor de seguridad de subpresión de 0.5 a 1.2 sin abatir y acuíferos de más de 600 L/s en la L-12	12 y 15
Dovelas con concreto resistente a sulfatos	Suelos y aguas con sulfatos	16
Autorización condicionada de la Semarnat	Sistema ambiental ya degradado y fin de reducir el riesgo de inundación	18

RETOS CON BASE EN LOS ESTUDIOS Y LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Los estudios de geología y geohidrología anunciaron cada reto, y los procesos constructivos fueron la respuesta de obra. Se distinguen cinco frentes.

1. El arranque en arcilla muy blanda. En el tramo 1 la humedad llega a 200 y 350 %, y en la L-00 hubo extrusión del terreno; se resolvió con anillo de rigidez y jet grouting en las entradas y salidas del escudo.
2. El agua. En la L-12 los estudios previeron un bombeo de 4.6 L/s y la obra necesitó 14 pozos con 580 L/s para excavar en seco; entre las L-18 y L-21 el acuífero confinado llegó a cerca de 7 bar.
3. La profundidad. Las lumbreras pasan de 23 m a casi 150 m, así que cada tramo exigió otro muro, otro bombeo y otra instrumentación (capítulo 15).
4. El cambio de suelo a roca. Del km 44 al portal aparecen vulcanitas, conglomerados y lavas duras con entrada profusa de agua en fallas, y las máquinas Robbins se diseñaron para ese frente mixto.
5. Seis frentes simultáneos. Los plazos se ganaron con seis tuneladoras, y se pagaron con seis plantas de dovelas, seis programas de rezaga y una coordinación muy exigente.

Estos retos no se resolvieron de golpe. El capítulo 23 los evalúa con los resultados de la obra.

OTROS TEMAS DEL TEO Y DÓNDE SE TRATAN

Las cimentaciones del TEO son las de las lumbreras (muro Milán, jet grouting, losa de fondo y trabe de liga) y se detallan en el capítulo 15. Los bancos de materiales usados en la obra, los de la planta de dovelas en Ecatepec y los bancos de tiro de la rezaga, están en el capítulo 13. La autorización de la Semarnat y su fundamento (LGEEPA y REIA) están en el capítulo 18, y el mantenimiento en el capítulo 19.

En resumen: el TEO es un túnel de gravedad de 62.4 km y 7.0 m de diámetro que baja 97 m entre la L-0 y el portal de El Salto, dividido en seis tramos y servido por 25 lumbreras. Su ubicación, su profundidad creciente y su descarga en el río Tula explican gran parte de las decisiones de la obra, que se desarrollan en los capítulos siguientes.



Parte II · La línea de conducción del TEO

10

Alternativas de solución

Por qué se eligió un segundo túnel profundo

Conagua comparó dos túneles con la misma capacidad y casi la misma longitud, y eligió el que casi no obligaba a expropiar. En los documentos públicos no hay una comparación contra captación pluvial, recarga de acuíferos o infraestructura verde. Este capítulo separa lo que se evaluó, lo que no se hizo público y el balance que se desprende de la evidencia.

La clasificación de las obras de conducción y los criterios para elegir entre ellas están en el capítulo 2; aquí se revisa qué alternativas se compararon para el TEO y por qué ganó la que ganó.

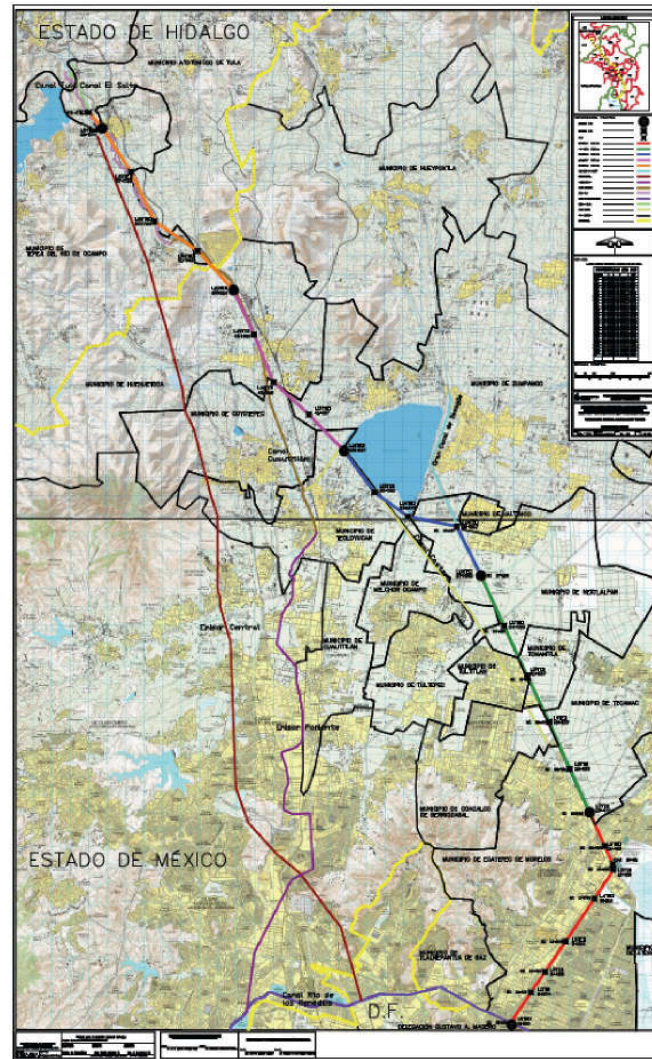


Figura 10.1 Drenaje del Valle en 2008

Figura 10.1. Drenaje del Valle en 2008

01

Cuánta agua ya no cabía

La pregunta de fondo no era "túnel o no túnel", sino cuánta agua había dejado de caber. La capacidad del drenaje bajó de 280 m³/s en 1975 a 195 m³/s en 2010. La pérdida, en porcentaje, es:

$$\text{Pérdida} = \frac{Q_{1975} - Q_{2010}}{Q_{1975}} \times 100$$

donde Q_{1975} y Q_{2010} son las capacidades de desalojo del sistema en m³/s en cada año. Sustituyendo:

$$\text{Pérdida} = \frac{280 - 195}{280} \times 100 = \frac{85}{280} \times 100 = 30.4\%$$

La pérdida se atribuye a un hundimiento promedio de más de 4 m entre 1975 y 2007.

El Túnel Emisor Central (TEC) trabajó 19 años sin mantenimiento mayor y su capacidad cayó de 170 a 110 m³/s. Con el Gran Canal en 15 m³/s y el Emisor Poniente en 30, el sistema sumaba 155 m³/s (K131, p. 14).

Había una segunda razón, menos citada: con el TEC en operación continua no se podía inspeccionar, y el hundimiento del Gran Canal "ha impedido realizar labores de conservación en el drenaje profundo" (K131, p. 9). Un túnel nuevo permitiría alternar: uno trabaja y el otro se revisa en estiaje.

El riesgo era una falla del TEC que obstruyera el flujo. El análisis de ocho manchas de inundación por cota: hasta la cota 2,226 msnm no hay población afectada; desde la 2,227 empiezan a verse afectadas Venustiano Carranza, Nezahualcóyotl y Ecatepec, y en la 2,333, que es el nivel máximo de inundación, la población afectada pasa de 3.9 millones, con poco más de un millón en Nezahualcóyotl (K131, pp. 50-51). En los mismos mapas se superpuso la mancha urbana, el Metro, el aeropuerto y las vialidades principales. Es una estimación de 2008, no una medición.

02

El antecedente de 1996

La comparación de 2008 se apoyó en un proceso institucional anterior: el Memorándum de Entendimiento del 21 de octubre de 1996 sobre saneamiento y abastecimiento hidráulico de la zona metropolitana. De ahí salió un estudio multidisciplinario con el Instituto de Ingeniería de la UNAM sobre el estado real del sistema. Con esos resultados, el Comité Técnico del Fideicomiso 1928 dio prioridad a mejorar el drenaje principal.

03

El desempate fue de predios

Dentro de ese marco, el estudio socioeconómico de 2008 identificó dos alternativas técnicas: el Túnel Emisor Oriente y el Túnel Emisor Central II. Tienen la misma capacidad y aproximadamente la misma longitud, así que "su única diferencia radica en el trazo" (K131, p. 11).

El TEO va "casi en su totalidad" por zona federal. El TEC II exigiría afectar predios para las lumbreras. Se eligió el TEO.

Desde la práctica de obra, ese criterio tiene sentido. Cada lumbrera necesita una plataforma donde entran grúas, plantas de lodo y camiones de rezaga, y el terreno tiene que estar liberado antes de que llegue la primera máquina. Un trazo que obliga a negociar o expropiar esos predios suma gestión antes de la primera excavación, y no se indica cuántos predios habría implicado. Es una razón legítima; lo escaso es que sea la única que se hizo pública.



Figura 10.2. TEO contra TEC II

Figura 10.2. TEO contra TEC II

04

Lo que no se evaluó

En los documentos oficiales no aparece una comparación del TEO contra captación pluvial, recarga de acuíferos o infraestructura verde. La MIA-P incluye alternativas de trazo, no de solución.

El diagnóstico oficial nombra dos causas que un túnel no toca. Una es la expansión urbana, que reduce la infiltración y sube el caudal pico, de modo que el sistema "trabaja al límite" (K131, p. 9). La otra es la sobreexplotación: se extrae más del doble del agua que se recarga, con 1,876 millones de m³ por año (K131, p. 13).

La respuesta se limita al túnel, para inundaciones, y a la planta de tratamiento, para saneamiento. El Programa de Sustentabilidad Hídrica sí incluye ahorro y reúso (K131, p. 7), pero es otro componente.

05

Un orden de magnitud

El volumen que mueve el túnel en una hora es el producto del gasto por el tiempo:

$$V = Q t$$

donde V es el volumen (m³), Q es el gasto (m³/s) y t es el tiempo (s). A 150 m³/s durante una hora:

$$V = 150 \times 3\,600 = 540\,000 \text{ m}^3$$

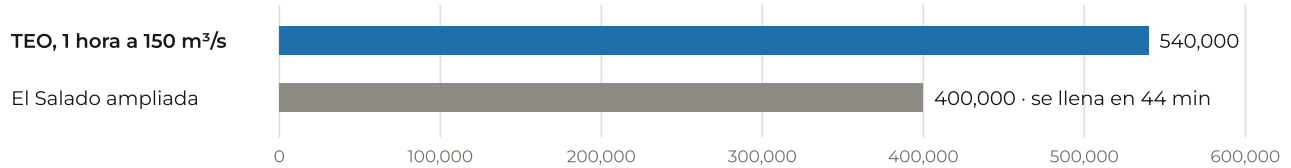
Conagua anunció en mayo de 2026 la ampliación de la laguna El Salado de 300 mil a 400 mil m³. El tiempo que tardaría el TEO en llenar un regulador de ese tamaño es:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{400\,000}{150} = 2\,667 \text{ s} \approx 44 \text{ min}$$

donde V es la capacidad del regulador (m³) y Q el gasto del túnel (m³/s). Un vaso grande equivale a menos de una hora del gasto del túnel. Eso no significa que las lagunas no sirvan. Una tormenta del Valle dura horas, y lo que importa es el hidrograma, no el pico, y con la información pública no es posible hacer ese cálculo.

Una hora del túnel frente a la laguna El Salado

volumen en metros cúbicos



Cálculo propio: $150 \text{ m}^3/\text{s} \times 3,600 \text{ s}$; $400,000 / 150 = 2,667 \text{ s}$.

Figura 10.3. Una hora del TEO contra la laguna El Salado ampliada

06

Qué dice la literatura

Las mediciones con InSAR registran hundimientos de hasta 285 mm/año en el norte de la zona metropolitana, y superiores a 200 mm/año a lo largo del TEO. Ese hundimiento causó la pérdida de capacidad, y por eso una solución por gravedad exige profundidad.

Los modelos de la descarga (TES01000670610, TES01000734965) son estudios del diseño de la salida, no de alternativas. En la literatura arbitrada revisada no hay una cuantificación del gasto pico que podrían absorber la captación pluvial o los parques lacustres en el Valle, ni una comparación del drenaje profundo contra soluciones basadas en la naturaleza, por lo que no se emplean como argumento.

07

Por qué profundo y no superficial

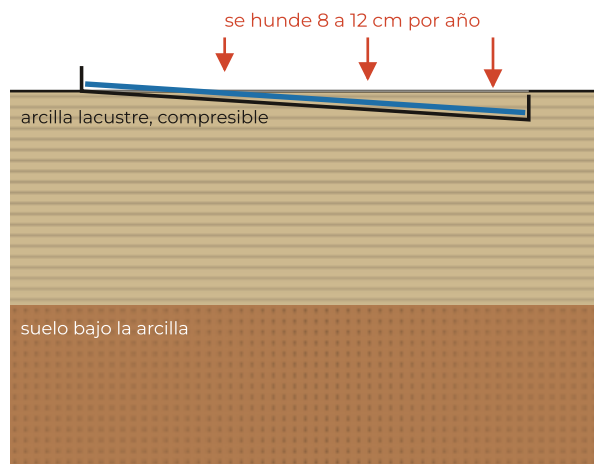
Esta parte es una inferencia apoyada en los datos del terreno. El Gran Canal es de superficie, y su capacidad se perdió con el hundimiento (K131, p. 9). Los hundimientos son de 8 a 12 cm por año en la Ciudad de México y de 35 a 40 cm en Xochimilco y Chalco.

Un conducto bajo la arcilla lacustre se aleja de esa deformación. Por eso las lumbreras llegan a 25-150 m y el túnel trabaja por gravedad desde la L-0, a 2,204.0 msnm. Es el mismo argumento por el que el Emisor Central de 1975 se construyó profundo. Ningún documento oficial compara explícitamente "profundo contra superficial".

Por qué profundo

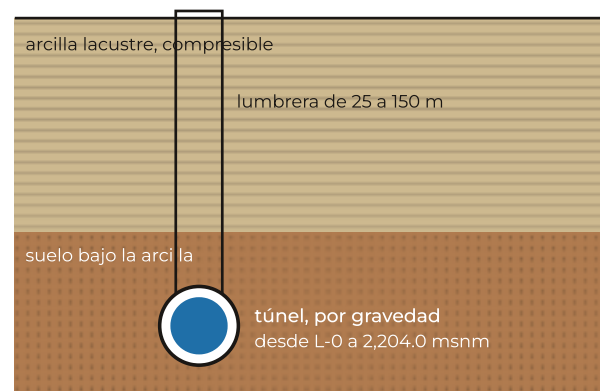
esquema sin escala; dos conductos sobre el mismo terreno

Conducto superficial



El fondo baja de forma desigual y el canal pierde la pendiente; así perdió capacidad el Gran Canal.

Túnel profundo



El conducto queda debajo de la capa que se deforma y conserva su pendiente.

Inferencia del equipo con datos de Vázquez Martínez (2021, p. 11), K131 (p. 9) y ASF (2018).

Figura 10.4. Conducto superficial sobre arcilla que se hunde contra túnel profundo

08

Balance

La evidencia sostiene que el drenaje necesitaba una conducción adicional y profunda. Una caída de 280 a 195 m³/s y un TEC sin mantenimiento mayor por 19 años dejaban a la ciudad con un solo conducto crítico. La redundancia, que permite revisar uno mientras el otro trabaja, es un argumento sólido y consta por escrito en la evaluación oficial. En obra, lo que no se puede inspeccionar termina fallando en el peor momento.

La frase "se evaluaron las alternativas" no tiene el mismo respaldo. Se evaluaron dos túneles. El criterio de elección fue de suelo, no de desempeño hidráulico ni de riesgo, y la comparación pública cabe en un párrafo. Un análisis de alternativas completo habría incluido costos, riesgos y la opción de no hacer nada.

Los datos permiten sostener que el túnel era necesario y que la evaluación pública fue limitada. También que el túnel resolvió la pérdida de capacidad mientras el hundimiento y la sobreexplotación siguen, conclusión que se refiere al sistema entero y no al TEO. Nada de lo anterior prueba que una combinación de captación y recarga hubiera evitado el túnel: los datos disponibles no permiten afirmarlo.

En resumen: la capacidad perdida y la falta de un segundo conducto para inspección justificaron un nuevo emisor profundo por gravedad. La comparación pública se redujo a dos túneles y se decidió por la tenencia del suelo. No se hizo pública una comparación con medidas de captación, recarga o infraestructura verde.



Parte II · La línea de conducción del TEO

11

Estudios del proyecto por disciplina

Qué se estudió, quién lo hizo y qué se decidió con cada estudio

Antes de que una tuneladora tocara el suelo, nueve disciplinas estudiaron el TEO durante años. Cuatro documentos de esa cadena son de acceso público completo: la evaluación de diseño de 2013, la manifestación de impacto ambiental de 2008, las auditorías de la ASF y el Libro Blanco de la Conagua de 2018. El resto se conoce por lo que reproducen las tesis de la UNAM y, para la ingeniería básica, por la descripción de primera mano que dos ingenieros de la CFE y de la UNAM publicaron en la revista Obras Subterráneas de CAMITOS.



Figura 11.21. Instalación de un piezómetro abierto y primera lectura en el sitio PZA-L5

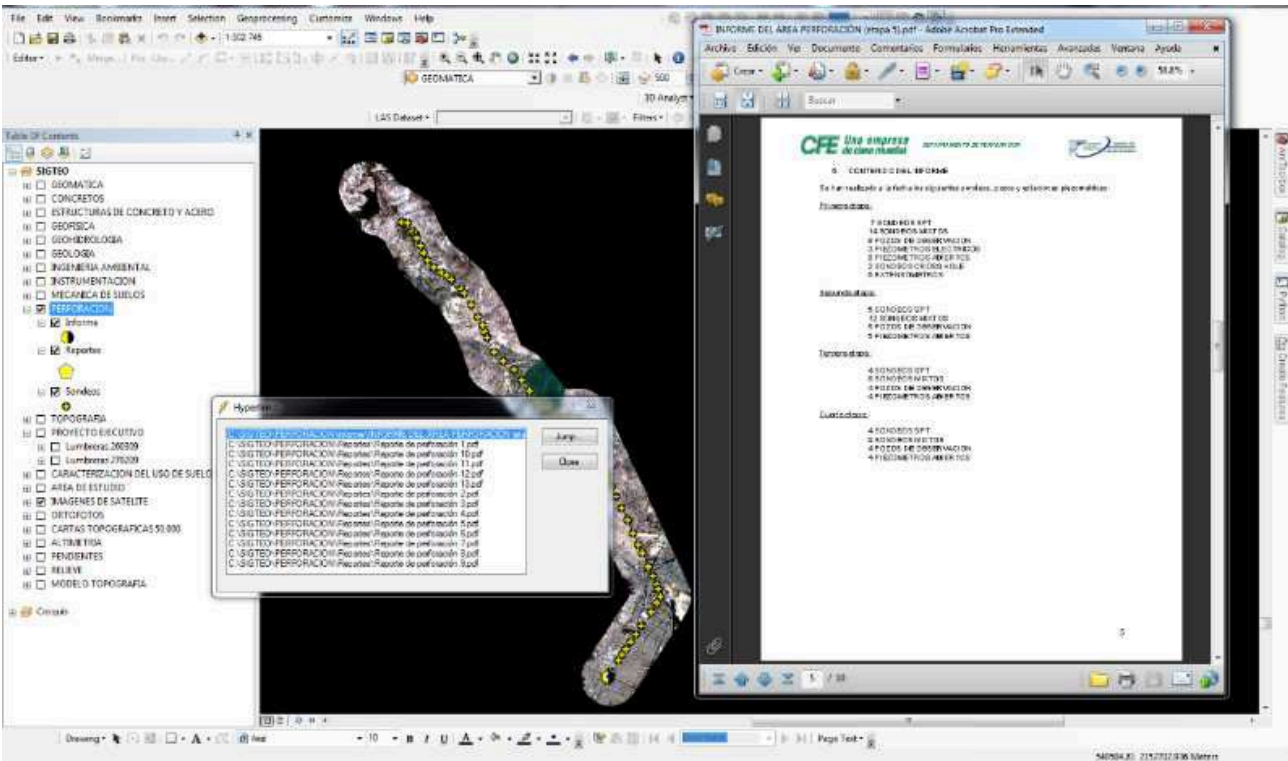


Figura 11.1. Árbol de capas del SIGTEO con las disciplinas de la ingeniería básica

El Túnel Emisor Oriente (TEO) no se apoya en un solo estudio sino en una cadena de ellos, hechos por distintas instituciones y en distintas fechas: una evaluación de diseño del programa presupuestario (2013), una ingeniería básica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) organizada en once departamentos (2007-2009), una manifestación de impacto ambiental, el proyecto ejecutivo del consorcio contratista, modelos físicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM y trabajos académicos posteriores. Este capítulo ordena esa cadena por disciplina: quién hizo cada estudio, cuándo, con qué método, qué resultados se pueden citar con cifra y qué parte del documento es de acceso público.

Los conceptos de estudios preliminares (qué se explora, con qué métodos y qué documentos se entregan) están en la Parte I (capítulo 4); este capítulo recorre los estudios que se hicieron para el TEO.

Los resultados del subsuelo (formaciones, perfiles, parámetros por lumbrera y geohidrología) se presentan en el capítulo 12 y la autorización ambiental y el resolutivo de la Semarnat en el capítulo 18. Aquí se tratan el inventario de estudios, la topografía y la tabla completa de lumbreras, la organización de la exploración, la hidrología, la hidráulica, la MIA-P y su comparación con la obra final, la parte económica y el riesgo. Los costos de la obra se desarrollan en el capítulo 20.

TABLA 11.1. INVENTARIO DE ESTUDIOS POR DISCIPLINA.

DISCIPLINA	QUIÉN Y CUÁNDO	QUÉ SE PUDO CONSULTAR	¿PÚBLICO?
Estudios previos y alternativas	Evaluador externo para Conagua; estudio socioeconómico de Inver Planning (2008); CFE-GEIC (2007-2009)	La evaluación completa; del resto, solo lo que la citan	Evaluación: sí. Estudio socioeconómico e informes CFE: no publicados
Topográficos y geodésicos	CFE-GEIC, 2008; contratistas durante la obra	Tabla de 25 lumbreras; método y control de la CFE-GEIC	Informe completo: no. Tabla y método: sí
Geológicos y geofísicos	CFE-GEIC, 2008	Seis formaciones por kilómetro; geofísica por lumbrera; métodos empleados	Informes completos: no

DISCIPLINA	QUIÉN Y CUÁNDO	QUÉ SE PUDO CONSULTAR	¿PÚBLICO?
Geohidrología e instrumentación	CFE-GEIC, 2008-2009	Acuíferos, censo de 240 aprovechamientos, niveles y caudales por etapa, instrumentos por lumbrera	Informes completos: no. Resumen de la propia CFE-GEIC: sí
Mecánica de suelos y geotecnia	CFE (informe 08-111-SGM/S y siguientes); proyecto ejecutivo	Resultados por lumbrera en tesis	Informes completos: no
Hidrológicos	Estudio socioeconómico (2008); tesis del Instituto de Ingeniería (2021)	Modelo SWMM con cuatro tormentas	Tesis: sí. Estudio de diseño: no publicado
Hidráulicos	Instituto de Ingeniería de la UNAM para Conagua (2010-2019)	Cuatro tesis sobre modelos físicos de la descarga	Tesis: sí. Informes del Instituto: no publicados
Impacto ambiental	Conagua (promovente), MIA-P de marzo de 2008; Semarnat, resolutivo de junio de 2008	MIA-P completa y resolutivo	Sí, en el repositorio de la DGIRA
Factibilidad y económicos	Inver Planning (2008); CFE (2009); ASF (2019, 2022)	Programa de inversión de la MIA-P; montos de la ASF	Auditorías: sí. Estudios económicos: no publicados
Riesgo	MIA-P (2008); artículos académicos (2015-2016); evaluación K131	Escenarios de inundación, InSAR, riesgos laborales	Sí, salvo el estudio socioeconómico

01

Estudios previos y alternativas evaluadas

EVALUACIÓN DE DISEÑO DEL PROGRAMA K131 (2013): TEO FRENTE A EMISOR CENTRAL II

La Conagua contrató por adjudicación directa una evaluación externa de diseño del programa presupuestario K131, "Túnel Emisor Oriente y Central y Planta de Tratamiento Atotonilco". La hizo la M. C. Blanca Margarita Montiel Batalla, con dos

colaboradores, por un costo de 104,000 pesos, y el seguimiento correspondió a la Gerencia de Planificación Hídrica de la Subdirección General de Planeación. El informe final es de septiembre de 2013, consta de 65 páginas y está en el portal de transparencia presupuestaria de la Secretaría de Hacienda.

Es una evaluación de gabinete, con información proporcionada por la dependencia, que contesta 19 preguntas siguiendo los términos de referencia de las evaluaciones de diseño. No calcula, no explora el subsuelo y no revisa el trazo. Su valor es que deja por escrito, con fuente oficial, cuál fue el problema que se quiso resolver y qué alternativas se consideraron.

La evaluación documenta tres hechos que sostienen la decisión de construir el TEO. El primero es la pérdida de capacidad del Túnel Emisor Central: tras 19 años de operación continua sin mantenimiento mayor, se estimó que bajó de 170 a 110 m³/s, con la posibilidad de un colapso que causaría una inundación generalizada en el centro y oriente de la Ciudad de México. El segundo es que la capacidad conjunta del sistema de drenaje cayó de 280 m³/s en 1975 a 195 m³/s en 2010, atribuida a un hundimiento promedio de más de 4 m entre 1975 y 2007, mientras se extrae del acuífero más del doble de lo que se recarga. El tercero es la población en riesgo si el Emisor Central fallara: de 124,976 habitantes en el escenario menos severo (cota 2227) a 3,920,481 en el más severo, en 9 delegaciones del Distrito Federal y 4 municipios del Estado de México.

También reproduce la justificación institucional que aparece en el Libro Blanco de la Conagua (2018, pp. 33-34; K131, pp. 38-42): el Memorándum de Entendimiento del 21 de octubre de 1996, el convenio marco con el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la asesoría técnica y la decisión del Comité Técnico del Fideicomiso 1928 de dar prioridad al mejoramiento del drenaje principal.

TABLA 11.2. DATOS DEL ESTUDIO SOCIOECONÓMICO QUE RESPALDA AL TEO SEGÚN LA EVALUACIÓN K131

CONCEPTO	DATO
Documento	"Estudio socioeconómico de la construcción del Túnel Emisor Oriente...", elaborado en 2008 por Inver Planning Consultores, S.C.

CONCEPTO	DATO
Zona de influencia	9 delegaciones del Distrito Federal y 4 municipios del Estado de México (Nezahualcóyotl, Ecatepec de Morelos, Chalco y Valle de Chalco Solidaridad)
Proyección de población	De 2005 a 2042, con datos del Conapo
Gasto de diseño que menciona la evaluación	150 m ³ /s de aguas residuales y pluviales
Escenarios de inundación	Delimitados por cota con áreas inundables del Instituto de Ingeniería de la UNAM
Población afectada	De 124,976 (cota 2227) a 3,920,481 habitantes (escenario más severo)

Este es el pasaje de las fuentes consultadas que dice más claramente qué se comparó antes de elegir el TEO. La evaluación cita el apartado 1.5 "Análisis de alternativas" del estudio socioeconómico de 2008 (p. 6 de ese estudio) y contrapone dos túneles técnicamente equivalentes.

TABLA 11.3. ALTERNATIVAS TÉCNICAS EVALUADAS ANTES DEL TEO

ALTERNATIVA	CAPACIDAD DE DESALOJO	LONGITUD	DIFERENCIA QUE SEÑALA LA FUENTE	RESULTADO
i) Túnel Emisor Oriente	150 m ³ /s	Aproximadamente igual a la otra	Su trazo está casi todo en zona federal	Elegida ("la idónea")
ii) Túnel Emisor Central II	150 m ³ /s	Aproximadamente igual a la otra	Requeriría afectar predios para ubicar las lumbreras	Descartada

La razón de la decisión no fue hidráulica ni geotécnica sino de tenencia del suelo: con la misma capacidad y casi la misma longitud, el TEO permitía construir las lumbreras en terrenos federales y el Emisor Central II no. A esto se suma un argumento operativo: el TEO se concibió para trabajar en forma alterna con el Emisor Central durante el estiaje, lo que permite inspeccionar y dar mantenimiento a ambos.

El texto de la evaluación solo menciona dos alternativas de drenaje profundo; no trata la captación pluvial, la recarga de acuíferos ni la infraestructura verde como sustitutos parciales.

La tenencia de predios es una razón válida para elegir entre dos túneles de igual capacidad y longitud: evitar la compra de terrenos para las lumbreras simplifica el trámite y reduce el riesgo social, y los predios y los accesos figuran entre los primeros factores que detienen un frente. Para una obra que terminó con un contrato de 20,702.8 millones de pesos, la comparación se limitó a dos túneles y a la tenencia del suelo, sin una alternativa que redujera el volumen que entra al drenaje (regulación o captación pluvial) ni un cotejo de costos entre los dos túneles.

INGENIERÍA BÁSICA DE LA CFE (2007-2009): ONCE INFORMES FINALES

La Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) de la CFE hizo los estudios de factibilidad técnica e ingeniería básica del TEO. Las visitas de campo para ubicar lumbreras comenzaron en diciembre de 2007, las actividades formales en enero de 2008 y el proyecto, "la primera etapa", se dio por concluido en diciembre de 2008. Los informes de geotecnia llevan clave de la Subgerencia de Geotecnia y Materiales: el primero, "08-111-SGM/S", cubre el túnel de la lumbrera L-0 a la L-5.

La GEIC es la unidad de la CFE que reúne los servicios de ingeniería civil y ciencias de la Tierra de la empresa; su manual de organización la describe con veintidós disciplinas, bajo la Dirección de Proyectos de Inversión Financiada desde el acuerdo de la Junta de Gobierno 73/2007 de julio de 2007. Se organiza en subgerencias: la de Estudios Geológicos (departamentos de Geofísica, Geohidrología, Geología y Sismotectónica), la de Estudios Hidrográficos (Hidrometeorología, Oceanografía y Topografía y Batimetría), la de Geotecnia y Materiales (Materiales, Mecánica de Rocas e Inyecciones y Mecánica de Suelos) y la de Comportamiento de Estructuras (Instrumentación e Ingeniería Electromecánica). Su objetivo declarado es dar confiabilidad a las obras de infraestructura mediante estudios técnicos y consultoría para su diseño, construcción y operación. Por eso pudo hacer para Conagua, con sus propios departamentos de geología, geofísica, geotecnia, topografía e hidrometeorología, la ingeniería básica del TEO.

Los once departamentos de la GEIC entregaron cada uno un "Informe final", y el de Geomática los integró en un sistema de información geográfica, el SIGTEO, con coordenadas UTM en el datum WGS84 acordado con Topografía. El trabajo se organizó

en cinco etapas de estudio, de la lumbrera L0TEO al portal de salida. El árbol de capas del SIGTEO, que se ve en la imagen de apertura de este capítulo, enumera las disciplinas. El SIG integra imágenes satelitales QuickBird, cartografía topográfica 1:250,000 y 1:50,000, modelos digitales de terreno, visualización en 3D y capas de ductos de Pemex, vías férreas y líneas de transmisión para analizar los sitios de lumbrera.

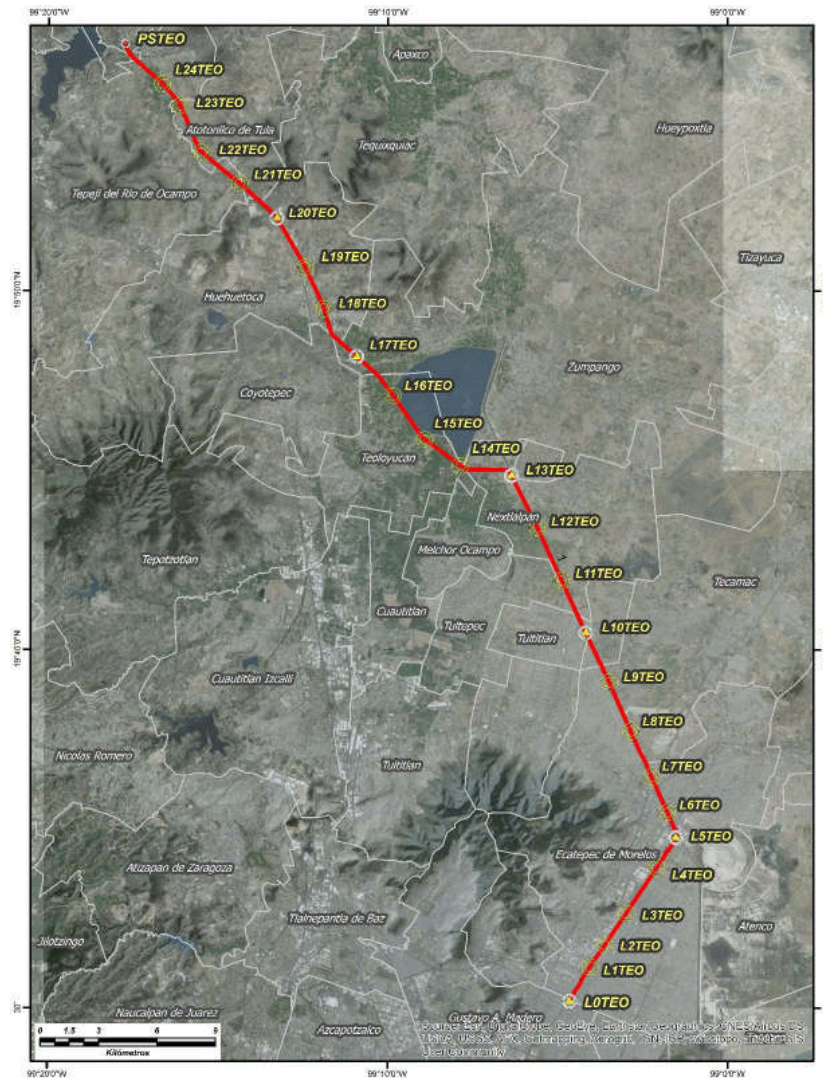


Figura 11.2. Localización del proyecto TEO en la cartografía de ingeniería básica



Figura 11.3. Informe final de los estudios geohidrológicos de ingeniería básica

TABLA 11.4. LOS ONCE INFORMES FINALES DE LA CFE-GEIC (2008) Y LO QUE INTEGRA CADA UNO EN EL SIGTEO

DEPARTAMENTO	CONTENIDO DESCRITO
Topografía	Plantas y perfiles; configuraciones de puentes y plantas de bombeo; apoyo a Geofísica; configuración topográfica; planos generales; informe topográfico
Geología	Modelo geológico-geofísico de L24TEO a L24TEO y portal de salida; exploración geológica superficial; descripción litológica de barrenos; estudio petrográfico; sección geológica y geología regional
Geohidrología	Abatimiento de pozos y recuperación hidrostática; pozos, pozos de observación y piezómetros; modelo hidrogeológico conceptual de todo el trazo

DEPARTAMENTO	CONTENIDO DESCRITO
Mecánica de suelos	Estudios geotécnicos de la trayectoria y de las lumbreras; 24 barrenos, cada uno con informe, figuras y anexos
Estructuras de concreto y acero (Seguridad y Estructuras)	Catálogos conceptuales de ingeniería básica de cada lumbrera, con materiales y especificaciones de resistencia y durabilidad
Ingeniería ambiental	Bancos de tiro, legislación sobre residuos de excavación, uso de suelo y tenencia de los predios propuestos; fichas de volumen aproximado de excavación por lumbrera
Geofísica	Exploración geofísica, georradar, sondeos eléctricos verticales, tomografías, registros de pozos, propiedades elástico-dinámicas de barrenos
Concretos	Agresividad del suelo y del agua (cloruros, sulfatos, pH) y recomendaciones para los concretos
Perforación	Barrenos a distintas profundidades y análisis de núcleos; 13 reportes de avance, 24 sondeos programados en cinco etapas e informe final
Instrumentación	Piezómetros por etapa, pozos de observación, extensómetros, informe fotográfico e informe general
Geomática	SIG del proyecto, ortofotos, cartografía, censo de población por AGEB, bancos de tiro

Las cinco etapas de estudio no coinciden con los seis tramos constructivos: las primeras son de exploración y los segundos de excavación. Las longitudes de las etapas de la ingeniería básica coinciden con las del anteproyecto de la MIA-P (13.471, 14.122, 10.694, 10.777 y 12.617 km, suma 61.681 km, cálculo propio) y con las que da el informe de Geomática, lo que confirma que ambos documentos describen el mismo anteproyecto. El mapa de bancos de tiro de la propia MIA-P está firmado por el Departamento de Ingeniería Ambiental de la GEIC con fecha de marzo de 2008, de modo que la ingeniería básica y la MIA-P se prepararon en paralelo.

TABLA 11.4A. ETAPAS DE LA INGENIERÍA BÁSICA

ETAPA DE ESTUDIO	LONGITUD APROX.	ÁREA DE ESTUDIO	INICIO Y FIN
1	13.5 km	101 km ²	De GAM y col. Altavilla a col. Las Salinas, Ecatepec
2	14 km	84 km ²	De col. El Progreso, Ecatepec, a límites de Nextlalpan

ETAPA DE ESTUDIO	LONGITUD APROX.	ÁREA DE ESTUDIO	INICIO Y FIN
3	10.6 km	66.3 km ²	De Nextlalpan a Santo Tomás, junto a laguna de Zumpango (Teoloyucan)
4	11 km	81.5 km ²	Límites Estado de México e Hidalgo: Zumpango, Coyotepec, Teoloyucan, Huehuetoca, Tepeji del Río, Atotonilco de Tula
5	12 km	96 km ²	Incluye el portal de salida; de Tepeji del Río a El Salto

La tesis de Salazar Enciso no presenta un orden único de los estudios, pero permite reconstruir la secuencia con que se trabajó en 2008:

1. Conagua, como cliente, pidió a la GEIC trabajos de cartografía base, topografía, perforación, estudios geológicos y geofísicos, geotécnicos, ambientales, geohidrológicos, de instrumentación y de concreto y acero.
2. Topografía abrió el trabajo. Fue "la disciplina de avanzada" y sus levantamientos de precisión, con estación total, fijaron el trazo oficial que usaron las demás.
3. Con el trazo y la cartografía se programaron las perforaciones: 24 sondeos para las cinco etapas, con 13 reportes de avance. Los núcleos extraídos fueron insumo de los análisis petrográficos, geológicos, geofísicos y geohidrológicos, y después los barrenos se instrumentaron con sensores para vigilar anomalías del subsuelo.
4. En paralelo, Geomática integró la información en ocho actividades (A a H en el diagrama): cartografía digital del INEGI georreferenciada a UTM, verificación de escalas 1:250,000, 1:50,000 y 1:5,000, generación del SIG, parcelario del Registro Agrario Nacional, maqueta virtual, clasificación de imágenes de satélite, levantamientos de campo para actualizar la cartografía e integración multidisciplinaria. Cada actividad tuvo entrega parcial con respaldo en DVD y revisión del cliente.
5. Con los resultados de todas las áreas se desarrolló la ingeniería básica, que se entregó al cliente para revisión antes de pasar a la construcción. Los informes de concreto y acero dejaron recomendaciones de materiales para el proyecto ejecutivo y la ejecución de obra.

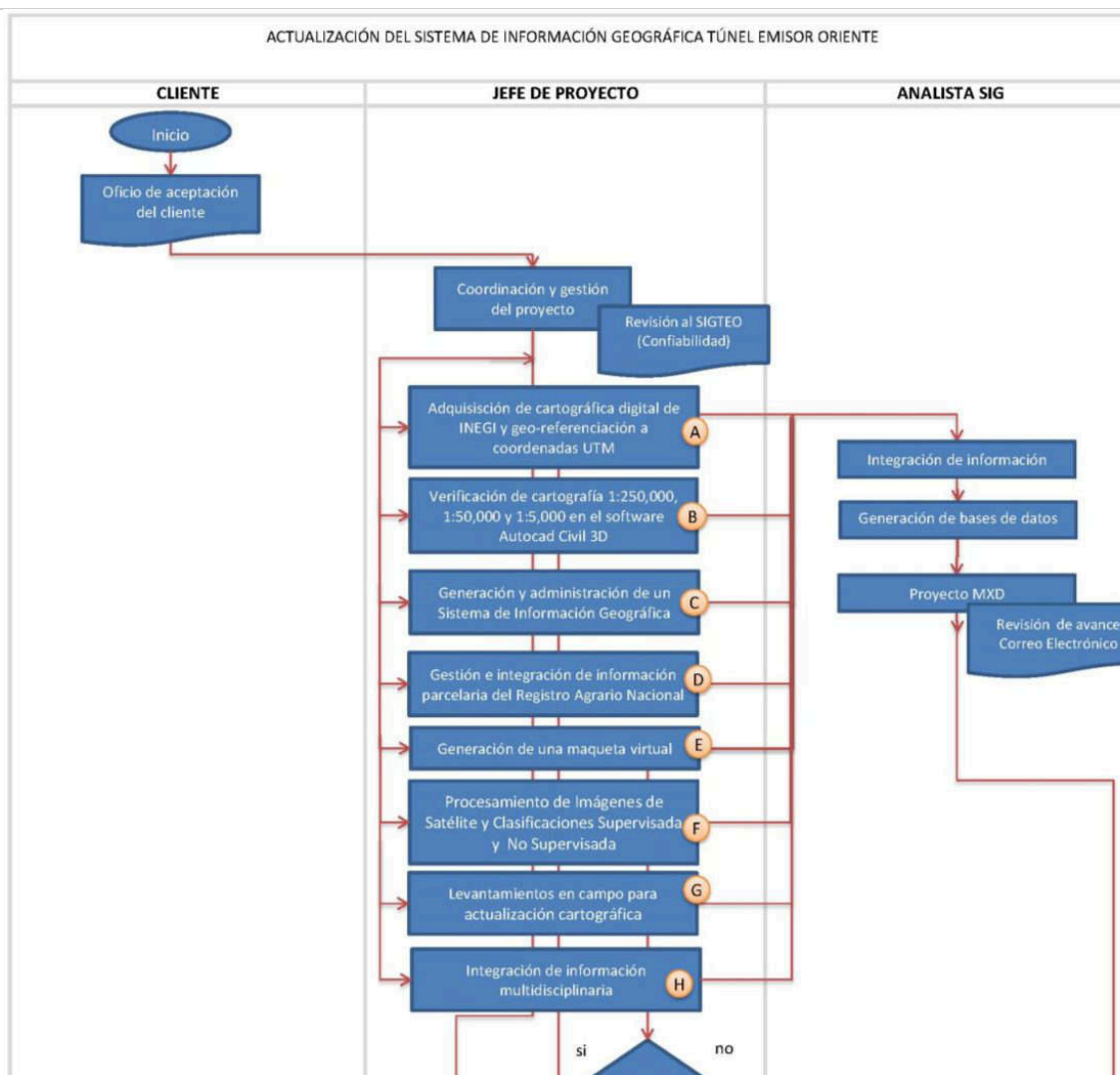


Figura 11.4. Secuencia de actividades del SIGTEO, de la aceptación del cliente a la integración

Los métodos y resultados que describen estos informes se resumen en la sección 5.1.5.

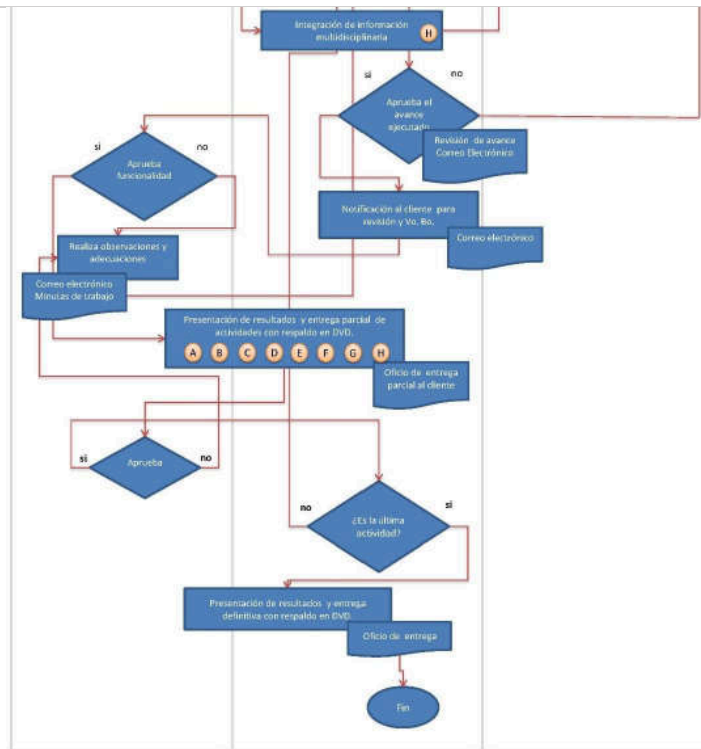


Figura 11.5. Aprobaciones y entregas parciales y final de los estudios del SIGTEO

PROYECTO EJECUTIVO Y EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El proyecto ejecutivo no fue un estudio aparte sino parte del contrato de obra: el contrato SGAPDS-GIHP-DFMEXHGO-08-008-RF-AD, firmado el 14 de noviembre de 2008, tiene por objeto "la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción" del túnel, a precio mixto y tiempo determinado. Por eso la ingeniería básica de la CFE llegó a la contratista como antecedente y la contratista la complementó en sitio.

Las auditorías muestran cómo funcionó esa complementación. En el concepto extraordinario EXT-1164, "ingeniería complementaria" para la excavación entre las lumbreras L-13 y L-17, la propia Conagua explicó a la Auditoría Superior de la Federación (ASF) que las condiciones reales encontradas en los campamentos de esas lumbreras difirieron de las previstas en la ingeniería básica (dimensiones, geometría de la superficie, geología), lo que obligó a diseñar de nuevo las cimentaciones de los equipos. La ASF no lo aceptó como justificación de pago y mantuvo un pliego de observaciones por 2,692.6 miles de pesos. En la revisión de la cuenta pública 2021 la ASF volvió a observar

pagos por ingeniería complementaria (conceptos EXT-1564 y EXT-1565) por 320.9 miles de pesos, porque el alcance ya estaba incluido en la partida de diseño ejecutivo del precio alzado.

La exploración no terminó en 2008: hubo una fase de proyecto ejecutivo y otra de exploración selectiva durante la obra. El detalle por lumbrera está en el capítulo 12. El proyecto ejecutivo, con sus memorias de cálculo y planos, concibió un sistema de auscultación que aprovechó la instrumentación de la ingeniería básica y colocó otra complementaria mientras se desarrollaban los criterios de diseño: topografía superficial (bancos de nivel profundos, mojoneras, puntos de referencia fijos y pernos), inclinómetros en terreno natural y en los sitios de lumbrera para vigilar desplazamientos verticales y horizontales, piezometría (tubos de observación, piezómetros eléctricos y piezómetros abiertos), piezoceldas para la presión del subsuelo y extensómetros de barra. Con ello se buscaban tres cosas: conocer el comportamiento teórico de las estructuras bajo cargas normales y extraordinarias para evaluar su seguridad, detectar a tiempo deficiencias de comportamiento y aportar al estado del arte del diseño y la construcción geotécnica de túneles. Según los autores, que participaron en el proyecto, esa instrumentación permitió contrastar las hipótesis y los resultados del cálculo, lo que repercutió en un diseño correcto, en el cuidado de la población y de las estructuras vecinas y en el cumplimiento de la normatividad ambiental. La contrastación no evitó todas las sorpresas: en la lumbrera L-12 el caudal previsto fue unas 130 veces menor que el real (4.6 frente a más de 600 L/s; capítulo 12).

LIBRO BLANCO DE LA CONAGUA

La Conagua publicó en noviembre de 2018 el Libro Blanco "Construcción del Túnel Emisor Oriente", que documenta de forma cronológica las acciones conceptuales, legales, presupuestarias, administrativas y operativas de la obra y sus resultados. La evaluación K131 ya lo citaba como Libro Blanco CONAGUA-05. Los lineamientos de la Secretaría de la Función Pública de 2011 establecen que estos documentos son información pública y que su documentación de soporte se rige por la ley de transparencia.

LA INGENIERÍA BÁSICA SEGÚN LA CFE-GEIC Y LA UNAM

En junio de 2007 la Coordinación General de los Proyectos de Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento del Valle de México de la Conagua pidió a la GEIC los estudios de ingeniería básica que sirvieran para elaborar el proyecto ejecutivo y construir el TEO; la Conagua era la responsable de la coordinación técnica del proyecto dentro del fideicomiso 1928. La descripción de ese trabajo se publicó en el número 30 de Obras Subterráneas, la revista de la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas (AMITOS), a cargo de la ingeniera Evangelina Gutiérrez Ayala, jefa de la oficina de Estructuras de Materiales Téreos de la GEIC, y del doctor José Anselmo Pérez Reyes, catedrático de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Resume los informes sin reproducir perfiles de sondeos, resultados de laboratorio ni tablas completas de lecturas.

Para la ingeniería básica la GEIC hizo exploración geotécnica (sondeos de penetración estándar, de cono eléctrico y mixtos con muestreo de suelos y rocas), exploración geológica (recorridos de campo, identificación de formaciones y estructuras superficiales y revisión detallada de las muestras), geofísica (sondeos eléctricos verticales y registros eléctricos de pozos), geohidrología (censos y mediciones en los aprovechamientos de agua alrededor del trazo) y piezometría con los instrumentos instalados en los sitios de lumbrera. Todo se apoyó en topografía de campo, fotografías satelitales de alta resolución y fotogrametría, con las que se definieron el trazo y la ubicación de las lumbreras.

La ingeniería básica se dividió en cinco etapas de longitud parecida: de la L0 a la L7, de la L7 a la L12, de la L12 a la L16, de la L16 a la L20 y de la L20 al portal de salida. Con los cadenamientos del perfil geológico que publica Lombardo Aburto (2021, p. 9), esas etapas miden 13.49, 14.12, 10.93, 11.10 y 12.17 km, con una suma de 61.80 km (cálculo propio); ese perfil da 61+803 para el portal, unos 0.6 km menos que la tabla 11.8. Difieren de las longitudes del anteproyecto de la MIA-P que da la sección 5.1.2 porque el trazo se afinó después.

Al terminar esta fase se entregaron a la Conagua, además de los informes, el diseño preliminar de la instrumentación tipo para las lumbreras y el túnel de la primera etapa, recomendaciones y guías de instalación para las demás lumbreras, las fichas de instalación

y los registros iniciales de medición. Todo se presentó en reuniones técnicas CFE-Conagua-COMISSA.

El carácter de esta etapa fue el de una campaña de reconocimiento muy amplia (24 lumbreras instrumentadas, unos 140 bancos de nivel, 240 aprovechamientos de agua censados) más que el de un conjunto de ensayos para diseñar. Para el proyecto ejecutivo se recomendaron pruebas de permeabilidad, aforo y bombeo en los sitios peculiares, y pruebas de bombeo para conocer el radio de influencia y el comportamiento del acuífero: los caudales de bombeo no estaban definidos al terminar la ingeniería básica, como lo confirmó después la lumbrera L-12. Los resultados de geohidrología se resumen en el capítulo 12 y la instrumentación en la sección 5.4.

02

Topográficos y geodésicos

QUIÉN, CUÁNDO Y CON QUÉ MÉTODO

El Departamento de Topografía de la CFE-GEIC fue "la disciplina de avanzada" del proyecto: sus levantamientos fueron el insumo de todas las demás. Su informe final de 2008 contiene plantas y perfiles, levantamientos de puentes y plantas de bombeo, apoyo a Geofísica, configuración topográfica, planos generales e informe topográfico. Durante la obra, las constructoras y la supervisión llevaron el control topográfico propio de cada frente.

El trabajo topográfico se resume en cuatro actividades.

1. Nivelación y levantamiento de interferencias. Se nivelaron bancos auxiliares de nivel para referenciar el trazo y se levantaron los elementos que podían interferir con él (predios, calles y obstrucciones a lo largo del eje), de modo que el trazo dejara espacio para las maniobras en las lumbreras y evitara estructuras y zonas habitacionales.
2. Bancos de nivel profundo. En sitios estratégicos se instalaron como puntos de control principal, porque los bancos superficiales se hunden con el terreno en una zona de hundimiento regional. Cada uno es un patrón fijo desplantado sobre un estrato firme:

una serie de tubos de acero galvanizado cédula 40 de 1¼ pulgadas acoplados entre sí y anclados a un tubo cédula 40 de 3 pulgadas relleno de concreto (un muerto de concreto), con una camisa de lámina galvanizada que lo aísla de los asentamientos del suelo circundante y un registro de protección en el brocal. La tesina de la lumbrera L-12 da la ubicación de los de las lumbreras L-10 (profundidad de instalación de 85.0 m, apoyado en arena fina y media limosa) y L-13 (100.0 m, en arena fina y media basáltica limosa).

3. Referencia de la instrumentación. La instrumentación de la lumbrera L-12 está referida al banco de nivel "Atzacocalco", en la calle Cabo Finisterre, cerca de la avenida General Martín Carrera, colonia Nueva Atzacocalco.
4. Guiado y control durante la excavación. La tuneladora del tramo 3 se guía con una estación total motorizada que mide dos prismas, un inclinómetro de dos ejes y la carrera de los cilindros, procesados por el programa TBM3. La convergencia de los anillos ya colocados se mide con estación total (seis puntos de control por anillo) y con tiltmeters, y no debe pasar de 0.05 % del diámetro del túnel.

La CFE-GEIC describe así el control topográfico de la ingeniería básica. El trazo preliminar se ubicó con las lumbreras y los puntos de inflexión del proyecto de la Conagua, se afinó con los jefes de las disciplinas y en un recorrido de campo conjunto GEIC-Conagua, y la Conagua aprobó los sitios. Cada punto se posicionó primero con un GPS de tipo navegador y se dibujó en mapas del INEGI y en imágenes de satélite para repartirlo a las demás disciplinas. Con el eje preliminar definido se estableció el control básico: mojoneras ubicadas a partir de la Lumbrera del Río de los Remedios (LRR) conforme a las Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos vigentes del INEGI. El control vertical partió del banco de nivel M(N05-E03), llamado Atzacocalco, hacia la lumbrera L2RR, que es la L0 del TEO y ya estaba construida, con nivelación de primer orden de ida y vuelta y un nivel fijo de precisión con micrómetro. Después se niveló un banco aproximadamente cada 500 m a lo largo del trazo, además de los instalados en las zonas de lumbrera, hasta sumar unos 140 bancos. Para 61.8 km, 140 bancos equivalen a uno cada 440 m en promedio (cálculo propio). Los bancos dañados durante los estudios se repusieron en las cinco etapas, porque ese sistema era la base para localizar instrumentos, estructuras y aprovechamientos de agua y para detectar hundimientos. La

topografía fue la instrumentación primaria del proyecto: sirvió primero para ubicar el trazo y las lumbreras y, conforme avanzaron los datos, para identificar riesgos en cruces con carreteras, tuberías de Pemex y canales y definir el trazo más conveniente.

El SIG se trabajó en proyección UTM con datum ITRF-1992 al principio, por ser el oficial en México en ese momento, y se reproyectó a WGS84 por acuerdo con Topografía porque los equipos GPS están referidos a él. El mapa de bancos de tiro de la MIA-P también declara "UTM ITRF92".

LOS SEIS TRAMOS CONSTRUCTIVOS

TABLA 11.6. TRAMOS DEL TEO, LONGITUDES Y CONTRATISTAS

TRAMO	DE / A	LONGITUD (KM)	CADENAMIENTO	CONTRATISTA
I	L-00 a L-05	10.053	0+000 a 10+053.59	Ingenieros Civiles Asociados
II	L-05 a L-10	11.581	10+053 a 21+635	Ingenieros Civiles Asociados
III	L-10 a L-13	9.158	21+635 a 30+793	Carso Infraestructura y Construcción
IV	L-13 a L-17	10.201	30+793 a 40+994	Carso Infraestructura y Construcción
V	L-17 a L-20	8.769	40+994 a 49+763	Construcciones y Trituraciones
VI	L-20 a portal de salida	12.654	49+763 a 62+418	Lombardo Construcciones y Constructora Estrella

El tramo I parte de la lumbrera 2 del Túnel Interceptor Río de los Remedios, en la lumbrera L-00 (Anillo Periférico Norte y avenida Gran Canal, alcaldía Gustavo A. Madero), y el portal de salida está en Atotonilco de Tula, cerca del portal del Túnel Emisor Central.

TABLA COMPLETA DE LAS 25 LUMBRERAS

La Tabla 2.1 "Características topográficas de las lumbreras" del proyecto reúne coordenadas, cadenamiento, elevaciones y profundidades de las 25 lumbreras finales y del portal de salida (PS); el anteproyecto de la MIA-P solo trae las del anteproyecto (sección 5.2.5). La tabla se reproduce tal como aparece en la fuente, incluidas las celdas con error de captura, que se marcan con una letra y se explican en la tabla 11.8.

LUMBRERA	COORDENADAS		DIAMETRO (m)	CADENAMIENTO	DIST. AL INICIO DEL TEO	DIST. ENTRE LUMBRERA	ELEV. DE TERRENO	PENDIENTE	ELEV. DE PLANTILLA	PROF. DE LA LUMBRERA	DESNIVEL RESPECTO AL
	X	Y									
L-00	491,877.600	2,156,503.668	16.00	0+000.000	0.000	0.000	2,227.290	0.19%	2,203.997	23.293	0.000
L1-A	493,316.631	2,158,837.259	12.00	2+753.213	2,753.213	2,753.213	2,231.392	0.19%	2,198.766	37.000	-5.231
L-03	494,795.725	2,161,029.950	12.00	5+398.135	5,398.135	2,644.922	2,234.976	0.19%	2,193.741	45.140	-10.256
L-03A	495,403.802	2,161,934.143	16.00	6+487.963	6,487.963	1,089.828	2,233.305	0.19%	2,185.301	45.630	-18.696
L-04	496,363.652	2,163,361.410	12.00	8+207.963	8,207.963	1,720.000	2,234.207	0.19%	2,188.402	48.800	-15.595
L-05	497,351.965	2,164,910.750	16.00	10+053.591	10,053.591	1,845.628	2,233.613	0.19%	2,184.895	53.020	-19.102
L-06	496,924.515	2,166,212.265	12.00	11+475.642	11,475.642	1,422.051	2,237.419	0.19%	2,182.193	58.980	-21.804
L-07	496,104.980	2,168,048.522	12.00	13+486.633	13,486.633	2,010.991	2,239.835	0.1514%	2,179.149	65.000	-24.848
L-08	495,043.720	2,170,358.541	12.00	16+031.712	16,031.712	1,545.079	2,240.605	0.1514%	2,175.296	69.610	-28.701
L-09	493,911.722	2,172,932.676	12.00	18+843.767	18,843.767	2,812.055	2,240.283	0.1514%	2,171.039	73.640	-32.958
L-10	492,716.069	2,175,454.947	16.00	21+635.101	21,635.101	2,791.334	2,238.490	0.1514%	2,166.813	76.520	-37.184
L-11	491,400.522	2,178,308.083	12.00	24+776.927	24,776.927	3,141.826	2,241.476	0.1514%	2,162.057	81.710	-41.940
L-12	490,224.165	2,180,877.815	12.00	27+603.115	27,603.115	2,826.188	2,236.790	0.1514%	2,157.778	84.870	-46.219
L-13	488,820.982	2,183,722.678	16.00	10+793.443	30,793.443	3,190.328	2,239.886	0.1514%	2,152.948	94.480	-51.049
L-14	486,271.905	2,184,070.472	12.00	33+416.090	33,416.090	2,622.647	2,243.247	0.1514%	2,148.977	100.620	-55.020
L-15	484,287.533	2,185,486.468	12.00	35+865.083	35,865.083	2,448.993	2,244.271	0.1514%	2,145.269	106.120	-58.728
L-16	482,805.485	2,187,661.070	12.00	38+533.131	38,533.131	2,668.048	2,246.673	0.1514%	2,141.230	112.790	-62.767
L-17	481,176.940	2,189,483.980	16.00	40+994.886	40,994.886	2,461.755	2,249.772	0.1514%	2,137.503	119.950	-66.494
L-18	479,275.135	2,192,066.179	12.00	44+303.970	44,303.970	3,309.064	2,256.042	0.1514%	2,132.493	128.450	-71.504
L-19	478,100.279	2,194,146.990	12.00	46+696.890	46,498.890	2,394.920	2,256.691	0.1514%	2,128.867	133.520	-75.130
L-20	476,861.310	2,196,795.830	16.00	49+763.971	49,763.971	3,065.081	2,269.385	0.1514%	2,124.427	152.360	-79.570
L-21	473,634.659	2,198,966.820	12.00	53+780.414	53,780.414	4,016.443	2,218.546	0.1514%	2,117.295	120.300	-86.702
L-22	472,959.248	2,200,195.852	12.00	55+214.717	55,214.717	1,434.303	2,214.823	0.1514%	2,115.124	111.960	-88.873
L-23	470,735.025	2,201,744.565	12.00	58+012.350	58,012.350	2,797.633	2,198.488	0.1514%	2,110.907	91.690	-93.090
L-24	470,140.877	2,203,153.542	12.00	59+541.514	59,541.514	1,529.164	2,178.601	0.1514%	2,108.574	90.120	-95.423
PS	469,051.717	2,205,779.325		62+418.769	62,418.769	2,877.255	2,121.284	0.1514%	2,104.218	21.828	-99.779

Figura 11.6. Tabla de lumbreras de la tesis de De Nova y Luna, tal como aparece en la fuente

TABLA 11.7. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LAS LUMBRERAS DEL TEO Y DEL PORTAL DE SALIDA

LUMBRERA	X (M)	Y (M)	DIÁM. (M)	CADENAMIENTO	DIST. AL INICIO (M)	DIST. ENTRE LUMBRERAS (M)	ELEV. TERRENO (MSNM)	PEND.	ELI PL. (M)
L-00	491,877.600	2,156,503.668	16	0+000.000	0.000	0.000	2,227.290	0.19%	2,203.997
L-1A	493,316.631	2,158,837.259	12	2+753.213	2,753.213	2,753.213	2,231.392	0.19%	2,198.766
L-03	494,795.725	2,161,029.950	12	5+398.135	5,398.135	2,644.922	2,234.976	0.19%	2,193.741
L-03A	495,403.802	2,161,934.143	16	6+487.963	6,487.963	1,089.828	2,233.305	0.19%	2,185.301
L-04	496,363.652	2,163,361.410	12	8+207.963	8,207.963	1,720.000	2,234.207	0.19%	2,188.402
L-05	497,351.965	2,164,910.750	16	10+053.591	10,053.591	1,845.628	2,233.613	0.19%	2,184.895
L-06	496,924.515	2,166,212.265	12	11+475.642	11,475.642	1,422.051	2,237.419	0.19%	2,182.193
L-07	496,104.980	2,168,048.522	12	13+486.633	13,486.633	2,010.991	2,239.835	0.1514%	2,179.149
L-08	495,043.720	2,170,358.541	12	16+031.712	16,031.712	1,545.079 (d)	2,240.605	0.1514%	2,175.296
L-09	493,911.722	2,172,932.676	12	18+843.767	18,843.767	2,812.055	2,240.283	0.1514%	2,171.039
L-10	492,716.069	2,175,454.947	16	21+635.101	21,635.101	2,791.334	2,238.490	0.1514%	2,166.813
L-11	491,400.522	2,178,308.083	12	24+776.927	24,776.927	3,141.826	2,241.476	0.1514%	2,162.057
L-12	490,224.165	2,180,877.815	12	27+603.115	27,603.115	2,826.188	2,236.790	0.1514%	2,157.778
L-13	488,820.982	2,183,722.678	16	10+793.443 (a)	30,793.443	3,190.328	2,239.886	0.1514%	2,152.948
L-14	486,271.905	2,184,070.472	12	33+416.090	33,416.090	2,622.647	2,243.247	0.1514%	2,148.977

LUMBRERA	X (M)	Y (M)	DIÁM. (M)	CADENAMIENTO	DIST. AL INICIO (M)	DIST. ENTRE LUMBRERAS (M)	ELEV. TERRENO (MSNM)	ELI PL. PEND. (M)
L-15	484,287.533	2,185,486.468	12	35+865.083	35,865.083	2,448.993	2,244.271	0.1514% 2,14
L-16	482,805.485	2,187,661.070	12	38+533.131	38,533.131	2,668.048	2,246.673	0.1514% 2,14
L-17	481,176.940	2,189,483.980	16	40+994.886	40,994.886	2,461.755	2,249.772	0.1514% 2,13
L-18	479,275.135	2,192,066.179	12	44+303.970	44,303.970	3,309.064	2,256.042	0.1514% 2,13
L-19	478,100.279	2,194,146.990	12	46+696.890 (c)	46,498.890 (c)	2,394.920	2,256.691	0.1514% 2,12
L-20	476,861.310	2,196,795.830	16	49+763.971	49,763.971	3,065.081	2,269.385	0.1514% 2,12
L-21	473,634.659	1,198,966.820 (b)	12	53+780.414	53,780.414	4,016.443	2,218.546	0.1514% 2,11
L-22	472,959.248	2,200,195.852	12	55+214.717	55,214.717	1,434.303	2,214.823	0.1514% 2,11
L-23	470,735.025	2,201,744.565	12	58+012.350	58,012.350	2,797.633	2,198.488	0.1514% 2,11
L-24	470,140.877	2,203,153.542	12	59+541.514	59,541.514	1,529.164	2,178.601	0.1514% 2,10
PS	469,051.717	2,205,779.325		62+418.769	62,418.769	2,877.255	2,121.284	0.1514% 2,10

Con los valores de la fuente, la tabla describe 25 lumbreras más el portal de salida. Por diámetro, son 18 de 12 m y 7 de 16 m (L-00, L-03A, L-05, L-10, L-13, L-17 y L-20); ninguna es de 18 m. La profundidad de cada lumbrera es la diferencia entre la elevación del terreno y la de la plantilla del túnel:

$$H = z_{\text{terreno}} - z_{\text{plantilla}}$$

donde H es la profundidad de la lumbrera (m), z_{terreno} la elevación del terreno (msnm) y $z_{\text{plantilla}}$ la elevación de la plantilla del túnel en esa lumbrera (msnm). En L-00, $H = 2,227.290 - 2,203.997 = 23.293$ m. Las profundidades van de 23.293 m (L-00) a 152.360 m (L-20), con un promedio de 85.0 m (cálculo propio).

La plantilla baja 99.779 m entre L-00 y el portal a lo largo de 62,418.769 m, de modo que la pendiente media es

$$S = \frac{\Delta z}{L} = \frac{2,203.997 - 2,104.218}{62,418.769} = 0.00160$$

donde S es la pendiente media (adimensional), Δz el desnivel de la plantilla entre L-00 y el portal (m) y L la longitud acumulada hasta el portal (m). Esto equivale a 0.160 %. La fuente asigna una pendiente de 0.19 % hasta L-06 y de 0.1514 % de ahí al portal. El

canal de salida del modelo físico del Instituto de Ingeniería usa 0.0015139, que es la misma pendiente expresada como fracción, y la ASF da una pendiente aproximada de 0.0016, es decir, 1.6 m/km. El terreno más alto de las lumbreras está en L-20 (2,269.385 msnm) y el más bajo en el portal (2,121.284 msnm).

VERIFICACIÓN ARITMÉTICA DE LA TABLA

La tabla trae columnas redundantes (cadenamiento, distancia al inicio y distancia entre lumbreras) que se pueden comparar entre sí y contra las coordenadas. La verificación aritmética detecta cuatro errores de captura (L-13, L-19, L-21 y L-08); los resultados son cálculo propio.

TABLA 11.8. ERRORES DE CAPTURA DETECTADOS EN LA TABLA 2.1 DE LA TESIS

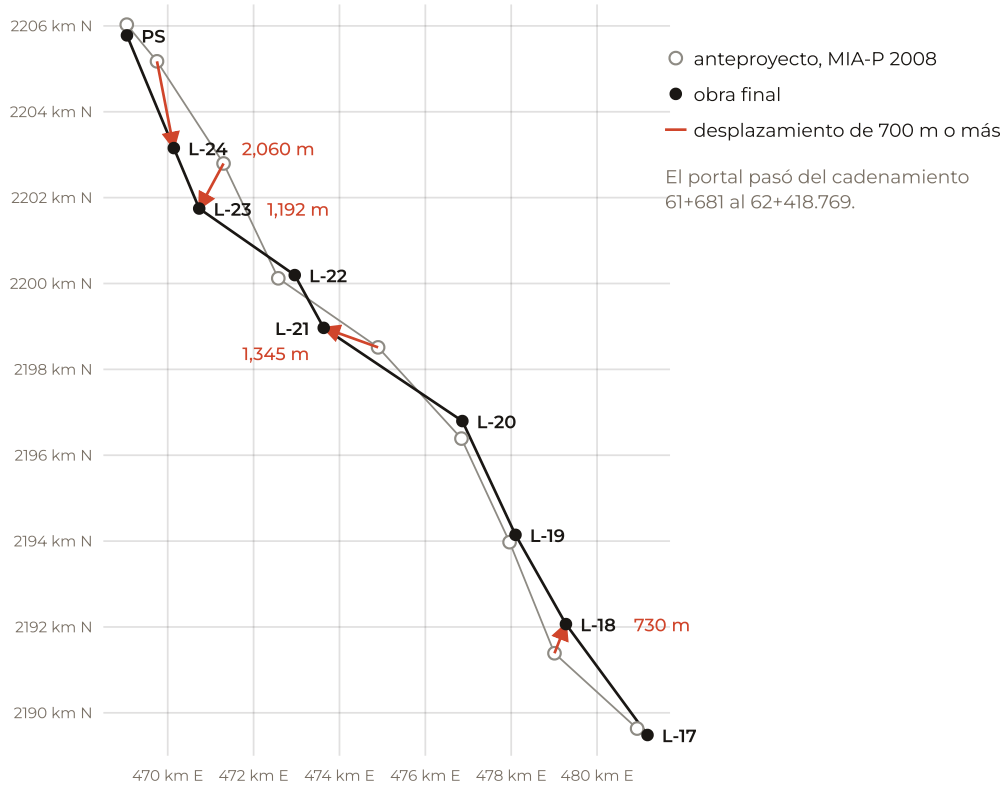
MARCA	LUMBRERA	CAMPO	VALOR EN LA FUENTE	VALOR PROBABLE	CÓMO SE DETECTÓ
(a)	L-13	Cadenamiento	10+793.443	30+793.443	Su distancia al inicio es 30,793.443 m y L-12 está en 27+603.115 con 3,190.328 m hasta L-13 ($27,603.115 + 3,190.328 = 30,793.443$). El texto de la tesis también ubica el límite de los tramos III y IV en 30+793.
(b)	L-21	Coordenada Y	1,198,966.820	2,198,966.820	Las lumbreras vecinas tienen Y de 2,196,795.830 (L-20) y 2,200,195.852 (L-22). Con el valor corregido, la distancia en planta L-20 a L-21 es de unos 3.9 km, compatible con los 4,016.443 m de distancia entre lumbreras; con el valor de la fuente sería de casi 1,000 km.
(c)	L-19	Distancia al inicio	46,498.890	46,698.890	$44,303.970$ (L-18) + $2,394.920 = 46,698.890$. Con ese valor también cuadra la siguiente suma: $46,698.890 + 3,065.081 = 49,763.971$ (L-20).
(c)	L-19	Cadenamiento	46+696.890	46+698.890	Mismo cálculo; la diferencia es de 2 m.
(d)	L-08	Distancia entre lumbreras	1,545.079	2,545.079	$16,031.712 - 13,486.633 = 2,545.079$; la distancia en planta de L-07 a L-08 es de unos 2.5 km.

El error de L-19 en la distancia al inicio no es el mismo que el de su cadenamiento: la columna de distancia está 200 m por debajo del valor consistente y el cadenamiento 2 m. Los demás renglones cumplen que el cadenamiento coincide con la distancia al inicio, salvo diferencias de centésimas, como en L-18 (44,303.970 contra una suma de 44,303.950). La tabla es utilizable con las correcciones de la tabla 11.8.

ANTEPROYECTO DE LA MIA-P FRENTE A LA TABLA FINAL

Lumbreras del tramo final: anteproyecto y obra

planta en coordenadas UTM; rejilla de 2 km



Elaboración propia con datos de Semarnat (2008a, tablas II.3-II.7) y De Nova y Luna (2014, p. 34); Y de L-21 corregida; separaciones, cálculo propio.

Figura 11.7. Lumbreras del anteproyecto frente a las de la obra final, de L-17 al portal

La MIA-P de 2008 trae las coordenadas de 24 lumbreras y del portal de salida del anteproyecto, lo que permite medir cuánto se movieron los sitios entre el anteproyecto y la obra. La Tabla 11.9 compara las lumbreras que conservan el mismo nombre. Las coordenadas de la MIA-P de L8 a L19 están redondeadas a metros enteros. El nombre no garantiza que sea el mismo sitio: la obra final añadió lumbreras (L-1A, L-03A) y cambió la distribución, así que las diferencias grandes deben leerse como cambio de ubicación o de numeración, y no necesariamente como un error.

TABLA 11.9. SEPARACIÓN ENTRE LAS LUMBRERAS DEL ANTEPROYECTO (MIA-P) Y LAS DE LA TABLA FINAL

LUMBRERA MIA-P	LUMBRERA FINAL	X MIA (M)	Y MIA (M)	X FINAL (M)	Y FINAL (M)	SEPARACIÓN (M)
LOTEO	L-00	491,878	2,156,504	491,878	2,156,504	0
L3TEO	L-03	494,796	2,161,030	494,796	2,161,030	0

LUMBRERA MIA-P	LUMBRERA FINAL	X MIA (M)	Y MIA (M)	X FINAL (M)	Y FINAL (M)	SEPARACIÓN (M)
L4TEO	L-04	496,362	2,163,363	496,364	2,163,361	2
L5TEO	L-05	497,363	2,164,948	497,352	2,164,911	39
L6TEO	L-06	496,917	2,166,209	496,925	2,166,212	8
L7TEO	L-07	496,097	2,168,045	496,105	2,168,049	8
L8TEO	L-08	495,020	2,170,394	495,044	2,170,359	43
L9TEO	L-09	493,905	2,172,942	493,912	2,172,933	11
L10TEO	L-10	492,710	2,175,464	492,716	2,175,455	11
L11TEO	L-11	491,467	2,178,154	491,401	2,178,308	168
L12TEO	L-12	490,216	2,180,884	490,224	2,180,878	10
L13TEO	L-13	488,900	2,183,552	488,821	2,183,723	188
L14TEO	L-14	486,273	2,184,091	486,272	2,184,070	21
L15TEO	L-15	484,448	2,185,408	484,288	2,185,486	179
L16TEO	L-16	482,806	2,187,660	482,805	2,187,661	1
L17TEO	L-17	480,935	2,189,634	481,177	2,189,484	285
L18TEO	L-18	479,007	2,191,387	479,275	2,192,066	730
L19TEO	L-19	477,961	2,193,977	478,100	2,194,147	220
L20TEO	L-20	476,842	2,196,388	476,861	2,196,796	408
L21TEO	L-21	474,901	2,198,514	473,635	2,198,967	1,345
L22TEO	L-22	472,575	2,200,120	472,959	2,200,196	392
L23TEO	L-23	471,299	2,202,795	470,735	2,201,745	1,192
L24TEO	L-24	469,749	2,205,176	470,141	2,203,154	2,060
PSTE0	PS	469,045	2,206,031	469,052	2,205,779	252

En 12 de las 24 lumbreras comparadas la separación es menor de 50 m, en L-03 las coordenadas de la MIA-P y de la tabla final son idénticas y en L-00 difieren apenas 0.11 m (cálculo propio). Los cambios importantes están al final del trazo: L-18 (730 m), L-21 (1,345 m), L-23 (1,192 m) y L-24 (2,060 m). El nombre L24TEO del anteproyecto estaba en el cadenamamiento 60+574 y el portal "PS2TEO" en 61+681, mientras que la tabla final pone L-24 en 59+541.514 y el portal en 62+418.769. Es decir, el tramo final cambió de trazo o de numeración respecto al anteproyecto.

DIMENSIONES GENERALES

TABLA 11.10. DIMENSIONES GENERALES DEL TEO QUE SE ADOPTAN EN ESTE DOCUMENTO

CONCEPTO	VALOR
Longitud	62.4 km aproximados (62,418.769 m al portal)
Diámetro interior	7.0 m
Lumbreras	25 (15 de 12 m, 9 de 16 m y 1 de 18 m)
Profundidad	25 a 150 m (23.3 a 152.4 m en la tabla de lumbreras)
Pendiente	0.0016 (aproximada)

La tabla de lumbreras, con las correcciones de la tabla 11.8, reúne las coordenadas, cadenamientos y profundidades de la obra final. El método y el control topográfico de la CFE-GEIC se describen en la sección 5.2.1.

03

Geológicos y geofísicos

Los departamentos de Geología y de Geofísica de la CFE-GEIC trabajaron en 2008 sobre el trazo completo, de la lumbrera L0TEO a la L24TEO y al portal de salida. Después, el proyecto ejecutivo y la propia excavación fueron corrigiendo el modelo: la geología original se basó en 64 barrenos a lo largo del túnel y en seis sitios de cruce, y "la geología real" se revisó varias veces, lo que exigió modificar máquinas y estrategias.

La exploración geológica y la geofísica fueron importantes para interpretar las mediciones del sistema de auscultación y para localizar las estructuras geológicas, como fallas y derrames basálticos, que se encontraron en el trazo. Los métodos se explican en el capítulo 4.

Geología integró un modelo geológico-geofísico con descripción litológica de barrenos, estudio petrográfico, secciones geológicas y geología regional por etapa. Geofísica hizo exploración geofísica en lumbreras para detectar cualquier infraestructura o variación de

estratos, georradar para localizar tuberías en los predios, sondeos eléctricos verticales, tomografías eléctricas, secciones magnetométricas y geoeléctricas, registros geofísicos de pozos y propiedades elástico-dinámicas de barrenos. En los estudios previos al diseño se usaron además los métodos de pozo "cross-hole" y SPAC para obtener perfiles de ondas P y S.

Las seis formaciones que cruza el túnel, las tres zonas geotécnicas, las fallas Zumpango Norte y Tepotzotlán y el perfil geológico general se presentan en el capítulo 12.

Los resultados de la geofísica por lumbrera se presentan en el capítulo 12. En la lumbrera L4TEO hubo pozo de observación, líneas geofísicas y sondeos eléctricos verticales alrededor del trazo (primera imagen); en la L8TEO se hicieron seis perfiles magnetométricos y tres tomografías de resistividad eléctrica de 30 m de longitud sobre el eje del túnel (segunda imagen); y en la L-12, el pozo de bombeo PB-3 se complementó con un registro eléctrico de 10 curvas para identificar el tipo de suelo y las zonas permeables.

Las cifras de exploración del subsuelo corresponden a alcances distintos.

TABLA 11.11. CIFRAS DE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO.

CIFRA	ALCANCE
"Alrededor de 250 barrenos", 25 mil m en total	Exploración geológica y geotécnica "en un principio"
64 barrenos y seis sitios de cruce	Base de la geología original
24 barrenos, cada uno con informe, figuras y anexos; 24 sondeos programados en cinco etapas	Ingeniería básica de la CFE
Al menos 2 sondeos por lumbrera (continuo con cono eléctrico, SPT, piezocono o mixto)	Estudios de la L-04 y demás lumbreras

El detalle por tramo y por lumbrera, con perfiles estratigráficos, parámetros y fotografías, está en el capítulo 12.

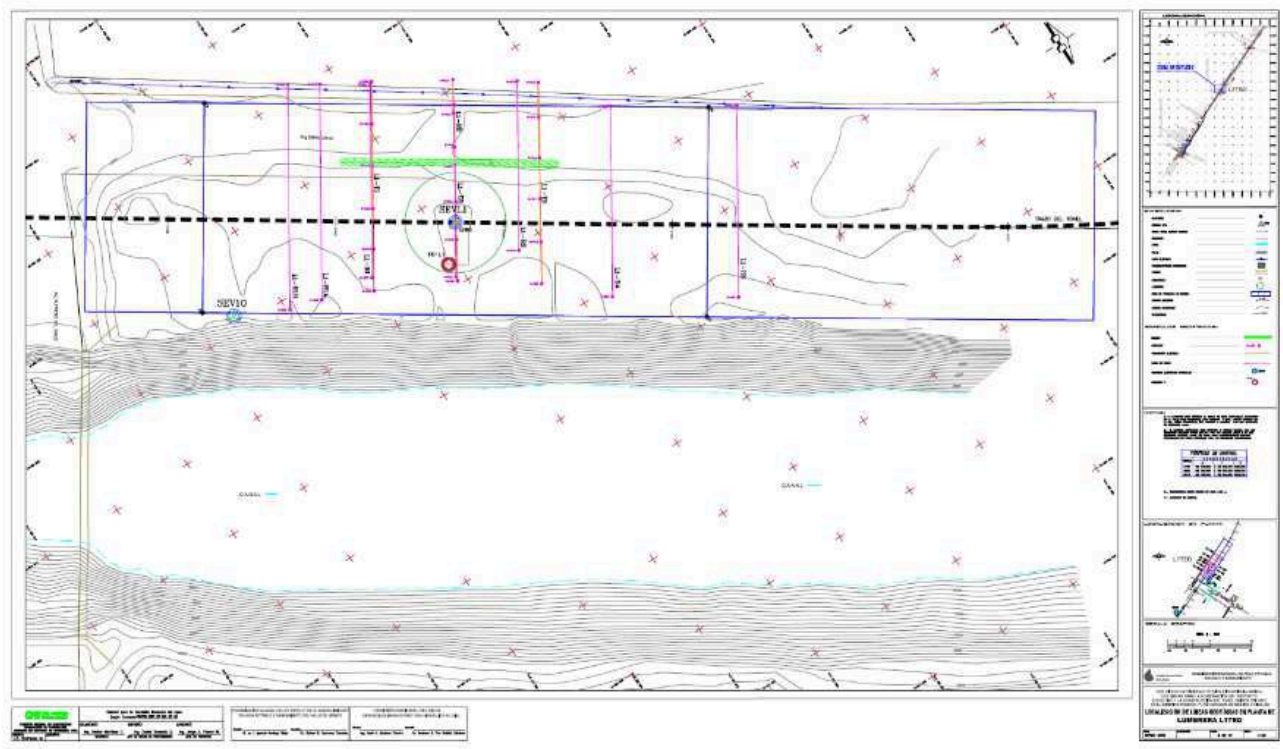


Figura 11.8. Pozo de observación y estudios geofísicos en la lumbrera L4-TEO

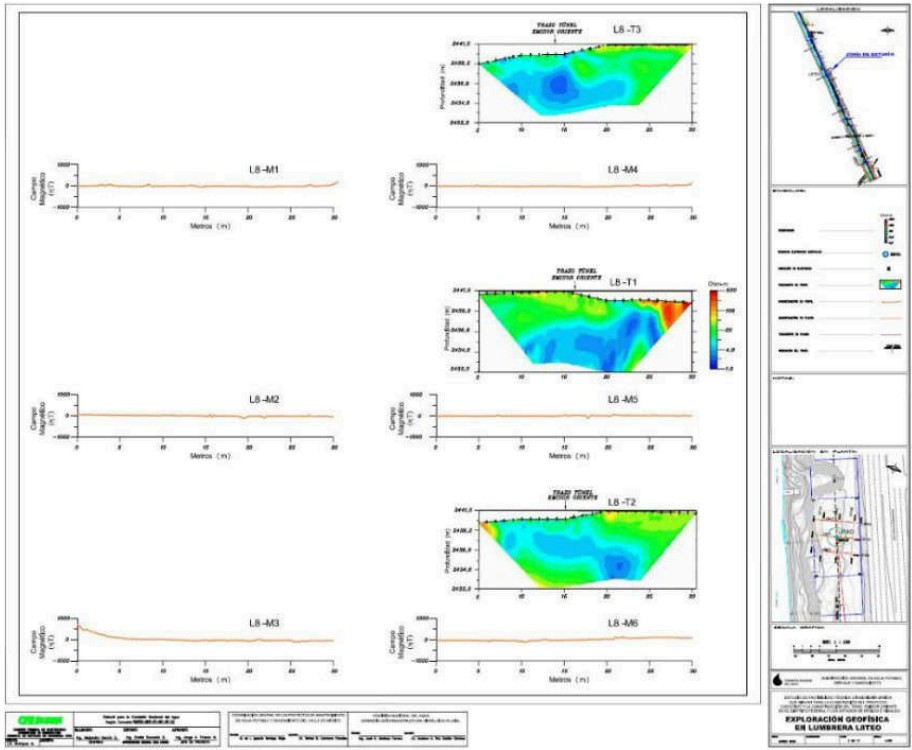


Figura 11.9. Exploración geofísica en la lumbrera L8-TEO

04

Mecánica de suelos y geotecnia

El Departamento de Mecánica de Suelos de la CFE-GEIC integró los estudios de 24 barrenos de la ingeniería básica, y el de Perforación entregó el informe final, 13 reportes de avance y 24 sondeos programados en cinco etapas. Para el túnel de L-0 a L-5, el estudio geotécnico a nivel de ingeniería básica es el informe 08-111-SGM/S de la Subgerencia de Geotecnia y Materiales. Después, el proyecto ejecutivo diseñó cada lumbrera con su propia exploración; por ejemplo, un sondeo mixto de 95.05 m en la L-12.

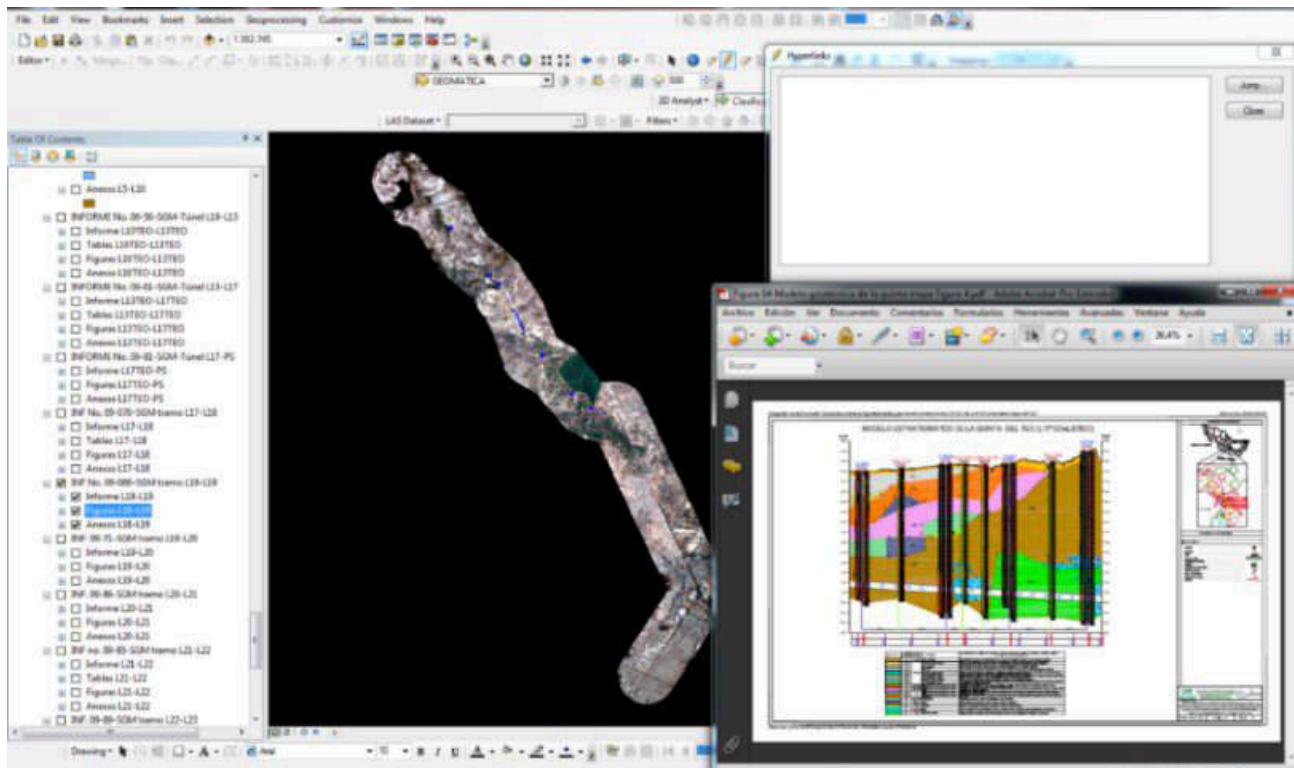


Figura 11.10. Informes geotécnicos por tramo en el SIGTEO

Los sondeos fueron de penetración estándar (SPT), cono eléctrico, mixtos con tubo Shelby, Denison o barril NQ, y se complementaron con piezómetros, permeámetros, presiómetros y dilatómetros; a más de 100 m de profundidad el muestreo inalterado de

arenas limosas, gravas, limos arcillosos y tobas fue muy difícil y obligó a ensayar en sitio. En la L-12 la CFE perforó un SPT de 90 m y un sondeo mixto de 97.5 m, y en la L-20 se hizo un sondeo mixto de unos 167 m.

Lo previsto y lo ocurrido en las lumbreras L-00, L-04 y L-12 (factores de seguridad, tratamientos y pozos de abatimiento), incluido el contraste entre la estimación de 4.6 L/s y los más de 600 L/s reales en la L-12, se presenta en el capítulo 12.

Un ingeniero de The Robbins Company, involucrado desde el inicio, atribuye parte del retraso y del sobrecosto a no contar con información geotécnica precisa ni con el diseño antes de empezar: "un informe base (baseline report) no se terminó hasta 2010, y el proyecto comenzó en 2008", lo que considera comprensible por tratarse de un plan de emergencia. Es la opinión de un fabricante, no un documento oficial. Es consistente con otro dato: las máquinas de Robbins para los lotes 3, 4 y 5 se diseñaron con la información geológica de 2008 para basaltos abrasivos de hasta 80 MPa de resistencia a compresión simple, mezclados con tramos de arcilla muy saturada, con presiones de agua estimadas de 4 a 6 bar.

A la exploración se sumó la instrumentación de los sitios de lumbrera. El sistema de auscultación de la ingeniería básica estuvo ligado a toda la exploración que definió estratos, formaciones y estructuras geológicas y la ubicación de las estructuras civiles que pudieran interferir con el túnel o resultar afectadas, y de ahí salieron cuatro objetivos:

1. Determinar las variaciones del nivel del agua dentro de los estratos arcillosos, cuyo abatimiento aumenta los asentamientos de la zona, y analizarlas junto con las mediciones de los bancos de nivel profundos.
2. Identificar los niveles de agua donde el túnel atravesaría materiales no arcillosos, para definir la posición del nivel freático.
3. Mantener la instrumentación funcionando en las etapas siguientes, para detectar a tiempo cambios, anomalías o deficiencias en las estructuras vecinas y en el entorno durante la construcción y la operación.
4. Obtener datos para mejorar el diseño y el proceso constructivo del túnel y de las lumbreras.

La profundidad de los bulbos piezométricos de cada lumbrera se eligió con la estratigrafía de los sondeos de exploración. En las 24 lumbreras del proyecto se instalaron pozos de observación y de tres a cinco bulbos piezométricos tipo Casagrande; además, piezómetros eléctricos en L0, L1A, L3, L4, L5 y L22 y extensómetros de barra en L0, L1A, L3 a L6, L8, L10 y L13. La única excepción fue la L19, donde el basalto muy fracturado impidió instalar piezómetros. Todos los instrumentos se ubicaron en el sistema de coordenadas ortogonal del proyecto y, al concluir la etapa, se entregaron a la Conagua las fichas de instalación, los instrumentos en sitio, los equipos de medición y el historial de mediciones. La CFE-GEIC instaló además piezómetros eléctricos y tuberías de inclinómetro en algunas lumbreras de la primera etapa y tomó las primeras lecturas de asentamientos y de desplazamientos horizontales antes de iniciar las excavaciones.

La CFE instaló en la ingeniería básica piezómetros, pozos de observación y extensómetros por etapa; el proyecto ejecutivo añadió inclinómetros, referencias superficiales y más piezómetros. La instrumentación completa de la L-12 se detalla en el capítulo 12. La imagen siguiente reproduce el plano de la CFE con los perfiles de instalación a lo largo de los tres acuíferos que cruza el trazo.

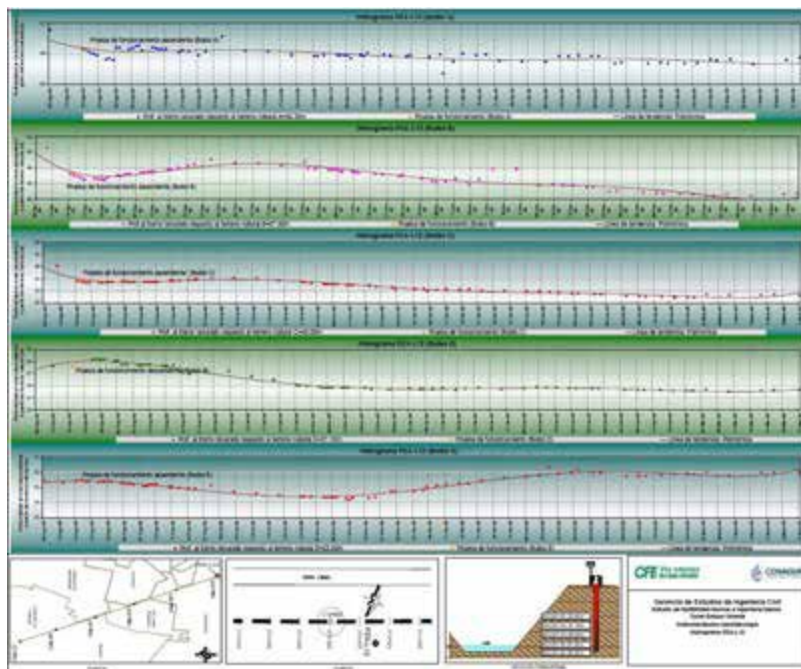


Figura 11.11. Niveles piezométricos medidos en la lumbrera L12 de agosto de 2008 a marzo de 2009

El análisis por lumbrera (L-00, L-04, L-12, L-18 a L-20) y la comparación con el Túnel Emisor Poniente II están en el capítulo 12. La instrumentación de la L-20 se describe además en una ponencia de 2011.

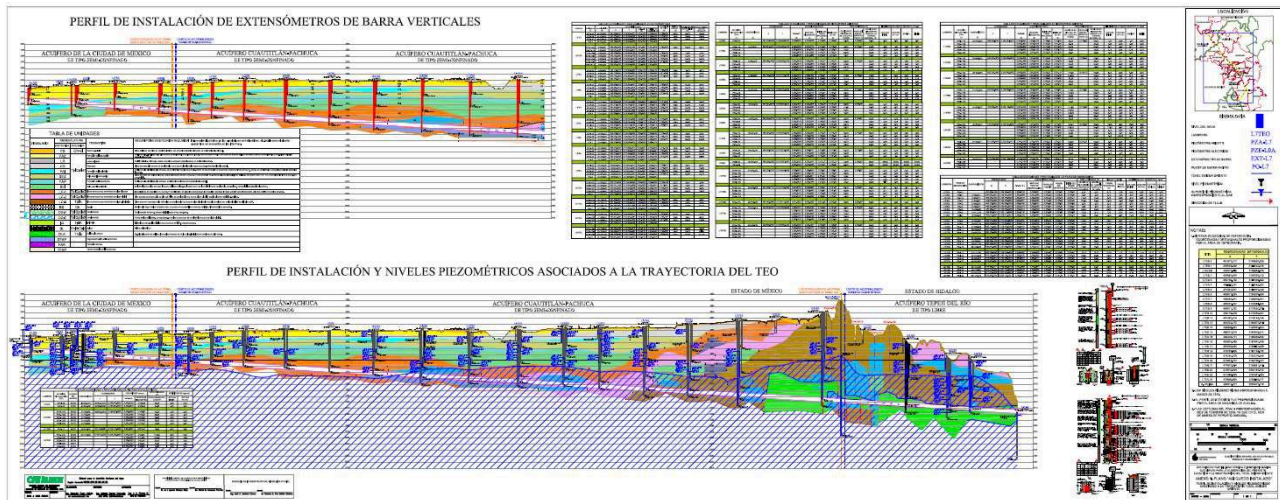


Figura 11.12. Instrumentación vertical a lo largo de los tres acuíferos del trazo

05

Hidrológicos

El gasto de diseño del TEO es de 150 m³/s. La información hidrológica proviene de tres piezas de naturaleza distinta: los escenarios de inundación por cota del estudio socioeconómico de 2008, que usan las áreas inundables del Instituto de Ingeniería de la UNAM; una frase de la MIA-P que fija el contexto de riesgo, y la tesis de maestría de Roberto Abraham Vázquez Martínez, "Problemática de las avenidas captadas por el Túnel Emisor Oriente", del Instituto de Ingeniería de la UNAM, de octubre de 2021.

Las fuentes coinciden en que la capacidad del sistema de drenaje principal cayó entre 1975 y la primera década de este siglo por el hundimiento, pero no en cuánto. La tabla 11.12 reúne las cifras.

TABLA 11.12. CAPACIDAD DE DESALOJO DEL SISTEMA DE DRENAJE, EN M³/S

AÑO	EMISOR PONIENTE	EMISOR CENTRAL (DRENAJE PROFUNDO)	GRAN CANAL	TOTAL
1975	30	170	80	280
2007	30	110	25	165
2010				195
2013	30	110	15	155

Con las cifras de 2007 de la tabla, la pérdida entre 1975 y 2007 fue de $280 - 165 = 115$ m³/s, el 41 % del total de 1975. Con las del rango superior (290 - 150) fue de $290 - 150 = 140$ m³/s, el 48 %. Con el TEO, la Conagua anunció $470 - 320 = 150$ m³/s adicionales, un aumento de 46.9 % (la fuente dice 50 %, redondeo de $150/320$); esos 150 m³/s coinciden con el gasto de diseño del TEO, como debe ser si se suman conductos que antes no existían. La cifra de 470 m³/s proviene de una sola fuente de prensa que cita a la Conagua.

Para justificar que la obra tiene una finalidad "preventiva", la MIA-P dice que la capacidad real de desalojo del Valle de México "podría resultar insuficiente ante ciertas circunstancias, tales como lluvias torrenciales con un periodo de retorno de 50 años". Esta frase no es un criterio de diseño del TEO: no dice con qué lluvia se dimensionó el túnel. La MIA-P tampoco trae láminas de lluvia, hidrogramas ni cálculos; solo enumera las estaciones climatológicas cercanas (aeropuerto, San Juan de Aragón, km 27+250 y km 46+930 del Gran Canal, El Tajo de Tequixquiac y Tula) y describe las cuencas.

El modelo matemático del sistema principal de drenaje del Valle de México, elaborado con el programa EPA SWMM y con el TEO incluido, se corre con cuatro tormentas reales. Reúne 290 subcuencas que ingresan al drenaje en 186 nodos. En cada subcuenca, el coeficiente de escurrimiento ponderado por área combina el de la zona no urbana, tomado de una publicación del Instituto, con el de la zona urbana, que es 0.45 veces el índice de urbanización (cociente entre el área impermeable y el área urbana); el tiempo de concentración se estimó con métodos simplificados que consideran el recorrido del agua por cunetas y conductos. Para cada tormenta se estima el periodo de retorno con un análisis regional y un factor de reducción por área. El número de estaciones dependió de

la información disponible: 89 en 1988 (49 del SACMEX y 40 de la Conagua), 102 en 2011 (78 y 24), 78 en 2017 y 122 en 2020 (78 del SACMEX y 44 del Observatorio Hidrológico de la UNAM; p. 58).

La compuerta de 7 × 7 m de la lumbrera L-5 del TEO fue la única que se varió, en tres casos: cerrada (caso 1), abierta 30 cm o "castigada" (caso 2, la condición de operación vigente, p. 150) y totalmente abierta (caso 3). Las demás compuertas se dejaron completamente abiertas. El modelo incluye las compuertas de 5 × 5 m entre el Túnel Interceptor Río de los Remedios y la L-0, la de 7 × 7 m entre la L-0 y el TEO, las dos de 4.5 × 4.5 m que comunican el Gran Canal con la L-0 y las aportaciones de subcuencas urbanas en las lumbreras L-1A, L-03 y L-4.

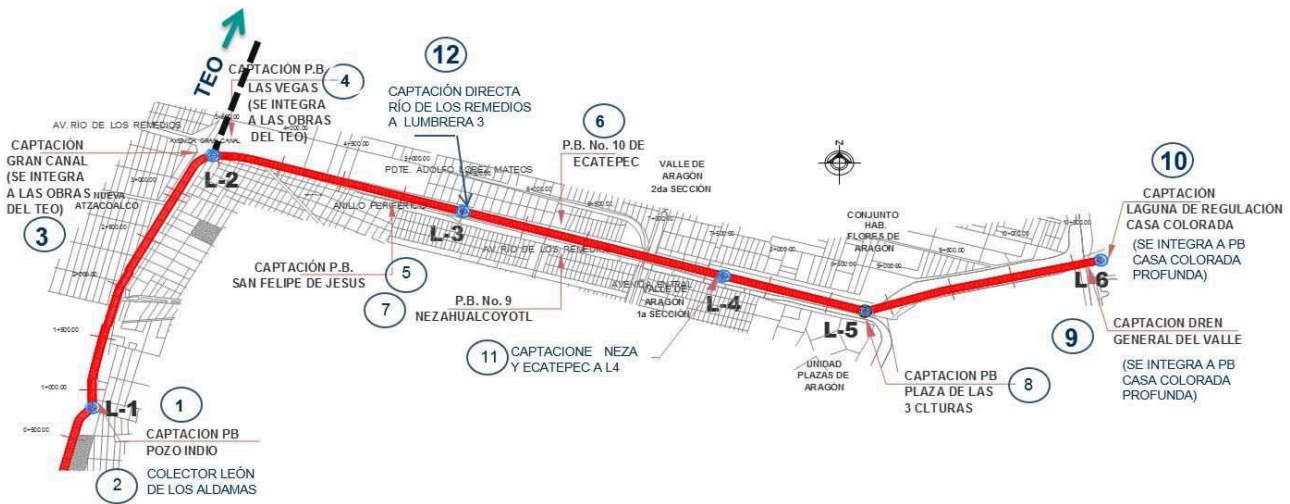


Figura 11.13. Captaciones al Interceptor Río de los Remedios y origen del TEO

TABLA 11.13. TORMENTAS ANALIZADAS POR VÁZQUEZ MARTÍNEZ (2021) Y SU PERIODO DE RETORNO

EVENTO	DURACIÓN	ZONAS CON MÁS LLUVIA Y LÁMINA MEDIA (MM)	PERIODO DE RETORNO	OBSERVACIÓN
1988	2 días	Sur 44.1; surponiente 43	Sur, suroriente y surponiente: 174, 40 y 72	Las estructuras trabajaron al límite con la compuerta cerrada
2011	3 días	Centro 24.7; oriente 28.8; suroriente 30.7	14, 230 y 179	El evento se concentró en la zona oriente



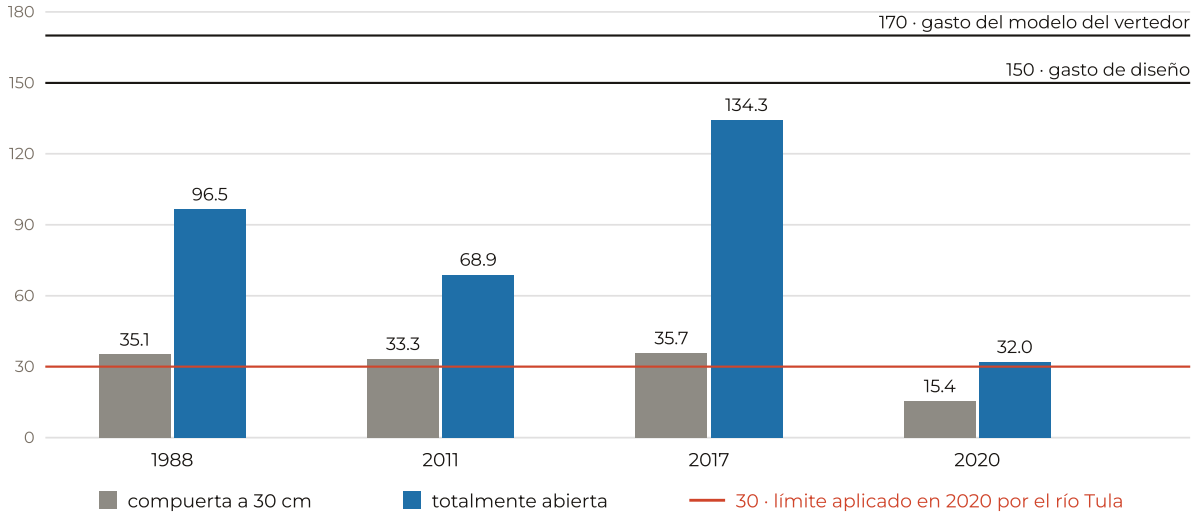
TABLA 11.14. RESULTADOS DEL MODELO SWMM PARA CUATRO TORMENTAS Y TRES APERTURAS DE LA COMPUERTA DE LA L-5

300

	SALIDA DEL TEO, EVENTO CASO 2	SALIDA DEL TEO, CASO 3	SALIDA DEL TEC, CASO 3	TEO + TEC, CASO 3	COLUMNA DE AGUA EN L-0 DEL TEC (M)
2020	15.4	32.0	92.0	123.1	5.5 / 5.5 / 5.5

Gasto máximo a la salida del TEO en cuatro tormentas

m³/s, con la compuerta a 30 cm y totalmente abierta



Elaboración propia con datos de Vázquez Martínez (2021, tabla 8.3, pp. 143-145). La tabla de origen dice TEC en el título; se lee TEO (134.3 / 170 = 79 %).

Figura 11.15. Gasto máximo de salida del TEO según la apertura de la compuerta

La lumbrera L-0 del Emisor Central tiene 23.3 m de profundidad, de modo que una columna de agua mayor de ese valor significa derrame; el nivel crítico es de 17 m y el conducto entra en carga a partir de 6.5 m. Con la compuerta del TEO totalmente abierta, el nivel baja de 24.8 a 5.9 m en 1988, pero en 2017 sigue en 25.6 m, es decir, hay derrame aun con el TEO. En cambio, con la compuerta abierta solo 30 cm el gasto del TEO queda cerca de 35 m³/s, apenas por encima del límite de 30 m³/s que se aplica para no inundar el río Tula. Y con la compuerta abierta del todo, en 2017 el gasto total rebasa por 44 m³/s la capacidad máxima de 200 m³/s del río Tula.

El modelo indica que el TEO alivia al sistema solo si se opera con todas las compuertas abiertas, lo cual hoy no es posible por la capacidad limitada del río Tula. Recomendamos ampliar el río o buscar otro cuerpo receptor, evitar la operación con compuertas parcialmente abiertas por el riesgo de vibraciones en las lumbreras y regular los ingresos aguas arriba, en las compuertas de 4.5 × 4.5 m del Gran Canal o en las de 6 × 2 m de la L-6 del Interceptor.

CÁLCULOS DE ESCALA CON LOS DATOS DEL MODELO

Con los datos del modelo y del sistema se hacen algunos cálculos de escala para ubicar el gasto de 150 m³/s frente a tormentas reales. No sustituyen el estudio de diseño de la Conagua; muestran qué tan holgado o justo queda el túnel frente a lo que llueve.

El Valle de México fue una cuenca cerrada con cinco lagos (Xaltocan, Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Chalco) que ocupaban unos 1,100 km². Hoy la Zona Metropolitana aloja a más de 20 millones de personas, y más de la mitad de los 2,000 km² de superficie del valle está sobre arcilla lacustre que se hunde por la extracción de agua (misma página). El área total de la cuenca es de unos 9,600 km², cifra que repiten Rojas Flores (2021, p. 71) y Ávila Martínez (2022, p. 25).

Las cuatro tormentas modeladas tuvieron características distintas. La del 4 de septiembre de 1988 dejó una lámina media de 38.4 mm en la zona de estudio, con periodo de retorno aproximado de 13 años; en el sur, el surponiente y el norponiente cayeron 58.1, 53.8 y 45.2 mm, con periodos de 70, 52 y 34 años. La del 28 al 30 de junio de 2011 dio una lámina media diaria de 47.4 mm y periodo de retorno de 54 años; en el oriente, el nororiente y el surponiente fueron 66.8, 54.6 y 49.4 mm, con 81, 24 y 34 años, y el desbordamiento del río de los Remedios afectó a más de 20 mil familias en Ecatepec y Nezahualcóyotl. La tormenta del 27 de agosto al 1 de septiembre de 2017 se concentró en el centro y el oriente del Valle, la que más influía en el TEO; cerró el AICM, inundó seis estaciones del Metro y desbordó el río de los Remedios. La del 22 de junio de 2020 fue generalizada en la Ciudad de México; la del 15 y 16 de septiembre de ese año dio periodos mayores de 100 años en algunos puntos, pero se concentró en el sur y no pesó en el TEO. En 1988 la lluvia fue menor de 50 mm en la ciudad y aun así el sistema trabajó a toda su capacidad, con las 17 lagunas llenas.

La lámina puntual se pasa a lámina sobre un área con un factor de reducción por área, y el periodo de retorno se estima con factores regionales (tabla 6.11 del estudio, pp. 66-68).

TABLA 11.14A. FACTORES REGIONALES PARA EL VALLE DE MÉXICO

T (AÑOS)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Factor regional	0.95	1.22	1.40	1.57	1.79	1.95	2.12	2.34	2.50

El factor de reducción por área empleado es

$$y = 0.9782 - 0.052 \ln x$$

donde y es el factor de reducción (adimensional) y x el área sobre la que se promedia la lluvia (km^2). Para $x = 100 \text{ km}^2$, $y = 0.9782 - 0.052 \ln 100 = 0.739$; para $x = 1,000 \text{ km}^2$, $y = 0.619$; y para $x = 9,600 \text{ km}^2$, $y = 0.9782 - 0.052 \ln 9600 = 0.501$ (cálculo propio). La lámina promedio sobre un área grande es, entonces, aproximadamente la mitad de la lámina puntual, razón por la que "47.4 mm de media" y "66.8 mm en el oriente" no se contradicen.

Como verificación de coherencia, si se interpola linealmente el factor regional entre los valores de la tabla (supuesto grueso), $T = 13$ años da $1.40 + 0.3(1.57 - 1.40) = 1.45$ y $T = 54$ años da $1.79 + \frac{4}{30}(1.95 - 1.79) = 1.81$. El cociente $1.81/1.45 = 1.25$ frente al cociente de láminas medias $47.4/38.4 = 1.23$ coincide dentro de 2 %, lo que indica que los periodos de retorno de 1988 y 2011 son coherentes entre sí. No valida el método; solo la consistencia.

El gasto de diseño de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ se puede traducir en volumen diario:

$$V_d = Q t = 150 \times 86,400 = 12.96 \times 10^6 \text{ m}^3$$

donde V_d es el volumen diario (m^3), Q el gasto (m^3/s) y t los segundos de un día (s). Con $170 \text{ m}^3/\text{s}$, el gasto que usó el modelo del vertedor, son 14.69 millones de m^3 . Para dimensionar una tormenta, se supone la lámina de 47.4 mm de 2011 repartida sobre toda la cuenca de $9,600 \text{ km}^2$, lo cual sobrestima el volumen porque esa lámina fue la media de la zona de estudio y el factor de reducción por área la bajaría:

$$V_l = h A = 0.0474 \times 9.6 \times 10^9 = 455 \times 10^6 \text{ m}^3$$

donde V_l es el volumen llovido (m^3), h la lámina (m) y A el área de la cuenca (m^2). Con un coeficiente de escurrimiento medio supuesto de 0.30, escurren $0.30 \times 455 = 136.5$ millones de m^3 , es decir, $136.5/12.96 = 10.5$ días de operación del TEO a plena capacidad. La conclusión no está en el número sino en la escala: el drenaje de una tormenta grande no se resuelve con un solo túnel, depende de las lagunas de regulación, de los conductos del drenaje profundo y de reducir el escurrimiento antes de que entre.

Sobre la vida útil, la MIA contempló 25 años de operación. La probabilidad de que un evento de periodo de retorno T ocurra al menos una vez en n años es

$$P = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

donde P es la probabilidad (adimensional), T el periodo de retorno (años) y n el número de años considerados. Con $n = 25$ resulta la tabla 11.14b.

TABLA 11.14B. RIESGO DE EXCEDENCIA EN 25 AÑOS (CÁLCULO PROPIO).

T (AÑOS)	PROBABILIDAD DE AL MENOS UN EVENTO EN 25 AÑOS
10	92.8 %
50	39.7 %
100	22.2 %

Elegir $T = 10$, 50 o 100 años no es una decisión solo técnica, es una decisión de cuánto riesgo se acepta. Un periodo de 10 años para un túnel que protege a millones de personas sería muy bajo, y uno de 100 deja una probabilidad de 22 % de ser superado una vez en 25 años.

Entre el 6 y el 7 de septiembre de 2021, el TEO y el TEC descargaron unos 220 m³/s en el momento más complicado, según el delegado de la Conagua en Hidalgo, Eleazar Saucedo Rojas. Es la cifra más alta conocida y proviene de una sola fuente. Contrasta con la capacidad del río Tula, menor de 200 m³/s según el modelo, y coincide con la restricción descrita. La inundación de 2021 se detalla en el capítulo 19.

De la comparación salen tres lecturas. Ninguno de los cuatro eventos históricos modelados exige al túnel su capacidad total en las condiciones de operación reales (compuertas castigadas): los gastos en la salida van de 15.4 a 35.7 m³/s. Con las compuertas abiertas, 2017 llega a 134.3 m³/s, que es el 79 % de 170 m³/s ($134.3/170 = 0.79$) o el 90 % de 150 m³/s ($134.3/150 = 0.895$). Y el cuello de botella no es el túnel, es el río Tula.

Hidráulicos (modelos físicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM)

La Conagua, por medio del Instituto de Ingeniería de la UNAM, construyó en su Laboratorio de Hidráulica un modelo físico a escala geométrica 1:30 del conjunto de descarga: los portales de salida del Túnel Emisor Central y del TEO, los canales en que descargan, el túnel-alcantarilla que cruza bajo el río El Salto y un tramo de casi 250 m del canal Salto-Tlamaco. Sobre ese modelo se desarrollaron cuatro tesis entre 2010 y 2019, tres de ellas dirigidas por el Dr. Jesús Gracia Sánchez.

Cada trabajo combina modelo físico con modelación numérica. El problema de fondo es hidráulico y de arreglo: en avenidas el TEO descarga por un vertedor lateral hacia el río El Salto, cerca del portal del Emisor Central, y en estiaje puede derivar hasta 50 m³/s hacia la planta de tratamiento de Atotonilco.

TABLA 11.15. ESTUDIOS HIDRÁULICOS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA SOBRE LA DESCARGA DEL TEO.

ESTUDIO	QUÉ ESTUDIA	GASTO Y ESCALA	RESULTADO PRINCIPAL
Vertedor de salida	Comportamiento hidráulico del vertedor de salida del TEO		Antecedente directo de la tesis de maestría de 2011
Sistema de descarga	Dos alternativas del vertedor de excedencias y dos geometrías de la conexión con el Emisor Central; simulación del río El Salto con HEC-RAS	150 m³/s en avenidas (170 m³/s máximo en el modelo); vertedor de diseño 170 m³/s; conexión de diseño 50 m³/s; HEC-RAS con 80 y 250 m³/s	Se recomienda el vertedor recto con la segunda versión de la conexión, y volver a probarlos en el modelo
Tanque amortiguador "El Salto II"	Tanque amortiguador trapecial y efecto de la rápida de entrada	240 m³/s (160 del Emisor Central más 80 extraordinarios del río El Salto); escala 1:30	Con la rápida lisa hay riesgo de desbordamiento; una rápida con 15 deflectores dentados en dos filas lo evita

ESTUDIO	QUÉ ESTUDIA	GASTO Y ESCALA	RESULTADO PRINCIPAL
Compuertas radiales	Leyes de descarga de las compuertas radiales con desfogue sumergido en la confluencia de los canales de salida	Modelo 1:30 desde los portales	Obtener las leyes de descarga de las compuertas con el modelo físico y, si hace falta, calibrar modelos numéricos de gasto

En el modelo se probaron dos versiones del vertedor y de la conexión, la segunda propuesta por personal de la Conagua (tabla 11.16).

TABLA 11.16. DOS VERSIONES DEL VERTEDOR DE EXCEDENCIAS Y DE LA CONEXIÓN EN EL PORTAL DE SALIDA

ELEMENTO	PRIMERA VERSIÓN	SEGUNDA VERSIÓN (PROPUESTA DE LA CONAGUA)	RESULTADO EN EL MODELO
Portal y canal	Portal en el cad. 61+802.948, plantilla en 2,106 msnm, transición de 15 m a un canal rectangular de 12 m de ancho y pendiente 0.0015139	Igual, con canal de 11 m de ancho	
Vertedor	Lateral recto, perfil Creager, inicia en 61+947.56, plantilla 2,105.781 msnm, cresta 2,111.5 msnm, 60 m de longitud, tanque amortiguador de 15 m	Lateral de cresta curva, similar al del Emisor Central, inicia en 61+991.948	La primera versión descarga bien controlada y el tanque disipa la energía; la segunda funciona bien como vertedor, pero origina socavación intensa en el río y su pared esbelta requeriría apuntalamiento que invadiría el cauce
Conexión con el Emisor Central	El flujo baja a gran velocidad por un cimacio sin tanque y oscila en el canal curvo hasta la obra de toma	Otra curvatura con un tramo recto para alojar el tanque	La primera funciona mal; la segunda mejora sensiblemente, sin eliminar todas las oscilaciones
Compuertas	Radiales de 3 × 6 × 6 m (tipo CM-C-70) en la unión con el Emisor Central, con un desnivel de 2 m para desarenar		

El estudio concluye que conviene la primera versión del vertedor (recto) combinada con la segunda versión de la conexión, modificando el tanque amortiguador y el escalón del desarenador, y que ese arreglo final debe probarse de nuevo en el modelo físico; señala también que la Conagua deberá considerar geotecnia, estructuras y procedimientos constructivos. La simulación del río El Salto con $80 \text{ m}^3/\text{s}$ (su gasto) y con $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (su gasto más el del TEO) usó rugosidades de Manning de $0.017 \text{ s/m}^{(1/3)}$ en el tramo rectificado y 0.030 en el resto del cauce.



Figura 11.16. Modelo físico del vertedor de excedencias del TEO

El gasto de diseño del modelo del tanque es el que dio la Conagua: el gasto que tiene actualmente el Emisor Central, $160 \text{ m}^3/\text{s}$, más el máximo extraordinario del río El Salto, $80 \text{ m}^3/\text{s}$, que suman $240 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo, equivalentes a 48.69 L/s en el modelo a escala 1:30. El tanque trapecial "El Salto II" tiene taludes 1.5:1 y en el modelo 0.66 m de ancho, 1.77 m de largo y 0.233 m de bordo libre. Con la rápida lisa existente el funcionamiento "podría verse comprometido por desbordamiento" (resumen, p. 6). Una

rápida escalonada redujo los tirantes máximos entre 0.98 y 2.24 %, insuficiente; la rápida dentada, con 15 deflectores en dos filas, evitó el desbordamiento y redujo los tirantes entre 3.29 y 4.28 % en las secciones críticas. En la modelación numérica con FLOW-3D, en cambio, ninguna configuración evitó el desborde y la rápida dentada lo aumentó entre 3.18 y 10.42 % en las secciones críticas.

Con la pendiente de la tabla 11.7 y la de la ASF, y un coeficiente de Manning supuesto, se puede revisar si los 150 m³/s son compatibles con la geometría, porque la rugosidad de diseño del túnel no se publica. A tubo lleno, el gasto es

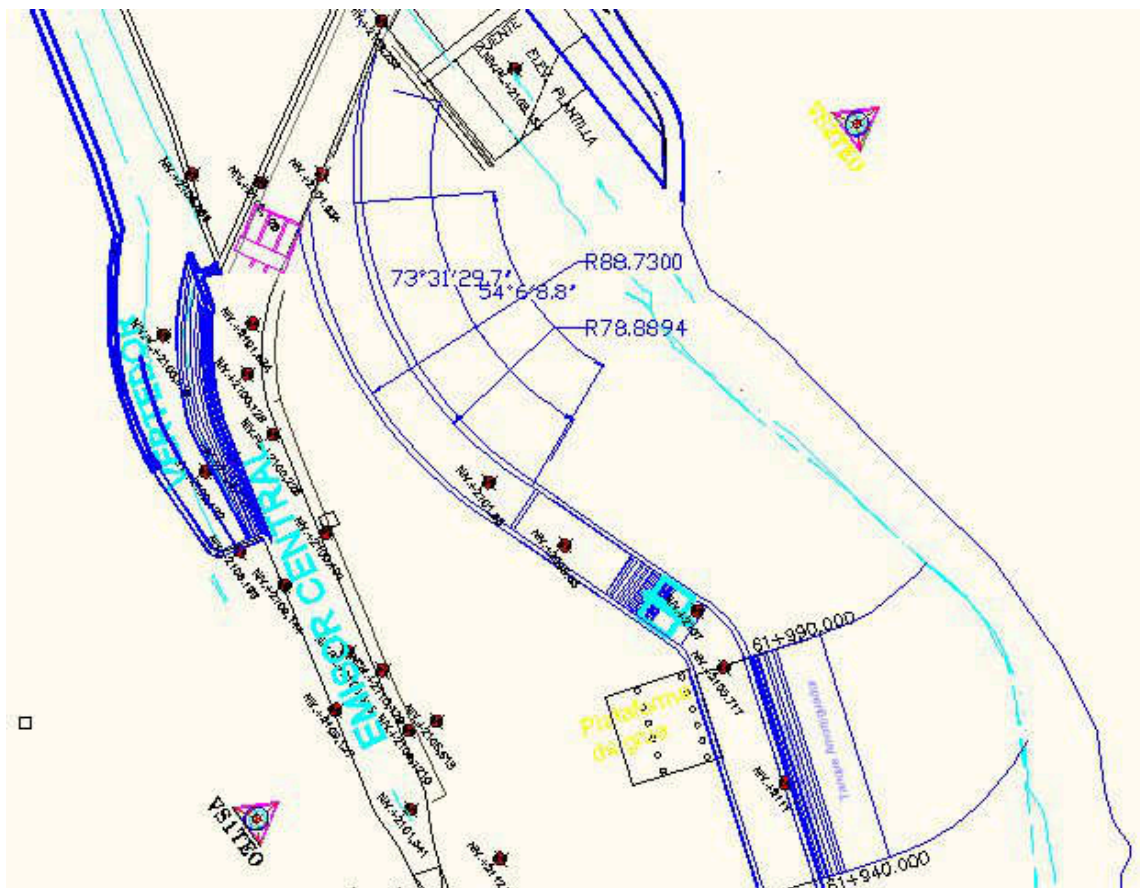


Figura 11.17. Planta del arreglo propuesto para el portal de salida

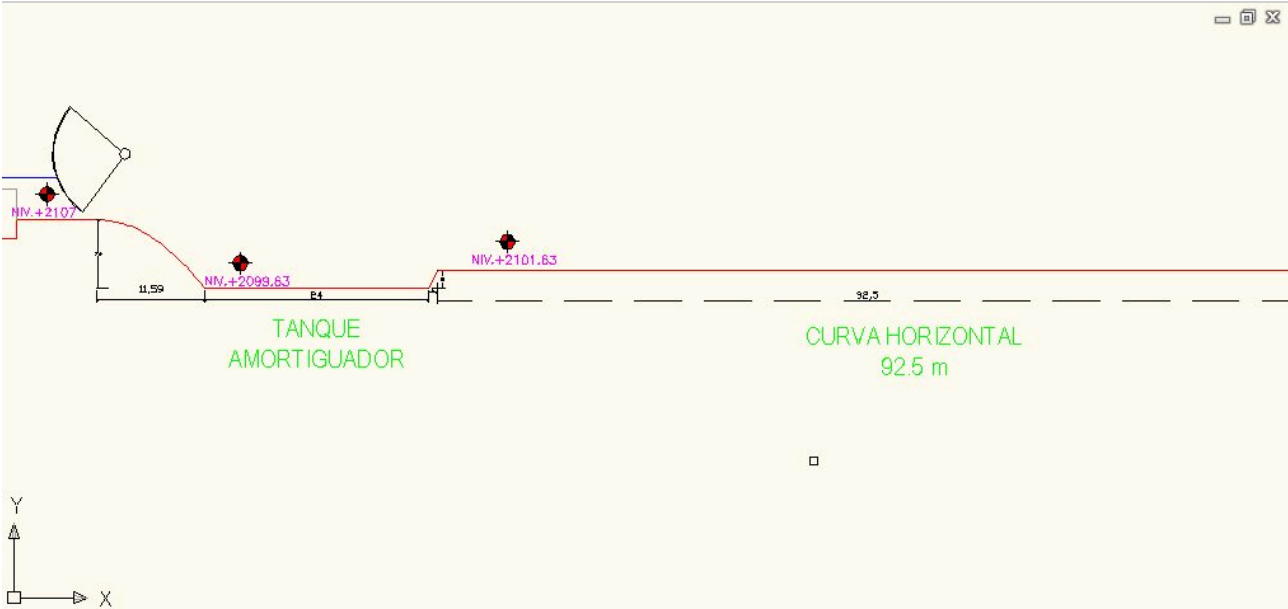


Figura 11.18. Perfil de la conexión con el acceso a las alcantarillas

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

donde Q es el gasto (m^3/s), n el coeficiente de rugosidad de Manning ($\text{s}/\text{m}^{1/3}$), A el área de la sección (m^2), R el radio hidráulico (m) y S la pendiente de la plantilla (adimensional). Para el túnel circular de diámetro $D = 7.0 \text{ m}$, $A = \pi D^2/4 = 38.48 \text{ m}^2$ y $R = D/4 = 1.75 \text{ m}$. Con $n = 0.013$ y $S = 0.0015139$:

$$Q = \frac{1}{0.013} (38.48) (1.75)^{2/3} (0.0015139)^{1/2} = 167.3 \text{ m}^3/\text{s}$$

La tabla 11.17 repite el cálculo con otros coeficientes y con la pendiente de la ASF.

TABLA 11.17. GASTO DEL TÚNEL A TUBO LLENO SEGÚN MANNING, EN M^3/S (CÁLCULO PROPIO, N SUPUESTO). LAS PENDIENTES SON 0.0015139 (**

COEFICIENTE N (SUPUESTO)	S = 0.0015139	S = 0.0016
0.012	181.2	186.3
0.013	167.3	172.0
0.015	145.0	149.0
n necesario para 150 m^3/s	0.0145	0.0149

Los 150 m³/s de diseño corresponden, a tubo lleno, a una velocidad media de $150/38.48 = 3.90$ m/s y se alcanzan con n de entre 0.0145 y 0.0149, un valor plausible para un revestimiento de concreto, mientras que con $n = 0.013$ el túnel daría de 167 a 172 m³/s. Es un cálculo ilustrativo, no el de diseño: no considera pérdidas locales, y el túnel opera en general parcialmente lleno.

07

Impacto ambiental (MIA-P 2008, resolutivo y obra final)

EL ESTUDIO: QUIÉN, CUÁNDO Y DE QUÉ CONSTA

La Conagua presentó ante la Semarnat la manifestación de impacto ambiental, modalidad particular (MIA-P), del "Proyecto para la construcción del Túnel Emisor Oriente, para incrementar la capacidad de desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle de México, y disminuir los riesgos de inundación a la población asentada en la zona", con clave 15EM2008H0009. El estudio es de marzo de 2008 y, según el resolutivo, ingresó el 21 de mayo de 2008; el oficio S.G.P.A./DGIRA.DG.1908.08 de la DGIRA lo autorizó de manera condicionada en junio de 2008 (el capítulo 18 lo fecha el 18 de ese mes). Los datos del representante legal y del responsable técnico del estudio están testados con la leyenda "Protección de datos LFTAIPG". El cuerpo del estudio ocupa 105 páginas impresas.

TABLA 11.18. ESTRUCTURA DE LA MIA-P DE 2008

CAPÍTULO	PÁGINAS IMPRESAS	CONTENIDO PRINCIPAL
I. Datos generales	1-3	Nombre, ubicación (de la lumbrera L-0, en Gustavo A. Madero, a Atotonilco de Tula), vida del proyecto, promovente: Conagua

CAPÍTULO	PÁGINAS IMPRESAS	CONTENIDO PRINCIPAL
II. Descripción del proyecto	4-21	Naturaleza, selección del sitio, inversión (secc. II.1.4), dimensiones y coordenadas de las lumbreras (tablas II.3 a II.7), usos del suelo, programa de trabajo, procedimientos de construcción, bancos de tiro potenciales, operación y mantenimiento, residuos, diseño por sismo y por zonas de transición
III. Vinculación jurídica	22 en adelante	Competencia federal (LGEEPA arts. 5 fr. XX y 28 fr. XIII), argumento de que el Gran Canal no es río y las lumbreras quedan a más de 10 m de su bordo, NOM aplicables, ordenamiento ecológico del Estado de México
IV. Sistema ambiental	Hasta la 69	Área de influencia de 100 m a cada lado del trazo, clima, geología, suelos, hidrología, flora y fauna, paisaje, medio socioeconómico
V. Identificación y evaluación de impactos	70-85	Lista de chequeo y matriz de Leopold modificada
VI. Medidas de prevención y mitigación	86-100	Medidas por etapa e impactos residuales
VII. Pronósticos y alternativas	101-105	Pronóstico del escenario, programa de vigilancia, conclusiones

La MIA-P describe un anteproyecto: 62 km, 7 m de diámetro, 24 lumbreras (las de construcción de 12 m y seis de gran sección de 18 m), profundidades de 40 a 180 m y un caudal máximo de 180 m³/s. Las lumbreras se construirían por flotación, con muro Milán o con anillos de concreto, y el túnel se excavaría con escudo de tierra balanceada en suelo blando, con escudo de frente mixto en suelo duro y con equipo de dientes de diamante en roca; el revestimiento primario sería de dovelas y el definitivo, de concreto reforzado diseñado para soportar toda la carga del suelo, sin contar con el primario (secc. II.2.4). El diseño ya considera el sismo, trata al subsuelo como un medio elastoplástico semiinfinito y verifica las zonas con fallas o transiciones abruptas en un perfil geológico (secc. II.2.11-II.2.12). La operación consiste en abrir y cerrar compuertas para aislar el túnel del drenaje profundo; el mantenimiento se prevé cada 20 años, con inspecciones cada 10 (secc. II.2.5). No se usarían explosivos (secc. II.2.8).

MÉTODO Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS

La MIA-P enumera ocho métodos posibles (listas de chequeo, matriz de Leopold, Batelle-Columbus, transparencias de McHarg, costo-beneficio, modelos de simulación, sistemas de información y método difuso) y elige una lista de chequeo para identificar interacciones y una matriz de Leopold modificada para valorarlas (secc. V.1). En la matriz, cada actividad del proyecto (columnas) se cruza con los factores ambientales (renglones), y cada casilla lleva una magnitud y una importancia, ambas subjetivas, en una escala del 1 al 10 (secc. V.1). Los indicadores son calidad del aire por partículas y por gases, ruido, características topográficas, erosión, aguas residuales, vegetación, fauna, apariencia visual, residuos peligrosos y no peligrosos, bienestar social y empleo (secc. V.1.2). El grado de impacto se califica como alto (5), medio (3) o bajo (1) (secc. V.1.3.1). Para el área de influencia se tomaron 100 m a cada lado del trazo, y se estimó una afectación superficial permanente máxima de 31,000 m²; cada lumbrera ocuparía temporalmente entre 2,500 y 3,000 m² (secc. IV.1 y III.5).

La conclusión de la MIA-P es que los impactos adversos son temporales y locales (aire, ruido y residuos durante la construcción de las lumbreras), que los más altos en operación son benéficos (apariencia visual y eliminación del riesgo de inundación) y que no hay impactos residuales (secc. V, VI.2 y VII.1). También afirma que el túnel "es un sistema estanco" que no permite intercambios de líquidos y, por tanto, no afecta a los acuíferos (secc. V, p. 84). Se prevé una profundidad promedio de 70 m, 24 lumbreras, de las cuales siete en zona urbana, cuatro en zona agrícola y trece en zonas alteradas (secc. VII.1).

El análisis del texto del estudio, con apoyo en una búsqueda por palabras, muestra cinco rasgos: (1) no analiza alternativas; el capítulo VII se titula "Pronósticos ambientales y, en su caso, evaluación de alternativas", pero solo trae el pronóstico, el programa de vigilancia y las conclusiones; (2) no analiza el hundimiento regional ni el abatimiento del nivel freático: las palabras hundimiento, subsidencia y abatimiento no aparecen, y solo se mencionan "los asentamientos regionales inducidos por el bombeo excesivo" como causa de la insuficiencia del drenaje (secc. II.1); el único tratamiento de agua subterránea es un relleno de 50 cm de tepetate donde el nivel freático es superficial (secc. II.2.2); (3) no incluye un estudio de riesgo ambiental ni de riesgo geotécnico; (4) no trae láminas de

lluvia, cálculo hidráulico ni el volumen total de excavación; (5) el cronograma de la secc. II.2.1 incluye una tarea llamada "Excepción de Manifestación de Impacto Ambiental" que el texto no explica. El primer punto coincide con la lectura del resolutivo en el capítulo 18, donde tampoco hay análisis de alternativas de trazo o tecnología.

La descripción geológica regional de la tesis de De Nova y Luna (2014, pp. 26-27), con sus cifras de espesores (1,400 a 2,200 m del Cretácico, 600 m de depósitos terciarios, 600 a 700 m de vulcanitas, 220 conos monogenéticos), es casi idéntica a la de la MIA-P (secc. IV.2.1.b); es probable que la tesis haya tomado la MIA-P o una fuente común, de modo que no son dos fuentes independientes.

EL RESOLUTIVO Y LA SEGUNDA MIA-P

El resolutivo se analiza con detalle en el capítulo 18. Para comparar con el estudio basta anotar que autorizó el proyecto de manera condicionada, exige autorización previa de la DGIRA para cualquier modificación (término séptimo) e impone informes semestrales durante la construcción y anuales durante ocho años.

La condicionante 2 (alternativas para ampliar la capacidad de tratamiento de aguas residuales) dio origen a otra MIA-P, "para la obra que da cumplimiento a lo dispuesto en la condicionante número dos", elaborada por Planeación y Proyectos de Ingeniería, S.C. en 2010. Su conclusión es que no habría impactos relevantes y que los más altos serían los benéficos.

MIA-P DE 2008 FRENTE A LA OBRA FINAL

La Tabla 11.19 compara el proyecto que se evaluó en 2008 con los datos de la obra construida. La comparación importa por una razón legal: el resolutivo exige autorización previa para cualquier modificación del proyecto (término séptimo), y varios de los parámetros cambiaron.

TABLA 11.19. PROYECTO DE LA MIA-P (2008) Y OBRA FINAL

CONCEPTO	MIA-P (2008)	OBRA FINAL
Longitud	62 km; suma de las cinco etapas hasta PS2TEO = 61.681 km (cálculo propio)	62.4 km; 62,418.769 m al portal

CONCEPTO	MIA-P (2008)	OBRA FINAL
Diámetro interior	7.0 m	7.0 m
Caudal	180 m ³ /s	150.0 m ³ /s por gravedad, pendiente aprox. 0.0016
Número de lumbreras	24	25
Diámetro de lumbreras	12 m y seis de 18 m	15 de 12 m, 9 de 16 m y 1 de 18 m
Profundidad	40 a 180 m (en otro pasaje, 60 a 200 m)	25 a 150 m; lumbreras de 23.3 a 152.4 m
Profundidad media	70 m	85.0 m promedio de las lumbreras (magnitud distinta; solo orientativo; cálculo propio sobre la tabla 11.7)
Etapas o frentes	5 simultáneos	6 tramos y 6 tuneladoras EPB de 8.93 m
Tecnología de excavación	EPB en suelo blando, frente mixto en suelo duro, equipo con dientes de diamante en roca	Seis EPB; hubo que modificar cabezas y bandas durante la obra
Anillo de dovelas	6 dovelas por anillo y 1 m de ancho (según el resolutivo)	6+1 piezas (tramos 1 y 2) y 7+1 piezas (tramos 3 a 6); ancho de anillo de 1.50 m (62,101.0 m / 41,352 anillos, cálculo propio)
Inversión de obra	12,000 millones de pesos; con servicios, ajuste de costos e IVA, 16,460.54	Ver capítulo 20
Plazo	Junio de 2008 a junio de 2012	Contrato del 14-11-2008 al 15-09-2012, ampliado de 1,402 a 3,911 días; primeros 10.1 km (L-0 a L-5) en operación en 2013
Agua subterránea	No se analiza abatimiento; el túnel "es un sistema estanco"	L-12: gastos de más de 600 L/s y 18 pozos de abatimiento
Informes de cumplimiento	Tres (MIA-P)	Semestrales y anuales (resolutivo)

Lo que no cambió es la longitud, el diámetro y el cadenamiento de las primeras lumbreras; cambiaron el caudal (de 180 a 150 m³/s), el número y diámetro de lumbreras, la profundidad, el costo (capítulo 20) y el plazo, de cuatro años previstos a más de once. Las fuentes revisadas no mencionan una modificación autorizada por la DGIRA para

estos cambios, y el resolutivo la exige (término séptimo). Si el plazo de 4 años del término segundo se cuenta desde 2008, la obra terminó unos siete años después de su vencimiento.

BANCOS DE TIRO Y MATERIAL DE EXCAVACIÓN

La MIA-P describe cómo se ubicaron los bancos de tiro: se revisaron cartas del INEGI, imágenes de satélite y ortofotos con ArcGIS 9, se consideraron bancos ya existentes, minas abandonadas, lotes baldíos y sitios de disposición de residuos, se visitó cada uno y se estimó su superficie y volumen (secc. II.2). El sitio BAT19, una zona de minas sobreexplotadas, podría recibir por sí solo 1.8 millones de m^3 , suficiente para toda la primera etapa y parte de la segunda (secc. II.2, p. 15). El resolutivo estima 4,941,474.50 m^3 de material a disponer entre túnel y lumbreras y 82 posibles bancos de tiro, de los cuales 44 podrían recibir casi 3.2 millones de m^3 (capítulo 18). El Departamento de Ingeniería Ambiental de la CFE-GEIC elaboró fichas técnicas de cada probable banco y el volumen aproximado por lumbrera, integradas en el SIGTEO.

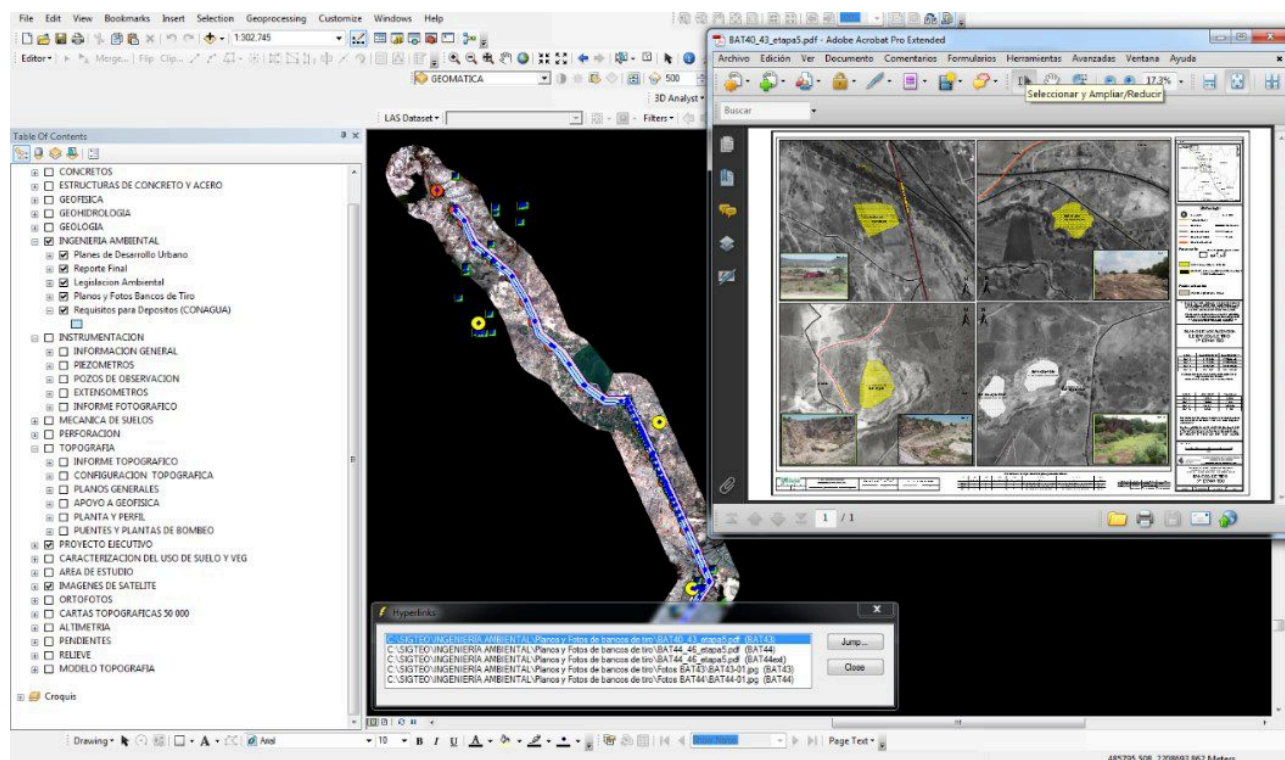


Figura 11.19. Ficha del banco de tiro BAT40_43 en el SIGTEO

Factibilidad y económicos

La parte económica del TEO se apoya en tres documentos: el estudio socioeconómico de la construcción del TEO, elaborado en 2008 por Inver Planning Consultores, S.C.; el estudio de factibilidad técnica e ingeniería básica de la CFE (sección 5.1.2) y el programa de inversión de la MIA-P de 2008. Los montos reales de la obra, que provienen de las auditorías de la ASF, se tratan en el capítulo 20.

El estudio de 2008 delimita la zona de influencia (9 delegaciones y 4 municipios), proyecta la población de 2005 a 2042 con datos del Conapo y multiplica la población de cada demarcación por el porcentaje de superficie urbana que cubre cada mancha de inundación, para obtener la población en riesgo. Los beneficios que reconoce son los costos que se evitan: daños en viviendas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, en el Metro, en la carpeta asfáltica, en subestaciones eléctricas y en la actividad económica, y la atención de emergencias. La evaluación no reporta indicadores de rentabilidad: ni valor presente neto, ni tasa interna de retorno, ni relación beneficio-costeo.

El estudio ambiental incluye, como requisito de la sección de inversión, el programa de la obra con cinco etapas de construcción, de 2,400 millones de pesos cada una de contrato, del 24 de junio de 2008 al 21 de junio de 2012.

TABLA 11.20. PROGRAMA DE INVERSIÓN DEL ANTEPROYECTO SEGÚN LA MIA-P (MILLONES DE PESOS)

CONCEPTO	MILLONES DE PESOS
Monto de obra (contrato más convenios)	12,000.00
Servicios	780.00
Obra más servicios	12,780.00
Ajuste de costos	1,533.52
Obra y servicios más ajuste	14,313.52

CONCEPTO	MILLONES DE PESOS
IVA	2,147.03
Gran total	16,460.54

AÑO	OBRA PROGRAMADA	TOTAL DEL AÑO (CON SERVICIOS, AJUSTE E IVA)
2008	247.73	315.54
2009	3,779.95	5,007.26
2010	5,085.23	6,975.52
2011	2,277.81	3,264.01
2012	564.15	842.94

Los montos del contrato de obra, del contrato de supervisión y el costo total estimado de la ASF, con su comparación frente al programa de inversión de la MIA-P, se presentan en el capítulo 20. El financiamiento fue con recursos presupuestales y del Fideicomiso 1928, y el Comité Técnico de ese fideicomiso reconoció desde antes de la obra la prioridad del mejoramiento del drenaje principal.

La clave 200916B0001512, asociada al proyecto en los informes de la ASF, es la del fideicomiso Mandato del TEO y no la de la cartera de inversión.

09

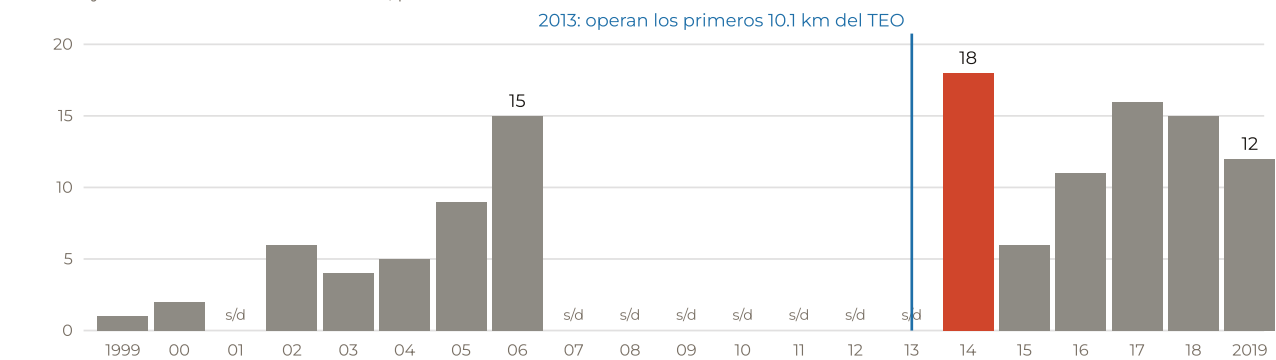
Riesgo

El riesgo del TEO se documenta en cinco trabajos de naturaleza distinta: la evaluación de diseño K131 (2013), que mide el riesgo de inundación; la MIA-P (2008), que lo usa como justificación y revisa el diseño por sismo; el artículo de Siles y colaboradores (2015) sobre hundimiento regional; el de Jiménez Argüelles y colaboradores (2016) sobre riesgos laborales en las lumbreras; y la tesis de Vázquez Martínez (2021) sobre la operación del sistema.

El riesgo de inundación por falla del Emisor Central es el que justificó la obra. La evaluación K131 retoma del estudio socioeconómico la posibilidad de un colapso del Emisor Central con extensión suficiente para obstruir el flujo y causar una inundación generalizada en el centro y oriente de la ciudad, con entre 124,976 y 3,920,481 habitantes afectados según la cota de inundación. El síntoma operativo es que el Emisor Central entra en carga (nivel mayor de 6.5 m en su lumbrera L-0, con nivel crítico de 17 m) cada vez con más frecuencia:

Veces que el Emisor Central entró en carga

nivel mayor de 6.5 m en su lumbrera L-0, por año



s/d: año sin dato en la fuente. Elaboración propia con datos de Vázquez Martínez (2021, tabla 1.1, p. 14, con datos del SACMEX).

Figura 11.20. Veces que el Emisor Central entró en carga en su lumbrera L-0

TABLA 11.21. VECES QUE EL EMISOR CENTRAL ENTRÓ EN CARGA, MEDIDO EN SU LUMBRERA L-0

AÑO	VECES	AÑO	VECES
1999	1	2014	18
2000	2	2015	6
2002	6	2016	11
2003	4	2017	16
2004	5	2018	15
2005	9	2019	12
2006	15		

En los años con dato, el promedio es de 6.0 entradas en carga por año entre 1999 y 2006 (42 en 7 años) y de 13.0 entre 2014 y 2019 (78 en 6 años; cálculo propio). La serie, por sí sola, no permite atribuir un efecto al TEO: los primeros 10.1 km del TEO entraron en

operación en 2013 y el túnel se terminó de excavar en 2019.

El riesgo de inundación por falla del Emisor Central es el que justificó la obra

Las series de interferometría de radar (ERS y ENVISAT) de 1999 a 2010 sobre el norte de la Zona Metropolitana del Valle de México muestran hundimientos con tendencia mayormente lineal y tasas de hasta 285

mm/año, y a lo largo de la estructura del TEO las tasas superan 200 mm/año. En el perfil entre las lumbreras L0 y L5, el hundimiento acumulado máximo es de alrededor de 1,490 mm cerca de la L0 y disminuye hasta la L3, y es mayor entre L0 y L2 que entre L2 y L5. El artículo también localiza zonas de probable fracturamiento del suelo donde hay saltos de desplazamiento. A 200 mm/año, diez años equivalen a unos 2 m de hundimiento superficial (cálculo propio); el efecto sobre un túnel de 25 a 150 m de profundidad depende de la estratigrafía y de la profundidad. El artículo describe el TEO con 7.5 m de diámetro y 24 lumbreras, cifras que difieren de las adoptadas en la tabla 11.10. La MIA-P, por su parte, solo menciona los asentamientos como causa de la insuficiencia del drenaje (sección 5.7).

El riesgo geotécnico de la construcción está documentado en las lumbreras (capítulo 12): factor de seguridad de 0.59 en la L-00 sin tratamiento y de 0.11 por subpresión en la L-12, y en el túnel, donde las máquinas de los lotes 3 a 5 se diseñaron con presiones de agua estimadas de 4 a 6 bar y basaltos de hasta 80 MPa. El diseño estructural considera el sismo: las estructuras del TEO se clasifican como grupo "A" (de alta seguridad, cuya falla causaría pérdidas elevadas) según el Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo de la CFE, y las lumbreras como tipo 3, es decir, muros de retención circulares con grandes empujes laterales e hidrostáticos. La MIA-P agrega que el revestimiento secundario se diseñó sin contar con el primario y que se verificaron las zonas de falla o transición abrupta en el perfil geológico.

La descarga potencial en Hidalgo de los tres conductos (Emisor Central, Emisor Poniente y TEO) supera los 300 m³/s, mientras que la capacidad actual del río Tula en su primer tramo no llega a 200 m³/s; por eso en 2020 hubo que limitar la descarga del TEO a 30

m³/s. Las obras de ampliación del cauce, que cubrirían 19.2 km, se detuvieron por la oposición ambiental a la tala de árboles. A ello se suma el riesgo de vibraciones en las lumbreras si las compuertas operan parcialmente abiertas (p. 150; sección 5.5).

Los riesgos laborales en la construcción de las lumbreras se califican como altos, aunque pueden minimizarse: derrumbes e inundaciones en la excavación por la presencia de agua subterránea, suelos blandos con hundimientos de más de 30 cm por año y un trazo que pasa en varios kilómetros junto a un canal de aguas negras sin revestimiento y a 10 m de una laguna. Entre las observaciones críticas del artículo figuran que el personal responsable de la seguridad en obra tenía formación de bombero o paramédico y que los plazos ajustados llevaban incluso a los directores a justificar actos arriesgados. El estudio se refiere a las lumbreras, no al túnel completo, y describe el TEO con 52 km y 7.5 m de diámetro.

TABLA 11.22. REGISTRO DE RIESGOS DEL TEO.

RIESGO	EVIDENCIA DISPONIBLE
Falla del Emisor Central e inundación	124,976 a 3,920,481 habitantes afectados según la cota; entrada en carga creciente
Hundimiento regional	Hasta 285 mm/año; más de 200 mm/año a lo largo del TEO; 1,490 mm acumulados cerca de LO
Subpresión y flujo de acuífero en lumbreras	L-12: FS = 0.11; más de 600 L/s; 18 pozos
Presión de agua y suelo mixto en el frente	4 a 6 bar y basalto de hasta 80 MPa previstos en 2008; geología revisada varias veces
Capacidad del río Tula y operación de compuertas	Más de 300 m ³ /s potenciales contra menos de 200 m ³ /s; límite de 30 m ³ /s en 2020
Sismo y zonas de transición	Estructuras grupo A; lumbreras tipo 3; verificación en perfil geológico
Riesgos laborales en lumbreras	Riesgo alto, formación del personal de seguridad, plazos ajustados
Calidad del agua en el destino	Capacidad de tratamiento insuficiente (condicionante 2)

Con la evidencia de la tabla 11.22, el riesgo peor documentado es el geotécnico de la construcción: las cifras de la L-12 (factor de seguridad de 0.11, más de 600 L/s) salen de una tesina y no de una matriz de riesgos del proyecto. Un proyecto de más de 20 mil

millones de pesos justifica una matriz de riesgos y un plan de emergencia; sin registro, el riesgo carece de seguimiento en obra.

En resumen: El TEO se apoyó en una cadena de estudios de nueve disciplinas, desde la evaluación de diseño de 2013 y la ingeniería básica de la CFE hasta el proyecto ejecutivo del contratista. La topografía fija la tabla de las 25 lumbreras; la hidrología y la hidráulica señalan que el cuello de botella está en el río Tula y no en el túnel; la MIA-P describe un anteproyecto que cambió en caudal, lumbreras, profundidad y plazo, y el riesgo geotécnico de la construcción es el menos documentado. Los resultados del subsuelo se presentan en el capítulo 12.



Parte II • La línea de conducción del TEO

12

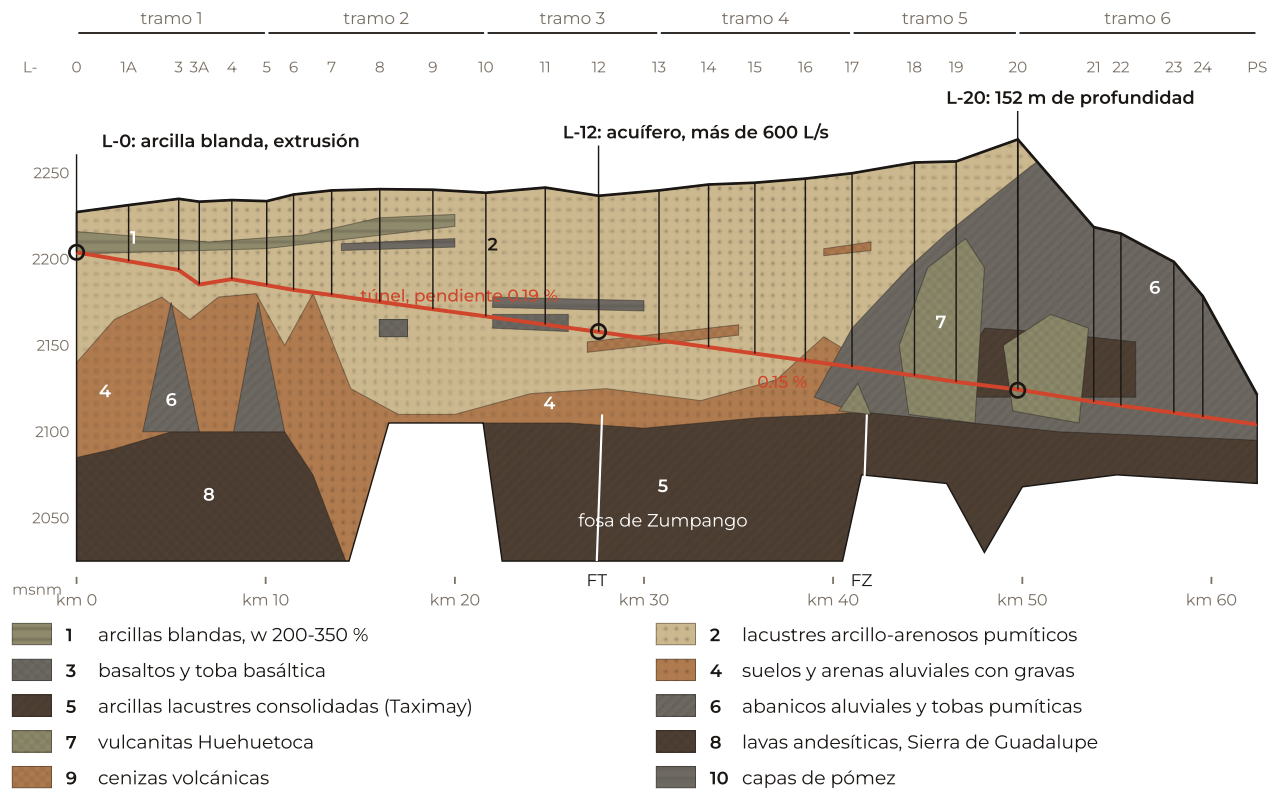
Geología y geotecnia del trazo

Resultados de los estudios del subsuelo a lo largo de 62 km

El TEO se trazó para cortar la menor cantidad posible de roca, y casi lo logró: cerca de 80 % de sus 62.4 km va en suelos blandos o consolidados. Pero el problema más caro del subsuelo no vino de la roca. Vino del agua que esperaba bajo una lumbrera en Nextlalpan: la CFE estimó 4.6 L/s y la obra bombeó más de 600.

Sección geológica general del trazo

de la L-0 al portal de salida; exageración vertical de unas 90 veces



Redibujado de Gutiérrez Morales (2013, p. 31, fig. 1-4); terreno, plantilla y lumbreras con datos de De Nova y Luna (2014). Contactos aproximados.

Figura 12.1. Perfil geológico general del TEO de la L-0 al portal de salida

Este capítulo reúne los resultados de los estudios del subsuelo que atraviesa el Túnel Emisor Oriente (TEO). La información proviene de los informes de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y de los contratistas tal como los reproducen las tesis de la UNAM, de los datos de las tuneladoras publicados por su fabricante y de la descripción de la ingeniería básica de la CFE-GEIC. Cada cifra lleva su fuente con página del PDF, y cuando dos fuentes no coinciden se anota en un recuadro de dato técnico. Cómo se planea una exploración del subsuelo y qué entrega cada tipo de estudio se explica en el capítulo 4; el inventario de los estudios del TEO por disciplina está en el capítulo 11.

El capítulo va de lo general a lo particular: las fuentes y su alcance, el marco geológico de la Cuenca de México y de la Sierra de Nochistongo, la exploración realizada, las propiedades geotécnicas por tramo, la geohidrología, los problemas que el subsuelo causó durante la obra y cómo se resolvieron, el diseño y la construcción de cada lumbrera estudiada, una tabla final de resultados por tramo, una comparación con el Túnel Emisor Poniente II (TEP II), la obra más parecida que se construyó después en la misma cuenca, y una síntesis.

Tres ideas organizan el capítulo. La primera es que el TEO se trazó buscando cortar la menor cantidad posible de roca: cerca del 80 % de su longitud va en suelos blandos o consolidados y solo un 20 % en materiales duros. La segunda es que el agua manda: en la zona lacustre el problema es la baja resistencia de la arcilla saturada, y en los tramos con basaltos fracturados, arenas o gravas lo son el caudal y la presión del agua que entra a la excavación. La tercera es que el subsuelo de la cuenca no es estático: el bombeo de los acuíferos ha abatido las presiones del agua y produce hundimiento regional, lo que cambia las condiciones de diseño con los años.

01

Fuentes y alcance

Los trabajos que sustentan el capítulo cubren aspectos distintos del subsuelo y se complementan: la geología de todo el trazo y la lumbrera L-00, los diseños geotécnicos de las lumbreras L-04 y L-20, la instrumentación medida en las L-18 a L-20, la geohidrología de la L-12, la compilación cartográfica de la ingeniería básica y la comparación con el TEP II. Se escribieron entre 2011 y 2023: los más antiguos describen el proyecto y los cálculos previos a la excavación, y los recientes lo que ocurrió, de modo que difieren a veces en la longitud total del túnel o en el número de lumbreras (sección 4.2.1). Cuando un

trabajo resume un informe, la cifra se atribuye al trabajo y no al informe original. Los parámetros geotécnicos de una lumbrera no se extrapolan a otra: se presentan por separado y solo se comparan en la sección 4.8.

02

Marco geológico de la Cuenca de México y de la Sierra de Nochistongo

EL TRAZO Y SU RELACIÓN CON LA GEOLOGÍA

El TEO se alineó para cortar el menor volumen posible de roca. Con 61.8 km de longitud en el proyecto de 2013, los primeros 40 km atraviesan depósitos cuaternarios poco consolidados del norte de la Cuenca de México, y los últimos 21.8 km, para llegar al río El Salto, al sur de Tula, Hidalgo, se excavan sobre todo en tobas terciarias consolidadas de Nochistongo. Por eso las máquinas de presión de tierras balanceada (EPB) trabajan en depósitos blandos o consolidados en cerca de 80% del recorrido y en formaciones duras o rocosas en solo 20%; las rocas duras son algunas coladas de lava y conglomerados fluviales cementados.

La sección geológica general de la trayectoria (figura 1-4 de la tesis) se presenta en la imagen de apertura del capítulo, redibujada con el terreno y la plantilla de la tabla de lumbreras de De Nova y Luna (2014, p. 34).



Figura 12.2. Trazo del TEO entre las lumbreras L-00 y L-05 en 2009

LAS TRES ETAPAS DE LA HISTORIA GEOLÓGICA

La historia geológica del área que cruza el túnel es la de dos formaciones lacustres y la de cuerpos de rocas volcánicas intercalados en ellas, y se divide en tres etapas.

En la primera etapa, un lago pliocénico, se formó la Formación Taximay. Entre Zumpango y Tula existió durante el Plioceno un lago somero entre anticlinales laramídicos, dentro de una fosa oligocénica orientada al noroeste. El lago se rellenó lentamente con cenizas volcánicas que se transformaron en arcillas. En épocas de sequía el agua desaparecía y se formaban suelos, por lo que en la secuencia hay, pocas veces, suelos café rojizos oxidados. Esta secuencia se llama Formación Taximay y el túnel la cruza en unos 15 km. Se distinguen dos miembros: la Taximay Superior, de arcillas consolidadas blancas, cremas o verde claro con porciones rojizas y escasas gravas, y la Taximay Inferior, de arcillas lacustres muy consolidadas de color verde oscuro, sin elementos fluviales. La diferencia de color obedece a que en el miembro superior se acumularon tobas pumíticas (ácidas) y en el inferior cenizas basálticas negras.

La segunda etapa corresponde al lago cuaternario de la Cuenca de México. Los depósitos lacustres del sur (Chalco), centro (zona metropolitana) y norte (Cuautitlán-Zumpango) se originan por el cierre de la cuenca provocado por la Sierra del Chichinautzin en el Cuaternario Superior. Aunque todos son de ambiente lacustre somero, cambian de sur a norte según el material volcánico de origen: tobas principalmente basálticas en el sur, andesíticas en el centro y casi exclusivamente pumíticas dacítico-riolíticas en el norte. El resultado práctico es el contenido de agua de las arcillas: de 300 a 400% en el sur, de 150 a 200% en el centro y de 50 a 100% en el norte. El TEO excava en estas arcillas limo-arenosas pumíticas de bajo contenido de agua desde la lumbrera 0 hasta el norte de Zumpango, sobre 33 km. Son depósitos unos 2 millones de años más jóvenes que la Taximay, y por eso son blandos y poco consolidados, mientras que la Taximay es dura.

La tercera etapa es la de las vulcanitas, rocas volcánicas contenidas en abanicos aluviales del norte o en los depósitos lacustres del sur. El túnel las corta en tres sitios: (a) los basaltos y cenizas del cerro de Tultepec, sobre 11 km (4 km de basaltos y cenizas y 7 km de cenizas poco consolidadas); (b) las ignimbritas y tobas intermedias a ácidas de la Formación Huehuetoca, bajo la Sierra de Nochistongo, donde las exploraciones encontraron roca en parte dura y en parte suave, con intercalaciones de arenas, gravas y boleas poco consolidados; y (c) las lavas de un valle angosto erosionado entre los km 52.9 y 53.1, donde el túnel cruza unos 300 m de lavas duras y no alteradas y donde entrará agua al frente "profusamente".

LAS SEIS FORMACIONES QUE CRUZA EL TÚNEL

A lo largo del trazo se identifican seis formaciones geológicas. La Tabla 12.1 las resume junto con lo que implican para la excavación y para el agua. El túnel cruza además tres zonas geotécnicas: la zona 1, de L-00 a L-10, en arcillas saturadas muy compresibles que amplifican las ondas sísmicas; la zona 2, de L-10 a L-17, con frente mixto de basalto sobre ceniza cementada y toba; y la zona 3, de L-17 al portal, en gravas y boleas en limo con presión de poro elevada y arcillas muy consolidadas de la formación Taximay.

TABLA 12.1. FORMACIONES GEOLÓGICAS ATRAVESADAS POR EL TEO

N.º	FORMACIÓN (EDAD)	MATERIAL	RECORRIDO APROXIMADO DEL TÚNEL	COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO PREVISTO
1	Depósitos lacustres de la Cuenca de México (Cuaternario Superior, máx. unos 300 000 años)	Arcillas, limos y arenas estratificadas de lluvias de erupciones pumíticas ácidas; capas de ceniza basáltica y pómez; sin gravas fluviales ni fallas	Tramo sur y centro (ver Tabla 12.2)	Poco transmisible; fuertes gastos de agua solo al cortar estratos de ceniza o pómez
2	Lavas, cenizas basálticas y pómez del Cuaternario (cerro de Tultepec y lavas del flanco norte de la sierra)	Lavas con fracturas columnares y cenizas muy poco cementadas	11 km entre las lumbreras 10 y 14	Alta permeabilidad y transmisibilidad; fuertes entradas de agua
3	Suelos pre-lacustres (Cuaternario)	Limos arenosos café, estratos de arena y, en puntos, gravas fluviales; muy compactados	En intervalos, unos 6 km	Sin aportaciones importantes por su compactación; sin fallas
4	Abanicos aluviales (Plio-Cuaternario de la Sierra de Nochistongo)	Suelos muy compactos rojizos, subhorizontales; en la base, arenas, gravas y boleos cementados o no	En intervalos, unos 6 km	Poco permeables en general; la base de gravas y boleos puede dar entradas súbitas
5	Vulcanitas Huehuetoca (Plioceno Superior)	Ignimbritas semiduras alternadas con tobas rojizas consolidadas, lavas ácidas fracturadas, brechas y flujos piroclásticos	Unos 6 km	Poca transmisibilidad; infiltraciones cambiantes pero manejables
6	Depósitos lacustres Taximay (Plioceno Medio), miembros Superior e Inferior	Arcillas, arcillas limosas y limos arenosos consolidados, con capas de pómez; estructura de bloques (fosas y pilares)	Alrededor de 15 km	Permeabilidad primaria muy baja a nula; entradas súbitas posibles en fallas, que en general están selladas

Cuatro observaciones ayudan a leer la tabla. La formación lacustre cuaternaria del norte es poco compresible porque su contenido de arcilla es bajo (es pumítica), en contraste con las arcillas del centro de la ciudad; hacia el sur aparece superficialmente una cuña reciente de arcillas con 200 a 350 % de agua que llega hasta las inmediaciones de la lumbrera 8, sobre pumicitas subyacentes de 50 a 100 %. La Taximay se distingue de los depósitos

lacustres del norte de la cuenca en la edad (unos 2 millones de años de diferencia), en la compactación (muy consolidada y con poca agua) y en la tectónica (está fallada, y las fallas crecieron conforme avanzaba la sedimentación). Los abanicos aluviales están poco afectados por la tectónica en su parte inferior y se depositaron arriba del antiguo nivel freático regional. Por último, el tectonismo de la Taximay se consideró "bien sellado", de modo que se pronosticaron entradas súbitas de agua pero nunca importantes; la sección 4.6 contrasta la predicción con los hechos.

LITOLOGÍA A LO LARGO DEL TRAZO

La tabla 12.2 traduce las formaciones a cadenamientos. Es la información más útil para saber qué material encuentra la máquina en cada kilómetro, y se debe leer junto con el perfil geológico general de la imagen de apertura.

TABLA 12.2. LITOLOGÍA DEL TEO POR CADENAMIENTO

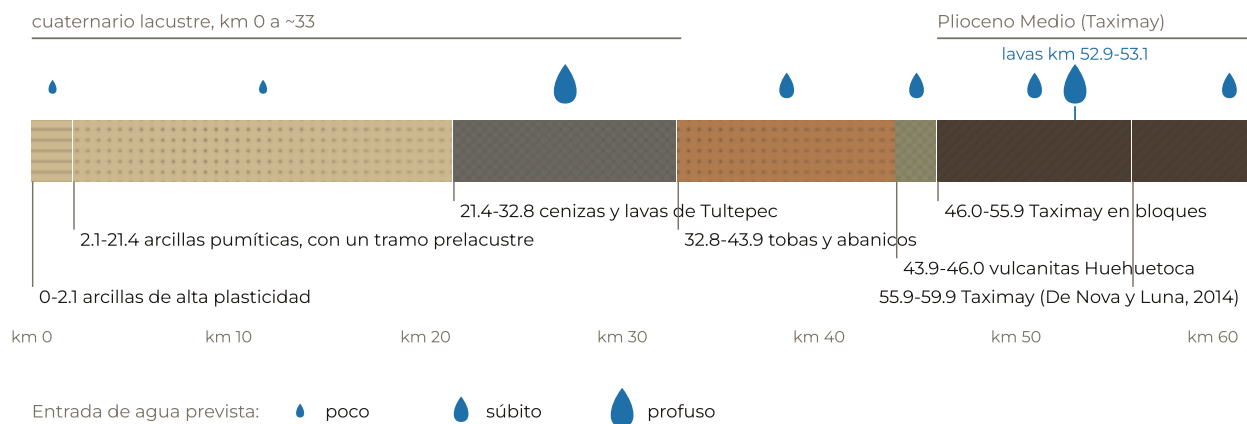
DEL KM	AL KM	MATERIAL
0.0	2.1	Arcillas lacustres de alta plasticidad y elevado contenido de agua
2.1	18.6	Arcillas lacustres pumíticas de bajo contenido de agua y poca plasticidad
18.6	19.2	Suelos tobáceos prelacustres, algo consolidados
19.2	21.4	Arcillas lacustres pumíticas de bajo contenido de agua y poca plasticidad
21.4	22.6	Cenizas volcánicas sueltas de Tultepec
22.6	26.0	Cenizas y lavas volcánicas y depósitos lacustres subyacentes
26.0	29.0	Arcillas lacustres pumíticas de bajo contenido de agua y poca plasticidad
29.0	32.8	Cenizas volcánicas sueltas y depósitos lacustres pumíticos de bajo contenido de agua y poca plasticidad
32.8	38.5	Suelos tobáceos café rojizos consolidados
38.5	43.9	Abanicos aluviales: suelos consolidados con arenas y gravas, en gran parte cementadas
43.9	46.0	Vulcanitas Huehuetoca: ignimbritas, brechas volcánicas y tobas de dureza media a elevada
46.0	55.9	Depósitos lacustres arcillosos Taximay Inferior y Superior, medianamente a muy consolidados, en bloques tectónicos; valle erosionado con tobas y lavas entre los km 52.9 y 53.1

DEL KM	AL KM	MATERIAL
55.9	59.9	Depósitos lacustres arcillosos de la Taximay
59.9	61.8 (portal de salida)	Arcillas consolidadas de la Taximay Inferior y Superior en bloques, y base de abanicos aluviales con tobas consolidadas, suelos y gravas

Dato técnico: coherencia de cadenamientos. El texto de la etapa 3 dice que el túnel corta 11 km de basaltos y cenizas en Tultepec, y la tabla 12.2 asigna cenizas y lavas entre los km 21.4 y 32.8 (11.4 km en total), así que ambas descripciones coinciden (cálculo propio). La descripción de la formación de basaltos los ubica "entre las lumbreras 10 y la 14"; con la tabla de lumbreras del capítulo 11, L-10 está en el cadenamiento 21+635 y L-14 en 33+416, lo que es consistente con ese intervalo.

Seis formaciones a lo largo del trazo

y cuánta agua prometía cada una al frente de la tuneladora



Elaboración propia con datos de Gutiérrez Morales (2013, pp. 15-17 y 21-26) y De Nova y Luna (2014, p. 28). Agua en la arcilla: 300-400 % al sur, 150-200 % al

Figura 12.3. Franja a escala de las seis formaciones a lo largo de 62 km

ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS MAYORES

El estudio puso atención especial en las fallas, porque pueden afectar el funcionamiento del túnel. Los lineamientos regionales con desplazamiento lateral tienen en general rumbo NE-SW y se relacionan con un eje distensivo NW-SE, el de Huehuetoca-

Popocatepetl. La secuencia lacustre y el basamento local están afectados por las fallas transtensionales NE-SW denominadas F-8 y F-9.

En esta zona se han presentado agrietamientos persistentes del suelo y descensos de la superficie de hasta 0.40 m por año. La tesis distingue dos mecanismos: los agrietamientos por desecación, que se manifiestan en época de estiaje, y los asociados a fallas activas NE-SW aceleradas por la extracción de agua, que ocurren en época de lluvias.

En la Sierra de Nochistongo el túnel cruza un tramo de intensa actividad tectónica terciaria. La sierra, que es el parteaguas entre la Cuenca de México y la región norte de Tula, representa una transición estructural de la fosa de Zumpango (al sur) a la fosa de Tula (al norte). Como consecuencia el túnel cruza fallas que dividen en bloques los depósitos lacustres de la Formación Taximay: se reconocen seis fallas dirigidas al ESE que interceptan el trazo, y un segundo sistema de edad pleistocénica inferior, el de Tepotzotlán, de fallas al noreste. Las fallas se trazaron con evidencias superficiales y con datos de barrenos; en el segundo caso se detectaron por el cambio de nivel del contacto entre las arcillas claras de la Taximay Superior y las verde oscuro de la Inferior. En el perfil general se indican solo las fallas que definen bloques importantes.

La base de datos regional incluye los pozos profundos perforados por Petróleos Mexicanos y por el antiguo Departamento del Distrito Federal (Tabla 12.3). Su correlación permitió establecer que las rocas marinas del Cretácico son el basamento de la secuencia volcano-sedimentaria continental del Terciario y Cuaternario de la cuenca.

TABLA 12.3. POZOS PROFUNDOS PERFORADOS EN LA CUENCA DE MÉXICO

PERFORADO POR	POZO	PROFUNDIDAD (M)
Petróleos Mexicanos	Texcoco-1	2,065
Petróleos Mexicanos	Copilco-1	2,258
Petróleos Mexicanos	Tulyehualco-1	3,000
Petróleos Mexicanos	Mixhuca-1	2,452
Petróleos Mexicanos	Roma-1	3,200
Departamento del Distrito Federal	Av. Cien Metros-1	2,233
Departamento del Distrito Federal	San Juan de Aragón-2	2,232

PERFORADO POR	POZO	PROFUNDIDAD (M)
Departamento del Distrito Federal	Tláhuac-3	2,241
Departamento del Distrito Federal	Río San Joaquín-4	2,267
Departamento del Distrito Federal	La Castañeda-5	2,317
Departamento del Distrito Federal	Av. Centenario-6	2,350
Departamento del Distrito Federal	Coapa-7	2,236
Departamento del Distrito Federal	Coapa-8	2,234

POR QUÉ IMPORTA EL MARCO GEOLÓGICO: DECISIONES Y SU JUSTIFICACIÓN

La primera decisión fue trazar el túnel por el norte de la cuenca, en depósitos lacustres pumíticos, y no por la zona de arcilla del centro. La razón es que las arcillas del norte tienen 50 a 100 % de agua frente a 150 a 200 % del centro y 300 a 400 % del sur, y son poco compresibles. La tesis no detalla la alternativa descartada; la evidente, la zona central de arcilla muy blanda, queda implícita (inferencia).

La segunda fue pasar bajo la Sierra de Nochistongo con máquinas EPB aun en las vulcanitas, porque las vulcanitas Huehuetoca tienen poca transmisibilidad y se pronosticó que se podían atravesar "sin mayores dificultades". La sección 4.6 compara esa previsión con lo ocurrido.

La tercera fue que la tuneladora trabaje en modo cerrado en el arranque. En arcillas blandas bajo el nivel freático, el modo cerrado equilibra las presiones del terreno y las hidrostáticas y reduce asentamientos. El modo abierto no se designó para el proyecto por los niveles freáticos y por falta de información sobre el flujo de agua a la profundidad del frente.

Exploración y estudios de campo realizados en el TEO

Esta sección documenta la exploración realizada en el TEO: su organización en la ingeniería básica, los tramos constructivos, la exploración en las lumbreras, los resultados geofísicos y la instrumentación instalada.

INGENIERÍA BÁSICA DE LA CFE (2008-2009)

La ingeniería básica de la CFE-GEIC (2008-2009), con sus once informes por disciplina, sus cinco etapas de estudio, sus métodos de exploración y el SIGTEO, se describe en el capítulo 11 (secciones 5.1.2 y 5.1.5). Por convenio con la Conagua, la CFE-GEIC hizo esos estudios; el proyecto ejecutivo y la construcción quedaron a cargo del consorcio COMISSA. Las etapas de estudio no coinciden con los seis tramos constructivos, que se tratan a continuación.

SEIS TRAMOS CONSTRUCTIVOS

El túnel se divide en seis tramos, entre los que se reparten los frentes de excavación (longitudes y contratistas en la tabla 5.5 del capítulo 11):

TABLA 12.4. TRAMOS CONSTRUCTIVOS DEL TEO

TRAMO	LUMBRERA INICIAL	LUMBRERA FINAL	MATERIAL PREDOMINANTE
T-1	L-0	L-5	Arcillas blandas con alto contenido de agua
T-2	L-5	L-10	Depósitos lacustres arcillo-arenosos con intercalaciones de arenas aluviales y gravas poco permeables
T-3	L-10	L-13	Depósitos lacustres arcillo-arenosos con varias intercalaciones de tobas basálticas
T-4	L-13	L-17	Depósitos lacustres arcillo-arenosos con cenizas volcánicas, toba basáltica, escombros volcánicos y tobas pumíticas medianamente permeables

TRAMO	LUMBRERA INICIAL	LUMBRERA FINAL	MATERIAL PREDOMINANTE
T-5	L-17	L-20	Tobas pumíticas medianamente permeables con conglomerados y fragmentos de roca; conglomerados con depósitos aluviales de baja permeabilidad y, sobre todo, arcillas lacustres consolidadas (Taximay)
T-6	L-20	Portal de salida	Arcillas lacustres consolidadas (Taximay) con abanicos aluviales, tobas pumíticas, conglomerados y fragmentos de roca

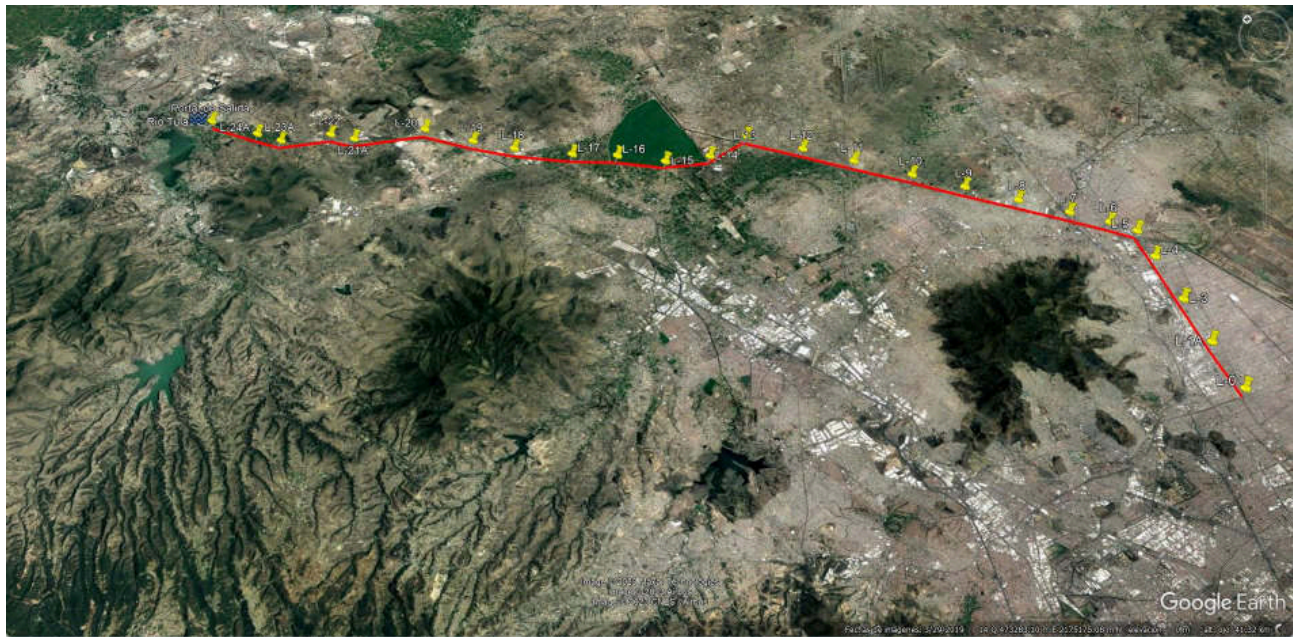


Figura 12.4. Localización del TEO y sus seis tramos constructivos



Figura 12.5. Esquema general del TEO y sus lumbreras sobre la cuenca

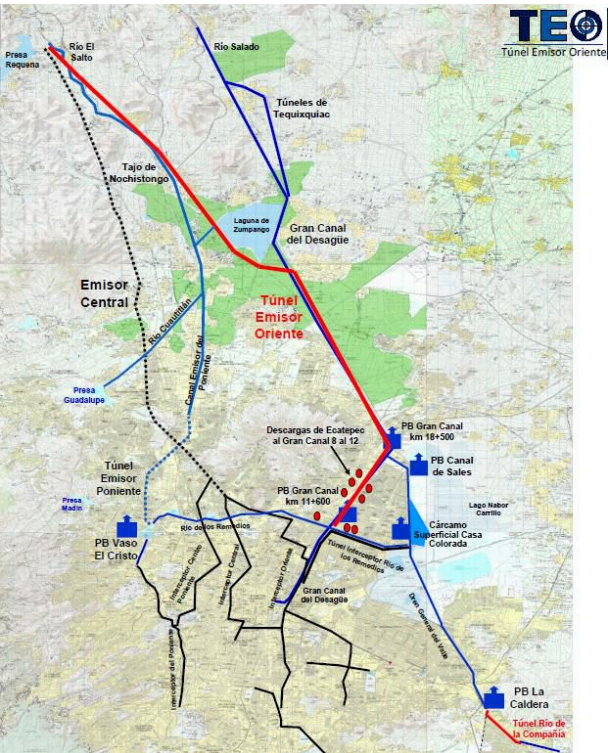


Figura 12.6. Trazo en planta del TEO junto al drenaje profundo en operación

EXPLORACIÓN EN LAS LUMBRERAS ESTUDIADAS

En cada lumbrera del TEO se hicieron al menos dos sondeos de los tipos sondeo continuo (cono eléctrico), sondeo mixto (penetración estándar con muestreo), piezocono o sondeo selectivo. La Tabla 12.5 resume lo documentado para las cuatro lumbreras con datos suficientes.

TABLA 12.5. EXPLORACIÓN DOCUMENTADA POR LUMBRERA

LUMBRERA	CADENAMIENTO	SONDEOS Y PRUEBAS DE CAMPO	PROF. EXPLORADA	PRUEBAS DE LABORATORIO
L-00	0+000	Sondeo de COMISSA (modelo estratigráfico de 100.3 m); sondeo de exploración adicional en la franja perimetral, que halló suelo blando contaminado con mortero	100.3 m	Contenido de agua, SPT (N de 2 a 99), tubos de pared delgada
L-04	8+207.963	SPT-L4, sondeo continuo SC-L4 (cono eléctrico), sondeos SM-26 (mixto) y SM-27 (selectivo), estudio Cross Hole; piezómetros PZA-L4A, C, D y PZL4-B; tubo de observación a 7.30 m	56 a 57 m	Compresión simple, triaxial UU, consolidación, finos, w, Ss, LL, LP, IP
L-12	27+603.115	Ingeniería básica: SPT-L12-IB (90 m) y SM-L12-IB (97.5 m); proyecto ejecutivo: sondeo mixto (95.05 m); 16 pruebas Lefranc de 5 m; magnetometría, tomografía eléctrica dipolar (3 líneas hasta 5 m) y SEV	90 a 97.5 m	w, límites de consistencia, finos, granulometría, resistencia al corte
L-20	49+764	SEV (AB/2 máx. 250 m), SPT hasta 165 m, sondeo mixto a 167 m (120 m de SPT, 47 m de barril NQ y 20 m de tubo Shelby), estación piezométrica de cinco bulbos y pozos de observación	165 a 170 m	Índice y resistencia: compresión simple y triaxial UU

Tres observaciones ayudan a entender los retos. La profundidad de exploración creció con la de la lumbrera, de unos 57 m en L-04 a 170 m en L-20; en L-20 el SPT rebasó los 100 m y, entre 100 y 135 m, hubo que usar barril NQ por la dureza del material. En L-04 se encontraron estratos con rechazo al SPT (más de 50 golpes con avance mínimo) en

los últimos 10 m explorados, lo que muestra capas muy resistentes bajo suelos blandos. Y en L-12 la ingeniería básica no dio parámetros hidráulicos para diseñar el abatimiento: las pruebas Lefranc se hicieron en tramos de 5 m que promedian suelos distintos y sirvieron para una estimación de 4.6 L/s que resultó muy baja (sección 4.6).

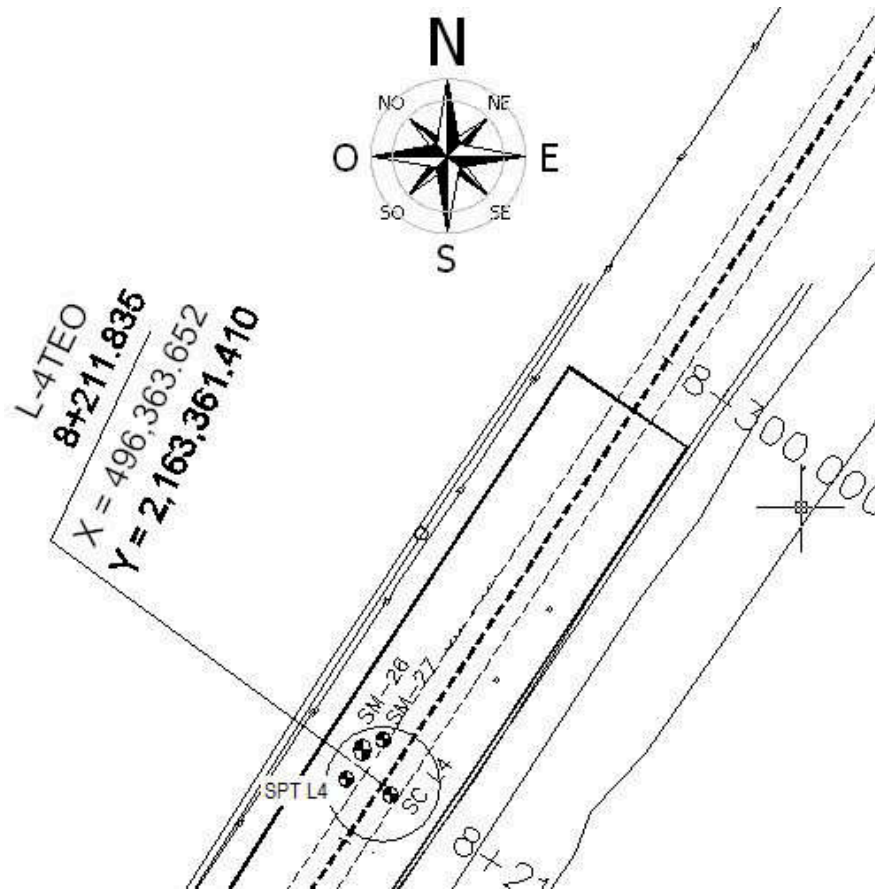


Figura 12.7. Ubicación de los sondeos en la lumbrera L-04

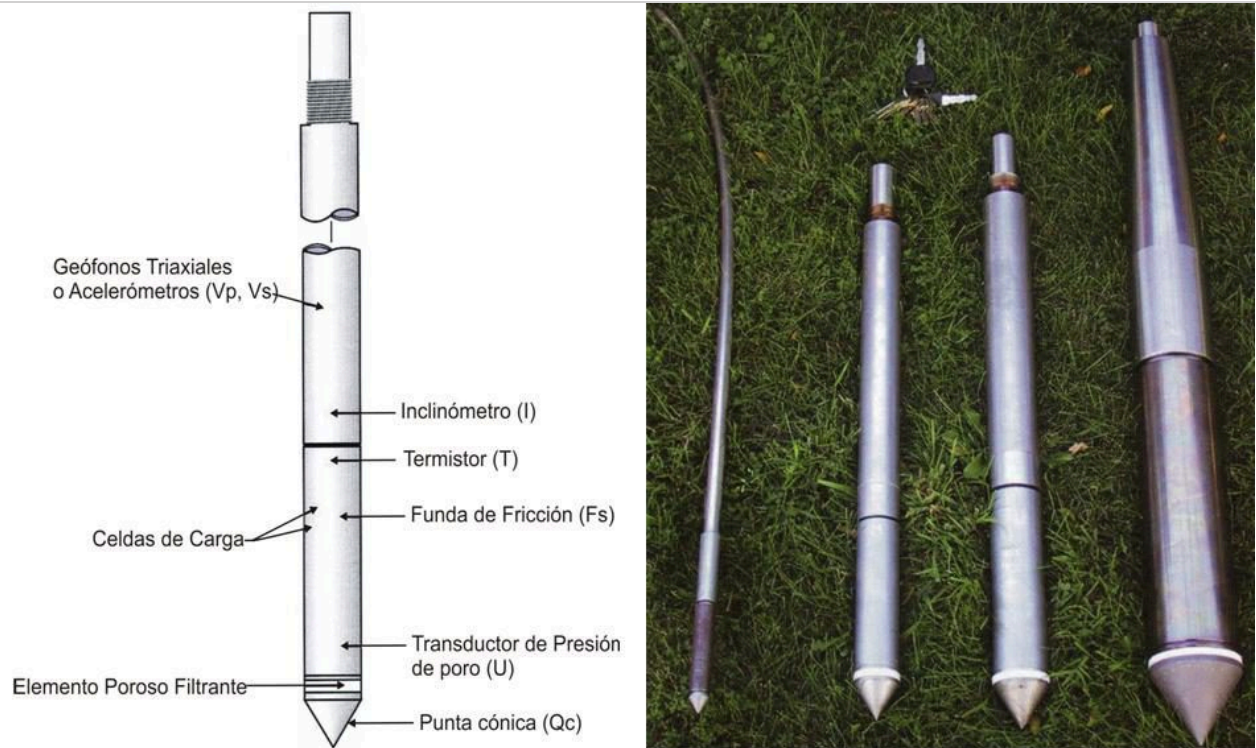


Figura 12.8. Piezocono y conos eléctricos usados en la exploración de lumbreras

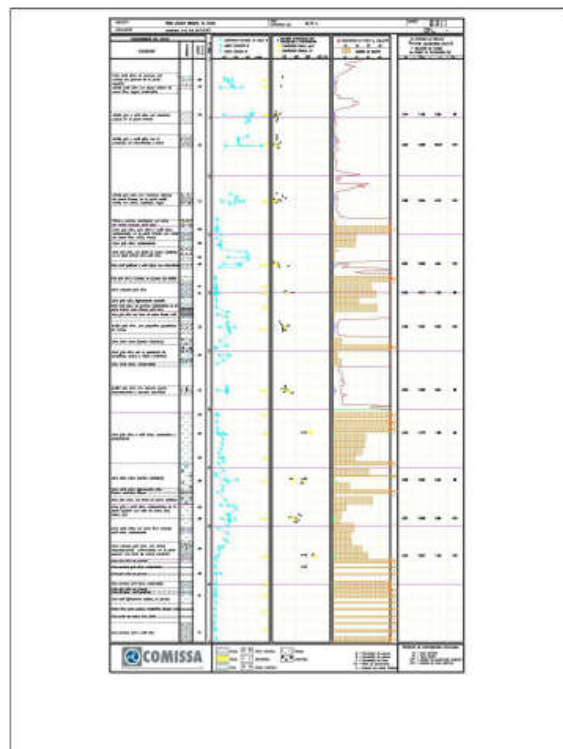


Figura 12.9. Registro de los sondeos SM-26 y SM-27 en L-04, primera parte

Figura 12.10. Registro de los sondeos SM-26 y SM-27 en L-04, segunda parte



Figura 12.11. Sondeos de ingeniería básica y proyecto ejecutivo en la lumbrera L-12

La exploración de la L-12 con pruebas Lefranc de 5 m resultó el eslabón débil de la cadena. La ingeniería básica no dio parámetros hidráulicos, y una lumbrera de 84.5 m dentro de un acuífero a más de 3 bares requería una prueba de bombeo antes de aprobar el proyecto ejecutivo. La prueba se hizo en enero de 2010, tres meses antes de que arrancara el sistema de abatimiento, y con ella aparecieron dos acuíferos en gravas y arenas bajo el nivel estático que la ingeniería básica no había mostrado. Esa prueba debió realizarse en la ingeniería básica, cuando todavía se podían mover el costo y el plazo; los 873 días de bombeo que siguieron dan la medida de lo que costó la omisión.

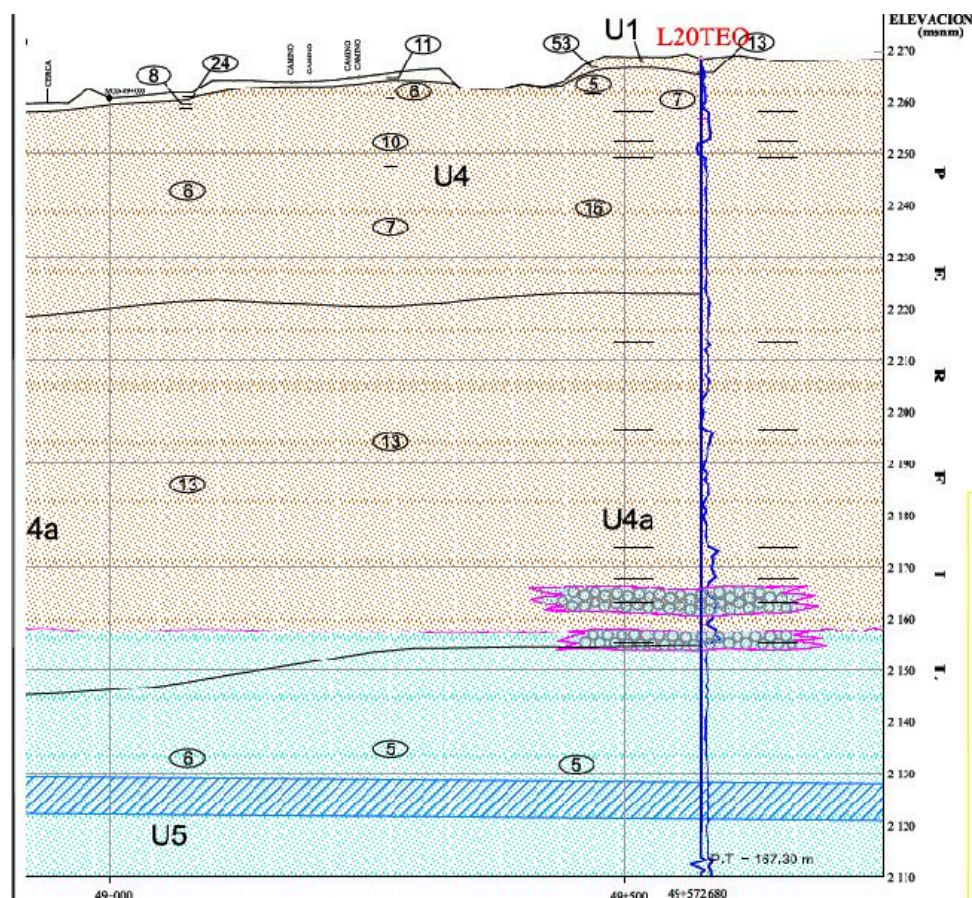


Figura 12.12. Sondeo eléctrico vertical en la lumbrera L-20

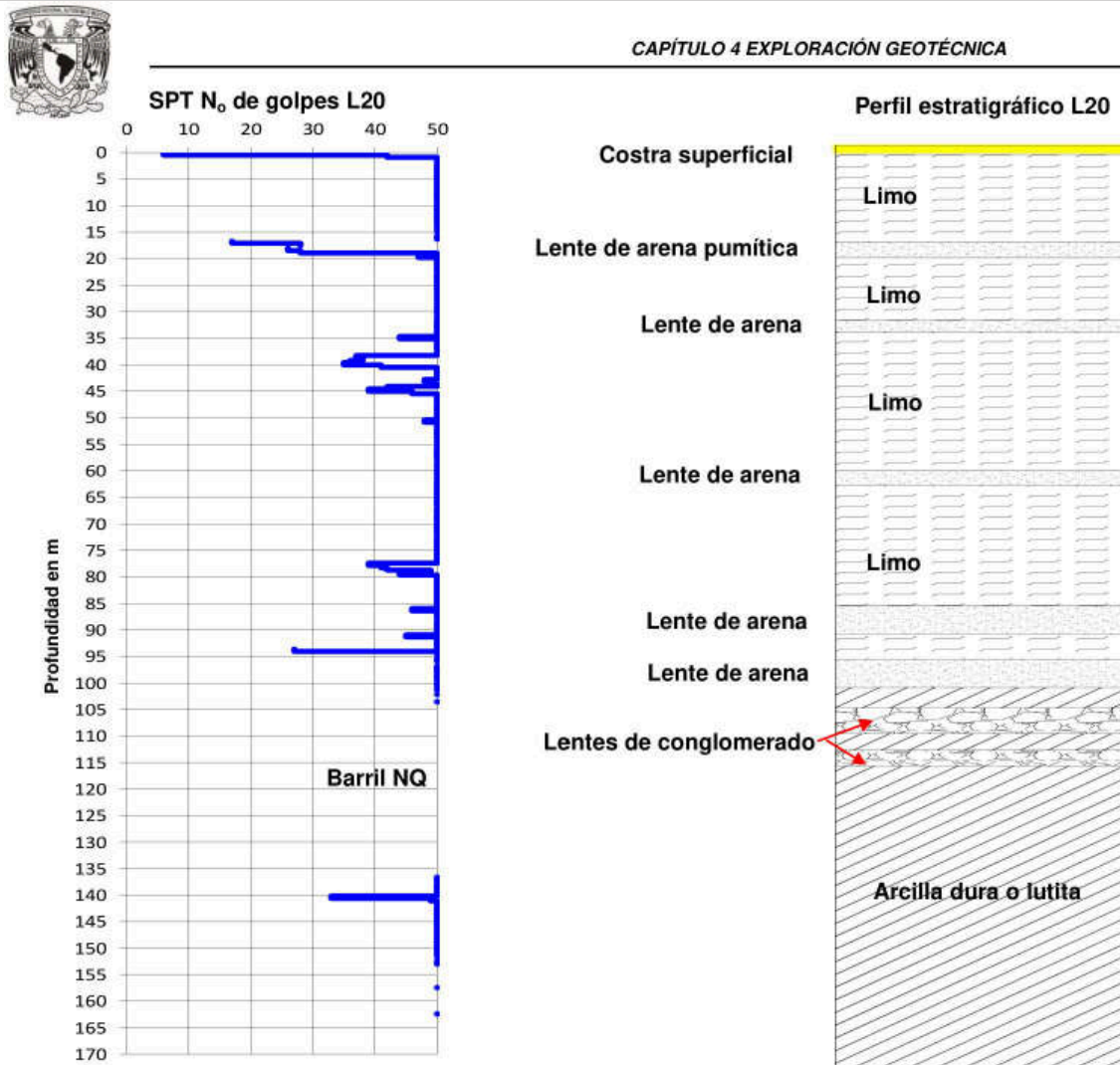


Figura 12.13. Perfil de penetración estándar de la lumbrera L-20 hasta 170 m

RESULTADOS DE LA GEOFÍSICA EN LAS LUMBRERAS

En la L-12 (Santa Ana Nextlalpan), la magnetometría descartó tubería enterrada, la tomografía eléctrica dipolar (3 líneas) mostró suelo arcilloso hasta los 5 m investigados, los SEV definieron el tipo de suelo y no se detectaron grietas ni cavernas. En la L-20 (Huehuetoca), el SEV con AB/2 de 250 m separó depósitos aluviales con suelos residuales (arcillas, limos y arenas; resistividad de 13 a 53 ohm·m en la unidad U1, de 0 a 9 m de espesor) de una unidad U4 de resistividad de 5 a 16 ohm·m, con intercalaciones, y de depósitos aluviales de arcillas plásticas, conglomerados y areniscas con interfaces de ceniza (U5, 5 ohm·m, espesor indefinido). En la L-04, el estudio cross-hole dio

velocidades de onda de corte V_s de unos 111 m/s en la costra superficial, 112 m/s en la arcilla blanda (unidad B) y hasta 500 m/s en las arenas cementadas del fondo (unidad G2), con las que se calcularon módulos de rigidez al cortante entre 1,511 y 45,744 t/m².

INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO INSTALADA

La instrumentación geotécnica y geohidrológica de las lumbreras L-12 y L-18 a L-20 se resume a continuación.

TABLA 12.6. INSTRUMENTOS INSTALADOS EN L-12

ETAPA	INSTRUMENTO	CANTIDAD	DETALLE
Ingeniería básica	Piezómetros abiertos tipo Casagrande	5 (PZAL-L12-01 a 05)	Bulbos a 85.30, 68.90, 49.00, 38.18 y 23.50 m
Ingeniería básica	Pozo de observación somero	1 (POL-L12-01)	15.65 m
Ingeniería básica	Extensómetros de barra	3	90.25, 42.15 y 20.05 m
Proyecto ejecutivo	Piezómetros abiertos complementarios	2 (PZAL-L12-C-06 y 07)	95 y 45 m
Proyecto ejecutivo	Piezómetro eléctrico (cuerda vibrante)	1 (PZEL-L12-01)	90 m
Proyecto ejecutivo	Pozo de observación profundo	1 (POL-C-L12-02)	92.5 m
Proyecto ejecutivo	Inclinómetros	4	Dos cortos (42 m, en muro Milán) y dos largos (92.5 m)

En L-18, L-19 y L-20 se instalaron referencias superficiales radiales (20 por lumbrera, a 7, 9, 11, 13, 15 y 17 m del centro), inclinómetros en muro Milán y en terreno natural, piezómetros eléctricos de cuerda vibrante (cuatro en la estación de L-20, a 123, 139, 147 y 159 m según la figura de presiones) y pozos de observación al centro de la lumbrera (caso de L-19).

La instrumentación de la ingeniería básica en las 24 lumbreras del proyecto (pozos de observación, piezómetros Casagrande y eléctricos, extensómetros de barra) se describe en el capítulo 11, sección 5.4. Las mediciones periódicas de estos instrumentos, junto con las de los aprovechamientos de agua, dieron la piezometría regional de la sección 4.5.5.

siguiente figura (se indican las profundidades de instalación de cada instrumento).

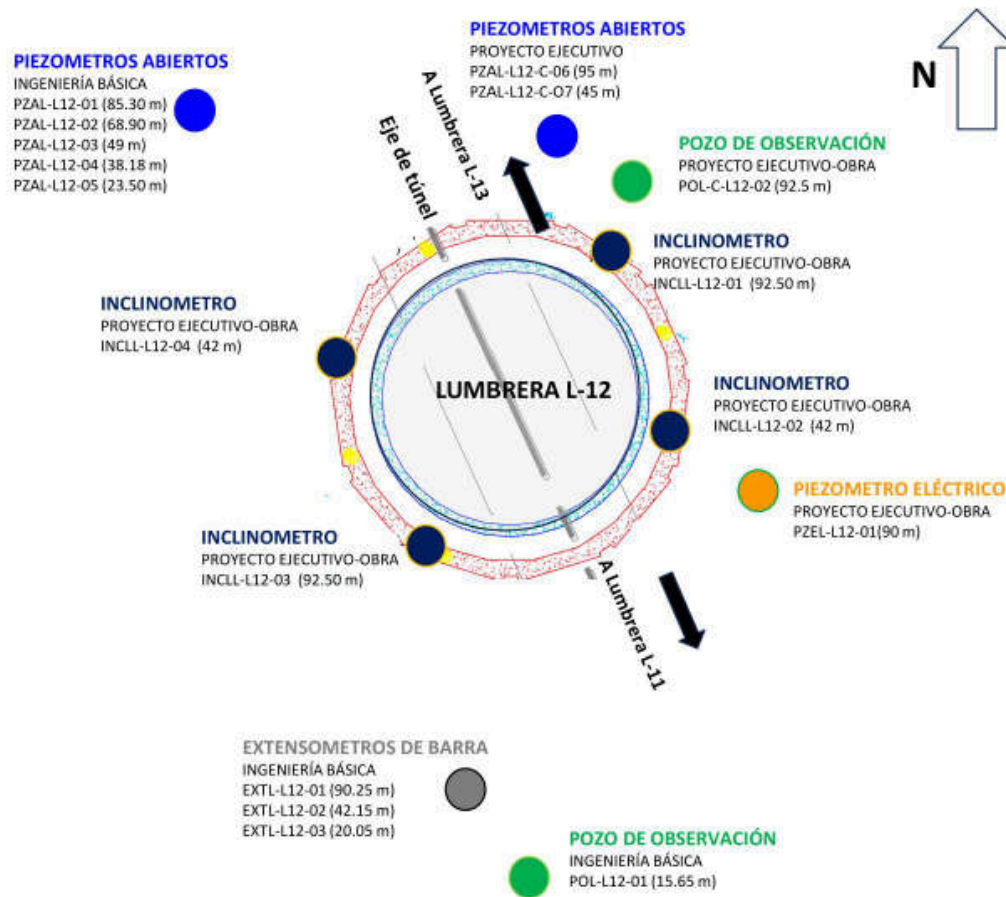


Figura 29.- Sembrado de instrumentación utilizada para la lumbrera L-12 (Fuente: CONAGUA-CFE-COMISSA).

Figura 12.14. Instrumentación de la lumbrera L-12, nomenclatura y profundidades

04

Condiciones del subsuelo y propiedades por tramo y lumbrera

Esta sección presenta las condiciones del subsuelo de cada tramo y de las lumbreras con estudio detallado: L-00 y L-04 (tramo 1), L-12 (tramo 3) y L-18 a L-20 (tramos 5 y 6). Los demás tramos se describen con la geología regional de la sección 4.2 y, para la excavación, con los datos de las tuneladoras de

la sección 4.6.4. Los parámetros de resistencia y deformabilidad son los de proyecto, obtenidos de laboratorio y de campo; los símbolos de los suelos siguen el Sistema Unificado de Clasificación (ver Marco teórico).

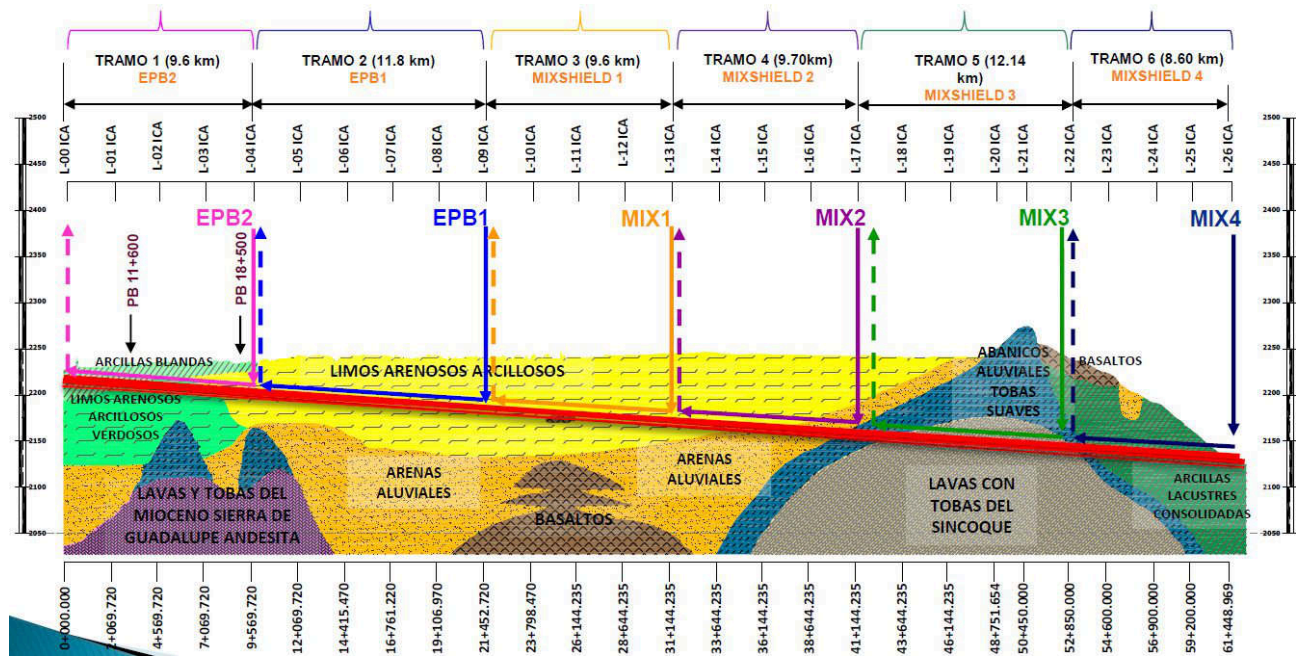


Figura 12.15. Interpretación de Mooser en elevación con la máquina de cada tramo

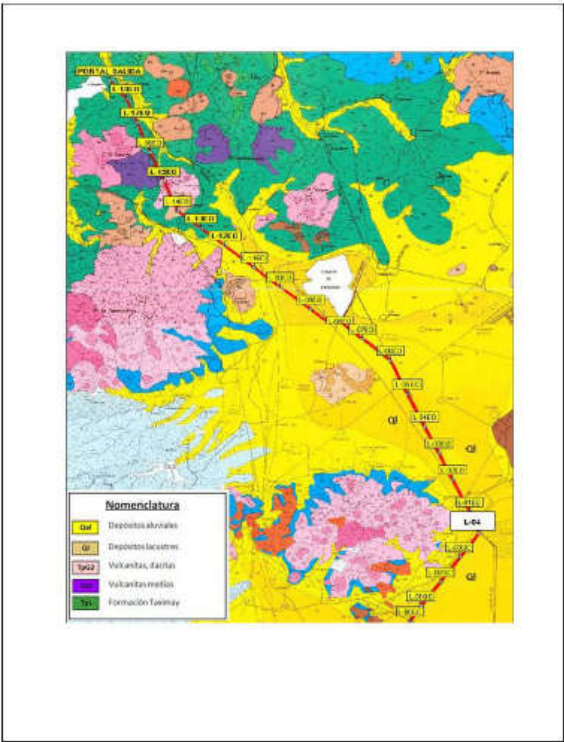


Figura 12.16. Interpretación geológica de Mooser en planta

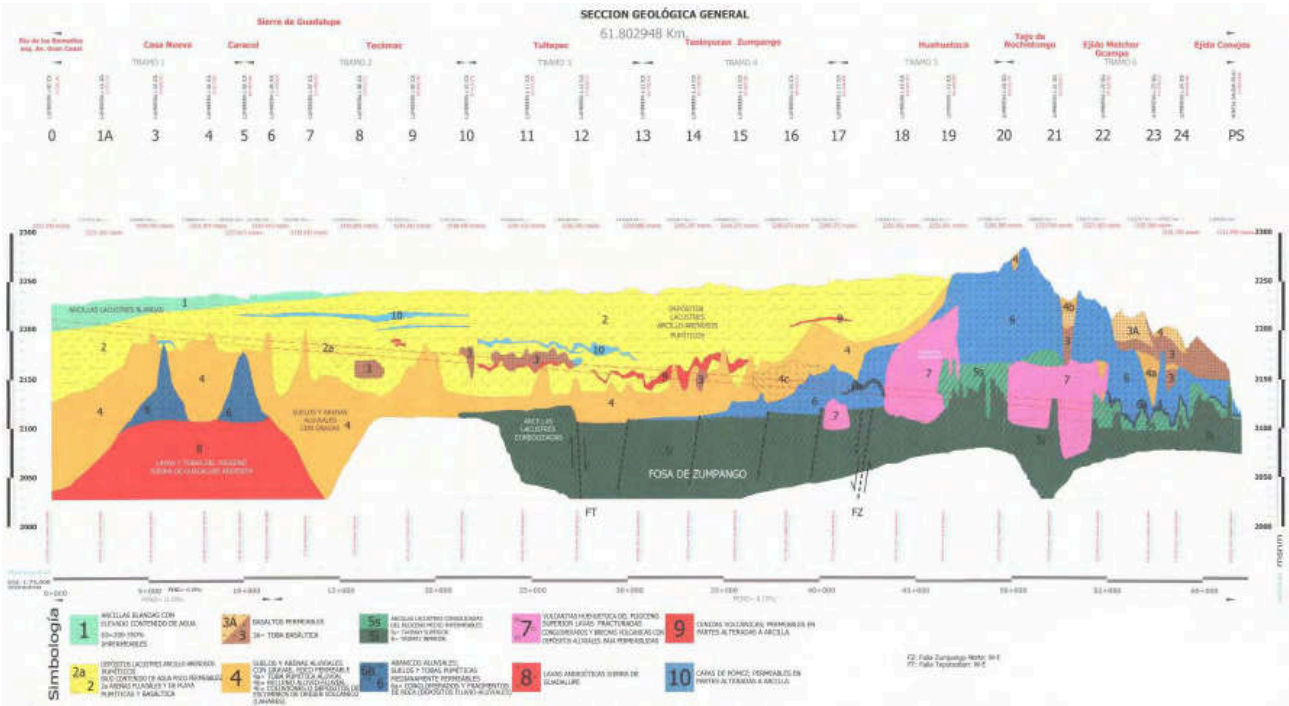


Figura 12.17. Geología de la L-17 al portal de salida y sus lumbreras

TRAMO 1: LUMBRERA L-00 (KM 0+000)

La lumbrera L-00 es el arranque del TEO y coincide con la lumbrera 2 del Interceptor Río de los Remedios. El sondeo de COMISSA, de 100.3 m, mostró un perfil de arcillas y limos de muy alta plasticidad y contenido de agua, con la resistencia concentrada en capas profundas (Tabla 12.7).

TABLA 12.7. MODELO ESTRATIGRÁFICO DE LA LUMBRERA L-00

UNIDAD	PROFUNDIDAD (M)	MATERIAL	W (%)	Γ (KN/M ³)	C (KPA)
A (costra)	0.0 a 3.0	Relleno heterogéneo de arcilla, arena, grava y basura; N SPT de 2 a 63	n.d.	n.d.	n.d.
B1	3.0 a 9.9	Arcilla CH y limo MH de alta plasticidad	350	12.0	28
B2	9.9 a 13.9	Arcilla CH con limos MH	200 a 400	11.73	23
B3	13.9 a 21.7	Arcilla CH y limo MH con lentes de arena fina, ceniza y vidrio volcánico	280	12.0	33
B4	21.7 a 26.4	Arcilla CH con limos MH	350	11.5	44
C	26.4 a 28.5	Limo MH duro con arena negra y ceniza; N de 17 a 50	25 a 130	n.d.	n.d.
D1	28.5 a 30.9	Limo de alta plasticidad con arena fina y media	300	11.56	171
D2	30.9 a 36.5	Arcilla CH con ceniza y vidrio volcánico	200	12.2	80
D3	36.5 a 42.4	Arcilla CH y limo MH con lentes de arena	180	12.5	100
E	42.4 a 67.0	Limos MH y ML con lentes de arena y materia orgánica; N de 1 a 98	17 a 286	n.d.	n.d.
F	67.0 a 100.3	Limos endurecidos con lentes de arena; N de 1 a 99	12 a 138	n.d.	n.d.

n.d.: no disponible en la fuente. Para el análisis de extrusión se ponderaron, hasta el nivel de la rasante hidráulica, una cohesión de 30.25 kPa y un peso volumétrico de 12.28 kN/m³; para las presiones de frente se usó una cohesión ponderada de 26.4 kPa y $\gamma = 12.53$ kN/m³ en los primeros 300 m. El nivel freático se ubicó a 3 m de profundidad en el análisis de la zanja y el brocal está en la cota 2,227.29 msnm y la rasante en 2,203.997 msnm.

TRAMO 1: LUMBRERA L-04 (KM 8+208)

La L-04 es una lumbrera de servicio con 51 m de profundidad de excavación, muro Milán de 1.0 m de espesor y diámetro interior de 13.5 m (12 m útiles después del anillo de rigidez). Las coordenadas UTM del centro son X = 496,363.652 y Y = 2,163,361.410,

la cota del brocal 2,234.207 msnm y la rasante del túnel 2,188.395 a 2,188.402 msnm.

Dato técnico: cadenamientos. Las tesis dan cadenamientos distintos de los de la tabla de lumbreras del capítulo 11: para la L-04, 8+207.963 y 8+211.835 frente a 8+207.963; para la L-10, 21+633 frente a 21+635.101, y para la L-20, 49+572.68 frente a 49+763.971, una diferencia de 191 m. En este documento se usan los de la tabla del capítulo 11.

El subsuelo está formado por depósitos lacustres y aluviales en diez unidades hasta 57 m. La Tabla 12.8 reproduce el modelo geotécnico de diseño de Ramírez de Arellano (2012, p. 42), con NAF a 5.48 m y sobrecarga de 30 kPa.

TABLA 12.8. MODELO GEOTÉCNICO DE LA LUMBRERA L-04

UNIDAD	PROF. (M)	ESPESOR (M)	DESCRIPCIÓN	SUCS	W (%)	Γ (KN/M ³)	C (KPA)	Φ (°)	N	E (KPA)	K ₀
A	0 a 1.40	1.40	Costra de arcilla limosa café claro, muy firme, con arena	CL	58	15.0	80.0	10	0.40	8,000	0.70
B	1.40 a 14.30	12.90	Arcilla blanda de alta plasticidad con materia orgánica	CH	200	12.1	32.8	0	0.40	6,850	0.70
C1	14.30 a 16.30	2.00	Limo arcilloso muy duro con intercalaciones de arcilla muy blanda	ML	50	11.8	40.5	0	0.35	10,340	0.70
C2	16.30 a 18.20	1.90	Arcilla muy blanda gris verdosa con grumos	CH (MH según Armendariz)	200	12.8	45.8	0	0.40	3,130	0.70
C3	18.20 a 21.60	3.40	Limo arenoso muy duro y arena volcánica compacta	ML	40	17.0	36.2	34	0.40	18,440	0.44
D	21.60 a 30.30	8.70	Limo muy firme con arcilla blanda a media	CH-ML	130	14.3	113.5	0	0.35	9,900	0.70
F1	30.30 a 38.10	7.80	Limo arenoso duro y arena limosa muy compacta	ML	75	14.0	200.6	6	0.35	20,320	0.70
F2	38.10 a 42.90	4.80	Arcilla de alta plasticidad firme y poco compresible	CH (MH según Armendariz)	100	14.1	138.7	9	0.35	20,020	0.70
G1	42.90 a 50.10	7.20	Limos y limos arenosos muy duros	MH-ML	15	16.4	172.0	0	0.30	23,330	0.70
G2	50.10 a 57.00	6.90	Limo arenoso cementado muy duro	ML	15	18.2	355.5	20	0.30	128,340	0.66

Los datos de las dos tesis son coherentes: la cohesión no drenada reportada en t/m^2 coincide con los 32.8 kPa del modelo de diseño, y lo mismo ocurre con la unidad D (11.35 t/m^2 frente a 113.5 kPa). Para los cálculos de estabilidad se usa además una resistencia al corte s_u (2.06 t/m^2 en B). Las propiedades índice son extremas: en la unidad B el límite líquido llega a 298 % y el índice de plasticidad a 191 %, y en la unidad C2 la plasticidad es de 149 %; en cambio, desde los 42.9 m los limos tienen de 12 a 15 % de agua y más de 50 golpes SPT.

El nivel piezométrico también varía con la profundidad: la CFE instaló en enero de 2009 una estación de cuatro piezómetros Casagrande y un tubo de observación a 7.30 m (seco en esa fecha); el piezómetro PZA-L4D (14.83 m) reportó 4.9 t/m^2 , el PZA-L4C (25.0 m) 14 t/m^2 (136.97 kPa), el PZL4-B (33.41 m) 1.5 t/m^2 y el PZA-L4A (52.38 m) 1.3 t/m^2 . La presión de poro alrededor de los 25 a 30 m es la que condiciona el diseño (sección 4.5).



Figura 12.18. Ubicación de la lumbrera L-04 respecto a la Sierra de Guadalupe

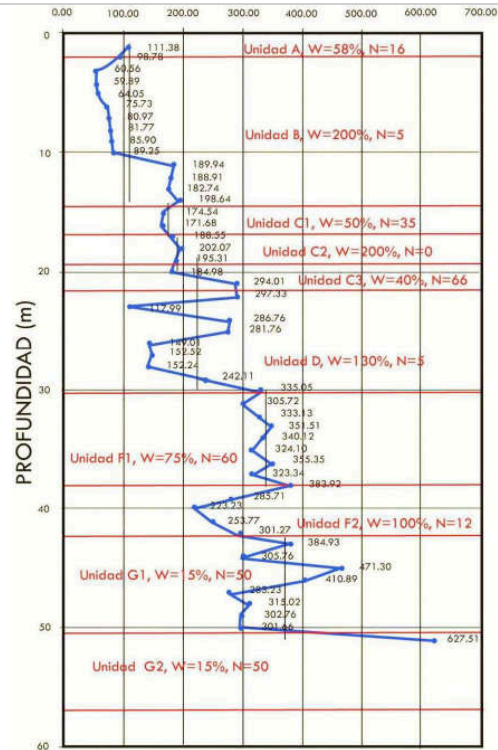


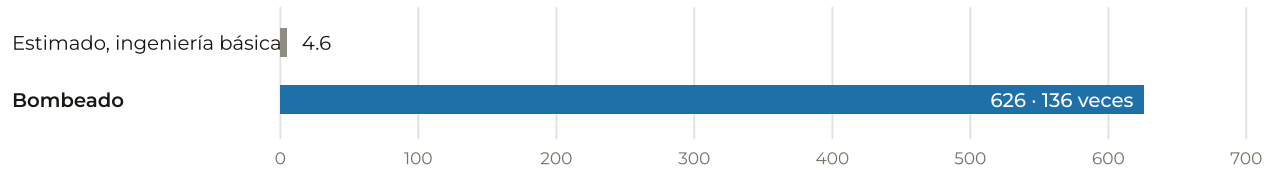
Figura 12.19. Velocidades de onda de corte en la L-04 por cross-hole

Modelo Geotécnico Lumbrera 04				5.48	m	NAF		30	kPa	Sobrecarga		
Unidad	Prof. (m)	Prof. media (m)	Espesor (m)	Descripción	SUCS	w(%)	Peso volumétrico, γ (kN/m ³)	Cohesión, c (kPa)	Ángulo de fricción, ϕ (°)	Relación de Poisson, ν	Módulo de Young, E (kPa)	K_0
A	0.00 1.40	0.70	1.40	Costra superficial formada por arcilla limosa, café claro de consistencia muy firme con arena	CL	58	15.00	80.00	10	0.40	8000	0.70
B	1.40 14.30	7.85	12.90	Arcilla de consistencia blanda y alta plasticidad con presencia de materia orgánica	CH	200	12.10	32.80	0	0.40	6850	0.70
C1	14.30 16.30	15.30	2.00	Limo arcilloso de consistencia muy dura con intercalaciones de arcilla de consistencia muy blanda	ML	50	11.80	40.50	0	0.35	10340	0.70
C2	16.30 18.20	17.25	1.90	Arcilla de consistencia muy blanda color gris verdoso, con grumos del mismo material	CH	200	12.80	45.80	0	0.40	3130	0.70
C3	18.20 21.60	19.90	3.40	Limo arenoso gris verdoso de consistencia muy dura y arena volcánica altamente compacta	ML	40	17.00	36.20	34	0.40	18440	0.44
D	21.60 30.30	25.95	8.70	Intercalaciones de limo de consistencia muy firme y arcilla de consistencia blanda a media	CH-ML	130	14.30	113.50	0	0.35	9900	0.70
F1	30.30 38.10	34.20	7.80	Limo arenoso de consistencia dura y arena limosa muy compacta	ML	75	14.00	200.60	6	0.35	20320	0.70
F2	38.10 42.90	40.50	4.80	Arcilla de alta plasticidad de consistencia firme y poco compresible	CH	100	14.10	138.70	9	0.35	20020	0.70
G1	42.90 50.10	46.50	7.20	Intercalaciones de limo y limo arenoso de consistencia muy dura	MH-ML	15	16.40	172.00	0	0.30	23330	0.70
G2	50.10 57.00	53.55	6.90	Limo arenoso cementado de consistencia muy dura	ML	15	18.20	355.50	20	0.30	128340	0.66

Figura 12.20. Modelo geotécnico de la lumbrera L-04 en forma tabular

TRAMO 3: LUMBRERA L-12 (KM 27+603)**L-12: el agua que no estaba en el estudio**

gasto de agua al frente de la lumbrera, litros por segundo



Factor de seguridad por subpresión: 0.11 contra 1.3 mínimo. Bombeo durante 873 días.

Elaboración propia con datos de González Ramírez (2023, pp. 37-38, 101, 142); la razón 626/4.6 es cálculo propio.

Figura 12.21. Caudal estimado y caudal bombeado en la lumbrera L-12

La L-12 está en el municipio de Nextlalpan (Estado de México), cerca de la laguna de Zumpango, entre L-11 y L-13; la plataforma está en 2,236.79 msnm, la profundidad máxima de excavación es de 84.5 m (las tres profundidades que se reportan para esta lumbrera se explican en el capítulo 11, sección 5.2.3) y el diámetro es de 12 m. Geológicamente el sitio tiene cuatro unidades locales: secuencia lacustre del norte, abanicos aluviales y tobas rojas, aluvión (delta del río de las Avenidas de Pachuca) y cenizas volcánicas. Con el muro Milán hasta unos 42 a 44 m, el resto se excavó de manera convencional (p. 141, conclusión ii).

TABLA 12.9. ESTRATIGRAFÍA Y PROPIEDADES DE LA LUMBRERA L-12

UNIDAD	PROFUNDIDAD (M)	DESCRIPCIÓN	W PROM. (%)	N SPT PROM.	Γ (T/M ³)	CU (T/M ²)	Φ U (°)
A	0 a 2	Costra superficial de limo arenoso duro	40	15	1.6	5	20
B	2 a 6.2	Limo arcilloso de alta y baja plasticidad, blando	110	5	1.27	1.5	10
C	6.2 a 11.2	Limo arenoso duro a muy duro	50	>50	1.75	1.7	33
D	11.2 a 13.5	Arcilla de alta plasticidad con arena, blanda a media	40	20	1.3	4	10
E	13.5 a 23.2	Limos y limos arenosos duros a muy duros	40	50	1.76	5.14	15
F	23.2 a 31.5	Limos y arcillas de alta plasticidad, media a dura	80	20	1.6	5.37	14
G	31.5 a 41.8	Limos y arcillas de alta plasticidad, media a dura	60	25	1.7	9.49	31
H	41.8 a 59	Limo arenoso y arena limosa, dura a muy dura	30	>50	1.8	10.7	18

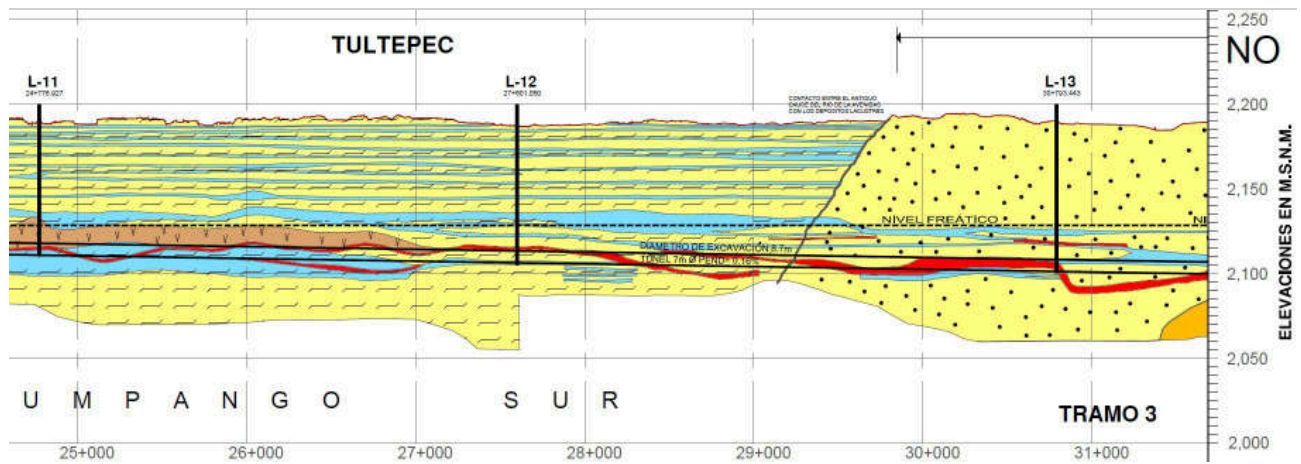


Figura 12.23. Perfil geológico del tramo 3 con la lumbrera L-12

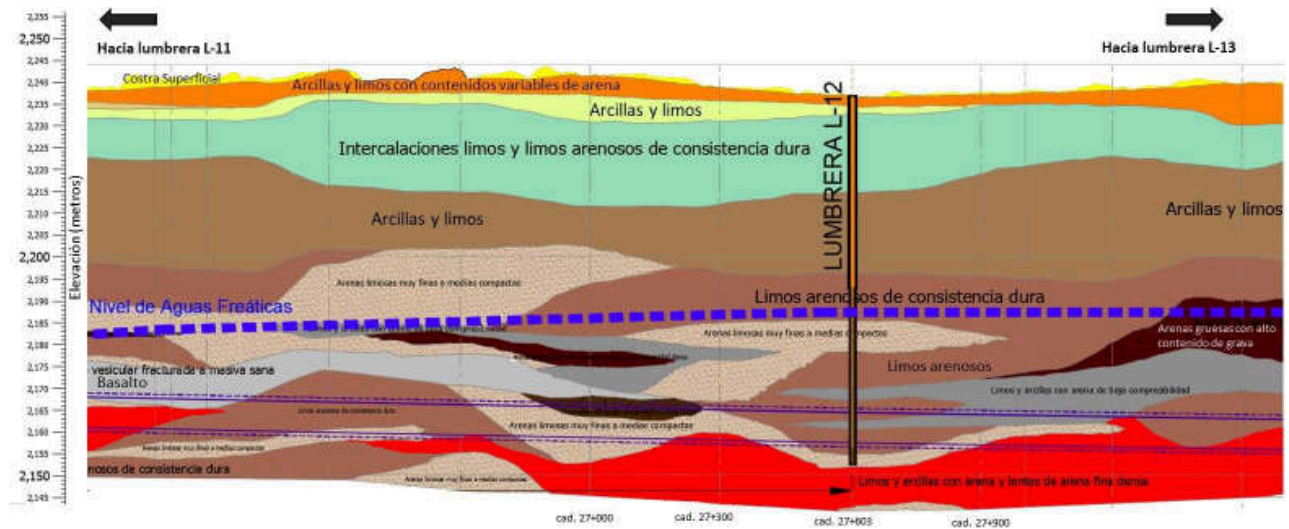


Figura 12.24. Perfil geotécnico a detalle de la lumbrera L-12

TRAMOS 5 Y 6: LUMBRERAS L-18, L-19 Y L-20

En el extremo norte la excavación de las lumbreras alcanza 128 a 155 m de profundidad. Las características y los materiales de las lumbreras L-18, L-19 y L-20 se resumen en la tabla 12.10; las lumbreras L-21 a L-24 se describen por su geometría en el capítulo 11 (tabla 5.6).

TABLA 12.10. LUMBRERAS DE LOS TRAMOS 5 Y 6 CON DATOS DISPONIBLES

LUMBRERA	CADENAMIENTO	DIÁMETRO (M)	PROFUNDIDAD DE EXCAVACIÓN (M)	RASANTE, ALTURA INTERIOR Y OTROS	OBSERVACIONES
L-18	44+304	12	128 (efectiva 126)	trabe de liga a 80 m	Muro Milán y método convencional; entrada de personal, materiales y maquinaria; rezaga
L-19	46+699	12	134 (efectiva 132)	trabe de liga a 67 m	Ídem
L-20	49+764	16	155 (efectiva 153) según Hernández; 152 a 154 según Uzárraga	rasante 2,121.21 msnm, altura interior 148.17 m, brocal 2,269.39 msnm	Lumbrera de ensamble de la tuneladora; trabe de liga a 120 m

Los perfiles del tramo 5 son los siguientes. En la L-18 hay intercalaciones de arcillas, limos arenosos y arenas hasta 65 m, un estrato de toba a 65 m y, de 70 m en adelante, arenas limosas y limos arenosos, con boleos a 100 y 110 m. En la L-19 hay intercalaciones de arenas limosas, arcillas y limos arenosos en la parte somera, un estrato de boleos de basalto a 85 m y, a partir de ahí, grandes estratos de lutitas (Taximay). En la L-20 hay limos arenosos y arena limosa, de 85 a 113 m boleos de basalto con arcillas arenosas y, desde 113 m, grandes formaciones de lutita o arcilla lacustre consolidada (Taximay).

En la L-20, el perfil es una costra desecada de 1 m, limo duro cementado de origen lacustre hasta 101 m (con un lente de arena pumítica entre 17 y 21 m) y, bajo él, arcilla dura o lutita gris verdosa, con dos lentes de conglomerado (104 a 108 m y 112 a 115 m) hasta los 170 m explorados.

TABLA 12.11. MODELO GEOTÉCNICO MG-1 DE LA LUMBRERA L-20

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	PROFUNDIDAD (M)	Γ (KN/M ³)	SU (KPA)	Φ (°)	E50 (MPA)	K0	N
Costra	Costra superficial desecada	0 a 1	16	200	n.d.	12.5	0.47	0.35
UG-1A	Limo	1 a 17	17	50	20	12	0.66	0.30
Lente	Arena fina pumítica	17 a 21	16	n.d.	33	18	0.45	0.28
UG-1B	Limo	21 a 101	17	150	20	22	0.66	0.30
UG-2A	Arcilla dura o lutita	101 a 104	18.5	430	5	120	0.91	0.45
Lente 1	Conglomerado	104 a 108	20	600	n.d.	200	0.40	0.25
UG-2B	Arcilla dura o lutita	108 a 112	17.5	670	13	135	0.77	0.45

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	PROFUNDIDAD (M)	Γ (KN/M ³)	SU (KPA)	Φ (°)	E50 (MPA)	K0	N
Lente 2	Conglomerado	112 a 115	20	600	n.d.	200	0.40	0.25
UG-2C	Arcilla dura o lutita	115 a 167	17.5	480	13	130	0.77	0.45

Nota: el orden de las dos últimas columnas sigue el encabezado de la tesis (K0 y después v); los K0 de la tabla coinciden con $1 - \sin \phi$ (por ejemplo, 0.66 para $\phi = 20^\circ$), lo que confirma la lectura (cálculo propio).

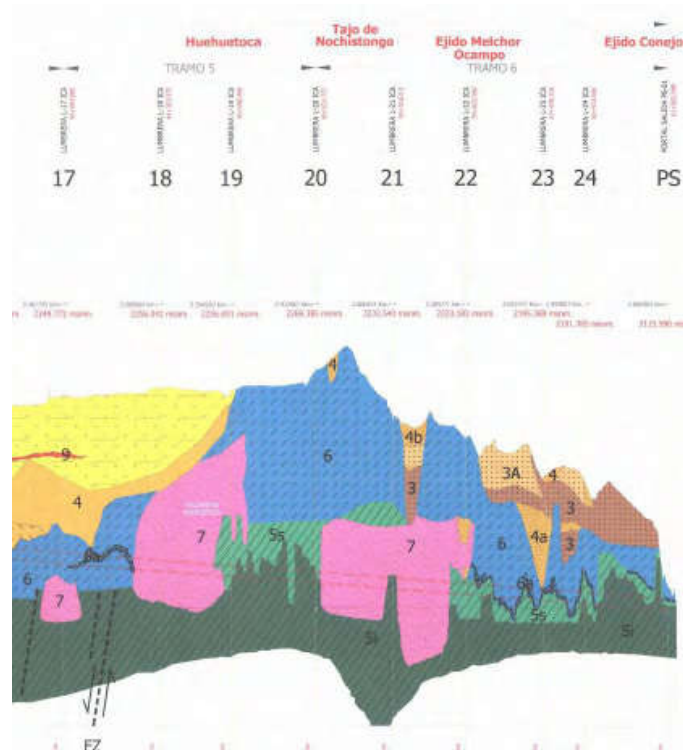


Figura 12.25. Perfil geotécnico del tramo 5 del TEO

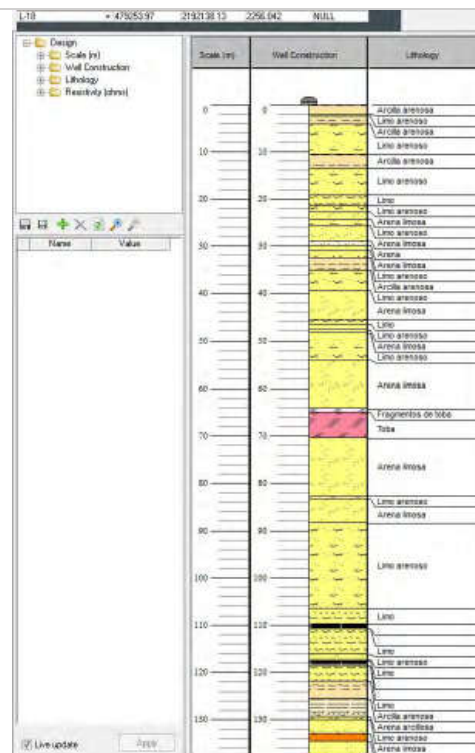


Figura 12.26. Perfil litológico del suelo de la lumbrera L-18

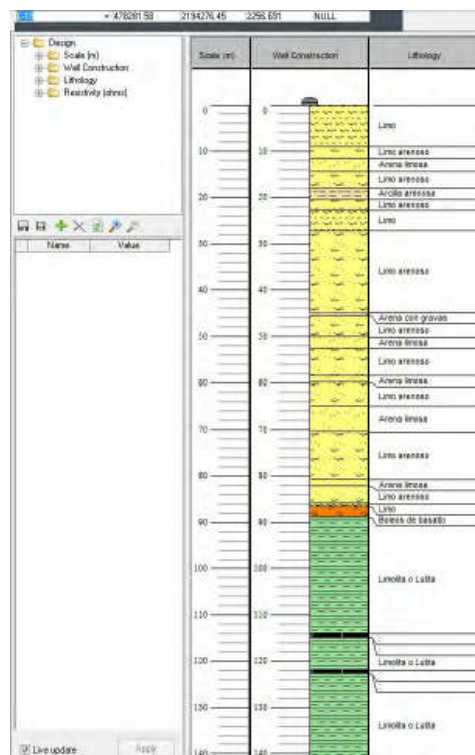


Figura 12.27. Perfil litológico del suelo de la lumbrera L-19

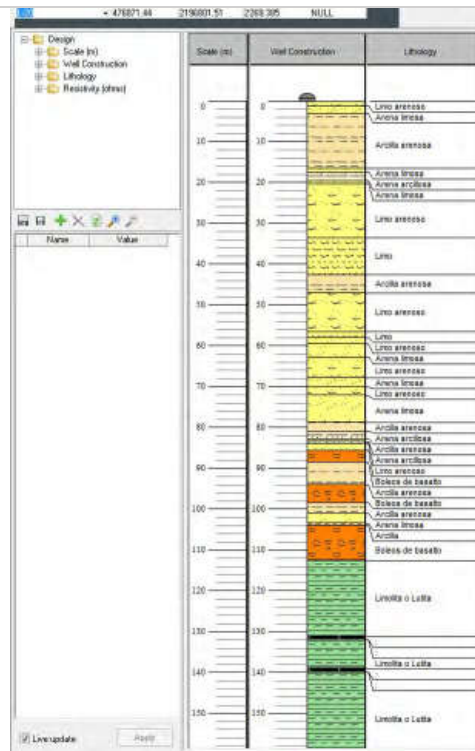


Figura 12.28. Perfil litológico del suelo de la lumbrera L-20



Figura 12.29. Perfil geológico de la L-20 y del TEO, etapas 5 y 6

Geohidrología y presiones del agua en el TEO

EL AGUA EN EL TRAZO SEGÚN EL PROYECTO

El agua del subsuelo en el trazo ha cambiado. El nivel freático original se mantiene hoy muy cerca de la superficie en la formación lacustre, desde la lumbrera 0 hasta cerca de Huehuetoca; en la Sierra de Nochistongo el nivel original sube un poco en los abanicos aluviales y cae de golpe hacia el río El Salto. Desde mediados del siglo XX la extracción artificial (pozos agrícolas e industriales) lo ha transformado en un nivel colgante en los depósitos lacustres del norte de la cuenca, mientras que el nivel profundo coincide con el original entre L-0 y el sur de Huehuetoca y baja bruscamente al norte. Las mediciones indicaban columnas de agua colgante de 20 a 30 m sobre el túnel en la formación de arcillas de la Cuenca de México, y bajo el parteaguas de Nochistongo una columna hidrostática profunda de solo hasta 50 m sobre el túnel.

Las entradas de agua previstas por formación se resumen en la última columna de la tabla 12.1; la sección 4.6 las contrasta con lo ocurrido en las lumbreras con datos de obra.

DATOS PIEZOMÉTRICOS POR LUMBRERA

TABLA 12.12. CONDICIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS LUMBRERAS CON ESTUDIO

LUMBRERA	NIVEL FREÁTICO / PIEZOMÉTRICO	PRESIÓN DE PORO Y CONDICIÓN	ESTRATOS DRENANTES
L-00	NAF a 3 m en el análisis de la zanja; estación piezométrica instalada en L-0	Presión hidrostática en clave del túnel de unos 12 t/m ² (valor de la tabla de presiones de frente)	Lentes de arena fina dentro de la arcilla de 300% de agua (unidad B3)
L-04	NAF 1.6 m o 5.48 m; tubo de observación seco a 7.30 m	PZA-L4D (14.83 m): 4.9 t/m ² ; PZA-L4C (25.0 m): 14 t/m ² (136.97 kPa); PZL4-B (33.41 m) y PZA-L4A (52.38 m): 1.5 y 1.3 t/m ²	Limos arenosos a 18.2, 30.3 y 50.1 m

LUMBRERA	NIVEL FREÁTICO / PIEZOMÉTRICO	PRESIÓN DE PORO Y CONDICIÓN	ESTRATOS DRENANTES
L-12	Nivel estático a 60 a 65 m (2008), nivel máximo de excavación de 84.5 m; piezométrica regional hacia la cota 2,175 msnm	Presión mayor a 3 bares; 41 t/m ² en el estrato drenante de 87.2 m	Dos paquetes de arenas limosas bajo el NAF; gravas y arenas del acuífero Cuautitlán-Pachuca
L-18 a L-20	NAF de proyecto a 80 m (L-20); en obra, 65 m en el sondeo; en L-19 estático a 70 m	L-20: presión teórica con NAF a 78.78 m de 43 a 79 t/m ² a 123 a 159 m; medida antes del bombeo de 39 a 97 t/m ²	Lentes de arena y conglomerado; acuífero profundo en L-19

Dato técnico: nivel freático de la L-04. Para la L-04 el nivel freático se reporta a 1.6 m y a 5.48 m. Pueden ser lecturas de épocas o de instrumentos distintos; la tabla 12.8 usa 5.48 m, el valor del diseño de Ramírez de Arellano.

Para la L-20, el nivel piezométrico promedio reportado es de 65 m, con presión de poro similar a la hidrostática, y el nivel de proyecto es de 80 m. Son valores de épocas distintas, y el segundo corresponde a la estación piezométrica de obra.

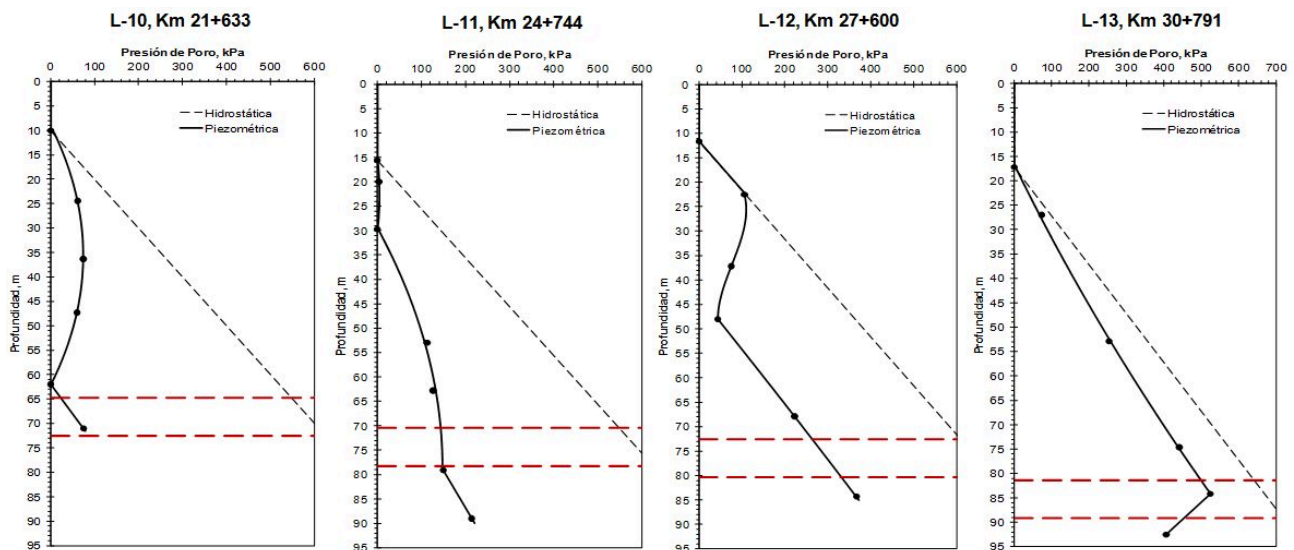


Figura 12.30. Presión de poro e hidrostática en las lumbreras L-10 a L-13

EL ACUÍFERO CUAUTITLÁN-PACHUCA Y LA LUMBRERA L-12

La L-12 se alojó en el acuífero 1508 Cuautitlán-Pachuca, de la región hidrológico-administrativa XIII "Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala", con 2,850 km² y abastecimiento a Estado de México y a gran parte de la Ciudad de México. Es un sistema semiconfinado y sobreexplotado: sedimentos lacustres arcillo-arenosos arriba, una secuencia de basaltos, brechas y tobas de alta permeabilidad al centro y riolitas, dacitas y andesitas terciarias abajo. El censo de aprovechamientos, las configuraciones piezométricas de 2008 y la evolución del nivel estático (1997-2007, hasta 10 m de descenso, es decir, unos 1 m por año; p. 61) mostraron un acuífero con recarga hacia el sitio desde el noroeste y noreste.

En enero de 2010 se construyó un módulo de prueba con un pozo de bombeo (PB-3) y dos pozos de observación (PB-2 y PB-4), con bomba de 10" y motor de combustión. Con seis pruebas se identificaron dos acuíferos en gravas y arenas bajo el nivel estático dentro de la zona de excavación, con aportes de 54.74 L/s y 9.34 L/s en el pozo de prueba. Con la fórmula de Thiem se estimó el aporte total a la lumbrera como si fuera un pozo de gran diámetro.

$$Q = \frac{2\pi T s}{\ln(R/r)}$$

donde Q es el gasto del acuífero hacia la lumbrera (m³/día), T la transmisibilidad (m²/día), s el abatimiento (m), R el radio de influencia (m) y r el radio de la lumbrera (m). Para el primer acuífero, con $T = 1,381.72$ m²/día, $s = 6.93$ m, $R = 304.256$ m y $r = 6.00$ m:

$$Q_1 = \frac{2\pi (1,381.72)(6.93)}{\ln(304.256/6.00)} = 15,324 \text{ m}^3/\text{día} = 177.36 \text{ L/s}$$

Para el segundo acuífero, con $T = 436.33$ m²/día, $s = 22.92$ m y los mismos R y r , $Q_2 = 185.23$ L/s. La suma es de 362.59 L/s, que con 10 pozos son unos 36.26 L/s por pozo y, con un margen de 20 %, 43.51 L/s por pozo.

Figura 12.31. Profundidad del nivel estático en 2008 en la zona de la L-12

Los seis pozos iniciales (PB-1 a PB-6) se perforaron entre 94 y 101 m con diámetro de 17½", ademe liso de 12" de 39.7 a 42.7 m y ademe ranurado de 12" de 51.4 a 61.8 m, con tapón de fondo de concreto de 0.50 m y filtro de grava. Los pozos adicionales PB-7 a PB-10 se perforaron a 115.9 m, 134 m, 137 m y 137 m, y se agregaron ocho más (PB-11 a PB-18) hasta formar un sistema integral de 18 pozos.

TABLA 12.13. CRONOLOGÍA Y RESULTADOS DEL ABATIMIENTO EN LA L-12

FECHA	EVENTO	RESULTADO
Ene 2010	Construcción de PB-1 a PB-6 y módulo de prueba	Se identifican dos acuíferos; no hay parámetros hidráulicos de ingeniería básica
8 may a 2 sep 2010	Operación del subsistema 1 (seis pozos)	No se logró abatir hasta el nivel máximo de excavación; la excavación avanzó de 53 m a 64 m

FECHA	EVENTO	RESULTADO
1 jul 2010	Subsistema 1	Q de 114.28 L/s, nivel dinámico a 87 m (abatimiento de 37 m), achique de 85.36 L/s: 199.64 L/s acumulados con excavación a 61 m; mermas hasta 13.38 L/s en algunos pozos
4 a 29 sep 2010	Entran PB-7, PB-8, PB-9 y PB-10 (subsistema 2)	Operación conjunta de 10 pozos
hasta 5 abr 2011	213 días de operación con paros por fallas de equipos y pérdida de caudal	Recuperaciones del nivel dinámico hacia el estático en cada paro
21 abr 2011	Arranca el subsistema 3 (PB-11 a PB-16)	Entre el 26 may y el 5 sep 2011 los niveles dinámicos quedan por debajo del nivel de excavación (66 a 74 m)
24 mar a 2 sep 2012	Opera el subsistema 4 (PB-17 y PB-18)	Sistema completo de 18 pozos
6 jun 2012	Fin de la excavación de la lumbrera	El bombeo continúa unos tres meses más para colar la losa de fondo y alcanzar su resistencia
30 abr 2012	Caudales por subsistema	S2: 154 L/s (nivel dinámico 98.70 m, excavación 76 m); S3: 303 L/s; S4: 105 L/s; total de pozos 614.34 L/s más 12.22 L/s de achique
21 abr 2010 a 10 sep 2012	Duración total del sistema	873 días (2 años y 143 días), con aumento gradual de pozos

La suma independiente de los caudales de los pozos fue de 688 L/s, que bajó por la interferencia hidráulica entre pozos; el gasto total con achique fue de 626.56 L/s. Las bombas de los primeros seis pozos fueron de 30 y 135 HP, con capacidad nominal de 70 a 75 L/s, y el achique empleó una bomba diésel de 440 HP (flujo máximo de 126 L/s) más dos auxiliares de 60 y 11 L/s.

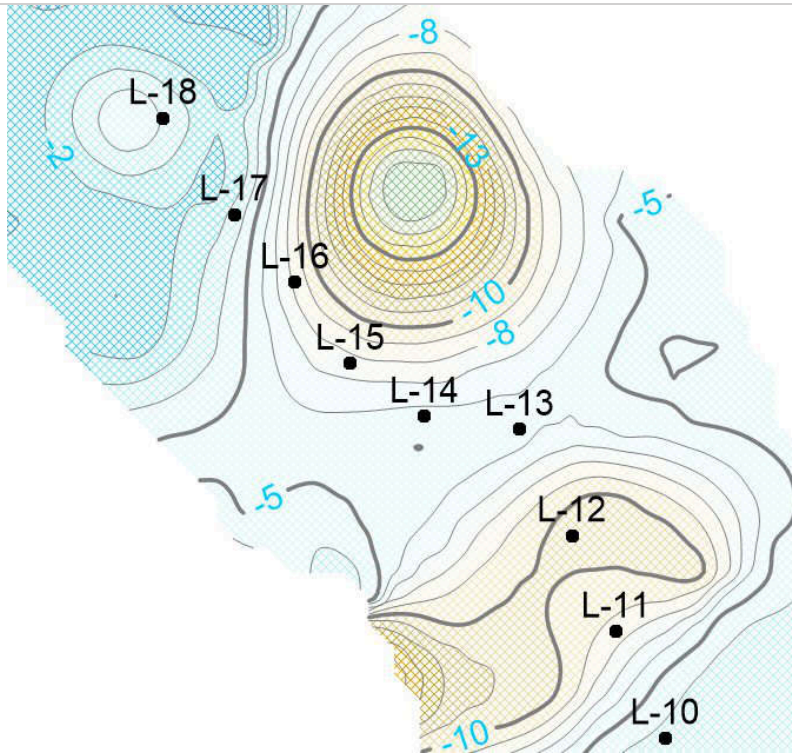


Figura 12.32. Evolución del nivel estático de 1997 a 2007 en planta

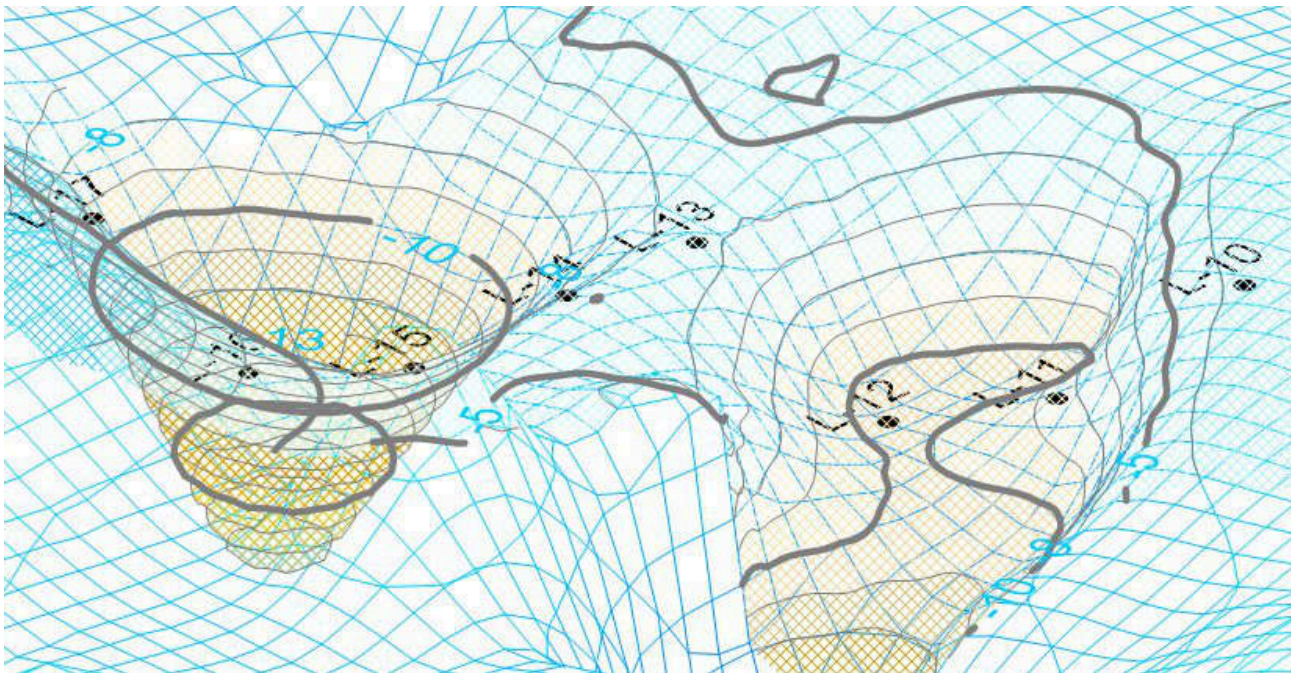


Figura 12.33. Evolución del nivel estático de 1997 a 2007 en tres dimensiones



Figura 12.34. Seis pozos iniciales de abatimiento de la lumbrera L-12

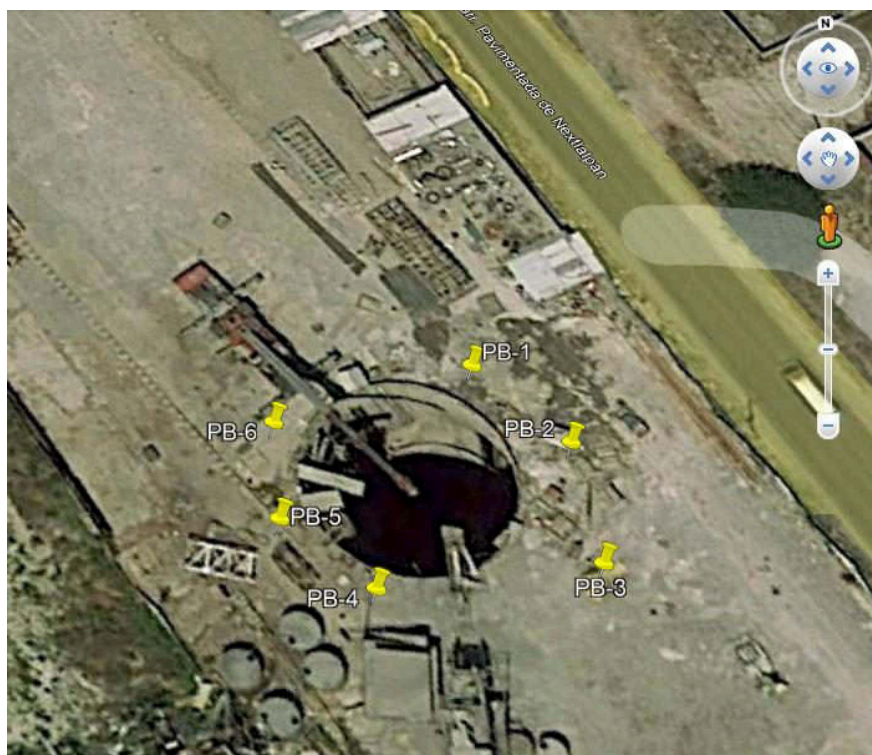


Figura 12.35. Módulo de prueba de bombeo de la lumbrera L-12



Figura 12.36. Prueba de bombeo en el pozo PB-3 de la L-12

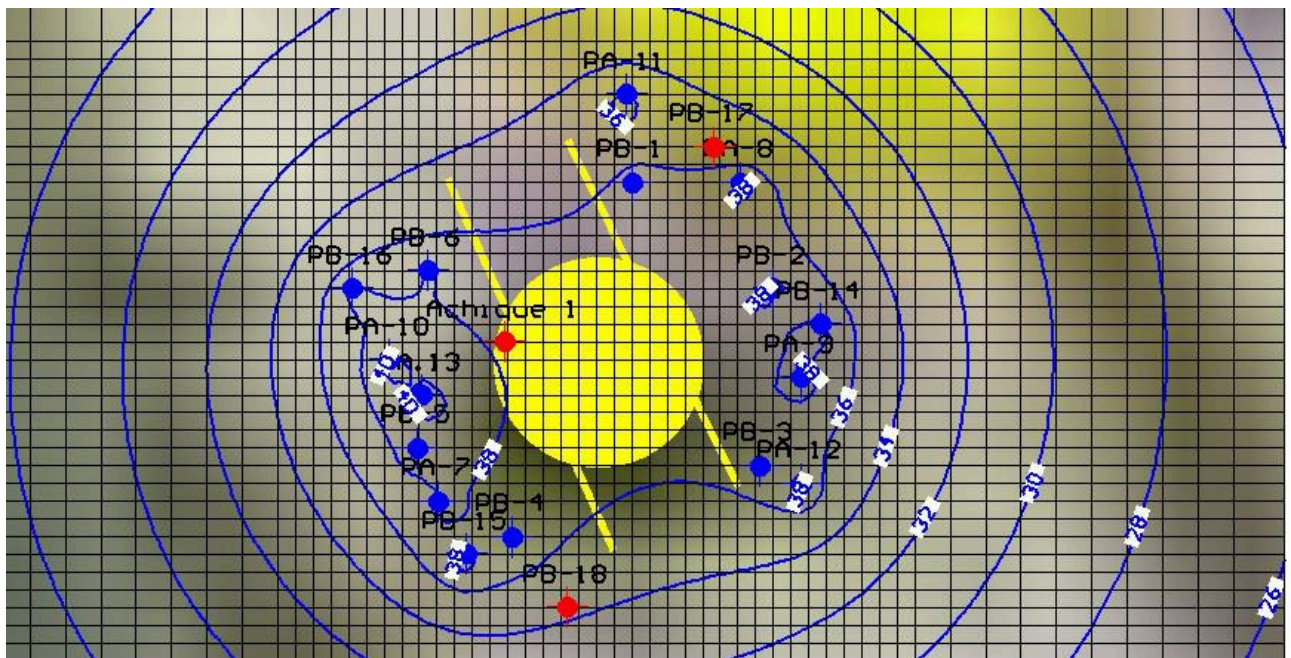


Figura 12.37. Modelo de flujo de la L-12

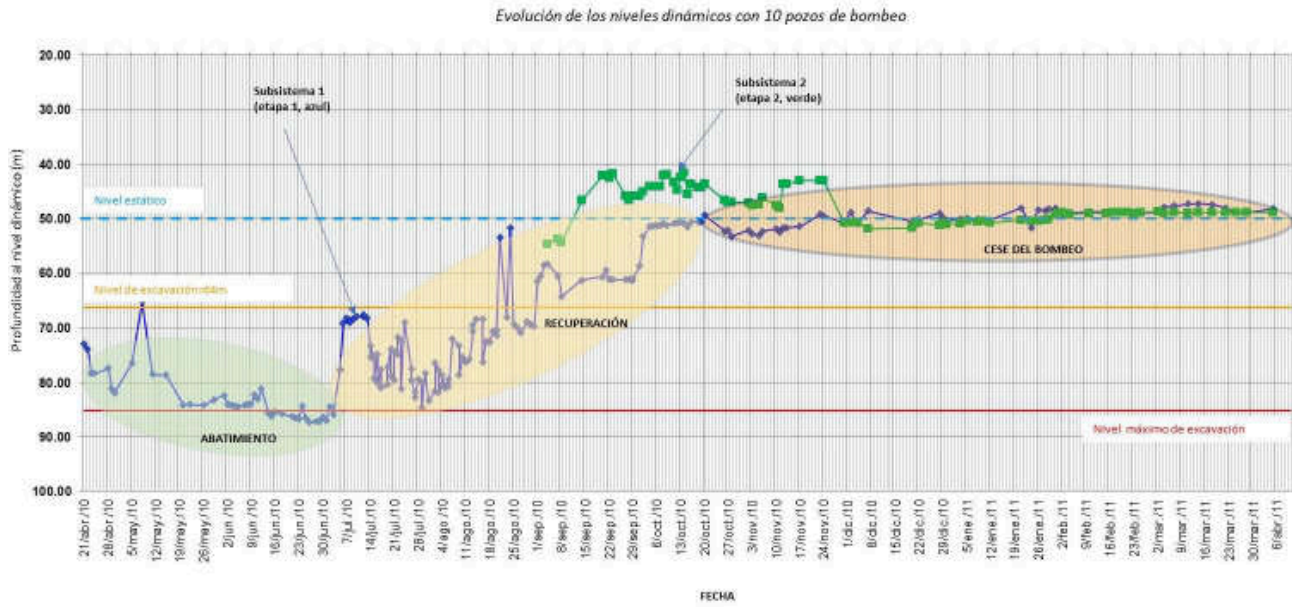


Figura 12.38. Niveles dinámicos con diez pozos de bombeo en la L-12

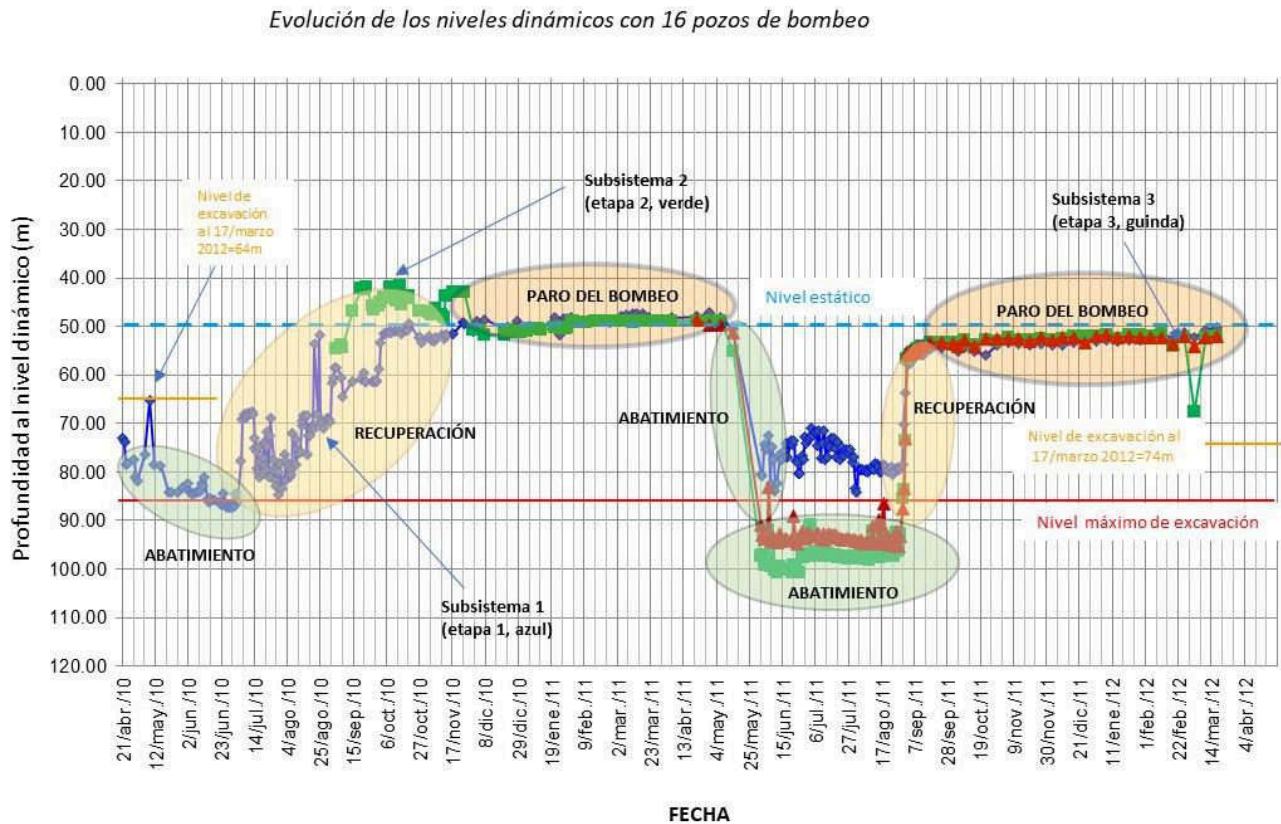


Figura 12.39. Niveles dinámicos con 16 pozos de bombeo en la L-12



Figura 12.40. Lecturas del pozo de observación POL-C-L12-02

Los movimientos fueron pequeños: en las referencias superficiales radiales el máximo fue de 23.0 mm el 5 de mayo de 2010, contra 15.3 cm admisibles; los extensómetros de barra registraron emersiones (levantamientos) de 57.39 a 70.53 mm en EXTL-L12-01 y EXTL-L12-03, y de 46 a 53 mm en EXTL-L12-02, estables desde mayo de 2011; los inclinómetros cortos (42 m, en el muro Milán) no detectaron desplazamientos entre 0 y 42 m.

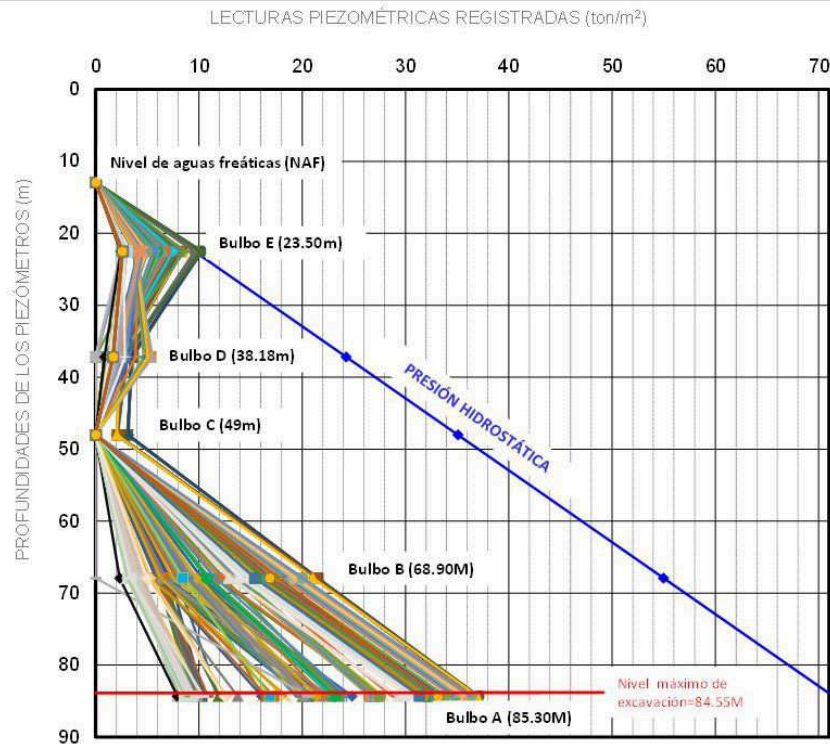


Figura 12.41. Lecturas piezométricas contra profundidad en la lumbrera L-12

ABATIMIENTO EN LAS LUMBRERAS L-04, L-19 Y L-20

En la L-04, los análisis de subpresión mostraron factores de seguridad de 1.3 o menores en varias etapas de excavación cuando no se considera el abatimiento. Por eso el diseño incluyó un sistema de bombeo profundo previo a la excavación del núcleo: cuatro pozos tipo zanja de 2.7×0.6 m, fuera de la lumbrera, perforados a 59 m, sellados de 0 a 51 m, con filtro de 51 a 59 m y bomba sumergible controlada por electroniveles, más un pozo de observación y bombeo de achique interior; su fin era también generar un halo de suelo endurecido por secado alrededor del corte. El asentamiento esperado en la periferia era menor a 30 cm y el promedio medido fue de 15 cm.

En la L-19 se instaló un pozo de observación al centro. Al avanzar la excavación el nivel del agua rebasó la boca del tubo, por lo que se canceló y se puso en operación un segundo módulo de pozos profundos.

En la L-20, con diseño de NAF a 80 m y necesidad de abatir hasta 106 m, el bombeo logró bajar el nivel a 119.65 m. En los cuatro piezómetros eléctricos (a 123, 139, 147 y 159 m, en ese orden según la figura de la tesis) las presiones teóricas con NAF a 78.78 m

eran de 43, 59, 67 y 79 t/m², las medidas antes de las pruebas de bombeo de 38.66, 52.27, 65.91 y 97.43 t/m² y las abatidas con los pozos perimetrales de 3.45, 10.53, 18.25 y 24.34 t/m²; al suspender el bombeo las presiones subían. La correspondencia de cada valor con su piezómetro se leyó de la figura de la tesis. Para mantener un factor de seguridad mínimo de 1.5 a 152 m de excavación, la presión de poro debía abatirse hasta 47 kPa en el estrato drenante de 156 m.

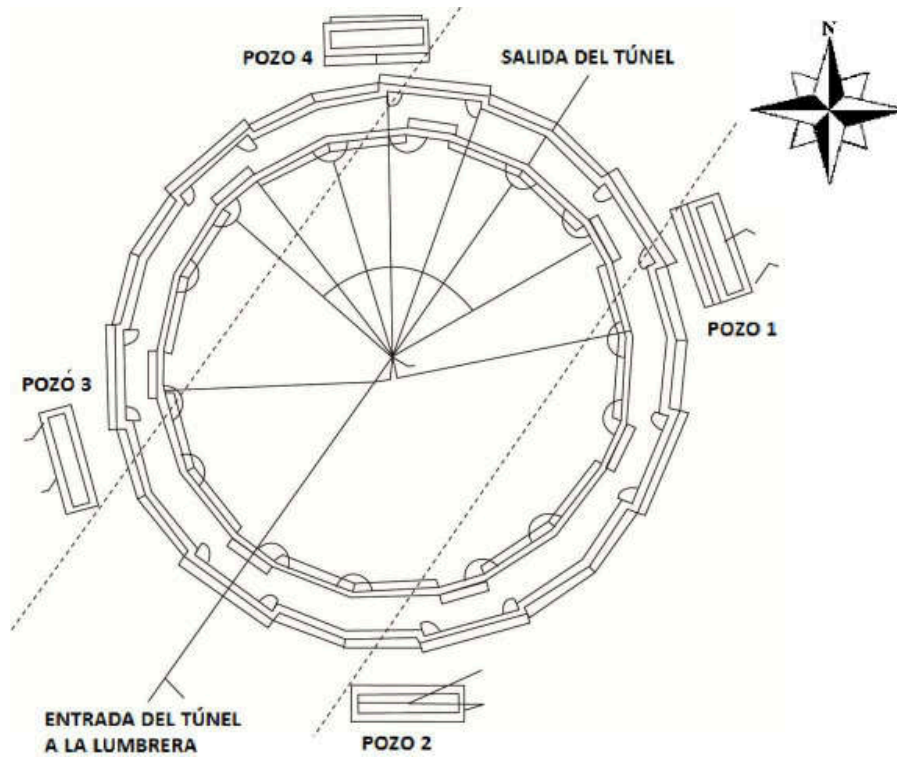


Figura 12.42. Pozos de bombeo periféricos de la lumbrera L-04

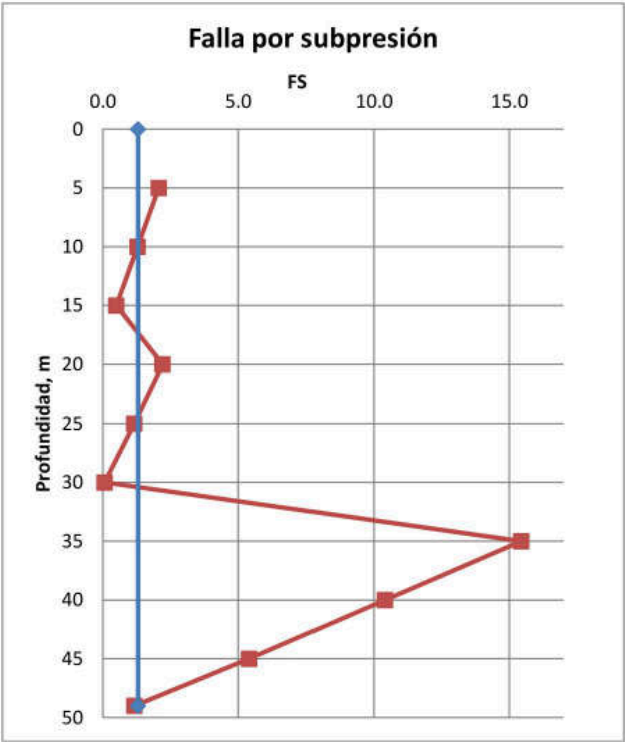


Figura 12.43. Falla por subpresión sin abatimiento en la L-04

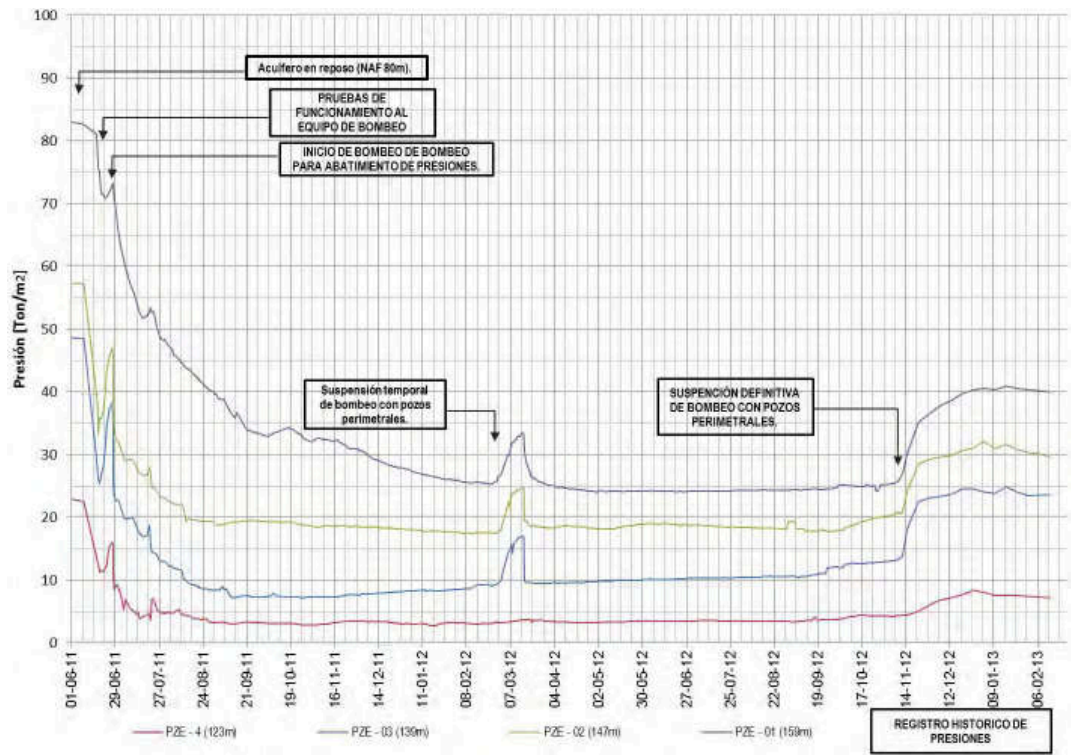


Figura 12.44. Presiones de los piezómetros eléctricos de la L-20 con el bombeo

LA GEOHIDROLOGÍA DE LA INGENIERÍA BÁSICA: ACUÍFEROS, CENSO Y PIEZOMETRÍA REGIONAL

Esta sección vuelve a la escala del trazo completo con la geohidrología de la ingeniería básica de la CFE-GEIC, que proviene de los reportes geohidrológicos 1 a 14 y del informe final de geohidrología, fechado el 21 de mayo de 2009.

El método fue doble. Por un lado se midieron periódicamente los niveles de agua en los piezómetros y en los pozos de observación de las lumbreras. Por otro, se censaron y se midieron los aprovechamientos de agua que extraen del subsuelo: los administrados por los organismos operadores de los municipios del Estado de México y de Hidalgo, los de la Conagua, del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y de la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), y, con ayuda del personal operativo de esas dependencias, pozos de particulares, norias y manantiales. Los acuíferos se delimitaron con dos fronteras, la del decreto y la del estudio de COPEI de 2003. Con las lecturas de lumbreras y de aprovechamientos se obtuvieron los niveles estáticos y dinámicos alrededor del trazo, en una franja de 2 km sobre el eje.

Según el artículo, alrededor de 62.41 % del trazo queda dentro de los mantos freáticos de los acuíferos, 44.89 % en el Cuautitlán-Pachuca y 17.52 % en el Valle del Mezquital.

TABLA 12.14. NIVELES DE AGUA POR ACUÍFERO A LO LARGO DEL TRAZO

ACUÍFERO	TIPO	DÓNDE CRUZA EL TRAZO	NIVELES Y CARGAS REPORTADOS
Ciudad de México	Semiconfinado	De la L0 al límite del acuífero, entre la L4 y la L5; sin interceptarlo	Niveles de 45 a 51 m de profundidad en L0 y L1; de 55 a 59 m en L3 y L4; 72 m en L7. Flujo preferente del agua freática de noroeste a sureste
Cuautitlán-Pachuca	Semiconfinado	Unos 28 km, desde la zona intermedia entre L10 y L11 hasta la L16	Niveles estáticos más someros en L5, L6, L12 y L13 (58 a 61 m); más profundos en L18 (94 y 96 m). Se previeron caudales de bombeo importantes para abatir los niveles durante la construcción
Valle del Mezquital	Libre	Desde entre la L20 y la L21; el trazo se adentra en el acuífero después de la L22	Cargas de 38 a 46 m sobre la clave. Niveles más profundos en la L21 (de 90 a 75 m); más someros de la L24 al portal (de 28 a 5 m), donde el agua afloraba y se ubicó la mayoría de norias y manantiales

El censo identificó 240 aprovechamientos en las inmediaciones del trazo. Los datos por etapa de estudio están en la tabla 12.15.

TABLA 12.15. CENSO DE APROVECHAMIENTOS, NIVELES ESTÁTICOS Y CAUDALES POR ETAPA DE LA INGENIERÍA BÁSICA

ETAPA	APROVECHAMIENTOS CENSADOS	NIVEL ESTÁTICO CERCA DEL EJE	CAUDALES DE EXTRACCIÓN
1 (L0-L7)	28	De 48 a 72 m; el mínimo en L0 y el máximo en L7	De 45 L/s (Ramal Charco) a 78 L/s (Ramal Teoloyucan), dato conjunto de las tres primeras etapas
2 (L7-L12)	95	De 72 a 62 m entre L7 y L12; lo más profundo entre L9 y L10 (de 76 a 80 m)	Incluido en el dato de las tres primeras etapas
3 (L12-L16)	34	De 62 a 80 m; lo más somero en L13 (60 m)	Incluido en el dato de las tres primeras etapas
4 (L16-L20)	44 pozos (30 activos), 3 norias y un cuerpo de agua	De 315 m (pozo lejano) a 62 m (pozo Ex Hacienda Xalpa, muy cerca del eje)	De 11 a 83 L/s en pozos muy cercanos al eje; de 70 a 152 L/s en pozos a más de 1 km a la altura de la L17
5 (L20-portal)	20 pozos activos, 14 norias privadas y 5 manantiales	De 67 m cerca de la L20 a 0.2 m en el portal de salida	Un solo dato: 100 L/s en un pozo a 1 km del eje entre L20 y L21

La dirección del flujo subterráneo en el segundo trimestre de 2008 fue de noroeste a sureste entre la L0 y la L5, de suroeste a noreste entre la L6 y la L10 y hacia el oeste entre la L11 y la L16. En la cuarta etapa había 16 aprovechamientos a menos de 1 km del trazo y en la quinta, 18; la construcción no interferiría con los de la cuarta, pero sí podría afectar su funcionamiento, y en ambas etapas no había datos para evaluarlo.

Con esa información se definieron "de manera muy aproximada" los niveles piezométricos en el perfil del túnel, y se identificaron las zonas con comportamiento peculiar o sin datos que debían estudiarse con más detalle para el proyecto ejecutivo, como el tramo de la L18 a la L21 y el portal de salida. Para los sitios peculiares se recomendó hacer pruebas de permeabilidad, aforo y bombeo y estimar los caudales probables para abatir los niveles durante la construcción; y, por la incertidumbre sobre la

afectación a los aprovechamientos, pruebas de bombeo para determinar el radio de influencia, los parámetros hidráulicos y el comportamiento del acuífero, además de evaluar la disposición del agua extraída (calidad y cantidad) conforme a la legislación vigente.

Al compararla con lo que vino después destacan dos cosas. La advertencia cualitativa sí existía: la ingeniería básica anticipó "caudales de bombeo importantes" para el tramo dentro del acuífero Cuautitlán-Pachuca, que es donde está la L-12 y donde luego se bombearon más de 600 L/s. Lo que falló fue la estimación cuantitativa de diseño, de 4.6 L/s, que no consideró el análisis por debajo de los 80 m de profundidad. Además, la L18 a la L21 y el portal figuran como zonas con información insuficiente, y es el mismo tramo donde después hubo que abatir con bombeo las lumbreras L-19 y L-20 (sección 4.5.4). Un censo de pozos y piezómetros de lumbrera da el orden de magnitud de los niveles, pero no sustituye a una prueba de bombeo con el pozo de la propia lumbrera, que es lo que los autores recomendaron.



Figura 12.45. Aprovechamientos de agua y niveles estáticos en la quinta etapa, enero de 2009

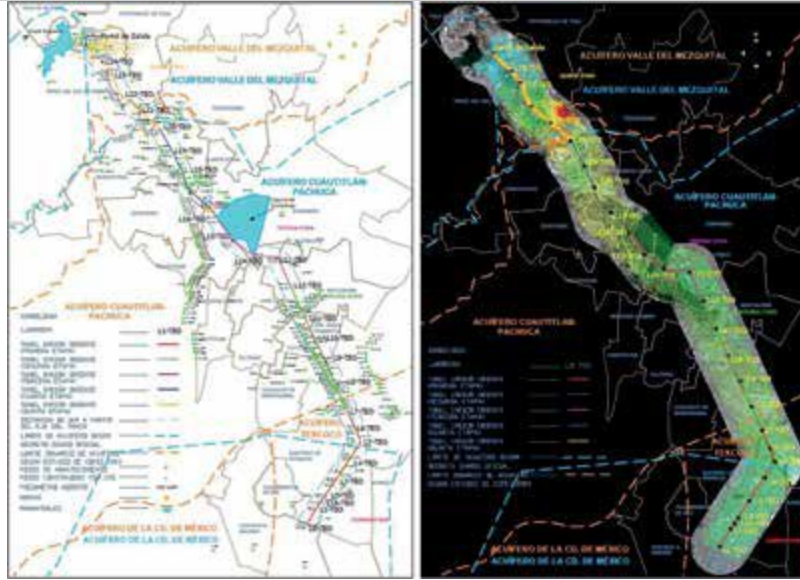


Figura 12.46. Aprovechamientos censados y niveles estáticos y dinámicos en una franja de 2 km sobre el eje

06

Problemas que el subsuelo causó y cómo se resolvieron

Esta sección contrasta la predicción de proyecto con lo observado en obra, caso por caso: primero las lumbreras, con los datos de las tesis, y al final las tuneladoras, con los de Robbins.

RESUMEN DE PROBLEMAS, CAUSA, SOLUCIÓN Y DECISIÓN JUSTIFICADA**TABLA 12.16. PROBLEMAS GEOTÉCNICOS Y GEOHIDROLÓGICOS DOCUMENTADOS**

N.º	DÓNDE	PROBLEMA (CON CIFRA)	CAUSA	SOLUCIÓN ADOPTADA	ALTERNATIVA DESCARTADA O LÍMITE
1	L-00 (km 0+000)	Riesgo de extrusión del suelo al abrir la lumbrera para sacar el escudo: FS = 0.59 contra 1.5 mínimo	Arcilla muy blanda (cohesión ponderada 30.25 kPa, $\gamma = 12.28$ kN/m ³) soportada solo por pantalla de lodo fraguante al abrir el corte de 8.70 m	Reemplazo del suelo por lodo fraguante con arena (300 kg de cemento, 300 kg de arena, 67 kg de bentonita, 742 L de agua, Fraguacil al 15%) con resistencia mínima de 1,500 kPa y franja de 3.67 m, que da FS = 3.5; más inyecciones verticales de consolidación por manguitos	No mejorar el terreno (FS menor a 1)
2	L-00	Franja perimetral con suelo blando contaminado con mortero	Un sondeo en la zona de la pantalla perimetral encontró materiales blandos contaminados con mortero (la fuente no explica el origen)	Inyecciones de manguito verticales desde superficie; dos líneas de inyección adicionales junto a la última línea de tableros	Aumentar solo el espesor del reemplazo
3	L-00 a L-1A (0+000 a 0+300)	Control de asentamiento superficial y bufamiento al arrancar el escudo bajo el Periférico, el río de los Remedios y el bordo del Gran Canal	Arcilla CH/MH de alta plasticidad bajo nivel freático	Presiones de frente calculadas con tres métodos (133 a 150 kPa en la clave, 187 a 200 kPa al eje, 240 a 254 kPa en la cubeta), modo cerrado de la EPB, inyección de mortero en el espacio anular a 13.8 t/m ²	Modo abierto: se descartó por nivel freático y falta de información del flujo
4	L-04	Subpresión: FS menor a 1.3 en varias etapas de excavación sin abatir el NAF	Estratos limo-arenosos drenantes a 18.2, 30.3 y 50.1 m con presión de poro de unos 137 kPa a 25 m	Cuatro pozos de bombeo profundo a 59 m, bombeo de achique y pozo de observación; muro Milán de 1.0 m hasta 51 m	Excavar sin bombeo (FS inaceptable)
5	L-04	Asentamiento en la periferia por abatimiento	Consolidación por bombeo	Se estimó menor a 30 cm; se midió un promedio de 15 cm	No se hizo análisis de fricción negativa
6	L-12	Subpresión extrema: FS = 0.11 contra 1.3 mínimo; presión de 41 t/m ² en el estrato de 87.2 m; había que abatir el nivel hasta 88 m	Acuífero Cuautitlán-Pachuca en gravas y arenas bajo la excavación, presión mayor a 3 bares	Sistema de 18 pozos de abatimiento más achique	Seis pozos no alcanzaron el nivel necesario; la estimación con Thiem (10 pozos) también quedó corta frente al modelo (18 pozos)
7	L-12	La estimación de caudal fue de 4.6 L/s y el caudal real superó los 600 L/s	Lefranc en tramos de 5 m que promedian suelos distintos; no se analizó por debajo de 80 m, donde estaba la subpresión	Pruebas de bombeo, fórmula de Thiem (362.59 L/s) y modelo MODFLOW (688 L/s)	Estimación teórica inicial

N.º	DÓNDE	PROBLEMA (CON CIFRA)	CAUSA	SOLUCIÓN ADOPTADA	ALTERNATIVA DESCARTADA O LÍMITE
8	L-12	Paros y pérdida de caudal en el sistema de bombeo: el nivel dinámico se recuperaba al estático al detenerse equipos	Falta de bombas y plantas de reserva, pozos con mermas de hasta 13.38 L/s, pozos distribuidos solo de un lado de la lumbrera	Pozos adicionales (PB-7 a PB-18), equipos de reserva, operación continua	Pozos sólo de un lado de la lumbrera
9	L-18	Asentamientos en las referencias superficiales	Maniobras con maquinaria pesada, banqueo de rezaga, asentamiento regional y bombeo	Control por monitoreo; máximos de unos 14 mm cerca de la lumbrera	No hubo indicio de falla
10	L-19	Nivel del agua rebasó el tubo de observación central	Acuífero profundo (nivel estático a 70 m)	Segundo módulo de bombeo con pozos profundos	
11	L-20	Inestabilidad del corte sin soporte: FS = 0.80; con concreto lanzado solo, FS = 0.70 y falla a 30 m	Corte profundo (hasta 152 a 155 m) en limo duro cementado y lutita, con NAF a 65 a 80 m	Etapas 1 (0 a 40 m) con anillos prefabricados (FS = 2.27; falla de fondo 1.78); etapa 2 (40 a 152 m) con elemento de retención inferior ERI-1 (muro Milán o pilas secantes) que crea un acuífero confinado a presión atmosférica (FS = 1.80); abatimiento del NAF 10 m bajo la losa de fondo	Concreto lanzado por etapas de 3 m (FS = 0.70)
12	L-20	Falla de fondo con FS cercano a 1 a 60, 90 y 150 m; subpresión en el estrato drenante a 156 m	Estratos drenantes profundos	Abatir la presión de poro hasta 47 kPa en el estrato de 156 m; el bombeo bajó el NAF a 119.65 m (necesarios 106 m)	
13	L-18 a L-20	Dudas sobre la calibración del equipo de instrumentación en los seis tramos	Instrumentos de distintos tramos, sin norma mexicana de calibración	Verificación con cinco sondas inclinométricas en un mismo inclinómetro y cinco consolas en un mismo piezómetro: tendencias iguales	Cable de la sonda sin verificar
14	L-12	Instrumentos dañados	Vandalismo de piezómetros eléctricos (daños en conexiones y registros)	Se documentó como lección; se propuso protegerlos	

CONTRASTE ENTRE LA PREDICCIÓN Y LO QUE OCURRIÓ

El caso más claro de contraste es el de la L-12. El proyecto de 2013 describía la formación lacustre del norte como poco transmisible, sin gravas fluviales en el trayecto del túnel (porque los ríos que alimentaban el lago desembocaban lejos de su parte central) y con fuertes gastos de agua solo al cortar ceniza o pómez. En la L-12, ubicada en el

tramo 3 y entre los kilómetros 26 y 29 de esa formación, el sitio resultó estar sobre un delta del río de las Avenidas de Pachuca, con arenas, gravas y un acuífero regional; el agua no fue un problema marginal sino el principal: entre 2010 y 2012 hubo que bombear más de 600 L/s para poder excavar.

En L-04 la predicción coincidió bien con lo observado: el análisis de equilibrio límite ya anticipaba que sin bombeo faltaría seguridad, y el asentamiento medido (15 cm) fue la mitad del esperado.

En la L-20 el análisis numérico mostró que el sistema constructivo más sencillo (concreto lanzado por etapas de 3 m) no cumplía y condujo a un diseño en dos etapas; algunos desplazamientos medidos con inclinómetros a profundidades mayores de 120 m fueron superiores a los de la memoria de cálculo, sin anomalías en las inspecciones visuales de la estructura.

El caso de la L-12 fue más un fallo de exploración que un riesgo imprevisible. La predicción regional de baja transmisibilidad era correcta para la arcilla, pero no se midieron los lentes de gravas y arenas del acuífero Cuautitlán-Pachuca, y el delta del río de las Avenidas de Pachuca figura en la geología regional que cita la propia tesina. Un sondeo con prueba de bombeo en ese estrato lo habría mostrado, como lo mostró el módulo de prueba de enero de 2010. Donde se midió el agua, el diseño aguantó; donde se estimó, la lumbrera necesitó 873 días de bombeo.

LECCIONES QUE LAS PROPIAS TESIS SEÑALAN

Entre las lecciones que señalan las propias tesis: (i) los pozos de abatimiento de presión de poro se diseñan distinto de los de abastecimiento, para extraer solo del estrato que genera subpresión; (ii) con muro Milán hasta 44 m, el ademe ciego con sellos de bentonita hasta esa profundidad evita inducir caudales de estratos superiores; (iii) se requieren plantas de luz y equipos de reserva; (iv) la presión de poro sigue al nivel dinámico y por eso el bombeo debe ser continuo; (v) la distribución radial de los pozos importa tanto como su número; y (vi) los especialistas en exploración deben unificar criterios de clasificación. Ahorrar en exploración y diseño es "un ahorro mal entendido" porque luego se pagan exploración y rediseño adicionales y retrasos.

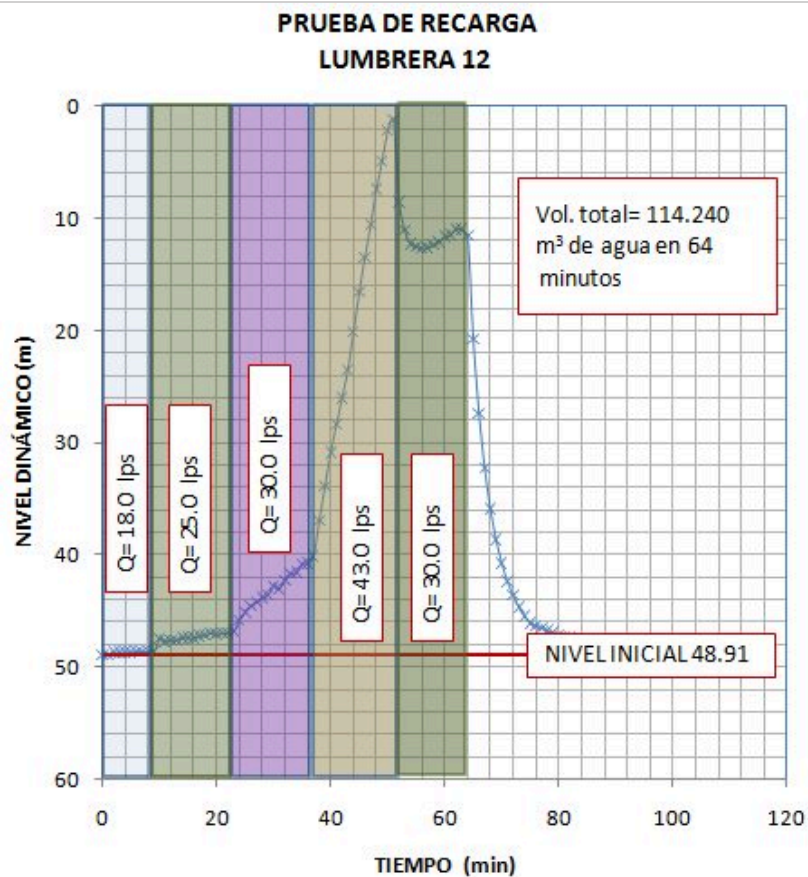


Figura 12.47. Prueba de recarga con el agua extraída en la L-12

LO QUE ENCONTRARON LAS TUNELADORAS

Los hallazgos durante el avance de las máquinas de los lotes 3, 4 y 5 no están en las tesis de las lumbreras; provienen del reporte del fabricante. Las máquinas se diseñaron con la geología de 2008 para basaltos abrasivos de hasta 80 MPa de resistencia a compresión simple, mezclados con tramos de arcilla muy saturada, con presiones de agua estimadas de 4 a 6 bar, y hubo que modificarlas durante la obra.

En el lote 3 (L-10 a L-13, 9.2 km) la tuneladora arrancó en febrero de 2012. Tras varios kilómetros encontró roca y suelo parcial en el frente, con cargas de impacto sobre los cortadores y un desgaste de la cabeza y las herramientas mayor al previsto, además de una gran cantidad de finos que obstruían y exigían mucha espuma. En la lumbrera L-11, a los 3.2 km, se instaló un tornillo nuevo con placas de desgaste y una cabeza rediseñada; la máquina llegó a su destino en 2018.

En el lote 4 (L-17 a L-13, 10.2 km, a profundidades de hasta 85 m) la máquina se comisionó en agosto de 2012. A los 405 m de excavación aparecieron en el material excavado piezas de rascadores y de las barras mezcladoras, y con presión de hasta 3.5 bar se hizo, el 2 de junio de 2013, la primera intervención hiperbárica con una EPB en México. Hubo cerca de 50 intervenciones hiperbáricas; el resto se hizo a presión atmosférica, que resultó más barata y rápida aunque había que bombear hasta 180 L/s y limpiar los finos cada vez. La máquina alcanzó su lumbrera de destino el 23 de mayo de 2019, con un récord del proyecto de 30 m en un día y de 528 m en un mes.

En el lote 5 (L-20 a L-17) la máquina se ensambló en la lumbrera L-20 y se comisionó en agosto de 2014; en octubre ya estaba completa dentro del túnel. A los 250 m de excavación apareció una arcilla verdosa pegajosa con poca agua que obstruía la cabeza y las bandas. Unos 100 m antes de la lumbrera L-19 el terreno cambió a arcilla dura, arena limosa y grava aislada con alta presión de agua, y después de la L-19 el frente pasó a basalto en toda la sección con un flujo de 200 L/s; hicieron falta intervenciones durante más de 20 días para cambiar herramientas en el pico del flujo. En el kilómetro siguiente aparecieron fragmentos de pómez, arena con grava, vulcanitas, lavas y abanicos aluviales con boleos, y la máquina salió el 28 de febrero de 2019.

07

Cómo se diseñó y se construyó cada lumbrera estudiada

Cada apartado recoge, para una lumbrera o un conjunto de ellas, el método de diseño, el procedimiento constructivo y los resultados que las fuentes documentan. Las cifras ya presentadas en las secciones anteriores se retoman solo para dar el hilo del argumento.

LUMBRERA L-00 Y PRIMER TRAMO: EXTRUSIÓN, MEJORAMIENTO Y PRESIONES DE FRENTE

Para el arranque del TEO en la lumbrera L-00 se estudiaron el mejoramiento del suelo para evitar la extrusión y las presiones de frente de la EPB y de inyección de mortero en los primeros 300 m. El escudo del primer tramo, de Herrenknecht, tiene 8.70 m de diámetro, unos 100 m de longitud con su tren de equipo y coloca anillos de dovelas de 0.35 m de espesor; el diámetro de excavación es de 8.74 m y el interior de 8.40 m, y debe recorrer unos 10 km hasta la L-05.

Para la extrusión del suelo al abrir la lumbrera, se usa el criterio de las líneas características (Skempton, Bjerrum y Eide, Alberro):

$$FS = \frac{N_{ct} c}{\gamma H + q_s}$$

donde FS es el factor de seguridad (adimensional), N_{ct} el coeficiente de estabilidad tridimensional del nomograma, c la cohesión ponderada del suelo (kPa), γ su peso volumétrico (kN/m³), H la profundidad a la rasante hidráulica del túnel (m) y q_s la sobrecarga en superficie (kPa). Con $H = 23.29$ m, $D = 8.70$ m, $q_s = 30$ kPa, $c = 30.25$ kPa y $\gamma = 12.28$ kN/m³, la relación $H/D = 2.73$ y $\gamma H/c = 9.45$ dan $N_{ct} = 6.25$ en el nomograma, y

$$FS = \frac{6.25 \times 30.25}{12.28 \times 23.29 + 30} = 0.598$$

que la tesis reporta como 0.59. Es menor que el mínimo de 1.5, de modo que se produciría falla por extrusión y es necesario mejorar el suelo. Para la franja de reemplazo, se compara la resistencia a la compresión simple del mejoramiento con el esfuerzo horizontal que ejerce el suelo exterior:

$$FS = \frac{2 f'_c e_m}{\sigma_h D_t}$$

donde f'_c es la resistencia a la compresión simple del mejoramiento a 28 días (kPa), e_m su espesor (m), σ_h el esfuerzo horizontal del suelo (kPa) y D_t el diámetro de la abertura del túnel (m). Con $e_m = 3.67$ m resulta $FS = 3.5$.

Para la zanja bajo lodo bentonítico, se verifica que la resistencia confinada del suelo sea mayor que el esfuerzo efectivo y resulta "estable" con $FS = 2.85$. Para la presión de inyección por fracturamiento hidráulico se usa

$$p_0 = k_0 \gamma z + c_u$$

donde p_0 es la presión de inyección (kPa), k_0 el coeficiente de empuje en reposo (0.50), γ el peso volumétrico (kN/m³), z la profundidad (m) y c_u la cohesión no drenada (kPa). Resultan entre 67 kPa (0 a 6 m) y 205 kPa (24 a 28.5 m), que se incrementan 50 % en la práctica.

Los tableros del mejoramiento se excavaron de forma alternada con almeja hidráulica de guía Kelly, con traslape de 20 cm y sin excavar junto a un tablero con menos de 24 h de colado. El lodo bentonítico tuvo una densidad mínima de 1.06 t/m³, viscosidad Marsh de 40 a 55 s y un contenido de arena máximo de 5 %; el colado se hizo con tubería tremie de 10 pulgadas ahogada 1 m, y se retiró el lodo contaminado.

Tres métodos de presión de frente (teorema de frontera, empujes activos, criterio observacional con relación de esfuerzos de 0.75, tomado del túnel Río de la Compañía) dan 133 a 150 kPa en la clave, 187 a 200 kPa al eje y 240 a 254 kPa en la cubeta. El anexo da presiones por cadenamiento entre 0+000 y 0+300 (de la lumbrera al lindero sur del Periférico, el puente, el río de los Remedios y el bordo del Gran Canal) con presión de inyección de mortero de 13.8 t/m² y la nota de que todas las presiones se ajustan con lo observado in situ.

El pie de las conclusiones de la tesis dice $FS = 3.67$ en lugar de 3.5; es un error de captura, porque 3.67 es el espesor de la franja.



Figura 12.48. Escudo EPB del tramo 1, entre L-00 y L-05

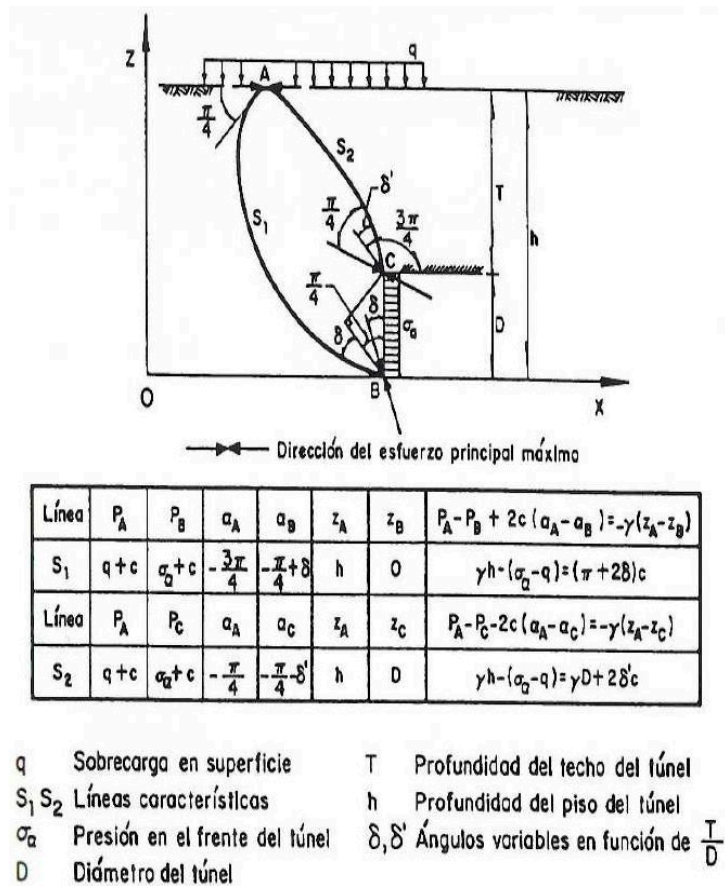


Figura 12.49. Líneas características para evaluar la estabilidad del frente del túnel

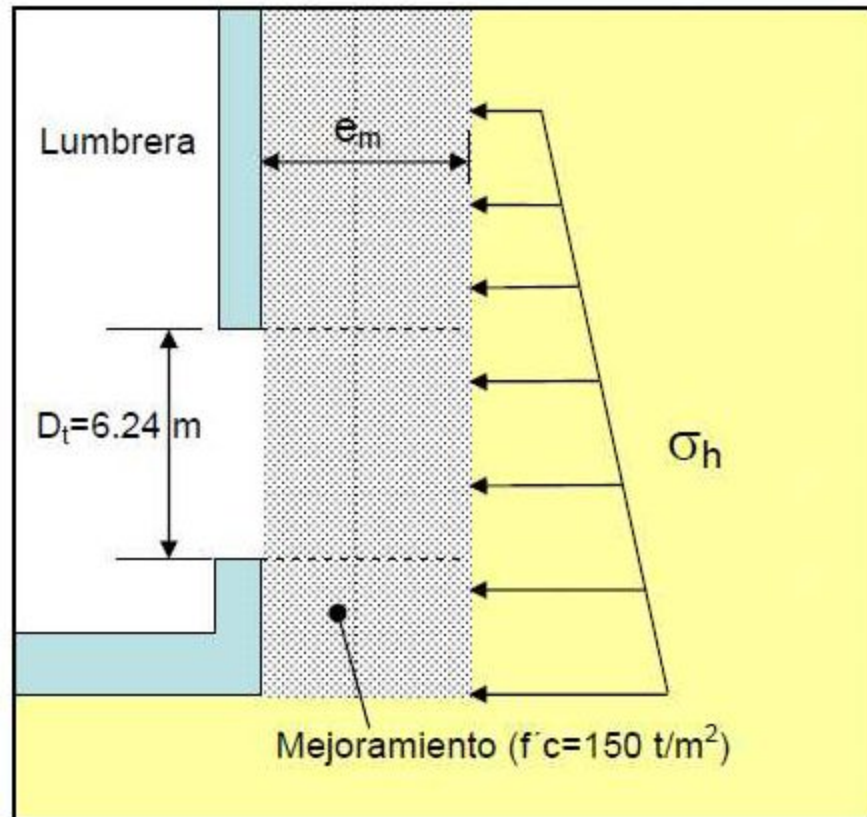


Figura 12.50. Espesor del mejoramiento en la conexión túnel-lumbrera de la L-00

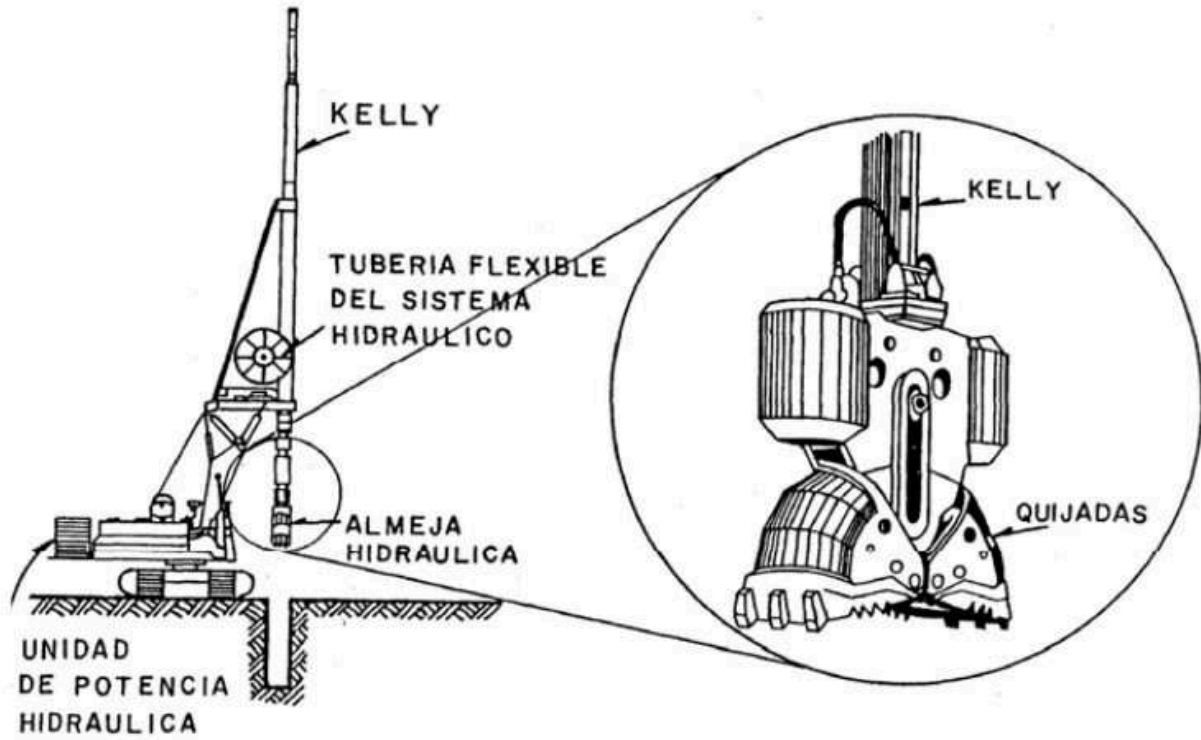


Figura 12.51. Almeja hidráulica con mástil Kelly para excavar tableros

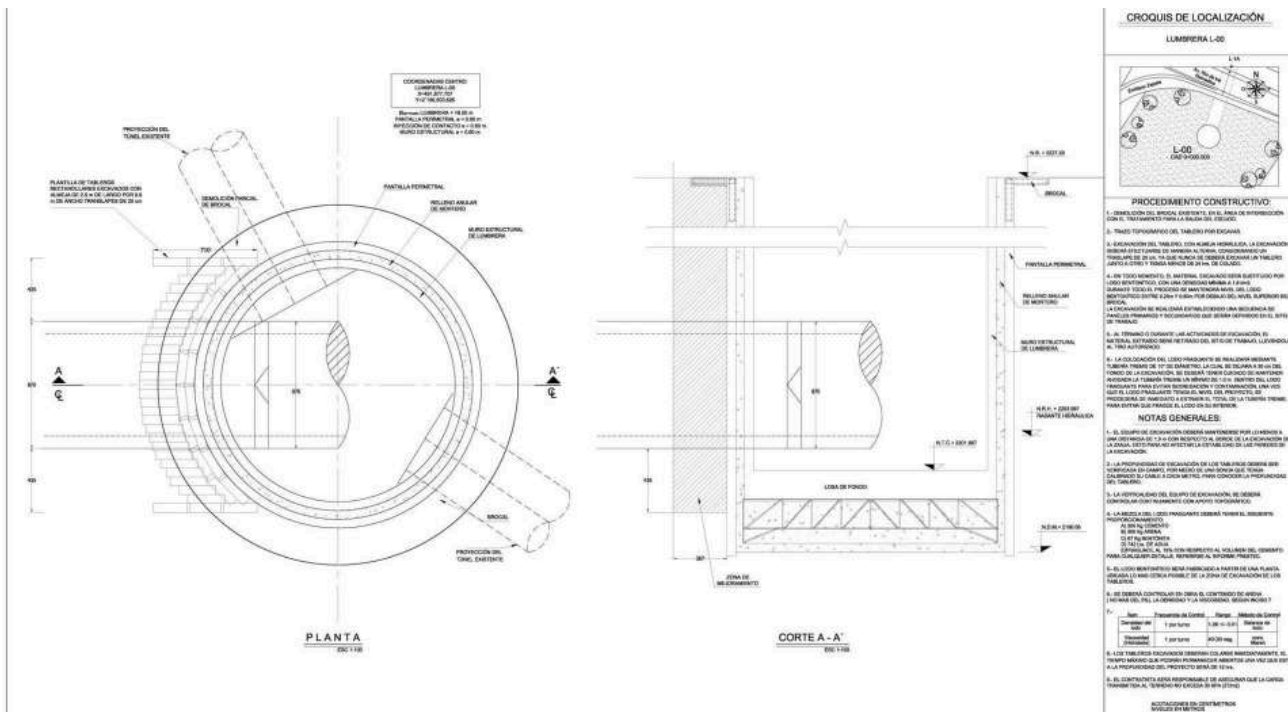


Figura 12.52. Plano del mejoramiento por reemplazo del suelo en la L-00

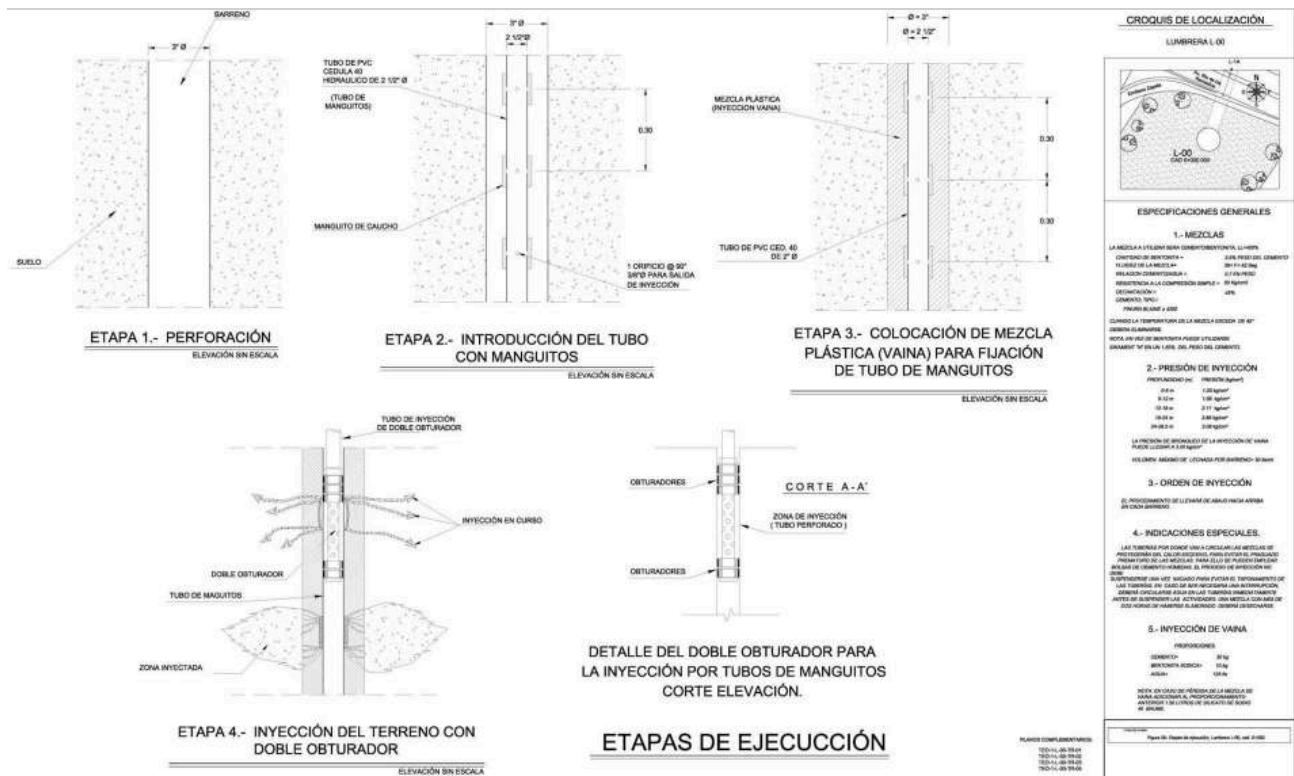


Figura 12.53. Etapas de la inyección de consolidación por manguitos en la L-00

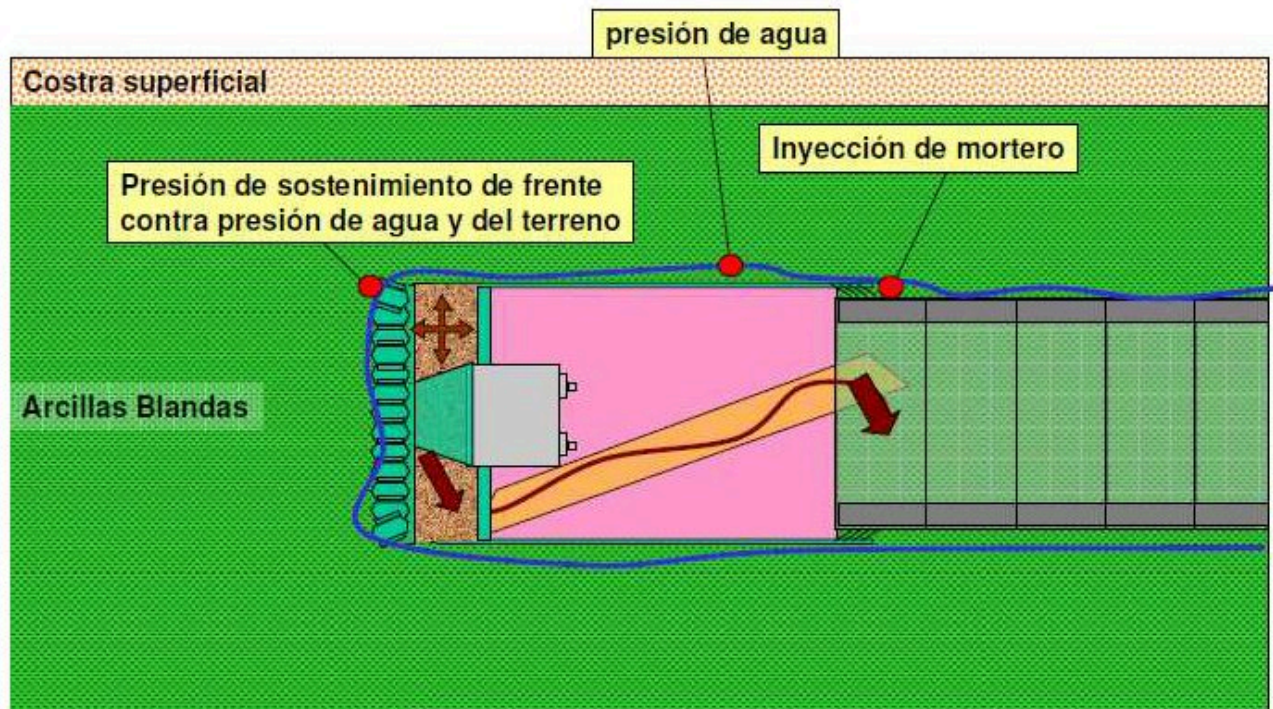


Figura 12.54. Presiones de frente, de agua y de inyección en la EPB

LUMBRERA L-04: PARÁMETROS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

La L-04 es una lumbrera de servicio con muro Milán, cuyo proyecto ejecutivo se desarrolló como sigue.

La exploración tuvo cinco componentes: SPT, sondeo continuo con cono eléctrico, sondeo mixto, sondeo selectivo y cross-hole; el laboratorio determinó compresión simple, consolidación, finos, contenido de agua, densidad de sólidos y límites. Los parámetros de diseño por unidad (tabla 6, p. 24) incluyen el módulo de reacción del subsuelo K_s , tomado del ábaco de Chadeisson. Las revisiones de estados límite cubrieron los empujes horizontales, con $K_0 = \nu/(1 - \nu)$ en suelos cohesivos y $K_0 = 1 - \sin \varphi$ en suelos cohesivo-friccionantes; la estabilidad de la zanja con lodo de 1.05 t/m^3 y sobrecarga de 3 t/m^2 por grúas, con un factor de seguridad mínimo de 1.3; la estabilidad con concreto fresco, que exige que el empuje del concreto sea menor que el pasivo del suelo con $K_p = 1.5$; la capacidad por fricción y punta ($Q_f = 23,727 \text{ t}$ y $Q_p = 7,241 \text{ t}$); la falla de fondo, con $FS = 1.8$ para $S_u = 13.65 \text{ t/m}^2$, $B = 13.5 \text{ m}$, $H = 48.805 \text{ m}$ y $N_c = 9.42$; la subpresión, con $FS = 11.5$ para una presión de agua de 1.6 t/m^2 en el estrato drenante; y la flotación, con $FS = 2.2$ y $W = 6,579 \text{ t}$. En esas expresiones, S_u es la resistencia no drenada del suelo, B el ancho de la excavación, H su profundidad, N_c el factor de capacidad de carga y W el peso de la estructura.

La construcción empezó con un brocal de 3 m de profundidad con concreto de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$; siete tableros excavados con almeja hidráulica de 250 HP en tres posiciones (dos pilas y el "merlón" entre 0.30 y 1.60 m), tolerancia de verticalidad de 0.5%; lodo de 1.10 t/m^3 (máximo 1.15 cuando se carga); colado con tubo tremie de 273 mm antes de 24 h; muro de 1.0 m de espesor hasta 51 m; trabe de coronamiento de $1.0 \times 1.0 \text{ m}$; anillo de rigidez de $2.0 \times 0.75 \text{ m}$ en el nivel -37.112 m ; losa de fondo de 2.5 m.

Todos los factores de seguridad superan el mínimo de 1.3 del Manual de Construcción Geotécnica de la SMMS; el asentamiento medido en la periferia fue de 15 cm, la mitad del máximo esperado.

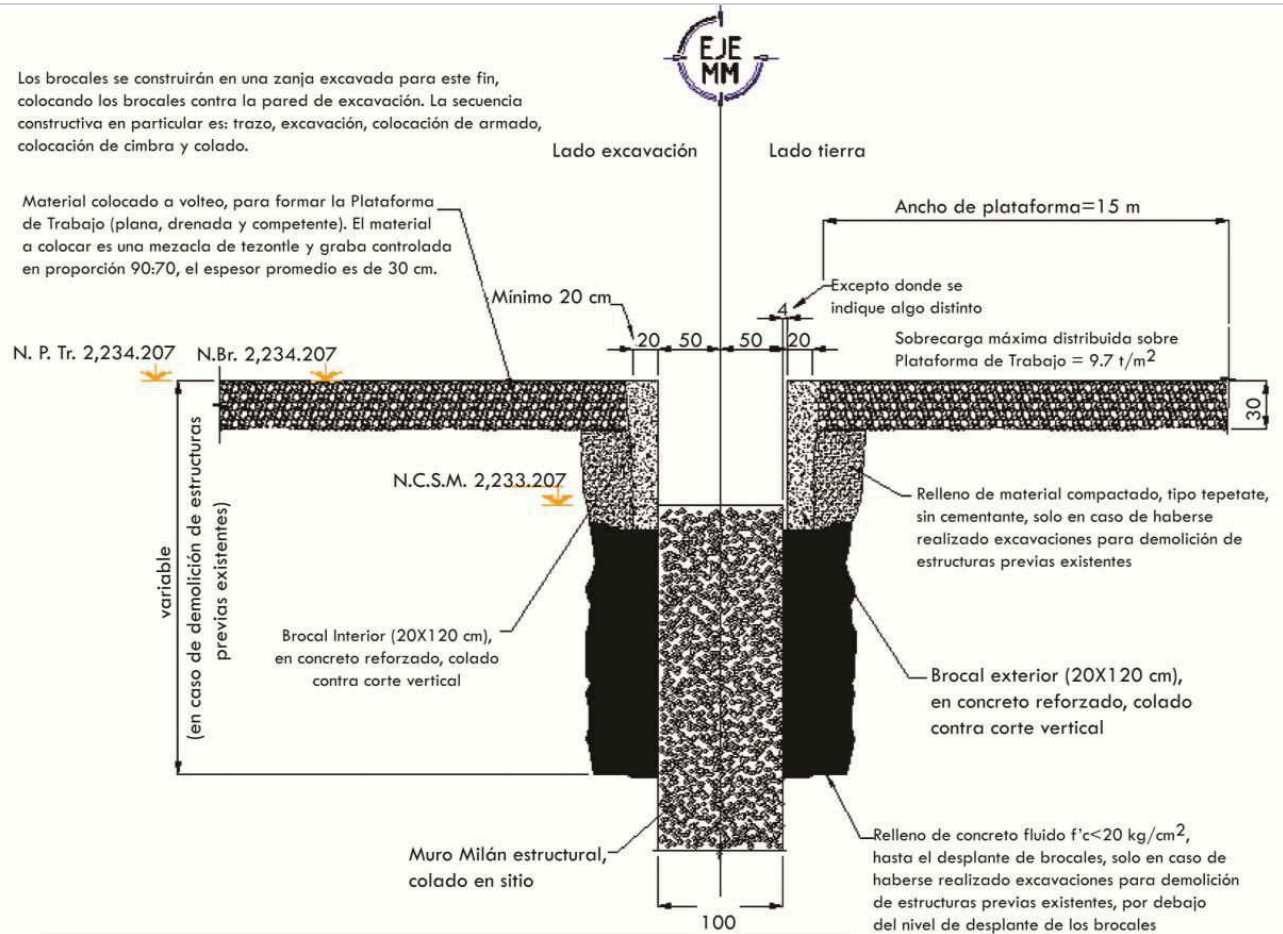


Figura 12.55. Brocal del muro Milán de la L-04



Figura 12.56. Almeja hidráulica en los tableros del muro Milán de la L-04



Figura 12.57. Armado de acero de un panel de la L-04

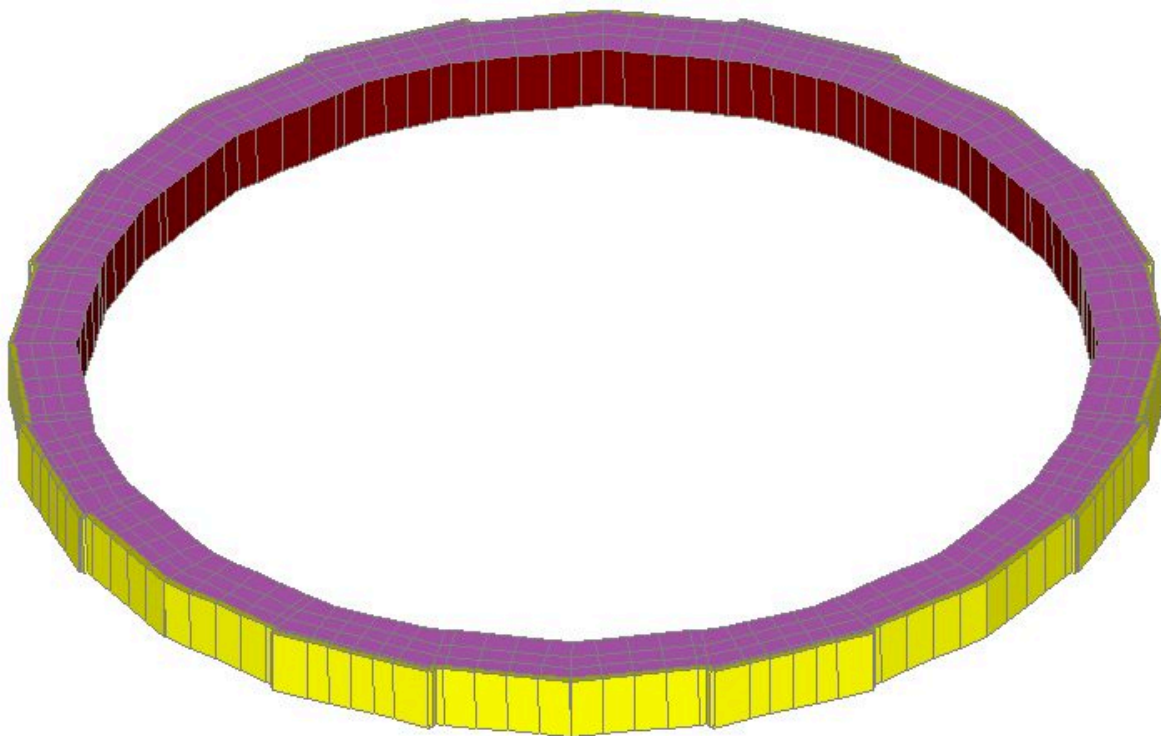


Figura 12.58. Anillo de rigidez de la L-04 en modelo tridimensional



Figura 12.59. Excavación del núcleo dentro del muro Milán de la L-04



Figura 12.60. Armado de la losa de fondo de la L-04

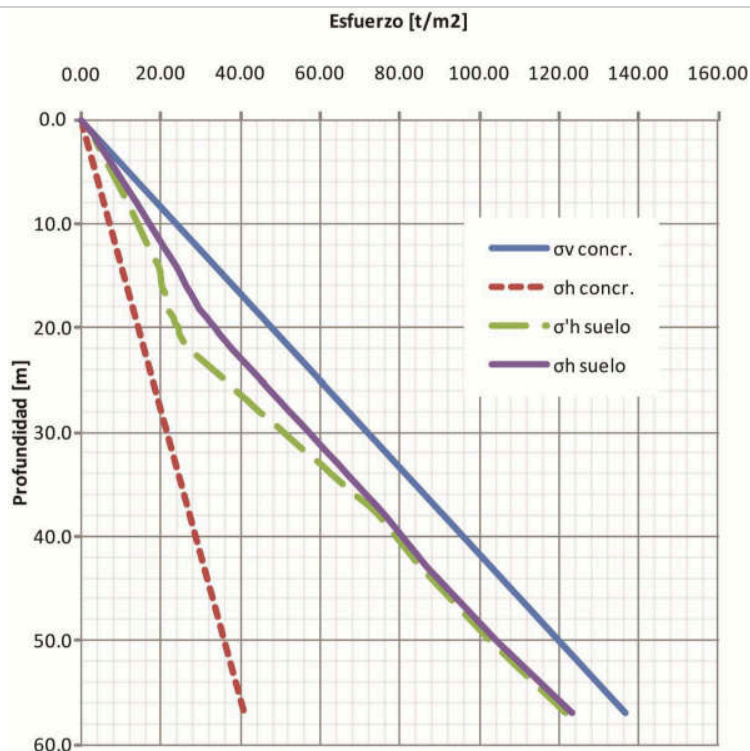


Figura 12.61. Empuje del concreto fresco contra el empuje pasivo en la L-04

LUMBRERA L-04: MODELO GEOTÉCNICO Y ANÁLISIS NUMÉRICO

Un segundo estudio de la misma lumbrera, con enfoque más amplio, combina análisis analítico y numérico y un modelo geotécnico como producto central. Los datos del proyecto son el inicio en agosto de 2008 y el término previsto en septiembre de 2012.

Los análisis de equilibrio límite incluyen empujes de Rankine (activos a corto plazo y en reposo a largo plazo; pp. 59-60), estabilidad de zanja, falla de fondo a 49 m, subpresión sin y con bombeo, y flotación; el modelo numérico se hizo en Plaxis 8.2, axisimétrico, con elementos de 15 nodos, fronteras laterales a 5 diámetros e inferior a 1 diámetro del último estrato.

Sin bombeo profundo los FS de subpresión no cumplen en varias etapas, y con él cumplen sobradamente; el muro Milán se desplaza 0.28 cm horizontalmente (41.0 cm admisibles) y la losa de fondo 4.86 cm verticalmente, por lo que ambos son aceptables. Los modos de falla por extrusión, avance sin soporte y pateo se descartan por el apoyo continuo del muro.

El eje del diseño es el sistema de bombeo profundo y de achique, y el modelo geotécnico, que se concibe como documento común a todos los cálculos.



Figura 12.62. Interior del túnel con dovela y equipo de transporte



Figura 12.63. Lumbrera de servicio sobre el trazo del TEO vista desde el aire



Figura 12.64. Lumbrera L-04 terminada y excavación de un tablero

LUMBRERA L-20: ENSAMBLE DE LA TUNELADORA DEL TRAMO 6

La L-20 es la lumbrera de ensamble de la tuneladora del tramo 6, en zona sísmica B de la CFE, estructura del grupo A (alto grado de seguridad) y lumbrera tipo 3; el clima es templado seco con 628 mm de precipitación anual.

El estudio siguió estos pasos: exploración (SEV, SPT, sondeo mixto e instrumentación), laboratorio (compresión simple y triaxial UU), modelo geotécnico MG-1, revisión de falla de fondo, subpresión, flotación y sismo, y modelación en Plaxis V8.2 con reducción de parámetros. Los resultados de diseño se resumen en la sección 4.6. Para el sismo usa los parámetros de PRODISIS de la CFE ($a_0 = 0.172 g$ y meseta $c = 0.429 g$) y una cuña de 115 m de base y 112 m de altura con peso $W = 109,480$ kN, y obtiene una fuerza sísmica

$$F_s = \frac{c}{Q} W = 23,483 \text{ kN}$$

donde F_s es la fuerza sísmica (kN), c el coeficiente sísmico de la meseta del espectro (0.429 g), Q el factor de comportamiento sísmico (de 2.0, deducido de los valores de la tesis) y W el peso de la cuña (kN). Con ella resulta $FS = 1.40$. Los desplazamientos verticales en superficie fueron de 4 cm y los del fondo de cada etapa, de 2 y 0.5 cm. La flotación da $FS = 7.90$.

El sistema constructivo propuesto es mixto: anillos prefabricados hasta 40 m y elemento de retención inferior (ERI-1) hasta 152 m con abatimiento del NAF, revisado con las NTC del RCDF y con elementos finitos.

Es una propuesta de diseño previa a la obra; lo construido y medido se presenta en la sección 4.7.5.

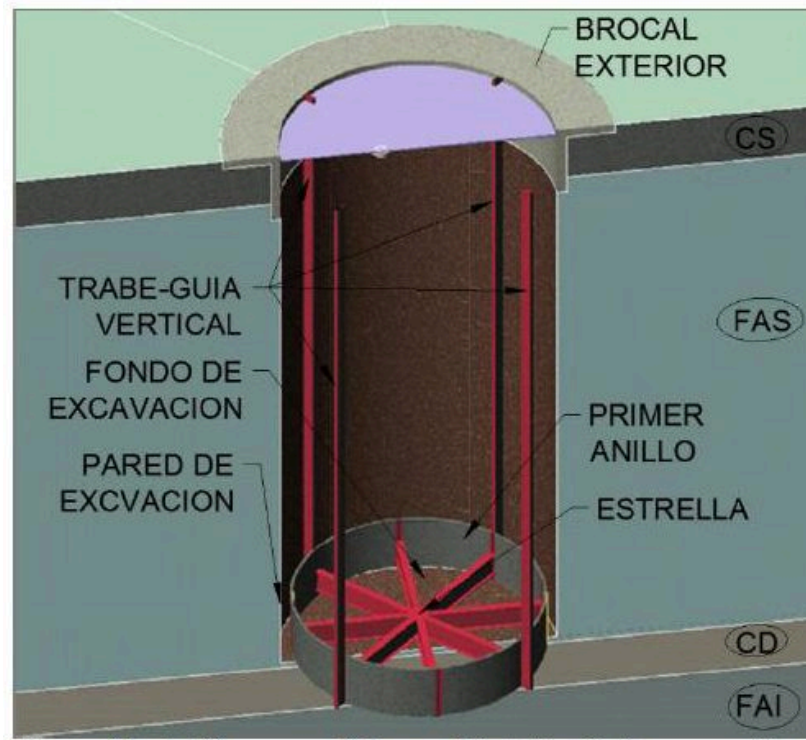


Figura 12.65. Lumbrera de anillos prefabricados con brocal, trabe guía y primer anillo

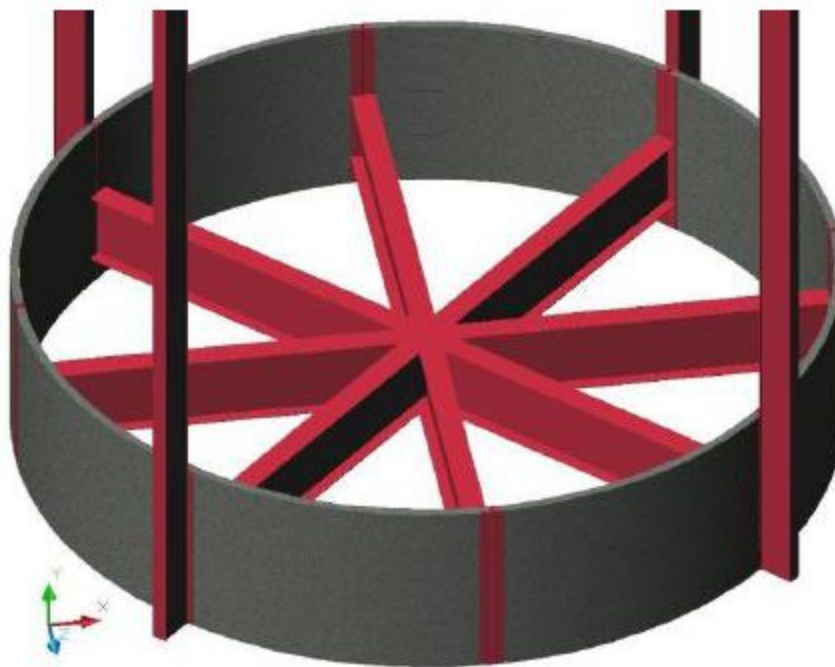


Figura 12.66. Primer anillo con vigas radiales en la lumbrera L-20

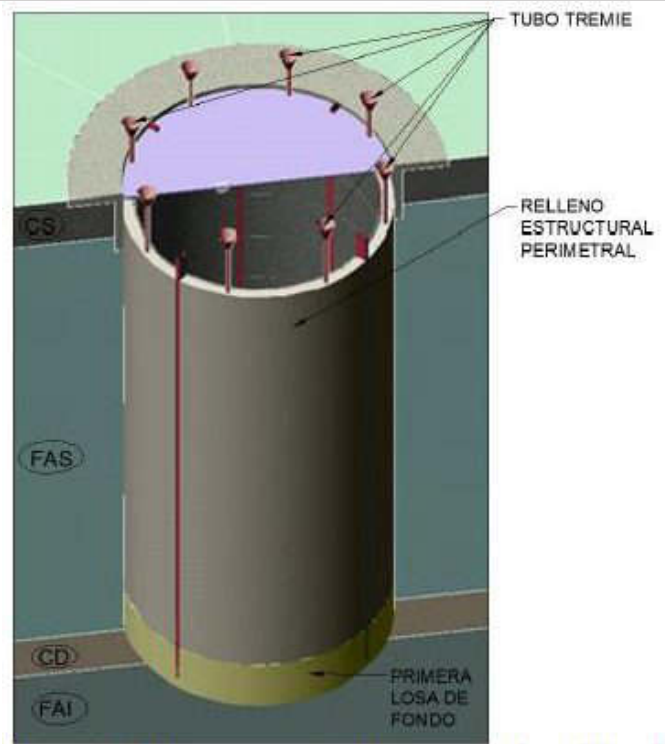


Figura 12.67. Secuencia de anillos prefabricados con lodo bentonítico

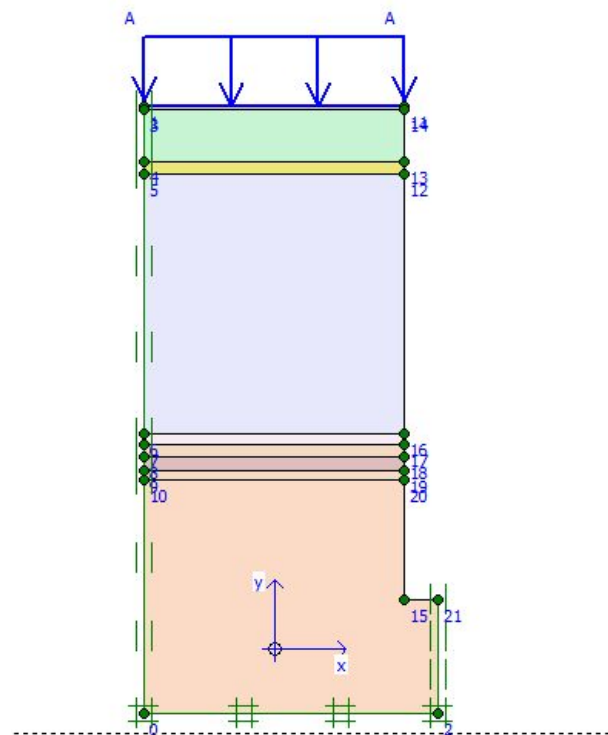


Figura 12.68. Modelo de elementos finitos axisimétrico de la lumbrera L-20

LUMBRERAS L-18, L-19 Y L-20: LO QUE SE MIDIÓ EN OBRA

Las mediciones reales de las lumbreras L-18, L-19 y L-20 se documentan con referencias superficiales, inclinómetros, piezómetros abiertos y eléctricos, pozos de observación y bancos de nivel profundo, y con el proceso constructivo de la L-20.

(a) Referencias superficiales: asentamientos de hasta unos 14 mm en la L-18, asociados a maniobras, rezaga y bombeo, sin indicios de falla. (b) Inclinómetros: desplazamientos hacia el interior de la lumbrera, más fuertes desde los 120 m, donde termina el muro Milán y empieza el método convencional; algunos superaron los de la memoria de cálculo, con inspecciones visuales sin anomalías. (c) Piezómetros: abatimiento del NAF de 80 a 119.65 m en la L-20, contra 106 m necesarios. (d) Tubo de observación en L-19: sirvió para operar eficientemente el módulo de bombeo con válvulas de retorno. (e) Verificación de calibración: cinco sondas inclinométricas y cinco consolas de cuerda vibrante en los seis tramos dieron lecturas coincidentes.

Cada medición se ejemplifica con la lumbrera más representativa (L-18 para asentamientos, L-20 para presiones). Las profundidades de 128, 134 y 155 m difieren de las de otras tesis (sección 4.4.4).

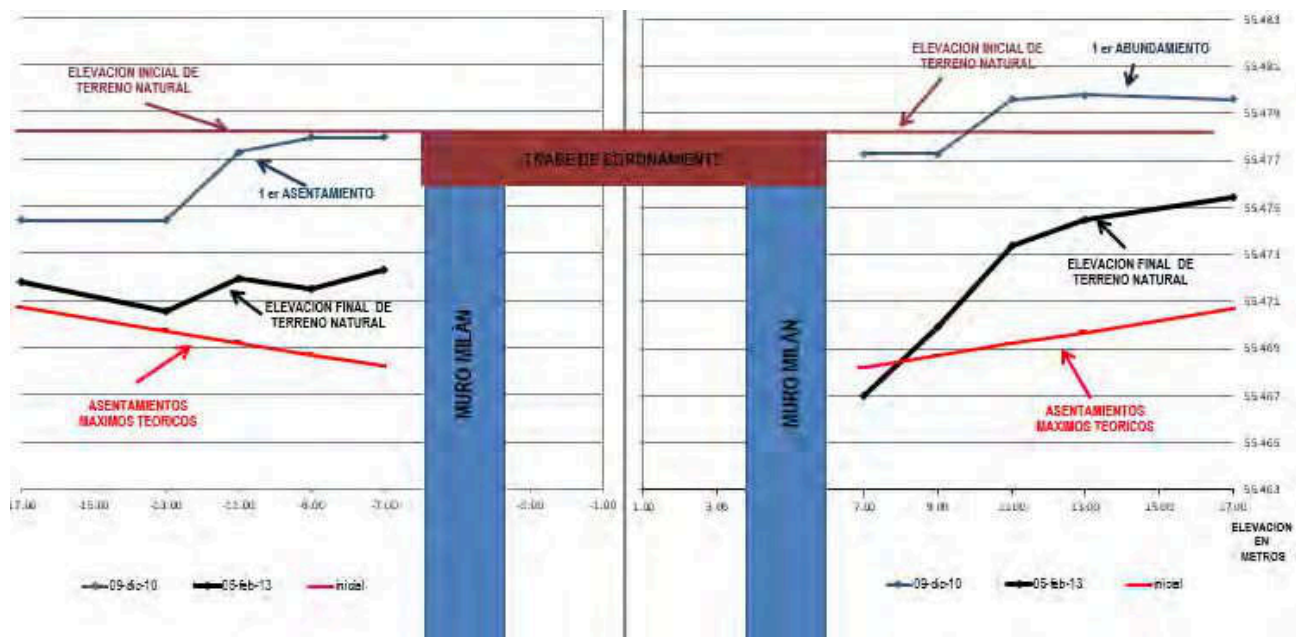


Figura 12.69. Asentamientos teóricos y medidos en la lumbrera L-18

LUMBRERA L-12: GEOHIDROLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

El estudio más detallado de un problema de agua en el TEO es el de la L-12: marco físico, geofísica, geotecnia, instrumentación y geohidrología; revisión del sistema de bombeo en cuatro etapas (6, 10, 16 y 18 pozos); propuesta de mejoras (políticas de operación, tecnología de medición en tiempo real, diseño de pozos con ademe ciego y sellos de bentonita hasta la profundidad del muro Milán, recarga del acuífero, alimentación a la red hidráulica, controles de calidad de pozos e instrumentos, pruebas piloto) y propuesta de normatividad para pozos de abatimiento. Los resultados cuantitativos se presentaron en secciones anteriores de este capítulo.

En San Juan de Aragón el hundimiento fue de 7.5 m en 75 años (1936-2011), es decir, unos 10 cm por año.



Figura 12.70. Predio de ocupación de la lumbrera L-12



Figura 12.71. Excavación del núcleo de la L-12 con retroexcavadora



Figura 12.72. Armado del revestimiento de la L-12



Figura 12.73. Descarga del agua extraída por el bombeo en la L-12

08

Tabla final de resultados por tramo

La tabla 12.17 junta, por tramo, el suelo, los parámetros, el agua, la solución y el resultado. Para los tramos 2 y 4 se usan la litología regional, la tabla de lumbreras del capítulo 11 y los datos de excavación de las tuneladoras.

TABLA 12.17. RESULTADOS DE GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y GEOHIDROLOGÍA POR TRAMO

TRAMO	CASOS CON DATOS	SUELO O ROCA	PARÁMETROS REPRESENTATIVOS	AGUA	SOLUCIÓN GEOTÉCNICA	RESULTADO (CALCULADO O MEDIDO)
T-1 (L-0 a L-5)	L-00 (km 0+000) y L-04 (km 8+208)	Arcilla lacustre blanda de alta plasticidad (w de 200 a 350%) hasta 26 m en L-00 y 14 m en L-04; limos duros desde 30 m (L-04)	L-00 (primeros 26 m): $\gamma = 11.5$ a 12.5 kN/m^3 , $c = 23$ a 44 kPa . L-04: $c = 33$ a 46 kPa en arcillas y 113 a 356 kPa en limos duros; E de 3 a 128 MPa	NAF de 1.6 a 5.48 m (L-04) y 3 m (L-00); presión de poro de 137 kPa a 25 m en L-04	L-00: reemplazo del suelo por lodo fraguante (3.67 m , $1,500 \text{ kPa}$) e inyecciones; EPB en modo cerrado con frente de 133 a 254 kPa . L-04: muro Milán de 1.0 m hasta 51 m y cuatro pozos de bombeo a 59 m	L-00: FS de 0.59 a 3.5 . L-04: FS de fondo 1.8 , flotación 2.2 , subpresión 11.5 con abatimiento; asentamiento medido de 15 cm

TRAMO	CASOS CON DATOS	SUELO O ROCA	PARÁMETROS REPRESENTATIVOS	AGUA	SOLUCIÓN GEOTÉCNICA	RESULTADO (CALCULADO O MEDIDO)
T-2 (L-5 a L-10)	Litología regional y datos de la máquina	Lacustres pumíticos poco plásticos; suelos tobáceos prelacustres; cenizas sueltas de Tultepec desde km 21.4	Arcillas pumíticas con 50 a 100 % de agua	Poco transmisible; fuertes gastos solo al cortar estratos de ceniza o pómez	EPB S-498 de Herrenknecht, 8,700 mm y 1,600 kW	Tramo de 11.581 km entre L-05 y L-10
T-3 (L-10 a L-13)	L-12 (km 27+603)	Lacustres arcillo-arenosos con tobas basálticas; arenas y gravas de delta (río de las Avenidas de Pachuca) y acuífero Cuautitlán-Pachuca	Cu de 1.5 a 58 t/m ² con la profundidad; ϕ u de 10 a 35°; N SPT mayor a 50 en capas duras	Nivel estático 60 a 65 m; más de 3 bares; 41 t/m ² a 87.2 m; caudal total de más de 600 L/s	Muro Milán hasta unos 44 m; excavación convencional; 18 pozos de abatimiento (94 a 137 m) más achique	FS de subpresión de 0.11 sin bombeo; 873 días de bombeo; emersión de 57 a 70 mm; movimientos superficiales de 23.0 mm
T-4 (L-13 a L-17)	Lote 4 de las EPB de Robbins	Arcillas pumíticas, cenizas, suelos tobáceos café rojizos consolidados (32.8 a 38.5 km) y abanicos aluviales con gravas cementadas (38.5 a 43.9 km)	Basalto abrasivo de hasta 80 MPa previsto para el diseño de las tres máquinas Robbins	Hasta 180 L/s en el túnel y presión de hasta 3.5 bar en la cabeza	EPB Robbins de 8.93 m con cabeza de frente mixto; unas 50 intervenciones hiperbáricas y después a presión atmosférica	Récord de 30 m por día y 528 m por mes; fin de excavación el 23 de mayo de 2019
T-5 (L-17 a L-20)	L-18 y L-19	Arcillas, limos arenosos y arenas hasta 65 a 70 m; toba a 65 m (L-18); boleos de basalto a 85 m y lutitas Taximay (L-19)	Sin tabla de parámetros	Nivel estático a 70 m (L-19); acuífero profundo que obligó a un segundo módulo de bombeo	Muro Milán hasta 67 a 80 m (trabe de liga) y excavación convencional hasta 128 a 134 m	Asentamientos de unos 14 mm en la L-18; desplazamientos de inclinómetros aceptables o con inspección sin anomalías
T-5/T-6 (L-20, ensamble)	L-20 (km 49+764)	Limo duro cementado hasta 101 m; lutita (arcilla dura) con lentes de conglomerado de 101 a 167 m	su de 50 a 150 kPa en limo y de 430 a 670 kPa en lutita; E50 de 12 a 22 MPa y de 120 a 135 MPa	NAF a 65 a 80 m; estratos drenantes profundos; abatir hasta 106 m	Anillos prefabricados hasta 40 m; ERI-1 de 40 a 152 m; abatimiento del NAF	FS de 0.80 sin soporte, 2.27 etapa 1, 1.80 etapa 2, flotación 7.90, sismo 1.40; NAF abatido hasta 119.65 m

TRAMO	CASOS CON DATOS	SUELO O ROCA	PARÁMETROS REPRESENTATIVOS	AGUA	SOLUCIÓN GEOTÉCNICA	RESULTADO (CALCULADO O MEDIDO)
T-6 (L-20 a portal)	L-21 a L-24 (solo geometría) y lote 6	Taximay consolidada con abanicos aluviales; lavas duras entre km 52.9 y 53.1; arcillas consolidadas hacia el portal	Arcillas muy consolidadas de la Taximay; gravas y boleos en limo con presión de poro elevada	Lavas con entrada profusa de agua prevista	EPB S-519 de Herrenknecht, 8,890 mm y 2,080 kW	Tramo de 12.654 km entre L-20 y el portal

09

Comparación con el Túnel Emisor Poniente II (TEP II)

El TEP II (Atizapán de Zaragoza y Cuautitlán Izcalli, Estado de México) se concibió tras la ruptura del Emisor Poniente en septiembre de 2009, como alternativo al sistema de desalojo del norponiente de la cuenca. Es una obra mucho más corta que el TEO, pero presenta una geología volcánica y un hallazgo imprevisto que sirven para contrastar.

El TEP II tiene un trazo de 5.9 km (5,956.23 m) en cinco tramos entre la captación de los ríos San Javier y Xochimanga y la descarga al Emisor Poniente a cielo abierto; el túnel es de 7.2 m de diámetro terminado y 112 m³/s de capacidad. El revestimiento primario son anillos de siete dovelas de 35 cm de espesor y 1.5 m de longitud (3,730 anillos), y hay una sola lumbrera de 12 m interior y 67 m de profundidad, excavada por método convencional con marcos de acero y concreto lanzado. Los estudios geológicos reportaron ocho tipos de materiales, de aluvión y brechas poco cementadas a domos de dacita, y el trazo cruza dos acuíferos, el de la Ciudad de México (73 %) y el de Cuautitlán-Pachuca (27 %), el mismo en que se alojó la L-12 del TEO. Esa mezcla de roca volcánica sana y fracturada con suelos blandos es muy distinta del 80 % de suelos del TEO.

El 25 de septiembre de 2016, en un paro nocturno de mantenimiento, se detectó en la clave una cavidad ascendente en el cadenamiento 5+142.585, bajo una calle cerrada de San Miguel Xochimanga, con tres casas y una nave industrial sobre el eje. El georradar con ocho calas virtuales y la tomografía eléctrica de 28 electrodos dipolo-dipolo definieron la anomalía: comienza a 9 m de profundidad, llega a 27 m y tiene un volumen aproximado de 3,600 m³, interpretada como un hueco entre clastos y peñascos de un depósito de pie de monte sobre una paleoladera. La solución combinó inyección de agua y bentonita desde la máquina, barrenos desde la calle para inyectar lechada de cemento con acelerante y verificación con estudios indirectos; la excavación se retomó con la máquina convertida a modo EPB. Para proteger las construcciones se colocaron 890 micropilotes de 8⁵/₈ pulgadas y 25 m de profundidad promedio, con trabes de liga.

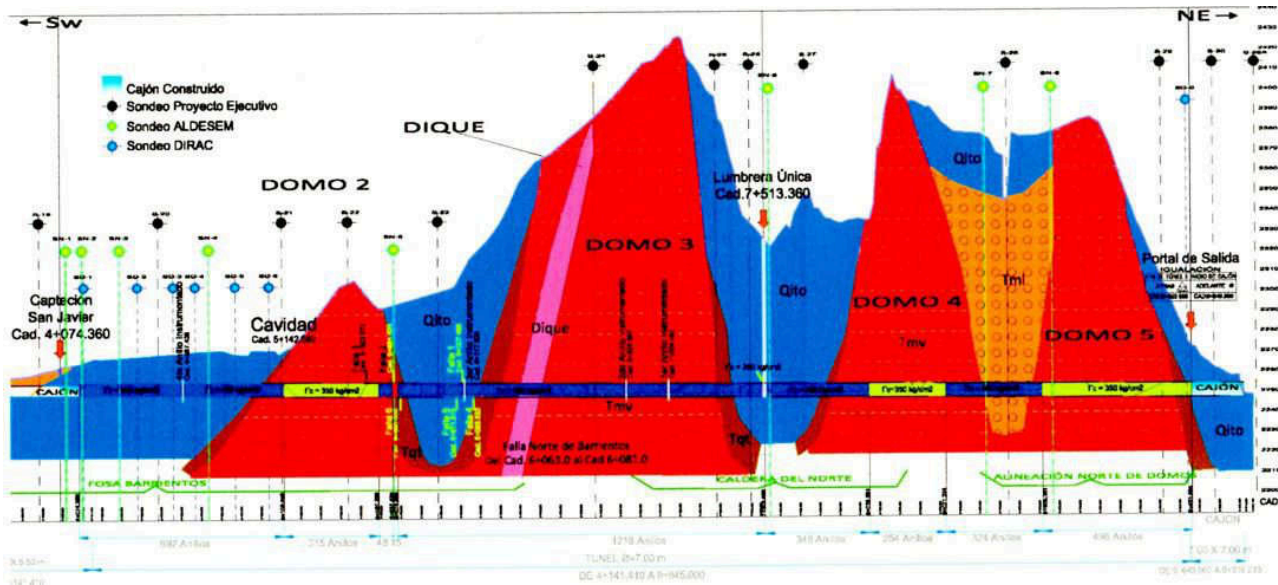


Figura 12.74. Perfil geológico del TEP II con domos, lahares y diques

TABLA 12.18. TEO Y TEP II

CONCEPTO	TEO	TEP II
Longitud	62.4 km	5.9 km
Capacidad	150 m ³ /s	112 m ³ /s
Diámetro interior	7.0 m	7.0 m (7.2 m terminado)
Lumbreras	25 (de 25 a 150 m)	1 (67 m)

CONCEPTO	TEO	TEP II
Geología dominante	80% suelos blandos o consolidados; 20% roca	Roca volcánica (domos, lahares, diques) y suelos de piedemonte, con un tramo final de suelo blando
Tuneladoras	Seis frentes (tramos de unos 10 km), EPB en el primero (8.70 m) y escudos mixtos en otros; ver capítulo 14	Una TBM Crossover de 8.7 m convertida a EPB
Agua	Acuífero Cuautitlán-Pachuca en L-12 con más de 600 L/s	Dos acuíferos: CDMX (73%) y Cuautitlán-Pachuca (27%); infiltraciones por lluvia al frente
Imprevisto principal documentado	Subpresión y caudal en L-12 (4.6 L/s estimados contra más de 600 L/s)	Cavidad de unos 3,600 m ³ de anomalía (o 90 m ³ según otra cifra) bajo viviendas
Protección de superficie	Modo cerrado y medición de asentamientos (L-00); inclinómetros y referencias en lumbreras	890 micropilotes de 25 m y trabes de liga
Revestimiento primario	Dovelas de 0.35 m (tramo 1)	Dovelas de 0.35 m, concretos de 350 a 650 kg/cm ² según zona

Dos coincidencias importantes: en ambos casos la exploración previa no anticipó el rasgo geológico decisivo (acuífero de gravas en L-12; cavidad entre clastos en el TEP II), lo que apoya la recomendación de hacer pruebas piloto y estudios geofísicos adicionales antes de construir; y en ambos casos la solución fue inyectar o bombear con instrumentación para verificar el resultado. La diferencia de fondo es de escala: la excavación del TEO es un problema de variabilidad a lo largo de 62 km, y la del TEP II es de un solo tramo de roca y suelo en poco más de 5 km.

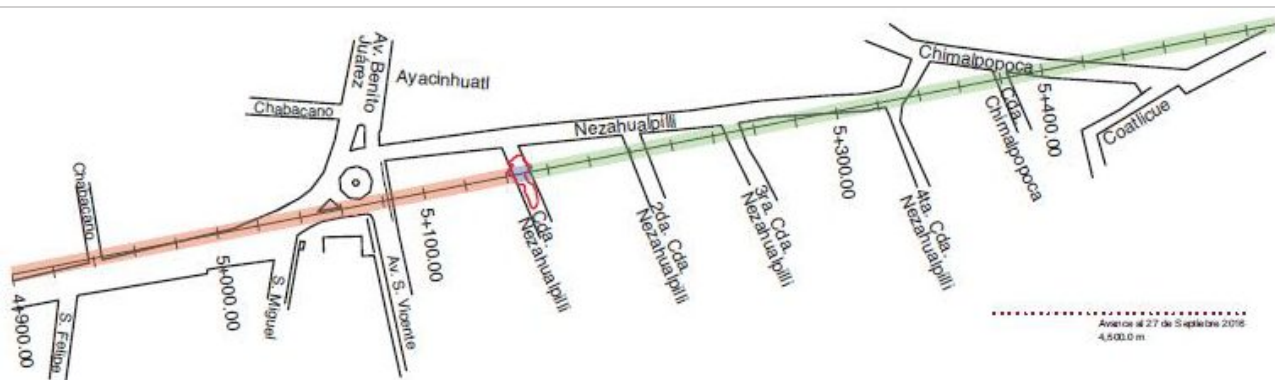


Figura 12.75. Localización de la cavidad sobre el eje del TEP II

10

Síntesis

Primero, el subsuelo del TEO es heterogéneo por tramo: de arcillas con 200 a 350 % de agua en el arranque a lutitas y lavas duras en el extremo norte, con 80 % de suelos. Por eso no existe un modelo geotécnico único, y las soluciones (reemplazo de suelo, muro Milán, anillos prefabricados, elemento de retención inferior, bombeo) son específicas de cada lumbrera.

Segundo, el agua, y no la resistencia del suelo, fue el factor más difícil. El factor de seguridad de 0.11 y los más de 600 L/s de la L-12 contrastan con una estimación de 4.6 L/s. Las lumbreras bajo el nivel freático requieren pruebas de bombeo y modelos de flujo desde la ingeniería básica, y no cuando la excavación está por empezar.

Tercero, donde hubo datos de obra, las verificaciones de diseño se cumplieron: asentamientos medidos de 15 cm en la L-04 y de 23 mm en la L-12, emersiones de 57 a 70 mm y desplazamientos de inclinómetros aceptables en la L-18 a la L-20. Eso respalda el uso de métodos de equilibrio límite complementados con elementos finitos.

Cuarto, el conocimiento detallado se concentra en cuatro lumbreras y en los lotes 3 a 5; los tramos 2 y 6 se conocen por la litología regional y los datos de las máquinas, de modo que el registro de campo es lo que permite aprender a tiempo y no reconstruir la lección después.

Por último, el TEP II confirma que las tuneladoras modernas se enfrentan a rasgos que la exploración puntual no ve, como cavidades y acuíferos, y que se mitigan con geofísica, inyección y monitoreo.

En resumen: El subsuelo del TEO es heterogéneo: cerca de 80 % de suelos blandos o consolidados y el resto en roca, con soluciones específicas por lumbrera. El agua, y no la resistencia del suelo, fue el problema más difícil, como mostró la lumbrera L-12, donde la estimación de caudal quedó muy por debajo del bombeo real. Donde se midieron las condiciones, las verificaciones de diseño se cumplieron; el TEP II confirma que la exploración puntual no ve todos los rasgos del terreno.



Parte II · La línea de conducción del TEO

13

Del anteproyecto a la obra: proceso constructivo

Cómo los estudios definieron la forma de construir el túnel

El Túnel Emisor Oriente se construyó en el orden en que se pensó solo a medias: la manifestación de impacto ambiental de 2008 describía 24 lumbreras, cinco frentes y cuatro años de obra, y lo que se terminó en 2019 tiene 25 lumbreras, seis tramos con siete frentes de excavación y once años desde el inicio de los trabajos. Este capítulo recorre ese camino. Parte del anteproyecto, sigue la ingeniería básica y el proyecto ejecutivo, explica cómo cada estudio terminó convertido en una decisión de obra y describe, en el orden en que ocurrieron, las actividades preliminares, la secuencia general de construcción, la obra de entrada y la obra de salida. Cierra con las cartas topográficas que cubren el trazo. El detalle de cada etapa está en su capítulo (estudios en el 11, geología en el 12, excavación y maquinaria en el 14, lumbreras en el 15, materiales en el 16); aquí se integra y se remite.

El anteproyecto: lo que planteaba la MIA-P de 2008

La manifestación de impacto ambiental modalidad particular (MIA-P) que la Conagua presentó en marzo de 2008 es el documento más completo del anteproyecto que se conoce. Describe un túnel de 62 km de longitud, 7.0 m de diámetro y 180 m³/s de capacidad máxima, con 24 lumbreras de entre 40 y 180 m de profundidad: 18 de construcción, de 12 m de diámetro, y 6 de gran sección, de 18 m, por donde entrarían y saldrían los equipos excavadores.

El trazo seguiría el Gran Canal del Desagüe. Durante los primeros 10 km corría por su margen izquierda hacia el noreste; después pasaba por debajo del canal, giraba ligeramente al noroeste y seguía paralelo a su margen derecha hasta cerca del km 38+500. Ahí daba la vuelta completa hacia el noroeste, cruzaba a la margen izquierda, pasaba por el sur y el costado de la laguna de Zumpango, y avanzaba junto al Canal de Castera y el Canal Cuautitlán hasta el portal de salida en El Salto. La razón de ese eje era facilitar las captaciones de los colectores que ya descargaban en esos cauces. El túnel descargaría a una cota cercana a la del Emisor Central, con unos 100 m de desnivel entre el fondo de la L-2 del Túnel Río de los Remedios y la plantilla del Emisor Central en el sitio de descarga.

Las 24 lumbreras eran una estimación. Su número salía de los cambios de dirección del trazo, de las lumbreras intermedias que hacían falta donde la distancia entre dos lumbreras con deflexión pasaba de 3 km y de la disponibilidad de predios. El proyecto se organizaba en cinco tramos, con 7, 5, 4, 4 y 4 lumbreras y longitudes de 13.471, 14.122, 10.694, 10.777 y 12.617 km, y cinco frentes de excavación simultáneos, uno por tramo.

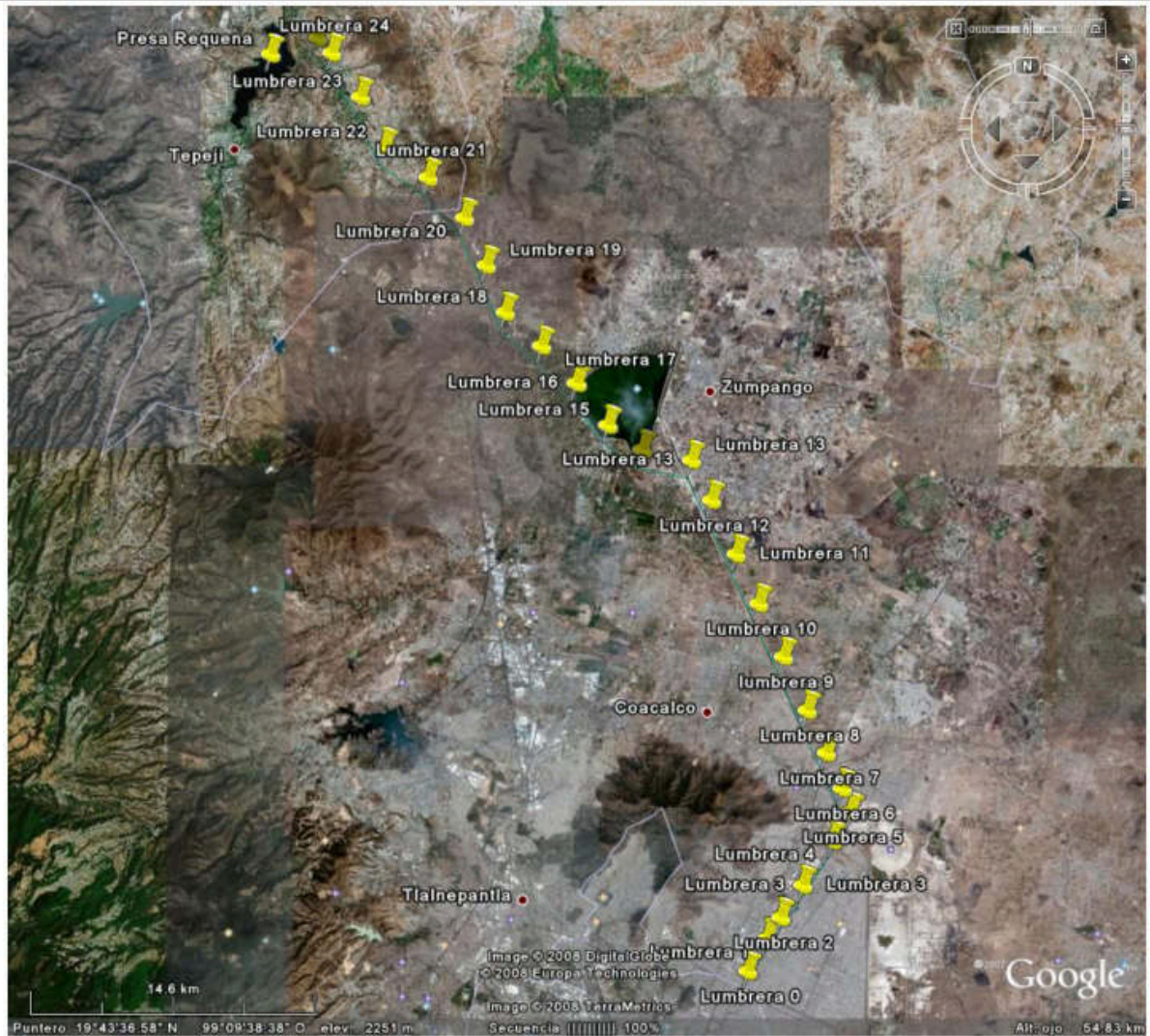


Figura 13.1. Trazo del anteproyecto de 2008 con 24 lumbreras

El procedimiento constructivo del anteproyecto ya tenía la lógica que se siguió después, aunque con menos precisión en los métodos. En cada lumbrera se haría un despalme con motoconformadora, una cerca perimetral y, donde el nivel freático fuera superficial, un relleno de 50 cm de tepetate. Las lumbreras se construirían por flotación, con muro Milán o con anillos de concreto según el suelo, y el túnel se excavaría con escudo de tierra balanceada en arcillas y limos, con escudo de frente mixto en suelo duro (aluviales con conglomerados, gravas y arenas con arcillas compactas) y con un equipo de dientes de diamante en roca. Las dovelas de concreto reforzado formarían el revestimiento primario y un revestimiento definitivo de concreto reforzado, calculado sin contar con el primario, se colaría cuando un tramo entre lumbreras ya estuviera excavado. La fabricación de cada

máquina tomaría de 9 meses a un año y su ensamble, de uno a dos meses. Seis lumbreras (L-1, L-7, L-12, L-16, L-20 y L-24) llevarían además un patio de dovelas, acero, cemento, agregados, durmientes, bandas y bentonita.

El programa general de trabajo, por trimestres, iniciaba la construcción en el segundo trimestre de 2008 y la terminaba en el segundo trimestre de 2012, esto es, cuatro años. En él, los estudios complementarios y el proyecto ejecutivo de cada frente aparecen como la primera partida del frente, antes de la fabricación de equipos, las lumbreras, la excavación y el revestimiento definitivo. El monto de obra del anteproyecto era de 12,000 millones de pesos y el gran total con servicios, ajuste e IVA, de 16,460.5 millones.

Dato técnico: la MIA-P llama a esta etapa "anteproyecto", y las coordenadas de sus lumbreras son de ese nivel. La L-20, por ejemplo, está en el cadenamamiento 49+064 en la MIA-P y en 49+607.654 en el proyecto ejecutivo. Para ubicar puntos sirven ambas; para replantear sirven solo las de proyecto ejecutivo.

02

Ingeniería básica y proyecto ejecutivo: qué cambió del anteproyecto a la obra

DOS ETAPAS DE DISEÑO QUE CORRIERON JUNTO CON LA OBRA

En junio de 2007 la Conagua pidió a la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la CFE (GEIC) la ingeniería básica con la que se elaboraría el proyecto ejecutivo y se construiría el túnel. La GEIC trabajó el trazo en cinco etapas de longitud parecida, que corresponden a los cinco tramos del anteproyecto de la MIA-P, y entregó a la Conagua informes, fichas de instalación y registros iniciales de instrumentos. Su informe de estudios se cierra en marzo de 2009 (ver capítulo 11).

El proyecto ejecutivo no fue un estudio previo sino parte del contrato. El contrato SGAPDS-GIHP-DFMEXHGO-08-008-RF-AD, firmado el 14 de noviembre de 2008, tiene por objeto "la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción" del túnel, a precio mixto y tiempo determinado. La consecuencia es de calendario: la primera tuneladora, la HK497, empezó a excavar desde la L-0 el 10 de noviembre de 2009, y cuando el proyecto ejecutivo se dio por terminado, y con él la planeación de toda la obra, llevaba 231 m. Las máquinas se encargaron con la geología de la ingeniería básica; por eso varias decisiones (sección 3) se corrigieron ya con el escudo en el terreno.

CAMBIOS ENTRE EL ANTEPROYECTO Y LO CONSTRUIDO

Los cambios que las fuentes documentan son los siguientes.

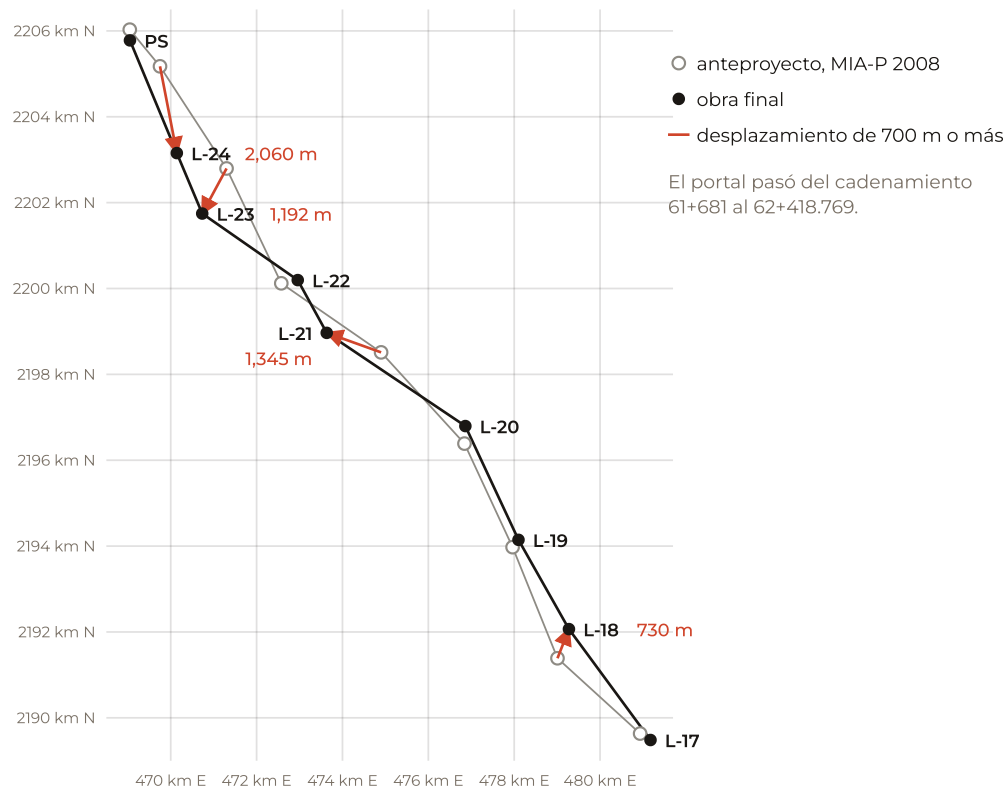
1. Número de lumbreras: de 24 a 25. Las lumbreras del anteproyecto eran 24 y se sumó una adicional, la L-3A. La L-3A se construyó para extraer las dos tuneladoras del tramo 1, que se encontrarían en ella, tras la inundación del 3 y 4 de febrero de 2010. Con ella, las lumbreras de montaje pasaron de seis a siete: L-0, L-3A, L-5, L-10, L-13, L-17 y L-20.
2. Método constructivo del tramo 1. El 26 de noviembre de 2010 la Conagua decidió acelerar ese tramo para ponerlo en operación pronto y reducir el riesgo de inundación en el oriente metropolitano. Se abrieron dos frentes (L-0 hacia L-3A y L-5 hacia L-3A), se construyeron ocho pozos de rezaga y se proyectó una planta de bombeo junto a la L-5 que pasara el agua al Gran Canal. El primer convenio modificatorio formaliza la modificación del método del tramo 1 y la lumbrera L-3A.
3. Trazo del tramo 6. En enero de 2011 la Conagua autorizó cambiar el trazo para reducir el riesgo de atrapamiento de la tuneladora HK S-519 en vulcanitas muy fracturadas, con ingeniería complementaria y tres lumbreras nuevas, L-21A, L-23A y L-24A. El segundo convenio modificatorio lo incorpora al contrato. Las coordenadas lo confirman: de las 24 lumbreras que se pueden comparar, las del extremo final son las que más se movieron respecto de la MIA-P, entre 730 y 2,060 m (L-18, L-21, L-23 y L-24; ver capítulo 11).
4. Número de frentes. Los cinco frentes del anteproyecto fueron seis tramos y siete frentes de excavación, porque el tramo 1 se atacó desde dos lados y el 5 se dividió en

dos subtramos, 5a y 5b, para acortar el plazo. La máquina pensada para el tramo 5 se usó en el 1B, mientras la L-20 aún se construía.

5. Longitud y diámetro. La longitud pasó de 62 km (anteproyecto) a 62.4 km, con 62,101 m excavados a octubre de 2019; el diámetro terminado de 7.0 m se mantuvo. La capacidad bajó de 180 m³/s en la MIA-P a 150 m³/s en el proyecto.
6. Profundidad y diámetro de lumbreras. El anteproyecto daba lumbreras de 40 a 180 m. Las de la obra van de unos 23 m (L-0) a unos 150 m (L-20). Las de gran sección dejaron de ser las seis de 18 m; la ASF las cuenta como 15 de 12 m, 9 de 16 m y una de 18 m.

Lumbreras del tramo final: anteproyecto y obra

planta en coordenadas UTM; rejilla de 2 km



Elaboración propia con datos de Semarnat (2008a, tablas II.3-II.7) y De Nova y Luna (2014, p. 34); Y de L-21 corregida; separaciones, cálculo propio.

Figura 13.2. Lumbreras del anteproyecto frente a las de la obra final, de L-17 al portal

EL PROYECTO EJECUTIVO NO CERRÓ LA GEOLOGÍA

Después del proyecto ejecutivo se detectaron condiciones geotécnicas distintas y más adversas que las de la ingeniería básica, y eso volvió imposible el plazo original. Lo mismo se observa en la auditoría: la ingeniería complementaria para la excavación entre la L-13 y la L-17 se justificó porque las condiciones reales de los campamentos diferían de las previstas (dimensiones, geometría de la superficie y geología), y obligó a rediseñar las cimentaciones de los equipos. Este patrón es consecuencia de empezar a construir con una ingeniería básica de 24 sondeos para 62 km: cada tramo se conoció casi al mismo tiempo que se excavaba, y el proyecto ejecutivo se fue ajustando con lo que aparecía (sección 3 y capítulo 12).

03

Cómo los estudios determinaron el proceso constructivo

Cada estudio de los capítulos 11 y 12 terminó en una decisión de obra. La tabla 1 junta las que están documentadas con su razón; los cálculos y los datos completos están en el capítulo indicado en la última columna.

TABLA 1. DE LOS ESTUDIOS A LAS DECISIONES CONSTRUCTIVAS

ESTUDIO	HALLAZGO	DECISIÓN CONSTRUCTIVA	CAPÍTULO
Topografía y SIG	Trazo en zona de hundimiento regional; cruces con carreteras, tuberías de Pemex y canales	Bancos de nivel profundos como control principal; trazo afinado para evitar interferencias	11
Geotecnia del norte de la cuenca	Arcillas con 50 a 100 % de agua en el norte, contra 150 a 200 % en el centro y 300 a 400 % en el sur	Trazo por el norte de la cuenca, no por el centro	12

ESTUDIO	HALLAZGO	DECISIÓN CONSTRUCTIVA	CAPÍTULO
Geotecnia general	Arcilla y arena bajo el nivel freático en casi todo el trazo	Seis tuneladoras de presión de tierra balanceada (EPB), con herramientas intercambiables en los tramos 3 a 5; descartados escudo abierto con aire comprimido, topo y voladura	14
Arcillas blandas, L-00 a L-1A	Arcilla muy blanda; factor de seguridad de 0.59 contra extrusión al abrir la lumbrera L-00	Reemplazo del suelo por una franja de 3.67 m de lodo fraguante (FS = 3.5) e inyecciones de manguito; arranque con la EPB en modo cerrado	12
Geohidrología, L-04	Estratos limo-arenosos drenantes con presión de poro; FS menor de 1.3 al excavar sin abatir	Cuatro pozos de bombeo profundo a 59 m y muro Milán de 1.0 m hasta 51 m	15
Geohidrología, L-12	Acuífero Cuautitlán-Pachuca a más de 3 bares; FS por subpresión de 0.11; caudal estimado de 4.6 L/s contra más de 600 L/s reales	Sistema de 18 pozos de abatimiento más achique	15
Geotecnia, L-20	Corte de unos 150 m en limo duro y lutita, con FS de 0.80 sin soporte	Anillos prefabricados de 0 a 40 m y elemento de retención inferior de 40 m en adelante, con abatimiento 10 m bajo la losa de fondo	15
Geología de los tramos 3, 4 y 5	Basalto abrasivo de hasta 80 MPa, vulcanitas y abanicos con boleas, agua a 4-6 bar	EPB de frente mixto con cortadores de disco y rascadores; tornillo y cabeza rediseñados durante la obra; intervenciones hiperbáricas o a presión atmosférica con bombeo	14
Geología del tramo 6	Vulcanitas muy fracturadas en el trazo original, riesgo de atrapamiento de la S-519	Cambio de trazo y lumbreras L-21A, L-23A y L-24A	14
Mecánica de suelos para lumbreras	La flotación tiene un máximo probado de 19 m de diámetro y 30 m de profundidad; las lumbreras del TEO llegan a unos 150 m	Muro Milán con hidrofresa hasta unos 120 m y excavación convencional por debajo, con trabe de liga	15

ESTUDIO	HALLAZGO	DECISIÓN CONSTRUCTIVA	CAPÍTULO
Hidrología y modelo físico, salida	Gasto de 150 m ³ /s en avenidas y hasta 50 m ³ /s en estiaje para la PTAR	Vertedor de excedencias y tanque amortiguador a la salida, con canal al río El Salto	11 y 17

Tres de estas decisiones muestran el vínculo entre estudio y obra. La elección de las EPB resultó de un conjunto de estudios (geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, de trazo, de longitud, de plazo y de entorno) y de un hecho físico: casi todo el túnel está bajo el nivel freático, y la presión del frente la contrarresta el propio material alojado en la cámara. El caso de la L-12 muestra que una decisión constructiva depende de la profundidad a la que se hizo el estudio: los ensayos de 5 m promediaban suelos distintos y no llegaban a los 80 m donde estaba el problema, y el abatimiento pasó de seis pozos a 18. La roca del tramo 3 al 5 contradijo la previsión de 2008 de atravesar las vulcanitas "sin mayores dificultades"; las máquinas, diseñadas para basaltos de hasta 80 MPa y 4 a 6 bar, se modificaron durante la obra. Los datos y las alternativas descartadas están en los capítulos 12, 14 y 15.

04

Actividades preliminares de la obra

El Libro Blanco de la Conagua enumera los trabajos que comprendía la ejecución, y la lista deja ver el orden de la obra: el diseño de las estructuras, la construcción de caminos de acceso, la construcción y el tendido de líneas eléctricas, el traslado, ensamble, pruebas y puesta en marcha de seis tuneladoras, los preparativos y trabajos de apoyo a la construcción de lumbreras, tres plantas de dovelas con la fabricación de 41,334 anillos, 25 lumbreras de acceso y de paso, la excavación de los seis tramos, el portal de salida, el revestimiento definitivo y el retiro de las instalaciones con el desalojo de las áreas usadas. Antes de excavar el primer metro había que resolver cuatro cosas: dónde estaba el eje, cómo se llegaba a cada sitio, de dónde venía la energía y dónde iba a vivir la obra.

TRAZO, REPLANTEO Y CONTROL TOPOGRÁFICO

La topografía fue la instrumentación primaria del proyecto desde la ingeniería básica. El trazo preliminar se ubicó con las lumbreras y los puntos de inflexión del proyecto de la Conagua, se afinó con los jefes de las disciplinas de la CFE-GEIC y en un recorrido de campo conjunto con la Conagua, y la Conagua aprobó los sitios. Cada punto se posicionó primero con un GPS de tipo navegador y se dibujó en mapas del INEGI y en imágenes de satélite. Con el eje preliminar definido se estableció el control básico:

1. Mojoneras ubicadas a partir de la lumbrera del Río de los Remedios, conforme a las Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos del INEGI.
2. Control vertical con nivelación de primer orden, de ida y vuelta, desde el banco de nivel M(N05-E03), llamado Atzacualco, hasta la lumbrera L2RR, que es la L-0 del TEO y ya estaba construida.
3. Bancos de nivel aproximadamente cada 500 m a lo largo del trazo, además de los de las zonas de lumbrera, hasta sumar unos 140. Para 61.8 km, 140 bancos equivalen a uno cada 440 m en promedio (cálculo propio).

En una zona donde las tasas de hundimiento superan los 200 mm/año a lo largo de la estructura, los bancos superficiales se mueven con el terreno. Por eso en sitios estratégicos se instalaron bancos de nivel profundos, desplantados sobre un estrato firme y aislados del suelo que se asienta con una camisa de lámina. Sus coordenadas se actualizaron periódicamente, de modo que sirvieron primero para ubicar el trazo y las lumbreras y después para vigilar los movimientos del terreno. Los bancos dañados durante los estudios se repusieron en las cinco etapas. La topografía figura entre los conceptos que el contratista podía subcontratar, y durante la obra cada frente llevó su control propio, con guiado de la tuneladora por estación total (ver capítulo 14). El sistema de coordenadas y el cambio de datum de ITRF92 a WGS84 se explican en el capítulo 11.

LIMPIEZA Y DESPALME

En cada sitio de lumbrera se retiraba la capa vegetal con herramientas o con motoconformadora, hasta dejar una superficie limpia y horizontal, y se levantaba una cerca de malla ciclónica que delimitaba el área. Donde el nivel freático era superficial se agregaba un relleno de 50 cm de tepetate. En la L-12, ya en obra, la plataforma se

preparó con escarificación y despálme de unos 70 cm y un relleno granular del mismo espesor. El despálme concentra los impactos de la etapa de preparación del sitio: polvos, ruido de maquinaria, desplazamiento de fauna nociva y disposición de sus residuos en bancos de tiro autorizados.

CAMINOS DE ACCESO Y LÍNEAS ELÉCTRICAS

La construcción de caminos de acceso y el tendido de líneas eléctricas son dos de los conceptos que el Libro Blanco lista antes que cualquier equipo. Los caminos de acceso, junto con las oficinas y campamentos, estaban entre los trabajos que el contratista podía subcontratar, con un tope de 30 % del monto del contrato. La energía es la otra condición: en el tramo 3 llegó con una acometida de 23 kV, transformadores de 1,000 y 225 kVA y cable de 13,200 V en el back up de la máquina, y de ella dependían la turbina de ventilación de 31 m³/s y las bombas de agua residual. El acceso pesó tanto como la energía. En el ejido Melchor Ocampo, la comunidad pidió personal de apoyo vial para el camino por el que se llegaba a la L-24A, y gastos de ese tipo formaron parte de los que la ASF cuestionó junto con el cambio de trazo. En el portal de salida se agregó una subestación eléctrica que no estaba en el proyecto original.

PATIOS, CAMPAMENTOS Y PLANTAS DE DOVELAS

En cada lumbrera se instalaban baños móviles, campamentos, bandas transportadoras, un área de depósito temporal de la rezaga y un almacén de combustibles y materiales para el equipo; en seis lumbreras había además un patio de dovelas, acero, cemento, agregados, durmientes, bandas y bentonita. El patio de dovelas debe ser lo bastante grande para alojar las que se consumen en el avance diario programado, y las dovelas se estiban sobre polines anclados al firme para no concentrar la carga. Las tres plantas de dovelas, en Ecatepec, Zumpango y Huehuetoca, se construyeron y se pusieron en marcha como parte de la obra, cada una asignada a un tramo del trazo. Antes del ensamble de cada máquina hacían falta además una plataforma de maniobras, un patio de manto de anillos y las cimentaciones de la grúa y de la planta de inyección.

BANCOS DE TIRO

El material excavado se debía llevar a bancos de tiro que designara la Conagua, conformarlos con bordos y tinas y restituir el sitio al final. La MIA-P identificó 19 sitios potenciales para la primera etapa, con el BAT19 como el de mayor capacidad, 1,800,000 m³. Las cifras de volumen y los efectos ambientales están en los capítulos 16 y 18; los bancos usados, al final de este capítulo.

05

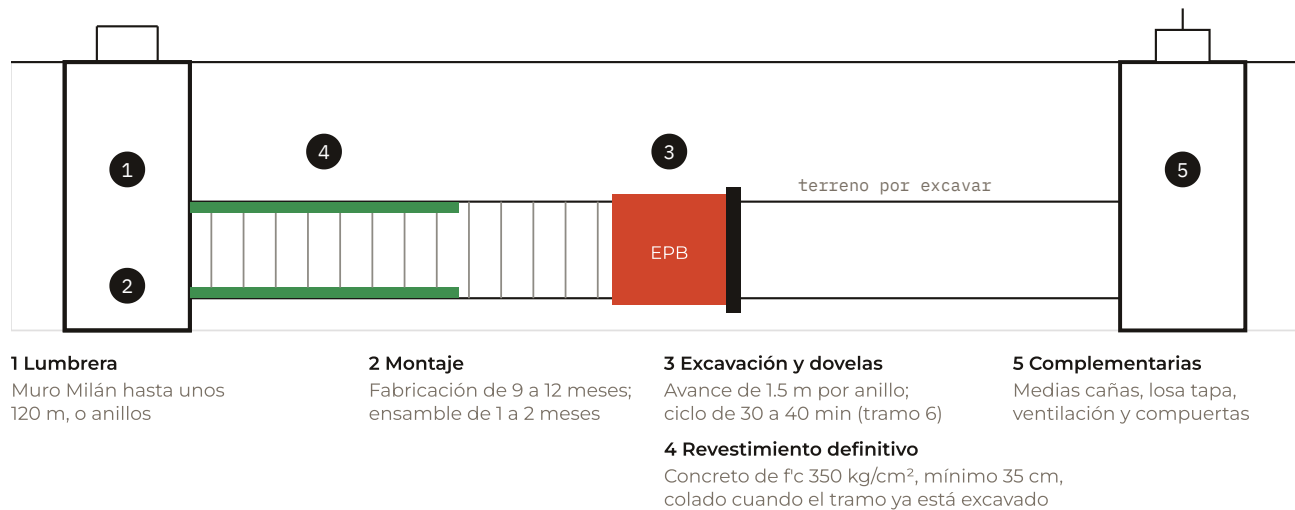
Secuencia general del proceso constructivo

Antes de ese proceso hubo otro orden, el de los estudios: según la tesis de Salazar Enciso (2017, pp. 84, 119-120), la topografía fijó el trazo, las perforaciones y su instrumentación aportaron los datos del subsuelo y la ingeniería básica se entregó al cliente antes de pasar a la construcción (sección 5.1.2).

El proceso se repite en cada tramo con un orden que no cambió en toda la obra: se construye la lumbrera de montaje, se arma la tuneladora en su fondo, se excava el túnel colocando el revestimiento primario de dovelas, se cuela el revestimiento definitivo y se terminan las obras complementarias. Lo que cambió de un tramo a otro fue el sistema de rezaga, el tipo de herramienta y, al final, el trazo.

Un tramo del TEO, de lumbrera a lumbrera

Corte longitudinal esquemático, sin escala



Elaboración propia con datos de Semarnat (2008a), Conagua (2018), Juárez García (2012) y Breuning (2012)

Figura 13.3. Secuencia constructiva de un tramo del TEO, de la lumbrera al revestimiento definitivo

1. Lumbreras. Brocal provisional, pantalla perimetral (muro Milán o anillos prefabricados), excavación del núcleo con abatimiento donde la subpresión lo exige, y brocal y revestimiento definitivos (capítulo 15). La L-00 ya existía como lumbrera flotada del Interceptor Río de los Remedios.
2. Montaje de las tuneladoras. La fabricación de la máquina toma de 9 meses a un año y su ensamble, de uno a dos meses, una vez terminada la lumbrera de acceso. Una grúa baja el escudo por piezas a la cuna de montaje, y los trenes de apoyo se conectan por umbilicales mientras el túnel no tiene longitud para alojarlos (capítulo 14).
3. Excavación y dovelas. La máquina excava 1.5 m, apoya sus gatos en el último anillo y coloca el siguiente; el ciclo en el tramo 6 fue de 30 a 40 minutos por anillo. La rezaga sale por bombeo en los tramos 1 y 2 y por banda en los demás. Los rendimientos y el detalle de la excavación están en el capítulo 14.
4. Revestimiento definitivo. Se cuela cuando un tramo entre lumbreras ya fue excavado, de manera monolítica en tramos de 9 m con cimbra metálica telescópica, con concreto de $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y un espesor de al menos 0.35 m. Las aportaciones de agua en el subtramo L-20 a L-19 obligaron a sellar antes de colocar la cimbra.

-
5. Obras complementarias. Medias cañas del túnel en el paso de lumbreras, losas tapa, chimeneas o sistemas de ventilación, bardas y casetas de vigilancia, alimentación de energía y compuertas, y al final el retiro de las instalaciones y el desalojo de las áreas usadas.
-

06

Obra de entrada: la captación en la L-0

El TEO empieza en la L-0, en el kilómetro 0+000, en la esquina sureste del cruce de la avenida Gran Canal y el Anillo Periférico, colonia 25 de Julio, en Gustavo A. Madero. Se ubica en la confluencia del Gran Canal del Desagüe con el río de los Remedios, en el límite entre la Ciudad de México y el Estado de México, a unos 23.3 m de profundidad. La L-0 no se construyó para el TEO: era la lumbrera 2 del Túnel Interceptor Río de los Remedios (TIRR), llamada L-2RR en la topografía, de modo que la obra nueva parte de una lumbrera flotada que ya existía. Ese origen explica por qué la MIA-P escribe que los caudales de los túneles Interceptor Oriente y Río de los Remedios "confluirán en la lumbrera L-2" antes de seguir por gravedad hasta El Salto.

El agua entra por tres vías que se reúnen en la L-0:

1. El Gran Canal, por dos compuertas de 4.5×4.5 m que descargan por lumbreras adosadas.
2. El TIRR, que lleva el agua del Interceptor Oriente y del propio río de los Remedios, a través de una compuerta de 5×5 m.
3. El embovedamiento del río de los Remedios, entubado entre el Gran Canal y el Dren General del Valle, donde el flujo puede ir en ambos sentidos.

Entre la L-0 y el túnel hay una compuerta de 7×7 m que regula el gasto que pasa al TEO. En el tramo 1 se suman aportaciones urbanas directas en la L-1A, la L-3 y la L-4. La compuerta de 7×7 m de la L-5 se instaló para impedir que el agua del tramo 1 llegara al tramo 2, todavía en construcción, y para que la planta de rebombeo El Caracol, junto a

esa lumbrera, la pasara al Gran Canal; con ella el tramo 1 se puso en operación el 13 de junio de 2013. Las compuertas fueron una parte de la obra complementaria del tramo y no del túnel. El comportamiento hidráulico de la captación, con sus capacidades, está en el capítulo 17.

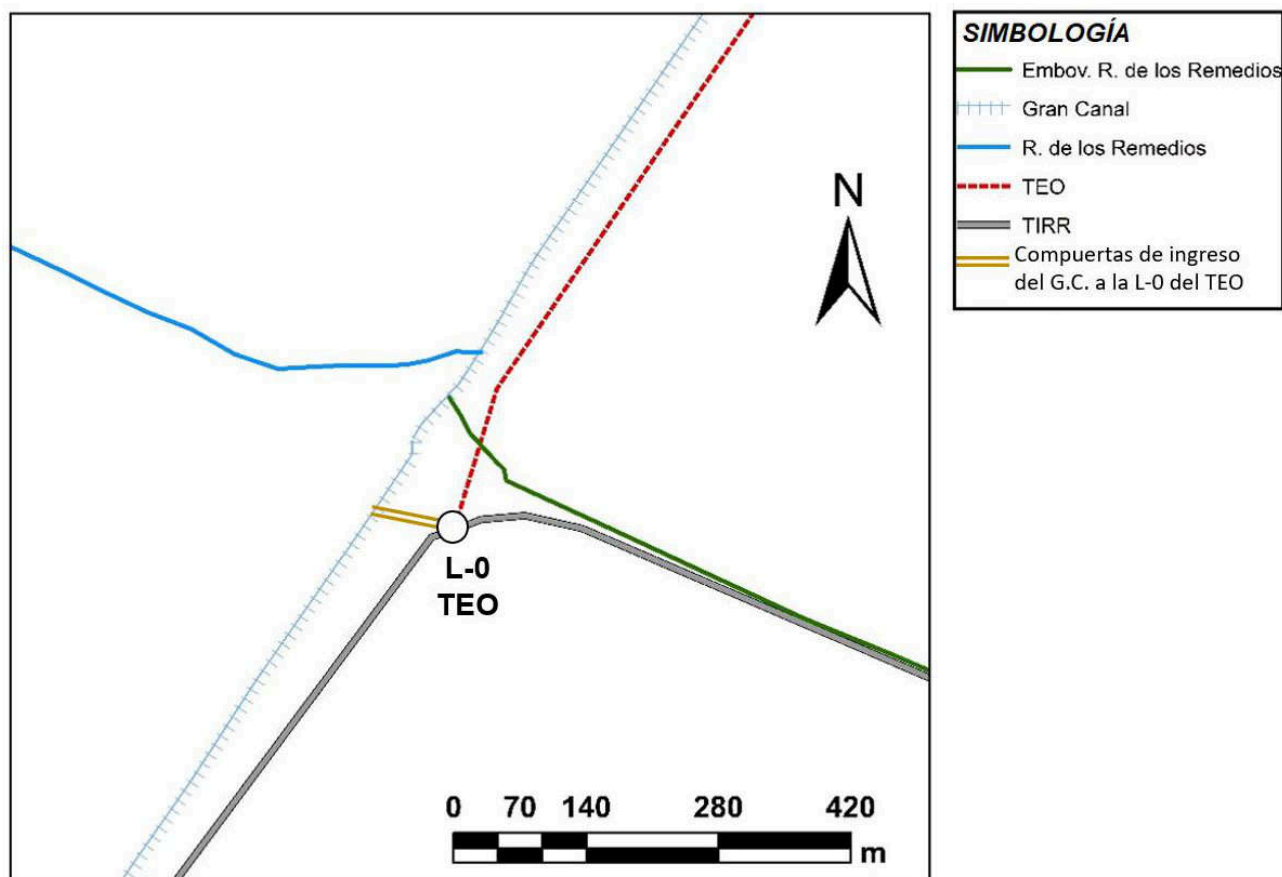


Figura 13.4. Confluencia de conductos y canales en la lumbrera L-0

07

Obra de salida: el portal de El Salto

El TEO termina en el portal de salida, en Atotonilco de Tula, Hidalgo, cerca del portal del Túnel Emisor Central y de la presa Requena. Las coordenadas son 19.94819° N y 99.29565° O. La obra de derivación que lo recibe se

diseño y se probó en un modelo físico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a petición de la Conagua, con un gasto de $170 \text{ m}^3/\text{s}$. Lo que sigue describe sus elementos en el orden en que el agua los recorre.

1. Portal de salida. El túnel llega al cadenamiento 61+802.948 con la plantilla en 2,106 msnm y pasa a un canal rectangular de 12 m de ancho por una transición de 15 m. El portal se construyó como una lumbrera de ensamble con muro Milán de hidrofresa hasta 122 m, desde donde se armó la tuneladora del tramo 6.
2. Canal principal y vertedor de excedencias. El canal rectangular conduce el agua al vertedor lateral de perfil Creager, ubicado en la margen derecha, con cresta en 2,111.5 msnm y un tanque amortiguador. Cuando el gasto sube de lo que admite el cauce de El Salto, el exceso vierte hacia el río.
3. Desarenador. Dos aberturas con compuertas deslizantes permiten limpiar el canal principal.
4. Canal de unión y rápida. El canal se une a la obra de toma del Emisor Central, con compuertas radiales operadas eléctricamente para los gastos que pide el distrito de riego 03. Una rápida baja el nivel de 2,107.66 a 2,101.634 msnm.
5. Descarga al río El Salto y al canal Salto-Tlamaco. El río está rectificado en un canal trapecial de concreto de 20 m de ancho, con un cimacio y un tanque amortiguador al pie. El canal Salto-Tlamaco lleva el agua al río Tula y a la presa Endhó y satisface las demandas del distrito de riego 03.

En avenidas el TEO descarga hasta $150 \text{ m}^3/\text{s}$ por el vertedor lateral hacia el río El Salto; en estiaje, el gasto puede llegar a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y derivarse a la planta de tratamiento de Atotonilco. El modelo físico probó dos versiones del vertedor: el recto funciona mejor y es más sencillo de construir, y el curvo socava el río entre 3.6 y 8.7 m. La recomendación final combina el canal de conexión de la segunda versión con el vertedor recto de la primera. Desde el portal se agregaron obras que no estaban en el proyecto original: una losa base para la grúa que baja los trenes del escudo, un pozo y planta de bombeo que abastece de agua a El Salto como compensación y requisito de Semarnat, un puente de acero sobre el río y una subestación eléctrica. El modelo físico está en el capítulo 11 y los cálculos del vertedor, la socavación y el límite del río Tula, en el capítulo 17.

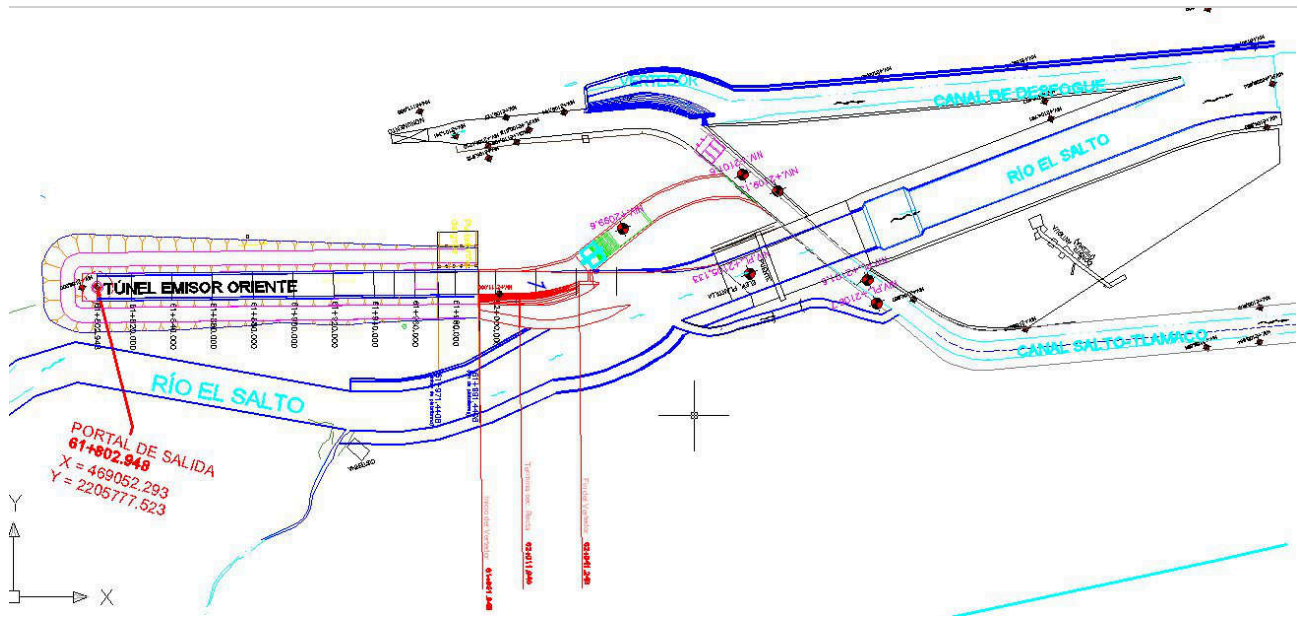


Figura 13.5. Planta de la segunda versión de la obra de derivación del TEO

08

Cartas topográficas del trazo

El INEGI publica la información topográfica de México a escala 1:50 000 en cartas con clave alfanumérica. Cada carta de esta serie abarca 15' de latitud por 20' de longitud, como se lee en los rótulos de marco de la carta E14A19 (INEGI, s/f). Con las coordenadas de entrada (19.50230° N, 99.07717° O) y de salida (19.94819° N, 99.29565° O) de la ASF (2022, p. 2), todo el trazo cae entre $99^{\circ}00'$ y $99^{\circ}20'$ de longitud oeste y entre $19^{\circ}30'$ y $20^{\circ}00'$ de latitud norte, es decir, en dos cartas contiguas; la de Ciudad de México queda como vecina al sur de la entrada (inferencia con la cuadrícula del INEGI).

La carta E14A19 muestra incluso las lumbreras 16 y 19 del TEO sobre el terreno (INEGI, s/f).

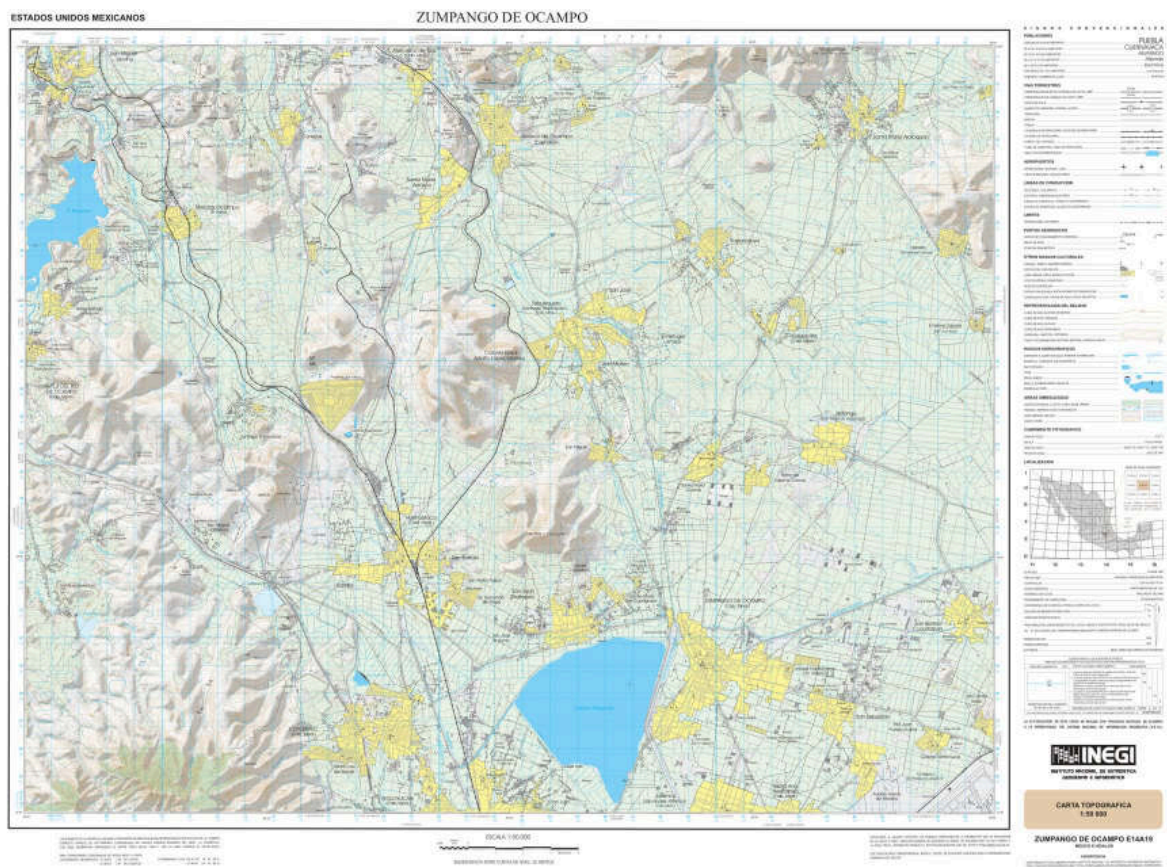


Figura 13.6. Carta topográfica E14A19 Zumpango de Ocampo, escala 1:50 000

TABLA 2. CARTAS TOPOGRÁFICAS 1:50 000 QUE CUBREN EL TRAZO

CLAVE	NOMBRE	ESCALA	QUÉ CUBRE DEL TEO
E14A29	Cuautitlán	1:50 000	De la L-0 en Gustavo A. Madero por Ecatepec, Coacalco y Tecámac (latitudes 19°30' a 19°45')
E14A19	Zumpango de Ocampo	1:50 000	Por Zumpango y Huehuetoca hasta el portal de salida en Atotonilco de Tula (latitudes 19°45' a 20°00')
E14A39	Ciudad de México	1:50 000	Carta vecina al sur de la L-0; no contiene trazo

Las cartas se consultan y descargan en el generador de cartas del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/programas/topografia/50000/generacarta50k/>).

Bancos utilizados en la obra

En una obra de este tamaño la palabra "banco" nombra cuatro cosas distintas, y el TEO usó las cuatro.

BANCOS DE NIVEL

Un banco de nivel es un punto fijo de cota conocida al que se refiere toda la nivelación de la obra. En el TEO el control vertical partió del banco M(N05-E03), llamado Atzacualco, y se llevó con nivelación de primer orden, de ida y vuelta, hasta la lumbrera L2RR, que es la L-0. De ahí se niveló un banco cada 500 m aproximadamente, más los de las zonas de lumbrera, hasta unos 140 a lo largo del trazo. Como el terreno se hundió, los de sitios estratégicos fueron bancos profundos, desplantados sobre un estrato firme. Su instalación y su uso en el control del trazo están en la sección 4.1.

BANCOS DE MATERIALES O DE PRÉSTAMO

Son las fuentes de donde se extraen agregados, arena y grava para los concretos. Para las dovelas de la planta de Ecatepec, la grava caliza de 3/4" salía de los bancos Cerro Jardín y La Palma, la arena de mina, del banco Santa María 3, y el agua de mezclado, del pozo Totolzingo, todos en el Estado de México. Las pruebas de reactividad y de abrasión de la grava se repiten al inicio de la obra y cada vez que cambia el banco, de modo que el banco es una variable de calidad. Los bancos que abastecieron a las otras plantas, en Zumpango y Huehuetoca, no están identificados; ICA fabricó dovelas en Ecatepec y Huehuetoca. Los materiales y su control están en el capítulo 16.

BANCOS DE TIRO O DE DESPERDICIO

Son los sitios donde se deposita el material que la obra no reutiliza. La MIA-P estimó 4,941,474.50 m³ por disponer, entre túnel y lumbreras, y 82 bancos de tiro posibles, de los cuales 44 podían recibir casi 3,200,000 m³. Para la primera etapa propuso 19 sitios, BAT1 a BAT19, y el BAT19, una zona de minas sobreexplotadas, tenía capacidad para 1,800,000 m³. Conagua informó 4.7 millones de m³ excavados (comunicado 851-19).

Las bases de contratación obligaban a llevar los lodos a los bancos que designara la Conagua, conformarlos con bordos y tinas y restituir el sitio al final. Entre los bancos realmente usados se mencionan el banco autorizado al que los camiones de 16 m³ llevaban la rezaga del tramo 3 y el tiro que la Conagua estableció en San Miguel Jagüeyes para la L-18. El balance de volúmenes está en el capítulo 16.

BANCOS DE ALMACENAMIENTO O DE ACOPIO

Son áreas donde se guardan materiales antes de usarlos. En el TEO fueron los patios de las plantas de dovelas, donde los anillos curados se estibaban con grúa pórtico, y los patios de las lumbreras, con dovelas, acero, cemento, agregados, durmientes, bandas y bentonita en seis de ellas. En el patio las dovelas se apoyan en polines anclados al firme para repartir su peso.

En resumen: el TEO se construyó a partir de un anteproyecto de 24 lumbreras y cinco frentes que cambió durante la obra a 25 lumbreras y seis tramos, porque el proyecto ejecutivo corrió junto con la construcción y la geología se fue conociendo al excavar. Cada estudio se tradujo en una decisión constructiva, y la obra siguió en cada tramo el mismo orden: lumbrera, montaje, excavación con dovelas y revestimiento definitivo. Los detalles de cada etapa están en los capítulos 11, 12, 14, 15 y 16.