



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA VEHICULAR E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL**

INFORME DE INVESTIGACIÓN

NOMBRE DEL PROYECTO

IE 20/21

**LEVANTAMIENTO DE ESTUDIOS DE ALTA TECNOLOGÍA EN EL TRAMO SUBTERRÁNEO
(ATLALILCO – MIXCOAC) DE LA LÍNEA 12 DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO
(STCM) DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

CONTENIDO

1	ANTECEDENTES	4
2	INSPECCIÓN VISUAL DE LA INFRAESTRUCTURA FÉRREA ENTRE LAS ESTACIONES MIXCOAC Y ATLATILCO..	5
3	LEVANTAMIENTO VECTORIAL ROBOTIZADO	10
3.1	Comentarios generales.....	10
3.2	Esquemas Vectoriales.....	10
3.3	Información sobre tramos que presentan filtraciones y agrietamiento en muros del tramo subterráneo.....	13
3.4	Análisis de Rieles en Curvas del tramo subterráneo	33
4	MICROONDAS DE ALTA FRECUENCIA.....	39
4.1	Método utilizado	39
4.2	Ventajas del sistema.....	39
4.3	Conclusiones de los resultados del estudio de microondas:	39
5	SONDEOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	45
5.1	Fundamentos de los métodos utilizados.....	45
5.2	Método Dipolo-Dipolo.....	46
5.3	Tomografía de resistividad eléctrica	46
6	EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE BALASTO.....	53
6.1	Antecedentes.....	53
6.2	Zona de estudio	55
6.3	Fisiografía.....	55
6.4	Geología.....	56
6.5	Geomorfología.....	57
6.6	Edafología	57
6.7	Hidrografía	58
6.8	Exploración geotécnica.....	59
6.9	Ensayes	64
6.9.1	Desgaste Los Ángeles.....	67
6.9.2	Densidad y absorción.....	68
6.9.3	Análisis granulométrico.	70
6.10	Análisis de resultados	81
6.11	Conclusiones.....	81
6.12	Bibliografía del capítulo 6	82

7	PETROGRAFÍA DEL BALASTO	83
7.1	Muestras	83
7.2	Preparación de las muestras	84
7.3	Petrografía con microscopía óptica y zona selecciona para el análisis químico por microscopía electrónica de barrido.....	86
7.3.1	Cadenamiento 18+490	86
7.3.2	Cadenamiento 23+600	87
7.3.3	Cadenamiento 26+320	88
7.4	ANÁLISIS QUÍMICO CON EL DETECTOR EDS DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.....	89
8	INFORME DE INSPECCIÓN VISUAL CONJUNTA CON PERSONAL DEL METRO Y DE LA EMPRESA A CARGO DE LA CONSERVACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA.....	99
9	REVISIÓN A LAS MEDICIONES GEOMÉTRICAS DE VÍA.....	101
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
11	ANEXOS.....	109
11.1	ANEXO FOTOGRÁFICO DE SONDEOS CON LWD	109
11.2	ANEXO DE MEDICIONES GEOMÉTRICAS DE TSO	114
11.3	REPORTE SYSTRA L12-DIAG-VIA-1179-MX-INF-1	132

1 ANTECEDENTES

- El día 3 de mayo de 2021 se produjo un accidente en el tramo elevado de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México, entre las estaciones Tezonco y Olivos, debido a una falla estructural en una trabe que sostiene el cajón de vías, provocando su colapso y la caída de un tren sobre Avenida Tláhuac. Desde ese momento, la Línea se encuentra fuera de servicio.
- Esta línea es la duodécima del Metro de la Ciudad de México y la segunda en emplear sistema de rodadura férrea. Sirve al sur de la ciudad, moviendo alrededor de 400,000 personas diariamente. Tiene correspondencias en la estación Atlalilco con la Línea 8, en la estación Ermita con la Línea 2, en la estación Zapata con la Línea 3 y en Mixcoac con la Línea 7, siendo ésta una de las terminales. El tramo subterráneo abarca las estaciones Atlalilco, Mexicaltzingo, Ermita, Eje Central, Parque de los Venados, Zapata, Hospital 20 de Noviembre, Insurgente Sur y Mixcoac, con una longitud total de 11.65 km.
- El Gobierno de la Ciudad de México debe encontrar soluciones a esta problemática, ya que el alto costo del transporte alternativo y dificultades logísticas, hacen que la movilidad en esa zona de la ciudad se vea impactada de manera negativa.
- A través de la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE), se solicitó al Instituto Mexicano del Transporte llevar a cabo el levantamiento de estudios de alta tecnología en el tramo subterráneo de la Línea 12 con la finalidad de evaluar su potencial apertura y puesta en funcionamiento.
- Debido a este sentido de urgencia, se acordó con la SOBSE que los estudios fueran mínimamente invasivos, rápidos y con mucha precisión por lo que se decidió utilizar un sistema de herramientas de diagnóstico que cumplen con dichas características. Dichos estudios incluirían: levantamiento vectorial robotizado, microondas de alta frecuencia y resistividad eléctrica, que en su conjunto pueden obtener un diagnóstico muy preciso de la problemática e incluso plantear propuestas de solución.
- Adicionalmente se llevó a cabo la inspección ocular y una campaña de pruebas de deflectómetro de impacto portátil y calas en las capas de balasto, para practicar una serie de pruebas y ensayos de laboratorio.
- Durante el desarrollo de estos estudios se fue recibiendo distinta documentación de apoyo y, de acuerdo a la fecha en que fue entregada, fue considerada para el análisis e integración de este documento.

2 INSPECCIÓN VISUAL DE LA INFRAESTRUCTURA FÉRREA ENTRE LAS ESTACIONES MIXCOAC Y ATLATILCO.

Los días 12 y 13 de Mayo del presente año se realizó un recorrido para detectar de manera visual defectos que pudieran poner en riesgo la operación del Metro las cuales se enuncian a continuación de acuerdo a los parámetros para trenes de pasajeros de AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association).

Subestructura de vía:

Los levantamientos con microondas y láser, tuvieron la finalidad de identificar posibles daños en el lecho de la vía como socavaciones, aguachinamientos y presencia de corrientes de agua, ya que se observaron algunas filtraciones en la estructura del túnel, las cuales provocaban escurrimientos hacia la superestructura de la vía. Fue necesario realizar un levantamiento con un equipo de geometría de vía, ya que este tipo de defectos (aguachinamientos), provocan golpes de nivel los cuales degradan prematuramente el balasto, ocasionan la ruptura de los durmientes de concreto y en consecuencia pueden provocar un descarrilamiento.



“La función principal de la subestructura es soportar y dar estabilidad a la vía con capacidad suficiente para las cargas muertas y vivas, disponiendo de un buen drenaje para el agua de lluvia y el agua freática existente en la zona”.

Cabe hacer mención que se solicitó a personal del STC Metro durante la inspección que proporcionaran una copia de la normatividad vigente, lo cual no sucedió. Por ello estos comentarios son basados en la experiencia y no pudieron ser contrastados contra la normatividad.

Superestructura de vía:

En la inspección visual de la superestructura se observó lo siguiente:

Tipo de vía: elástica.

Escantillón de vía 56 ½”.

Riel marca ENSIDESA fabricado en Octubre de 2009, de 115 lbs/y. seccion RE.

Durmiente de concreto marca PRET con separación entre 64 y 67 centímetros. Fuera de parámetro (la separacion de durmientes es 60 cm., de acuerdo con AREMA).

Fijación elástica tipo grapa de resorte con perno tirafondo, cojinete y almohadilla elastomérica.

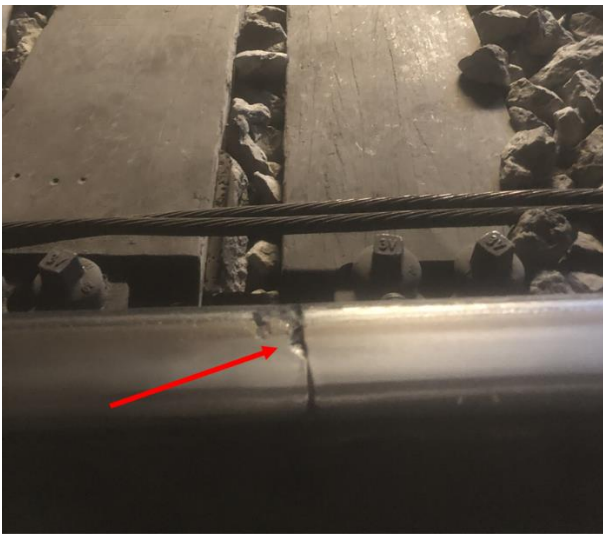
Soldadura aluminotérmica marca Railtech.



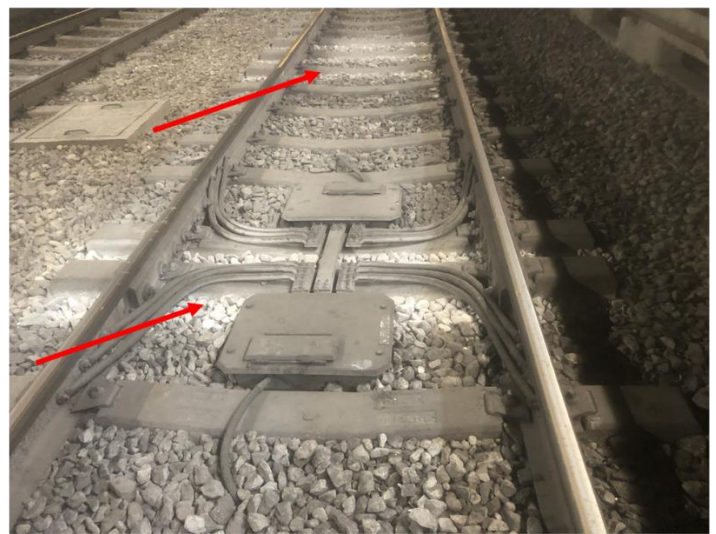
No se observan testigos de desplazamientos longitudinales, laterales y verticales del Riel, lo cual nos indica que la fijación está trabajando correctamente en el lugar inspeccionado. Tampoco se encontraron fijaciones vencidas o dañadas.

Riel: Se observa bien la sección del hongo de riel, sin deformaciones plásticas, escurrimientos de metal, spalling o shelling, que pudieran provocar algún defecto interno de riel (es recomendable realizar inspección ultrasónica de riel por lo menos 3 veces por año).

En la zona de aparatos de vía, como señales luminosas, se observaron juntas aisladas con rieles despuntados derivado de los impactos que se crean en las juntas al paso de los trenes. Esto tiene como consecuencia la degradación prematura del balasto lo cual provoca el incremento de impactos. Se han empezado a formar golpes de nivel donde se puede suscitar que un tren, a más de 60 km/h, pueda brincar la rueda y descarrilar si el golpe de nivel tiene una flecha mayor de $1\frac{3}{4}$ ", medida con una cuerda de 20 metros, así como la acumulación de finos los cuales, si llegan a entrar en contacto con agua derivado de las filtraciones del túnel, pueden reblandecer la subestructura y crear rupturas en los durmientes y deformaciones plásticas en los rieles que formarán defectos internos de riel.



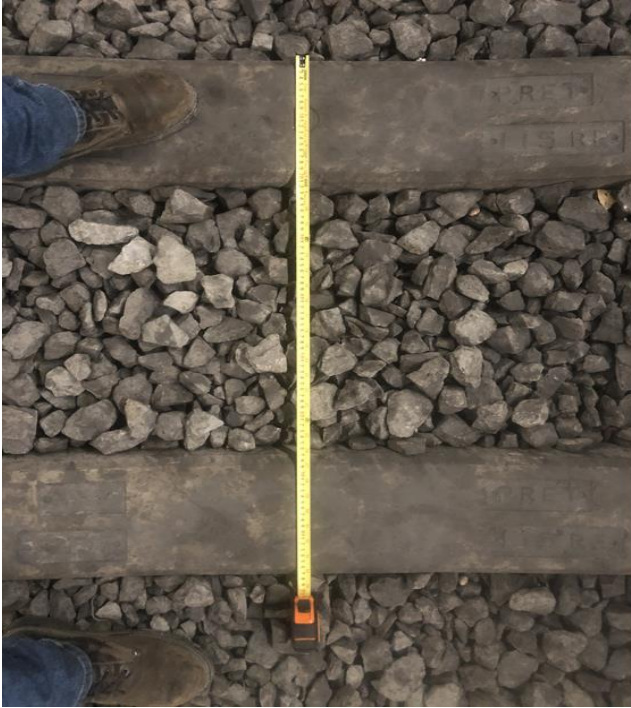
Riel despuntado derivado de los impactos en juntas emplanchueladas.



Balasto degradado (manchas blancas) en juntas emplanchueladas, y a una distancia de 4 a 6 metros de las juntas se empieza a degradar también, debido a la estabilización de las unidades del tren incrementado las fuerzas verticales a su paso del mismo por el golpe de nivel que se genera.

En algunas curvas se observaron trabajos de esmerilado de riel con presencia de martensita, lo cual se deriva de un esmerilado a muy baja velocidad. Esta toma un color azulado en la banda de rodamiento del riel provocando que se endurezca el acero y más susceptible a quebrarse. Es recomendable realizar estos trabajos a una velocidad de 10 km/h.

Durmientes de concreto: Se observó una separación de los durmientes entre 64 y 67 centímetros lo cual provoca que el riel trabaje más su elasticidad e incremente su fatiga. Para este tipo de durmiente la separación debe ser de 60 centímetros.



Balasto: Se observó en las zonas donde se generan impactos (juntas aisladas, soldaduras aluminotérmicas fuera de especificación geométrica) la degradación prematura del balasto , lo cual provoca que pierda las aristas, redondeándose y no pueda restringir los movimientos longitudinales, laterales y verticales de la vía bajo las cargas impuestas por el equipo rodante y las fuerzas ejercidas por el riel, así como la filtración de agua derivada de la saturación de finos.

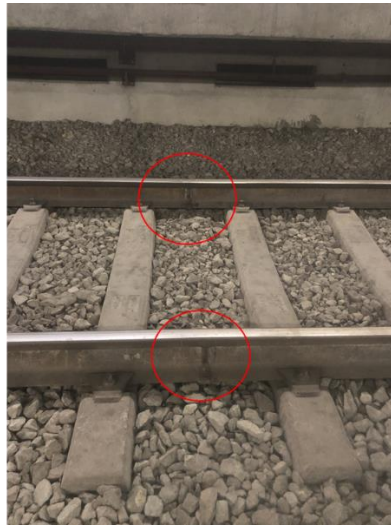


Se observa un testigo en las caras laterales del durmiente
En tono blanco derivado del bombeo y la degradación que
que se esta generando por la abrasión.

Soldadura Aluminotérmica: No existe un cuatraperio en las soldaduras aluminotérmicas; en vías con riel soldado continuo (RSC), las juntas soldadas deben ser alternadas y no opuestas entre ambos rieles de la vía. Para no presentar secciones débiles de la vía, la mínima distancia que debe existir entre soldaduras opuestas en RSC debe ser de 4' (121 cms)

Se observaron algunas soldaduras con defectos de geometría en el plano vertical, lo cual provoca impactos, degradando el balasto. Aunado al mal espaciado de los durmientes, estas soldaduras pueden iniciar desgarramientos en la parte baja del patín o presentar algún defecto interno en el hongo.. Es recomendable realizar un registro de todas las soldaduras, así como efectuar una inspección visual en la parte baja del patín y de ultrasonido en toda su estructura.

Algunas soldaduras presentan desprendimientos de material derivado de los impactos o un sobrecalentamiento en su realización.

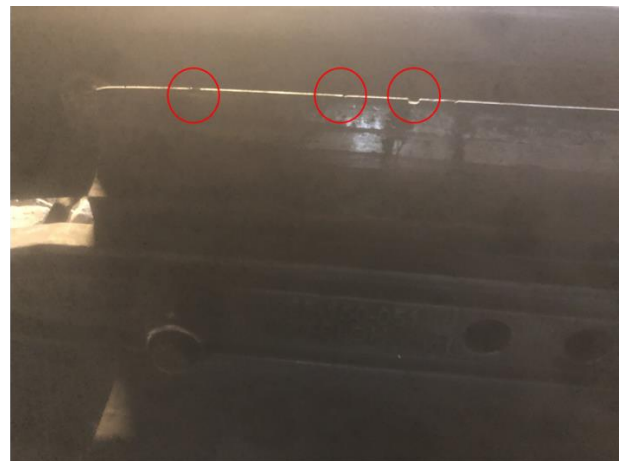


No hay cuatrapeo en las soldaduras y algunas ya presentan desprendimientos de metal en la banda de rodamiento.

Cortavías: En la zona de los cambios de cortavías únicamente se observó algunas agujas que ya pudieran estar condenadas por desgaste y desgranamiento en la aguja lo cual nos indica que la rueda las está golpeando derivado de un golpe de nivel en el block flotante ó golpe de línea en la zona de las agujas. Es necesario se releve la aguja y el riel de apoyo.



Brillo por contacto excesivo de la ceja de la rueda con la punta de agujas, la cual debe iniciar su Contacto 4" después de la punta.



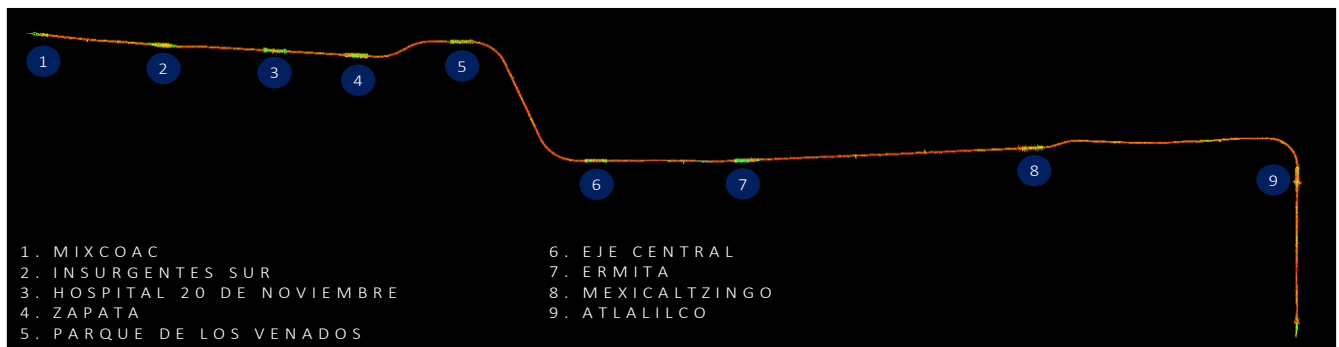
Desgranamiento de aguja por impacto de rueda.

3 LEVANTAMIENTO VECTORIAL ROBOTIZADO

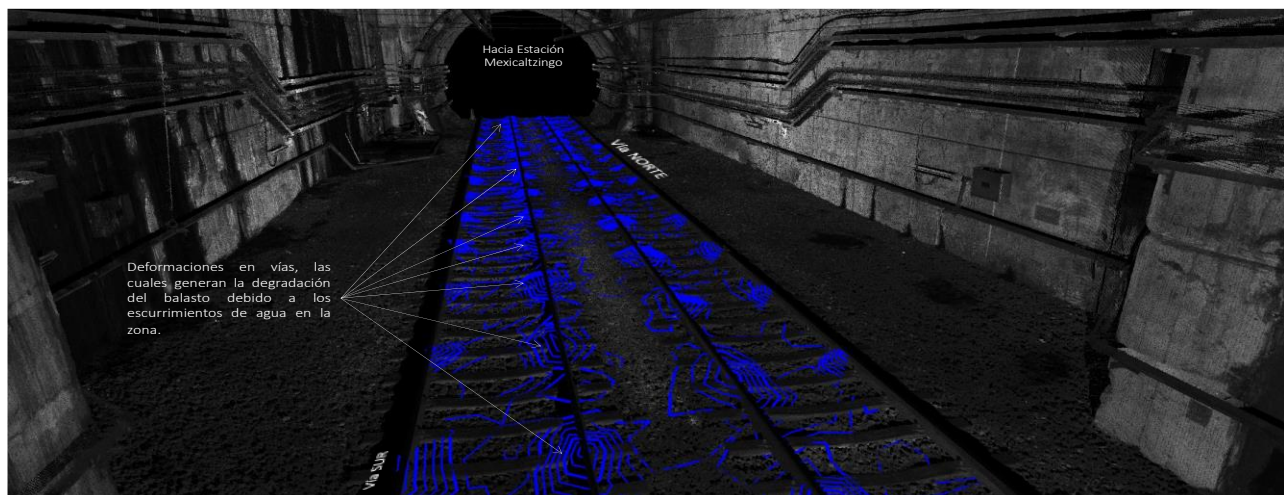
3.1 Comentarios generales

- El escaneo láser reunió 53,835 millones de puntos con información vectorial, mismos que fueron procesados para crear una maqueta tridimensional general del tramo subterráneo.
- Con la información generada, se logró identificar dos zonas que presentan un exceso de filtraciones; la primera se localiza de la estación Mixcoac hasta la estación Insurgentes Sur; la segunda se localiza entre los cadenamientos 20+190 y 20+900, entre las estaciones Mexicaltzingo y Atlalilco.
- La información vectorial fue útil para conocer las deformaciones horizontales que se localizan sobre un tramo de la zona 2, con presencia de humedad y de agua sobre las vías. Además, las deformaciones de las cubiertas (tramos cortos) de la sección de dovela y cajón de la zona 2.
- Para identificar con una mayor claridad las zonas que presentan filtraciones, se convirtió la información tridimensional en una herramienta que ayudará al usuario a realizar mediciones, adquirir imágenes, etc.
- El monitoreo láser debe realizarse en periodos no mayores a 6 meses, la información adquirida servirá como base para poder realizar comparativas con la información que se genere de futuros análisis vectoriales.

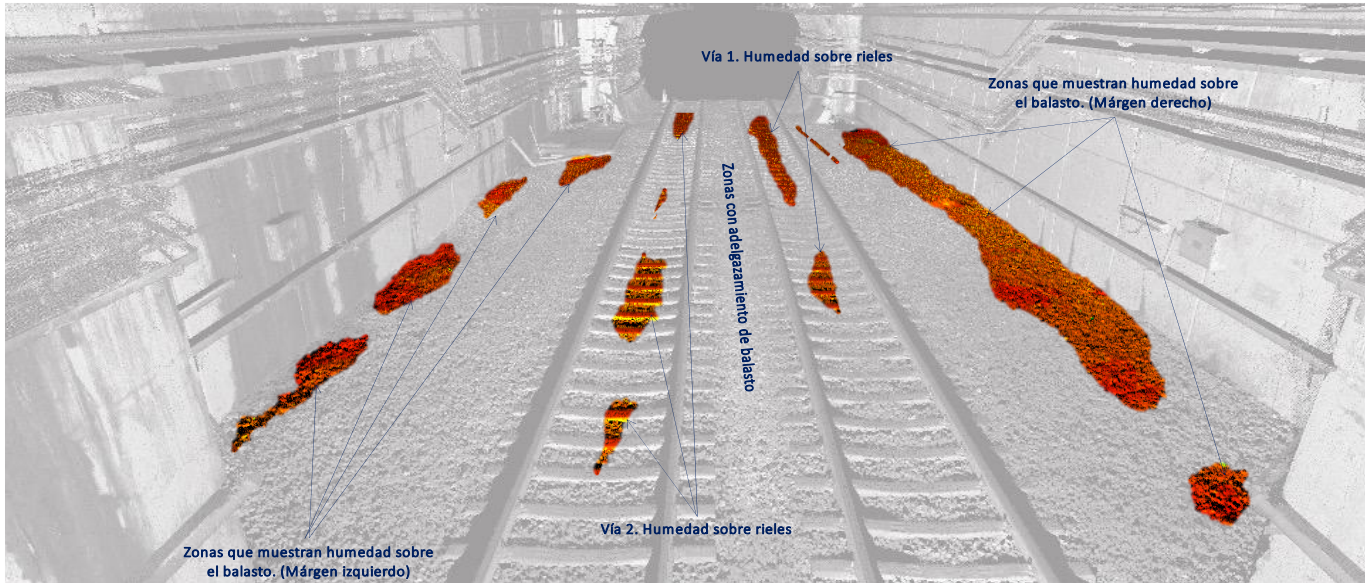
3.2 Esquemas Vectoriales



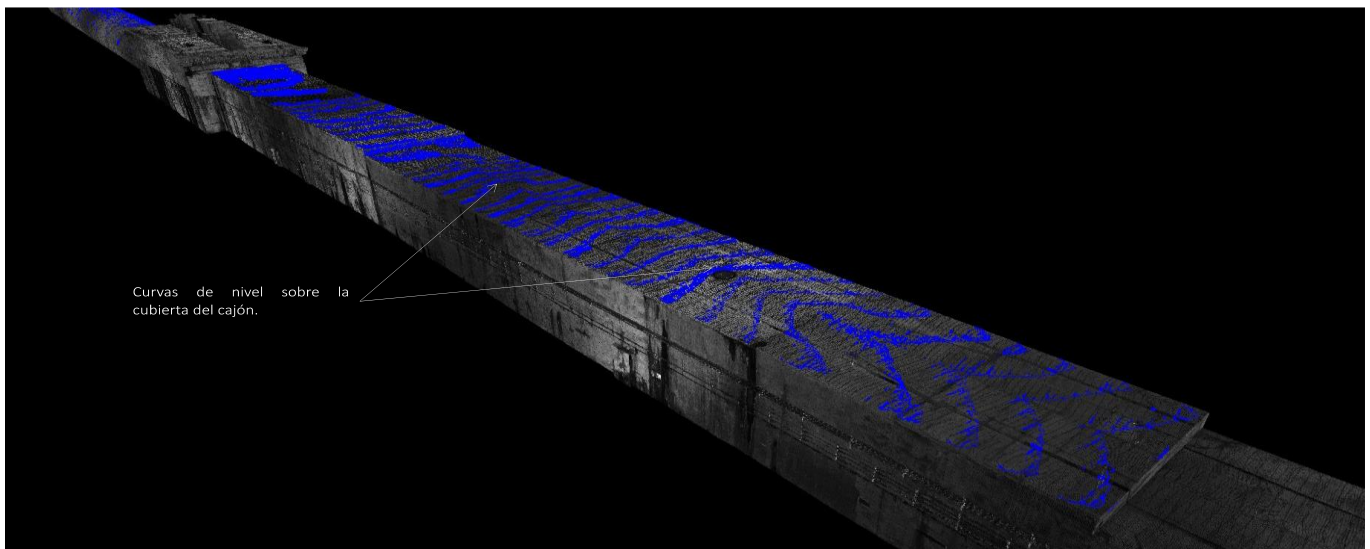
Esquema General láser del tramo subterráneo línea 12



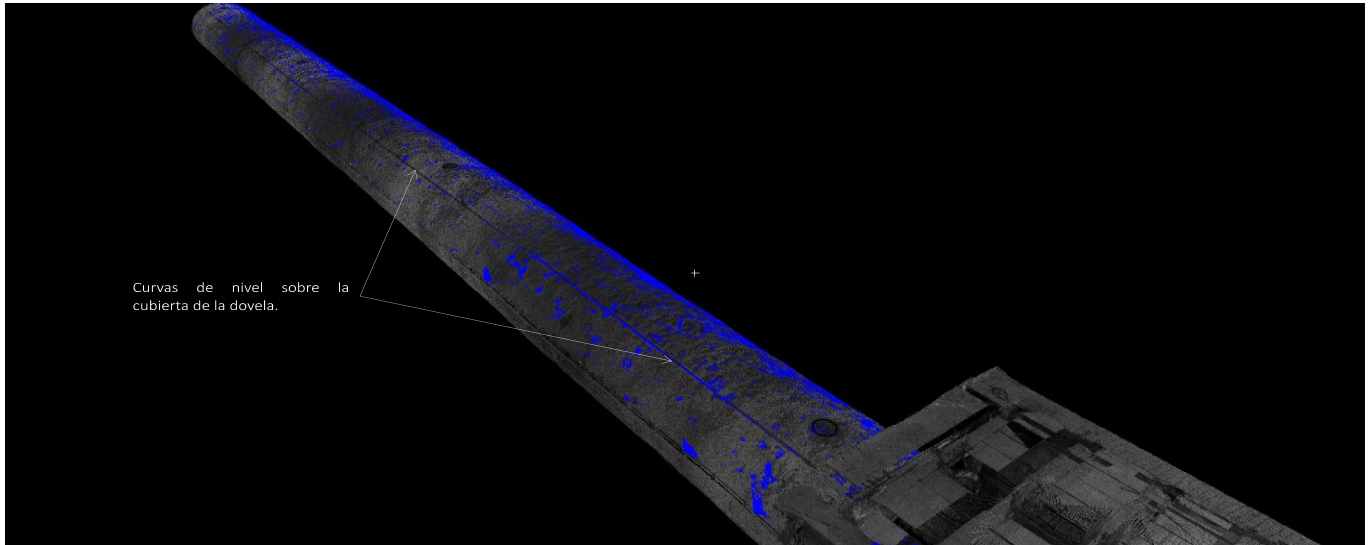
Esquema con curvas de nivel del tramo PK. 20+345 zona de transición entre Mexicaltzingo – Atlalilco



Esquema que muestra la humedad sobre el balasto en el PK. 20+345 de la zona de transición entre Mexicaltzingo – Atlalilco



Esquema que muestra las curvas de nivel en la parte superior de la estructura tipo cajón ubicada en el PK. 20+318



Esquema que muestra las curvas de nivel en la parte superior de la estructura tipo dovela ubicada en el PK. 20+418



Esquema que muestra las zonas con filtraciones del tramo PK. 20+345 de la zona de transición

3.3 Información sobre tramos que presentan filtraciones y agrietamiento en muros del tramo subterráneo

A continuación, se presenta el concentrado de filtraciones y otras incidencias, así como el análisis en curvas.

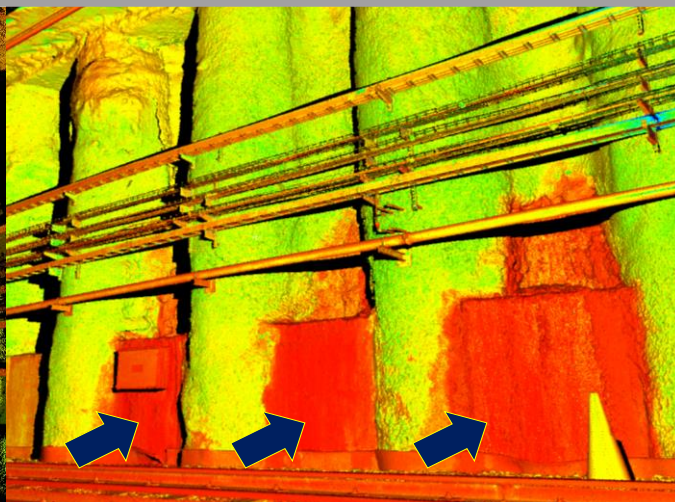
N°	Inter-Estaciones	Longitud del Túnel (m)	Zona de Filtraciones de PK a PK		Longitud Dañada	Filtraciones Puntuales	Filtraciones Continuas (m)	% de Filtraciones por Zonas en Túnel	% Total de Filtraciones
1	Mixcoac - Insurgentes Sur	746	28+030	28+100	340	45	0	46%	31%
			27+550	27+820		0	270		
2	Insurgentes Sur - 20 Nov	618	27+340	27+350	20	7	0	3%	
			27+190	27+200		8	0		
3	20 Nov - Zapata	410	26+305	26+335	30	22	0	7%	
4	Zapata - P. Venados	595	25+444	25+855	411	290	0	69%	
5	P. Venados - Eje Central	1272	24+739	25+280	541	387	0	43%	
6	Eje Central - Ermita	858	23+432	23+776	344	241	0	40%	
7	Ermita - Mexicaltzingo	1795	22+096	22+483	683	276	0	38%	
			21+020	21+316		0	296		
8	Mexicaltzingo - Atlalilco	1886	19+707	19+930	711	160	0	38%	
			19+930	20+418		0	488		
9	Atlalilco - Portal Oriente	960	17+941	18+501	560	311	0	58%	
	Total	9140			2025	1168	1054		

El tramo que mayor porcentaje de filtraciones presenta es el de Zapata a Parque de los Venados con un 69% afectado por filtraciones. Después le sigue el tramo de Atlalilco al que se denominó Portal Oriente, que es la transición hacia el tramo subterráneo, con un 58% de afectaciones. Los que menos tienen son el tramo de Hospital 20 de Noviembre a Zapata con un 7% y el de Insurgentes Sur a Hospital 20 de Noviembre con un 3%.

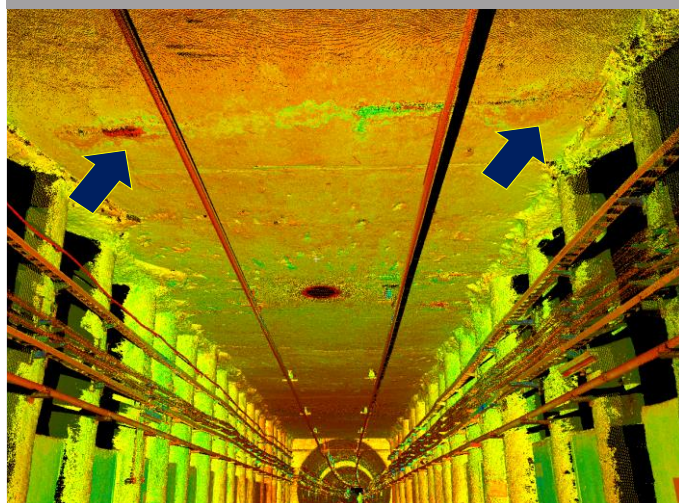
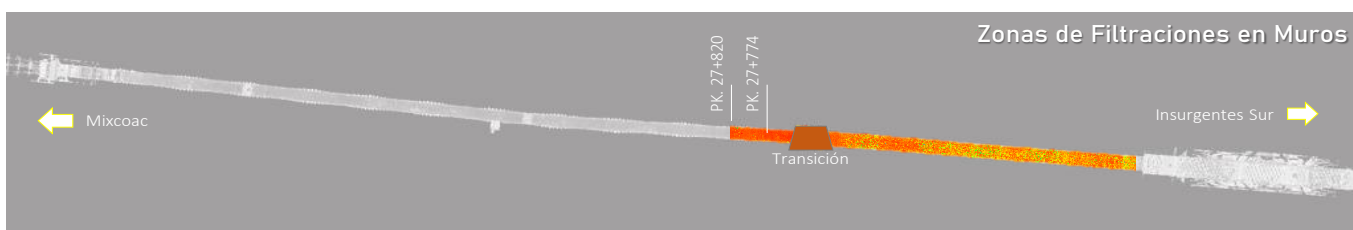
Tramo 1. Mixcoac – Insurgentes Sur



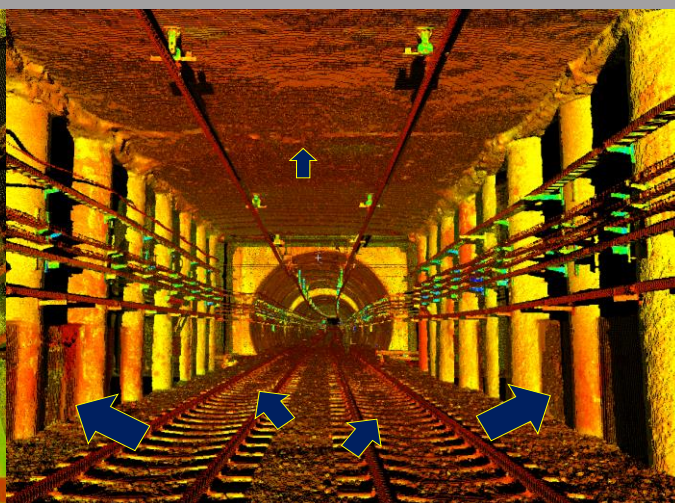
ZONA DE FILTRACIÓN 1
Cad. PK. 28+100 tramo Mixcoac – Insurgentes Sur



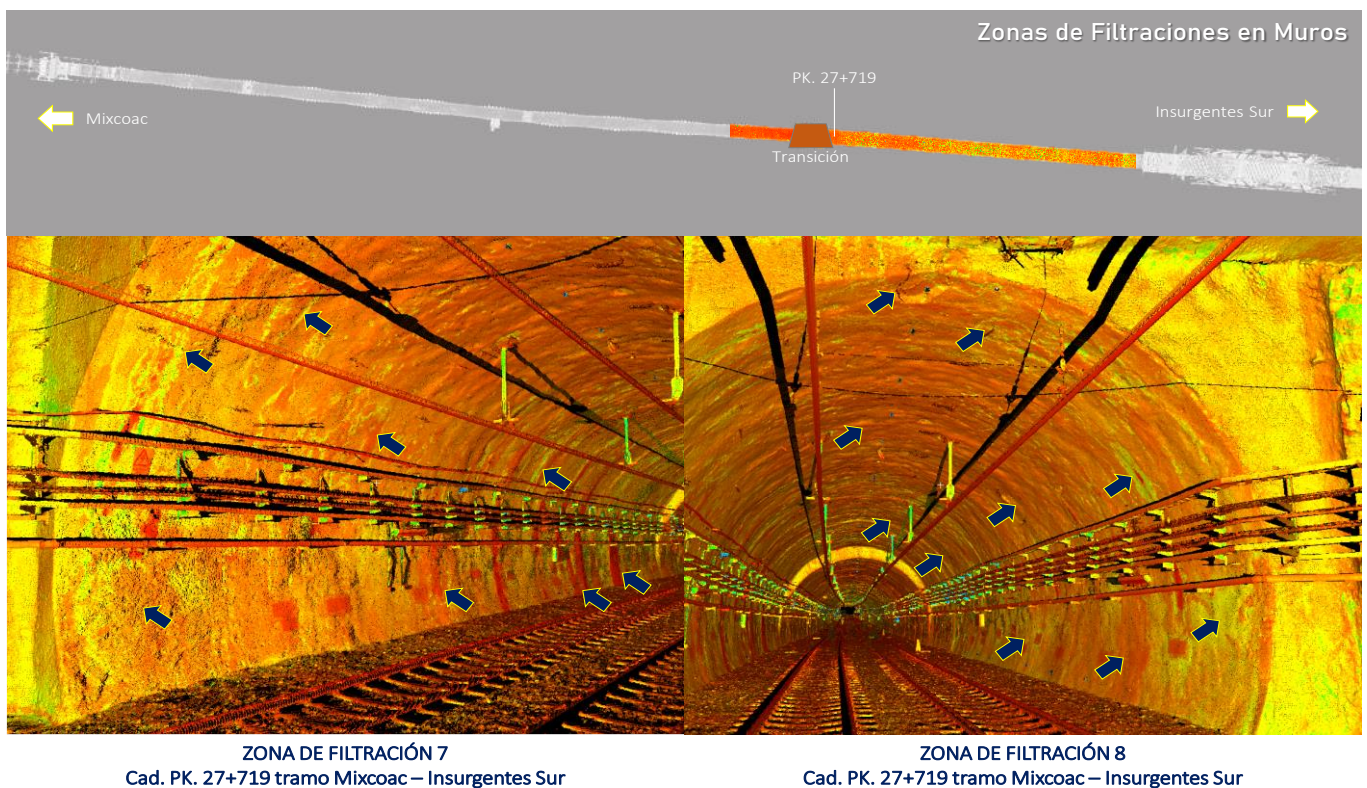
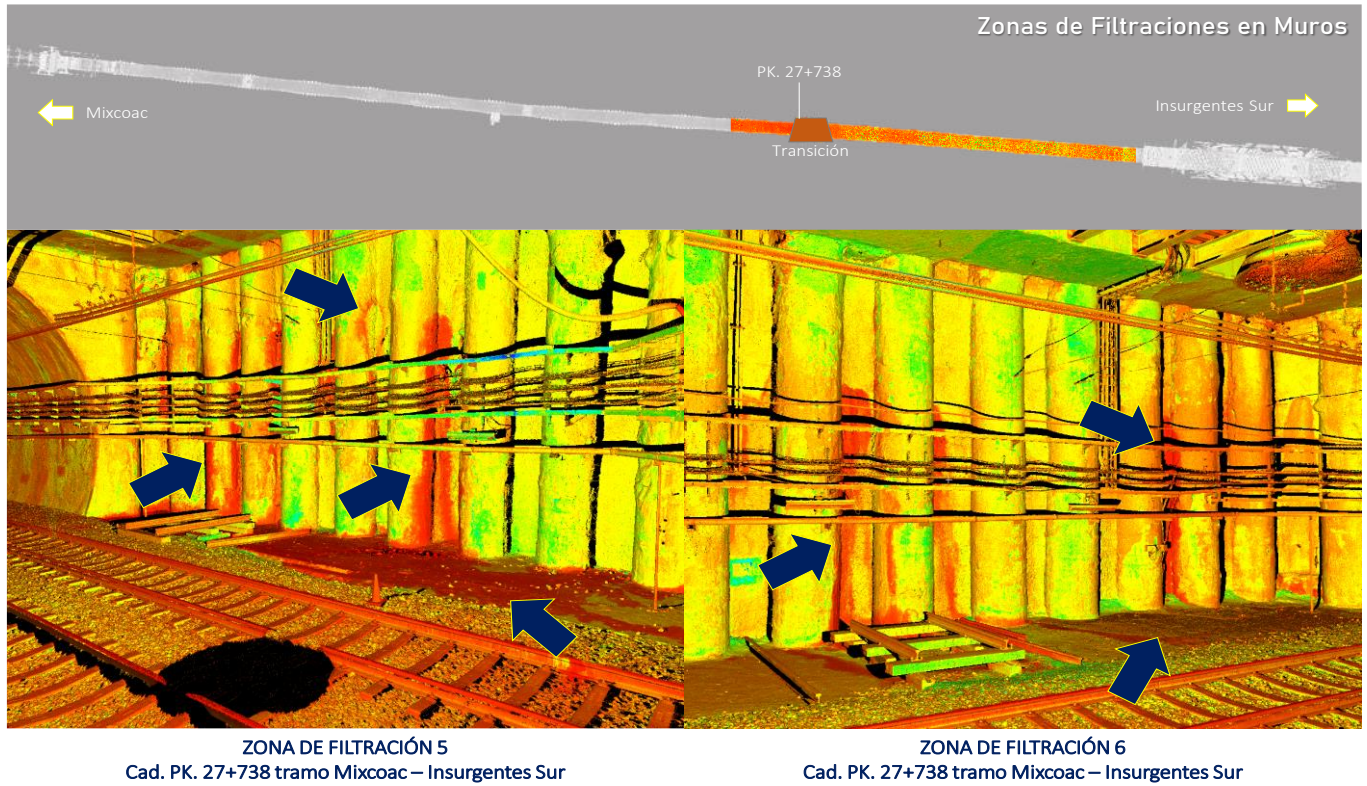
ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 28+030 tramo Mixcoac – Insurgentes Sur

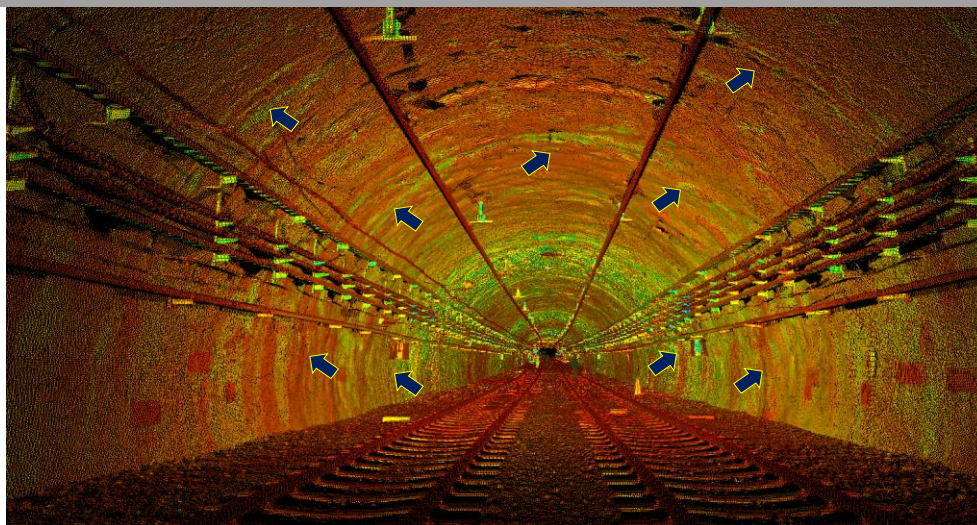


ZONA DE FILTRACIÓN 3
Cad. PK. 27+820 tramo Mixcoac – Insurgentes Sur

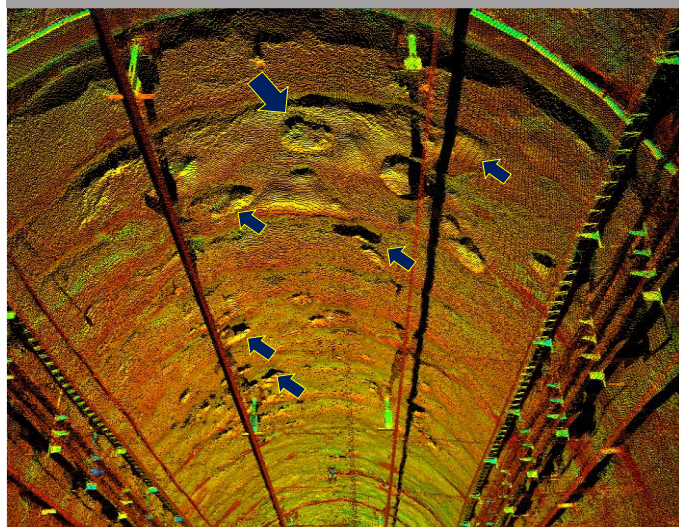
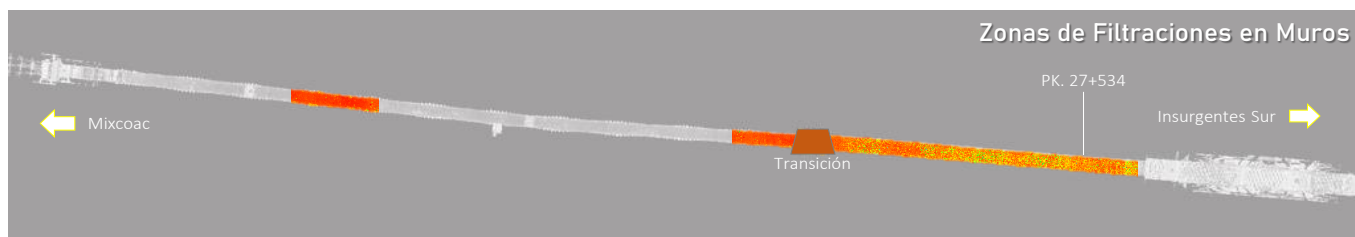


ZONA DE FILTRACIÓN 4
Cad. PK. 27+774 tramo Mixcoac – Insurgentes Sur





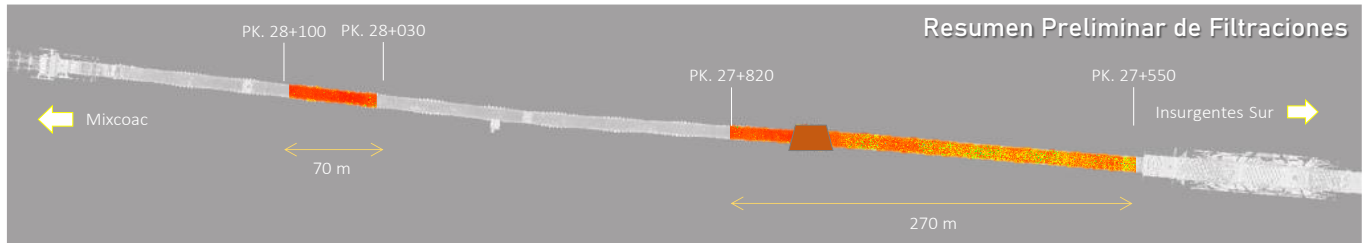
ZONA DE FILTRACIÓN 9
Cad. N/A tramo Mixcoac – Insurgentes Sur



SUPERFICIE TIPO POROSA 1
Cad. N/A tramo Mixcoac – Insurgentes Sur



ZONA DE FILTRACIÓN 10
Cad. N/A tramo Mixcoac – Insurgentes Sur

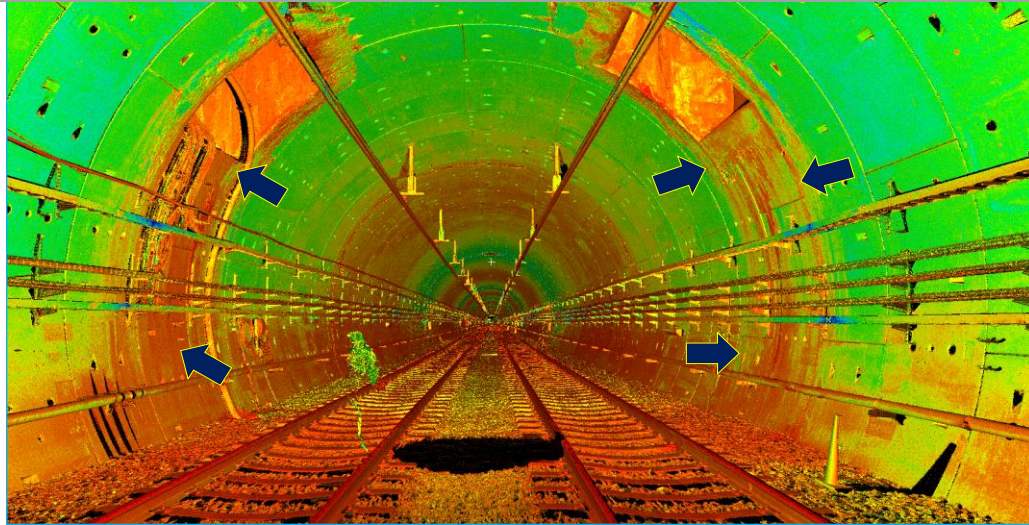


46 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

Tramo 2. Insurgentes Sur – Hospital 20 de Noviembre



ZONA DE FILTRACIÓN 1
Cad. PK. 27+340 tramo Insurgentes Sur – Hospital 20 de Noviembre

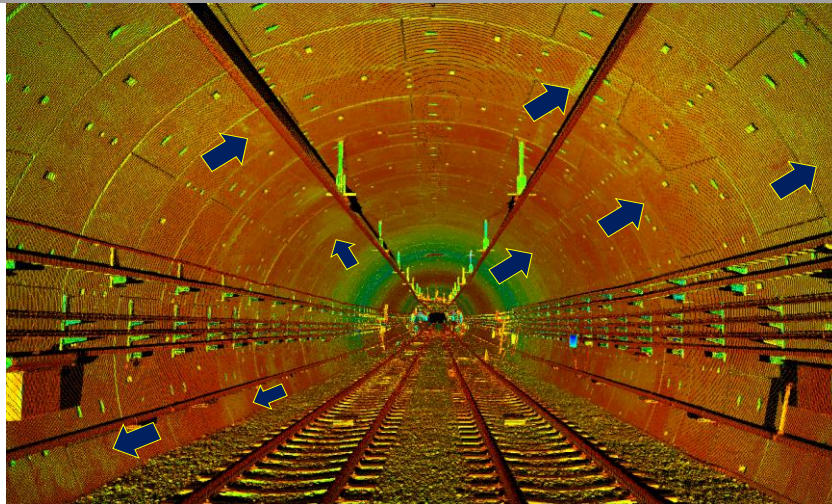
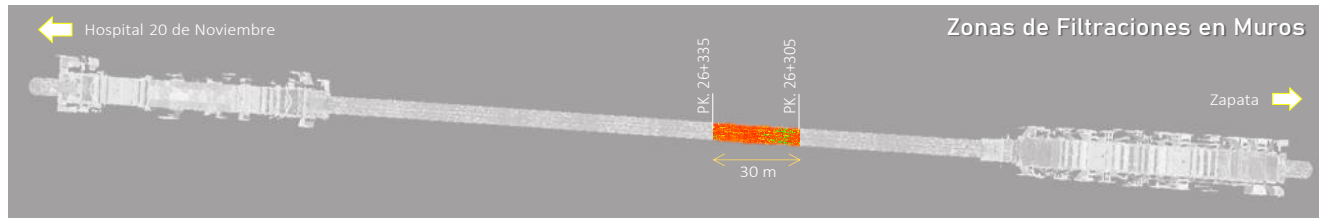


ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 27+200 tramo Insurgentes Sur – Hospital 20 de Noviembre

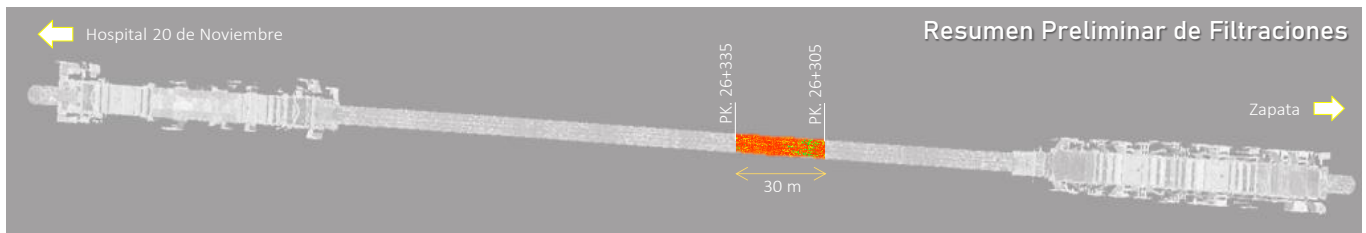


3 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

Tramo 3. Hospital 20 de Noviembre - Zapata



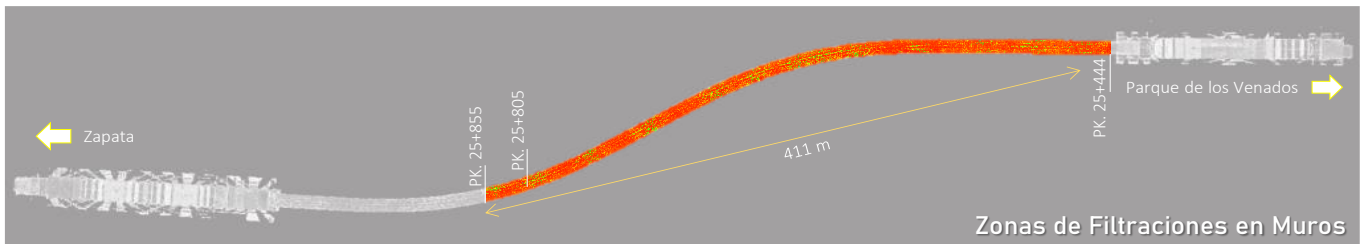
ZONA DE FILTRACIÓN 1
Cad. PK. 26+335 tramo Hospital 20 de Noviembre - Zapata



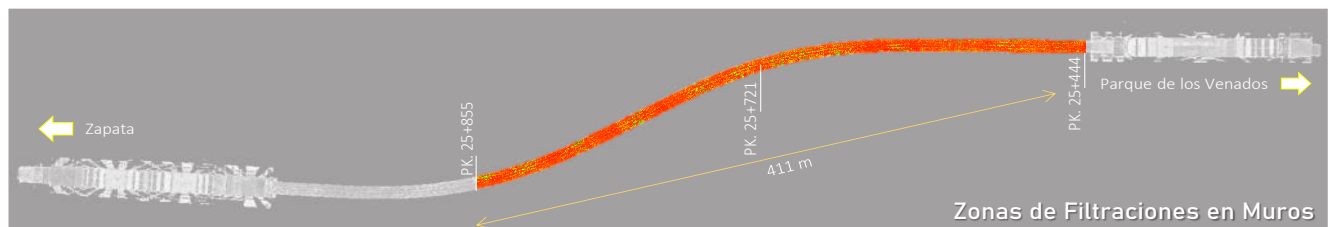
	Cabecera Oriente Estación Hospital 20 de Noviembre	Cabecera Poniente Zapata
Longitud entre Inter-estaciones	Túnel tipo Dovela 410 m	
Longitud aproximada que presenta filtraciones puntuales	30 m	
Longitud aproximada que presenta filtraciones continuas	0 m	

7 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

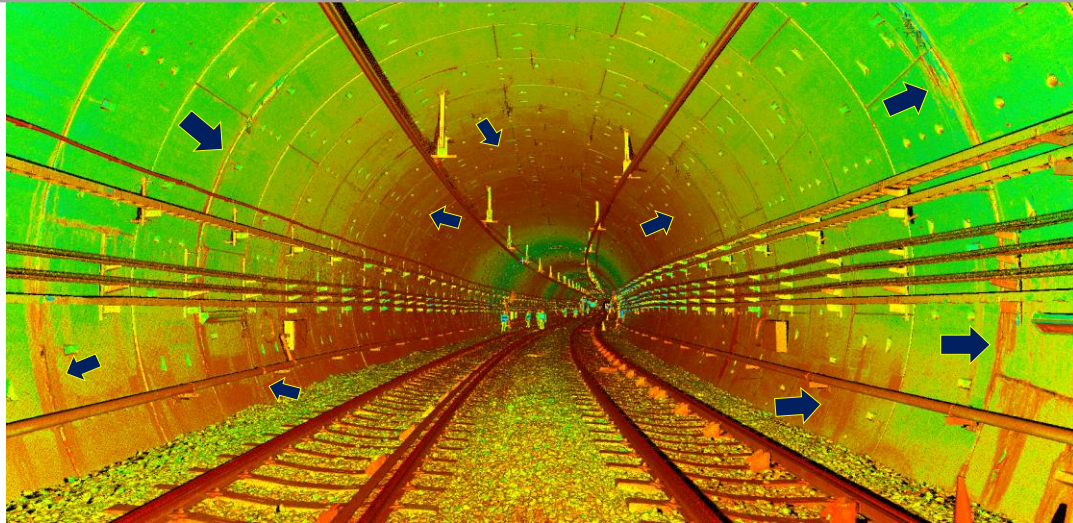
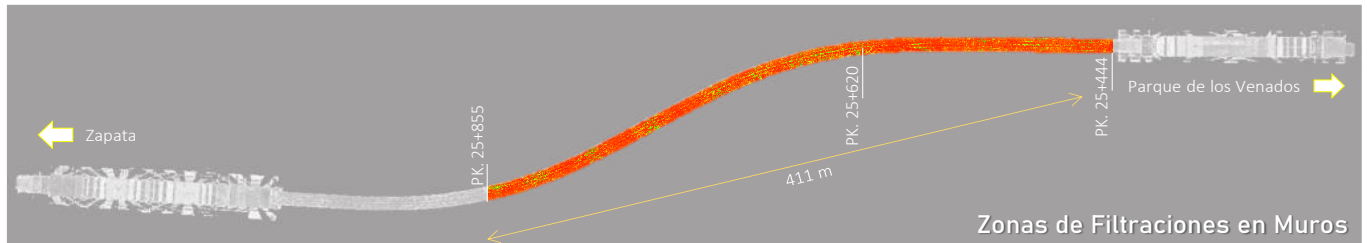
Tramo 4. Zapata – Parque de los Venados



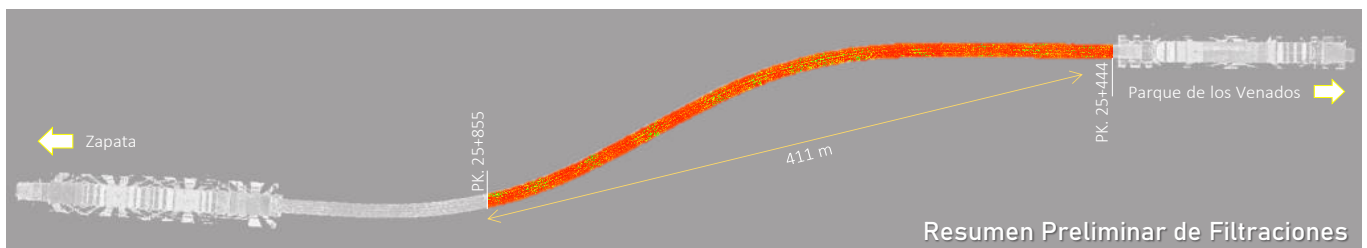
ZONA DE FILTRACIÓN 1
Cad. PK. 25+805 tramo Zapata – Parque de los Venados



ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 25+721 tramo Zapata – Parque de los Venados

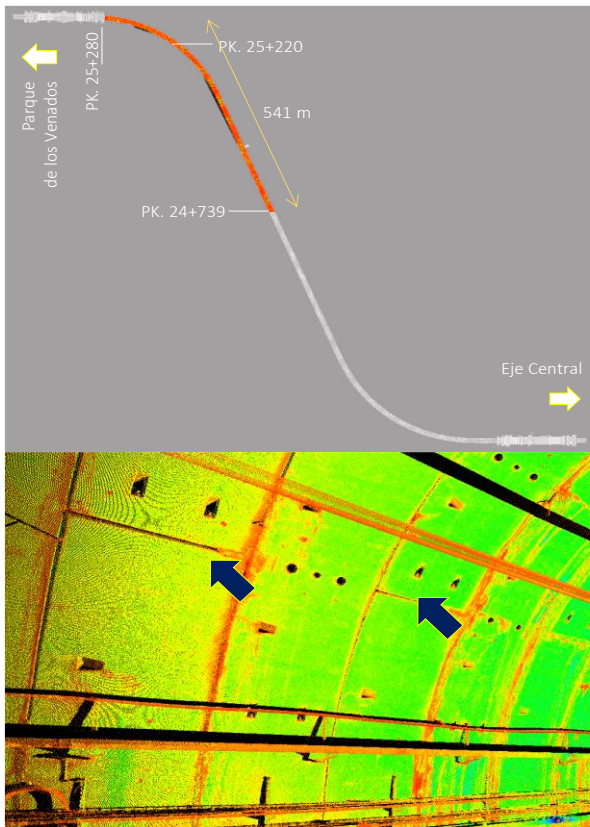


ZONA DE FILTRACIÓN 3
Cad. PK. 25+620 tramo Zapata – Parque de los Venados

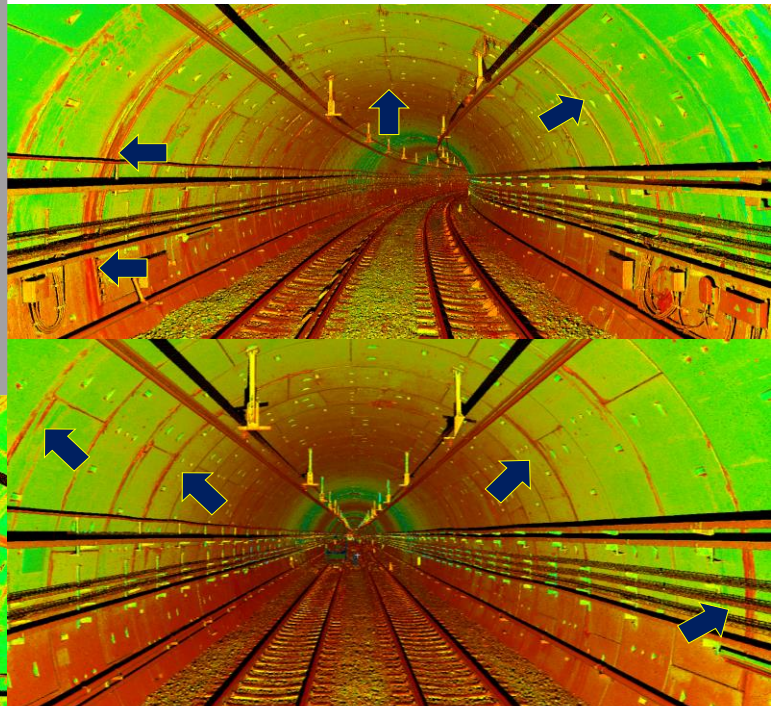


69 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

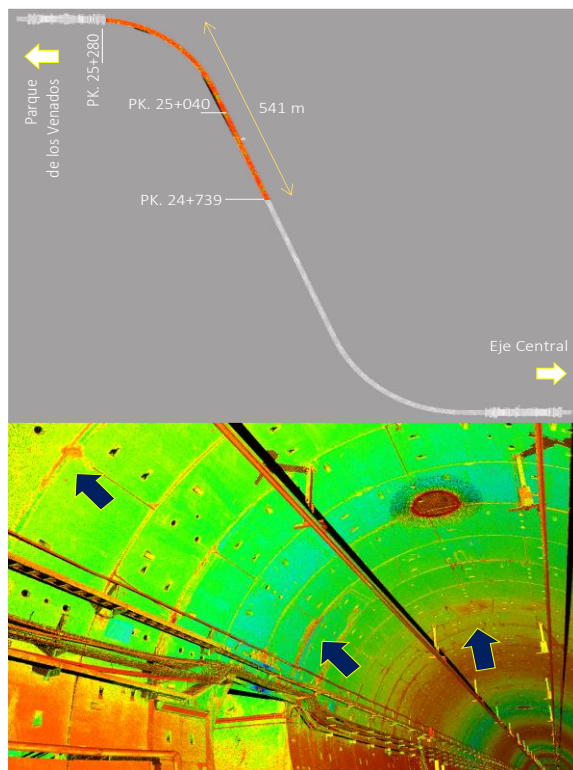
Tramo 5. Parque de los Venados – Eje Central



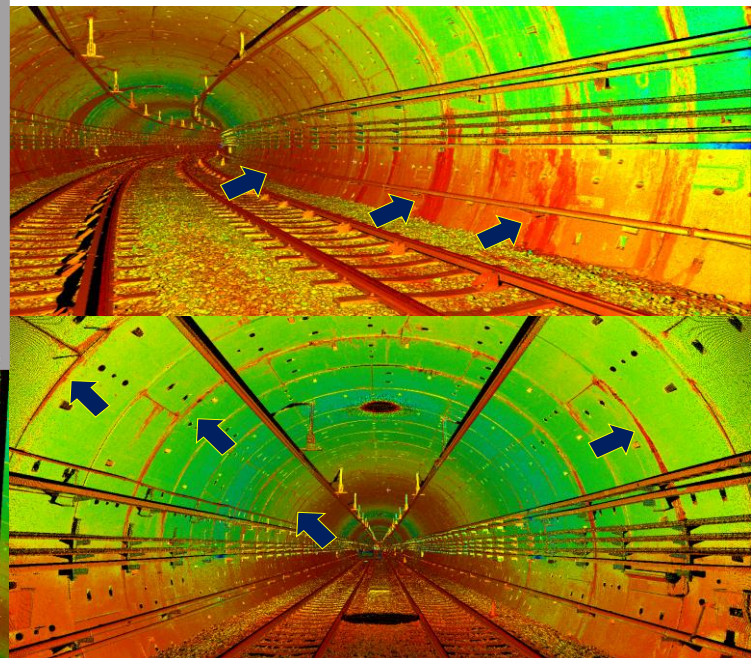
Zonas de Filtraciones en Muros



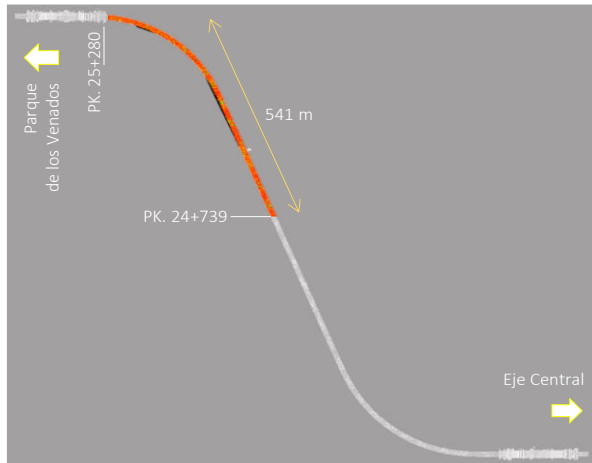
ZONAS DE FILTRACIÓN
Cad. PK. 25+220 Parque de los Venados – Eje Central



Zonas de Filtraciones en Muros



ZONAS DE FILTRACIÓN
Cad. PK. 25+040 Parque de los Venados – Eje Central



Resumen Preliminar de Filtraciones

Cabecera Oriente
Estación Parque de
los Venados



Cabecera Poniente
Estación Eje Central



Túnel tipo Dovela

1,272 m

Longitud entre Inter-estaciones

Longitud aproximada que presenta
filtraciones puntuales

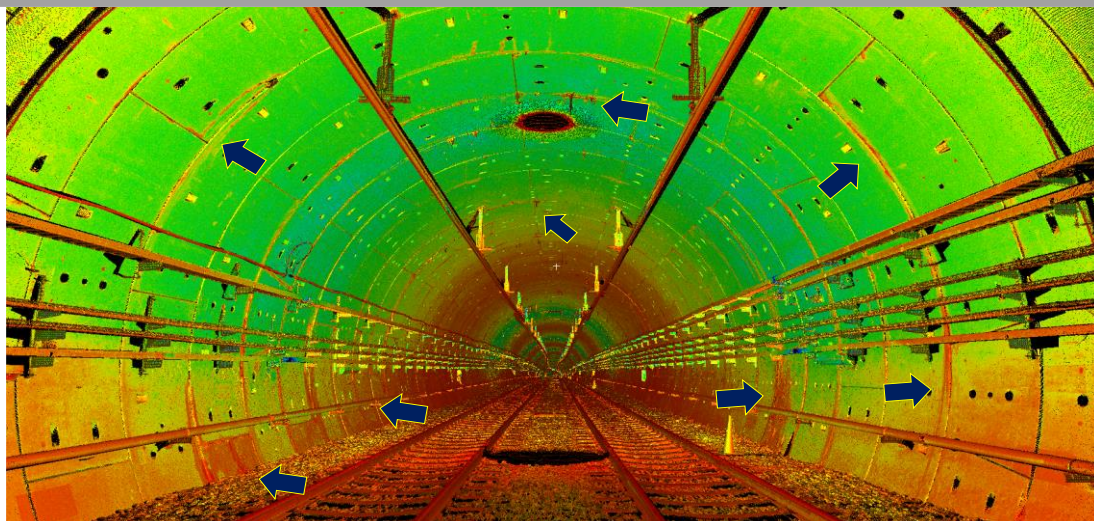
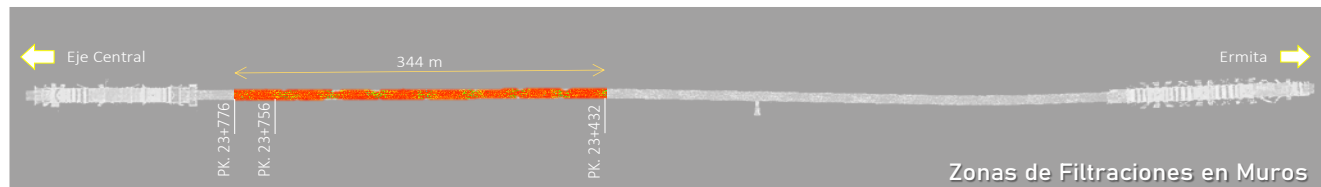
541 m

Longitud aproximada que presenta
filtraciones continuas

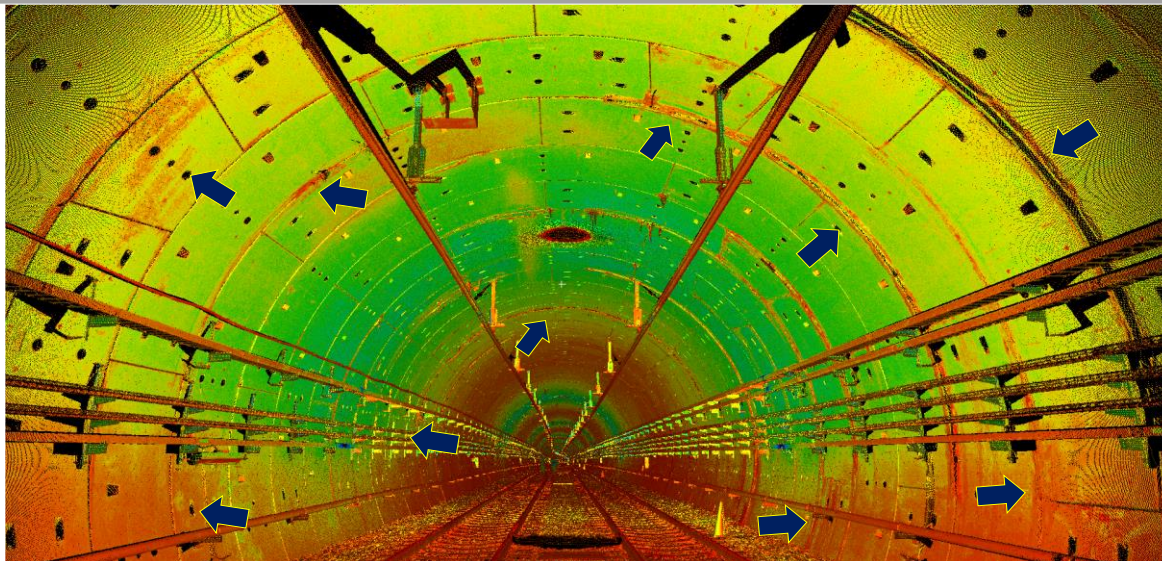
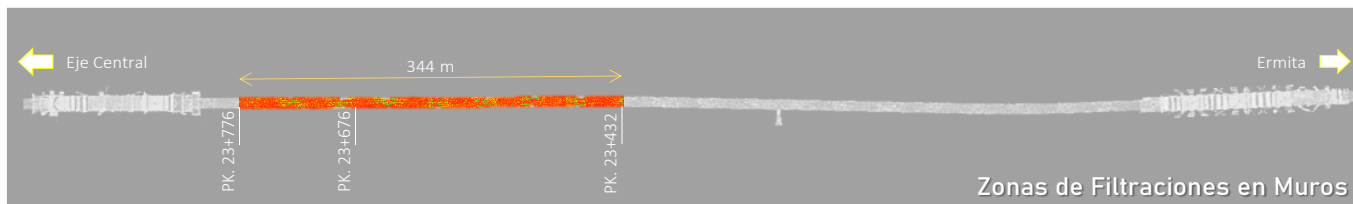
0 m

43 % del tramo; presenta filtraciones en la
estructura del túnel

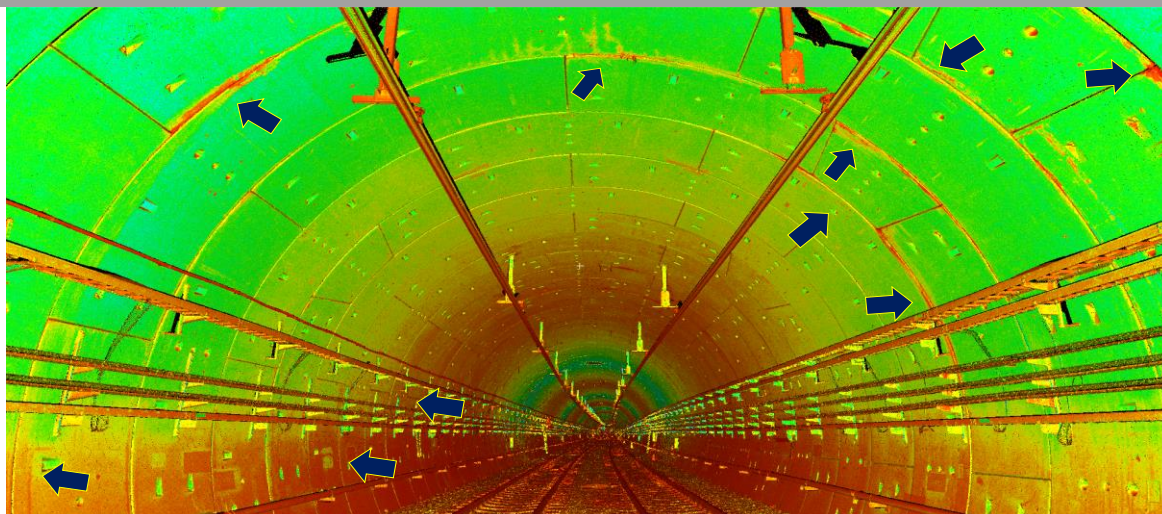
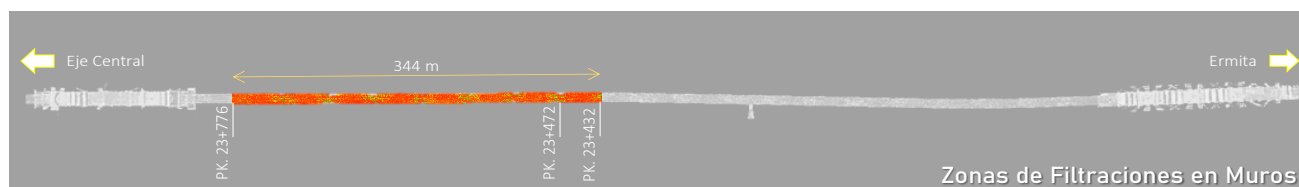
Tramo 6. Eje Central – Ermita



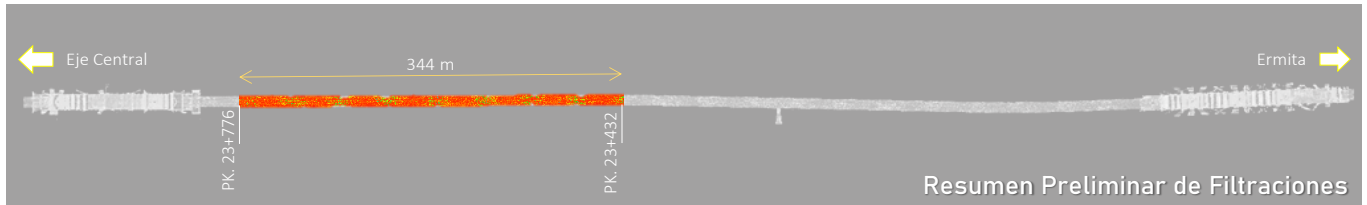
ZONA DE FILTRACIÓN 1
Cad. PK. 23+726 tramo Eje Central – Ermita



ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 23+376 tramo Eje Central – Ermita

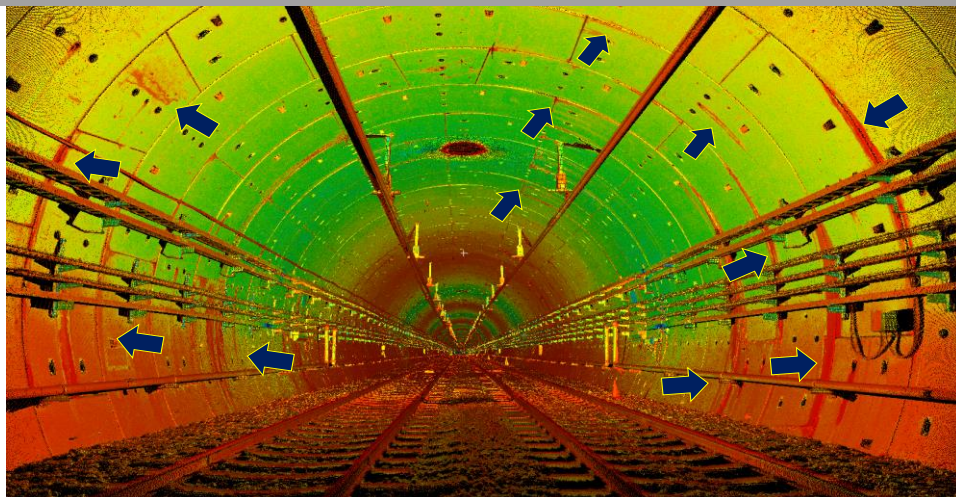


ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 23+472 tramo Eje Central – Ermita

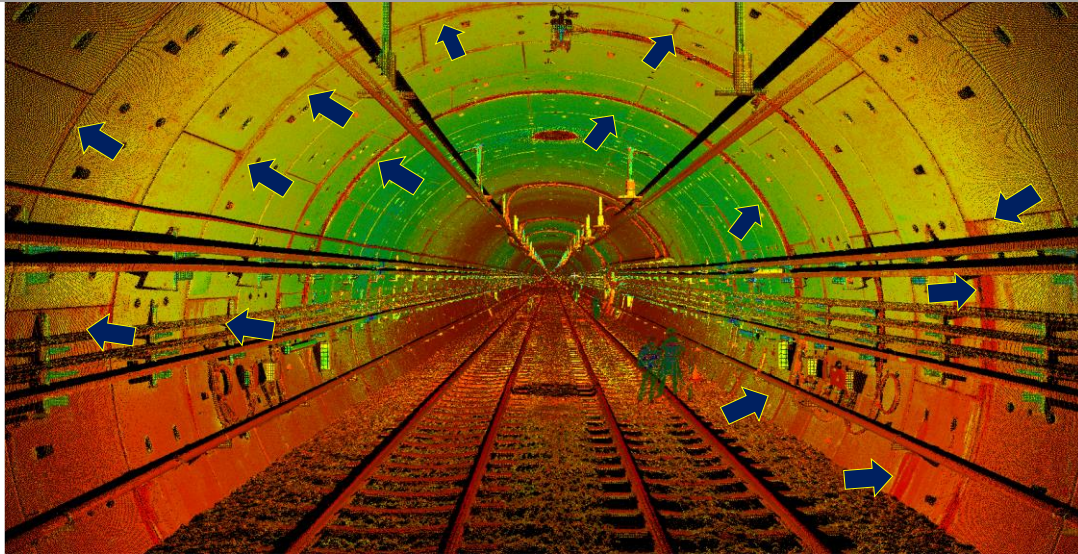


40 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

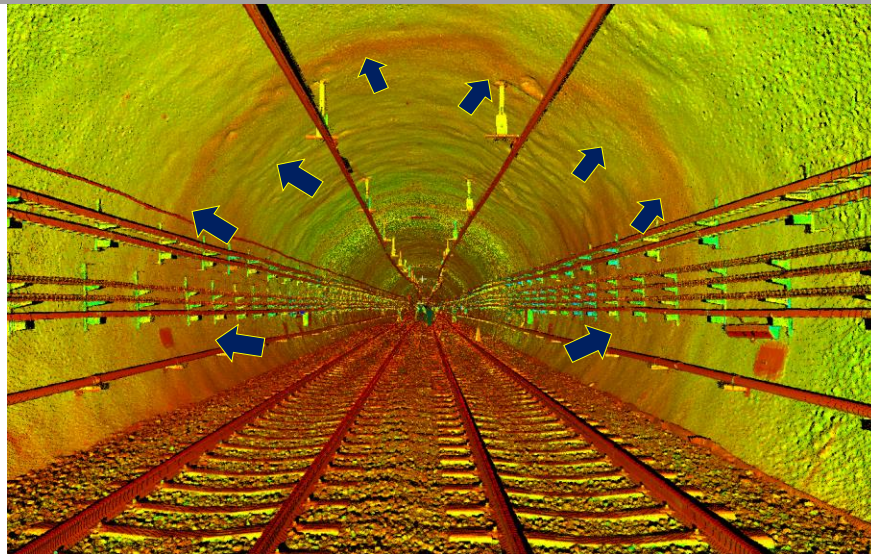
Tramo 7. Ermita – Mexicaltzingo



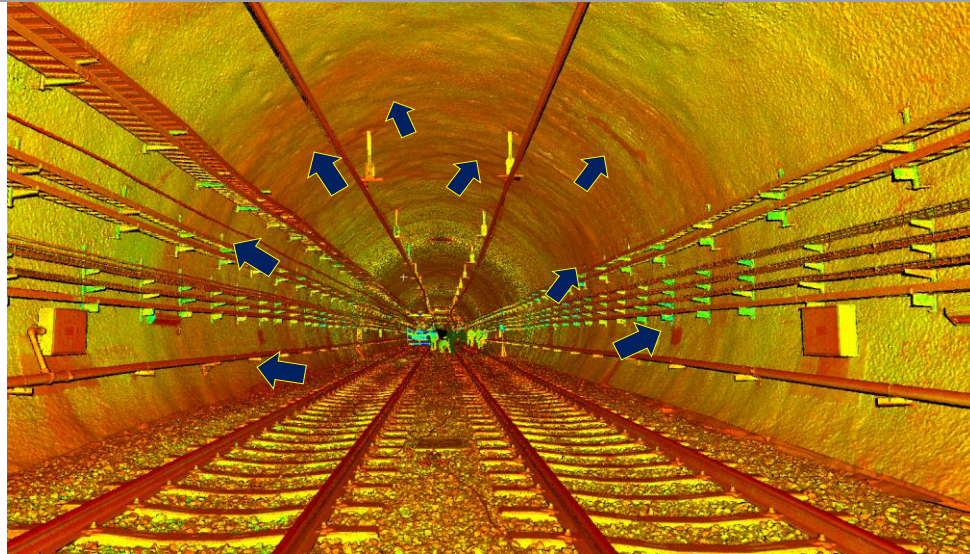
ZONA DE FILTRACIÓN 1
Cad. PK. 22+383 tramo Ermita– Mexicaltzingo



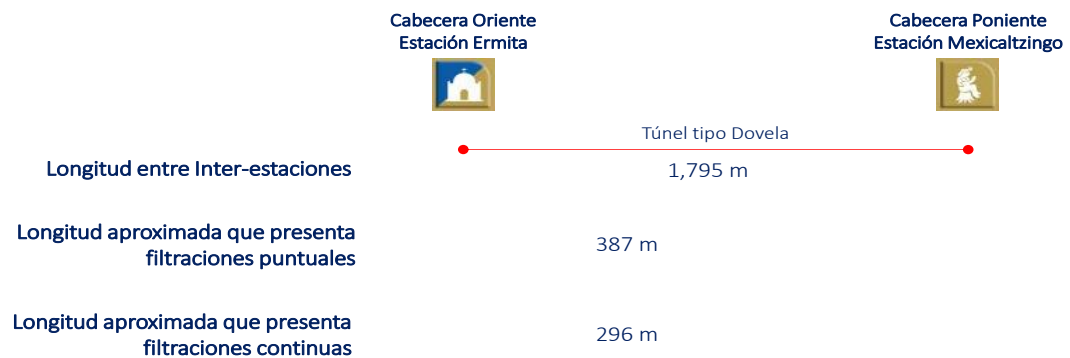
ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 22+196 tramo Ermita– Mexicaltzingo



ZONA DE FILTRACIÓN 3
Cad. PK. 21+316 tramo Ermita– Mexicaltzingo

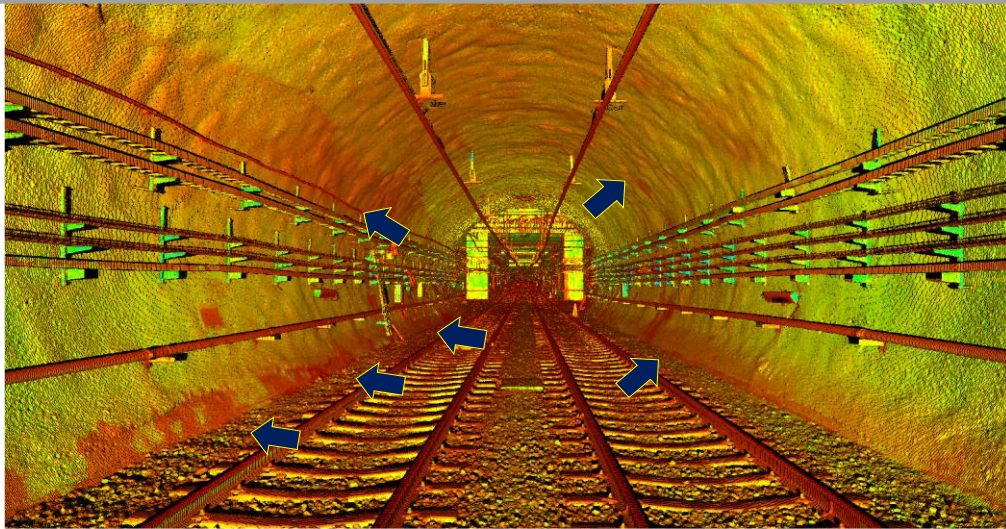
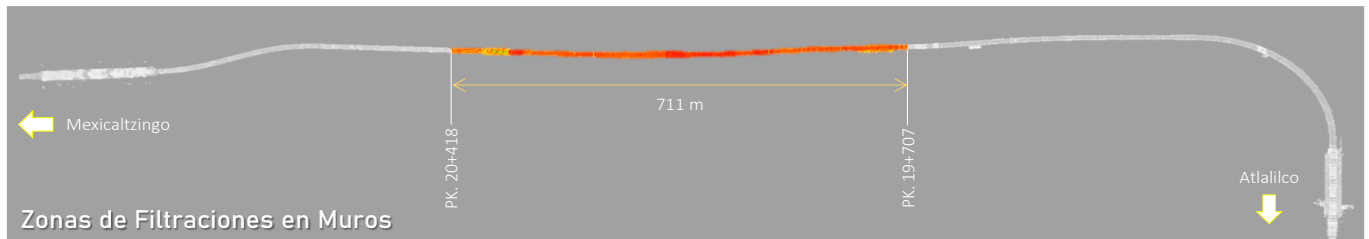


ZONA DE FILTRACIÓN 4
Cad. PK. 21+168 tramo Ermita– Mexicaltzingo

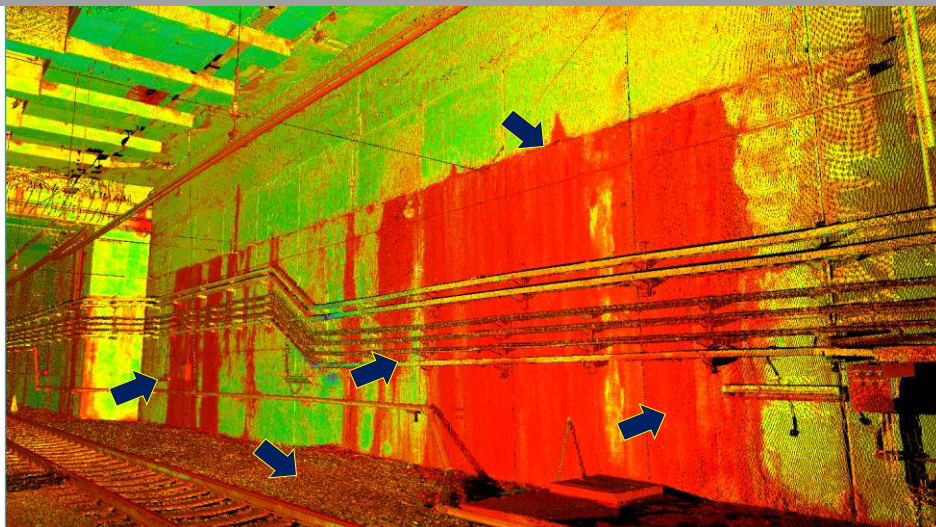
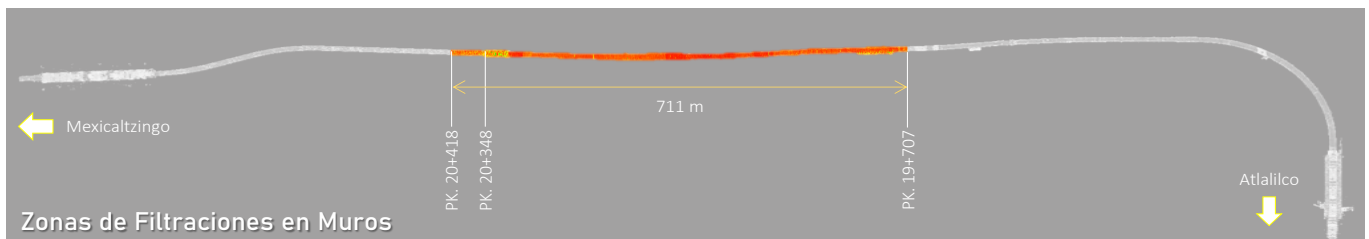


38 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

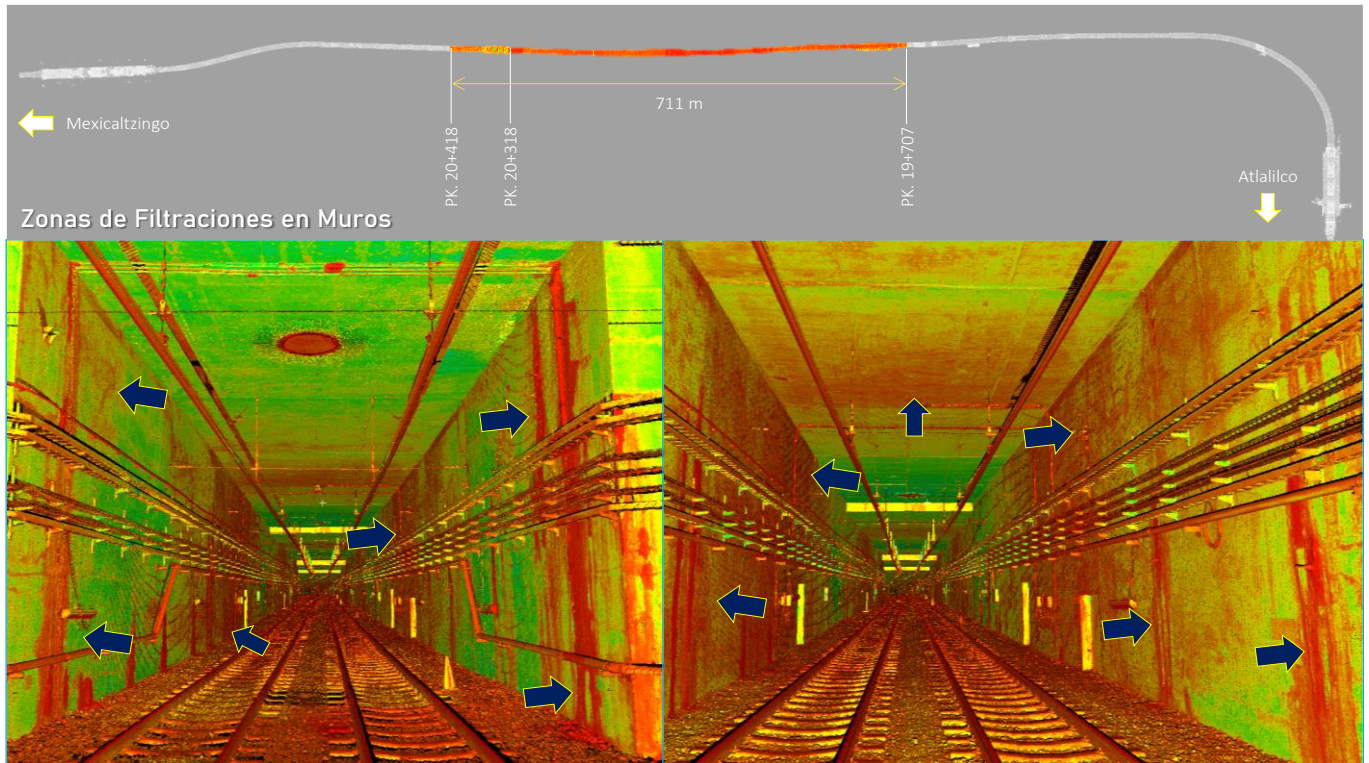
Tramo 8. Mexicaltzingo – Atlalilco



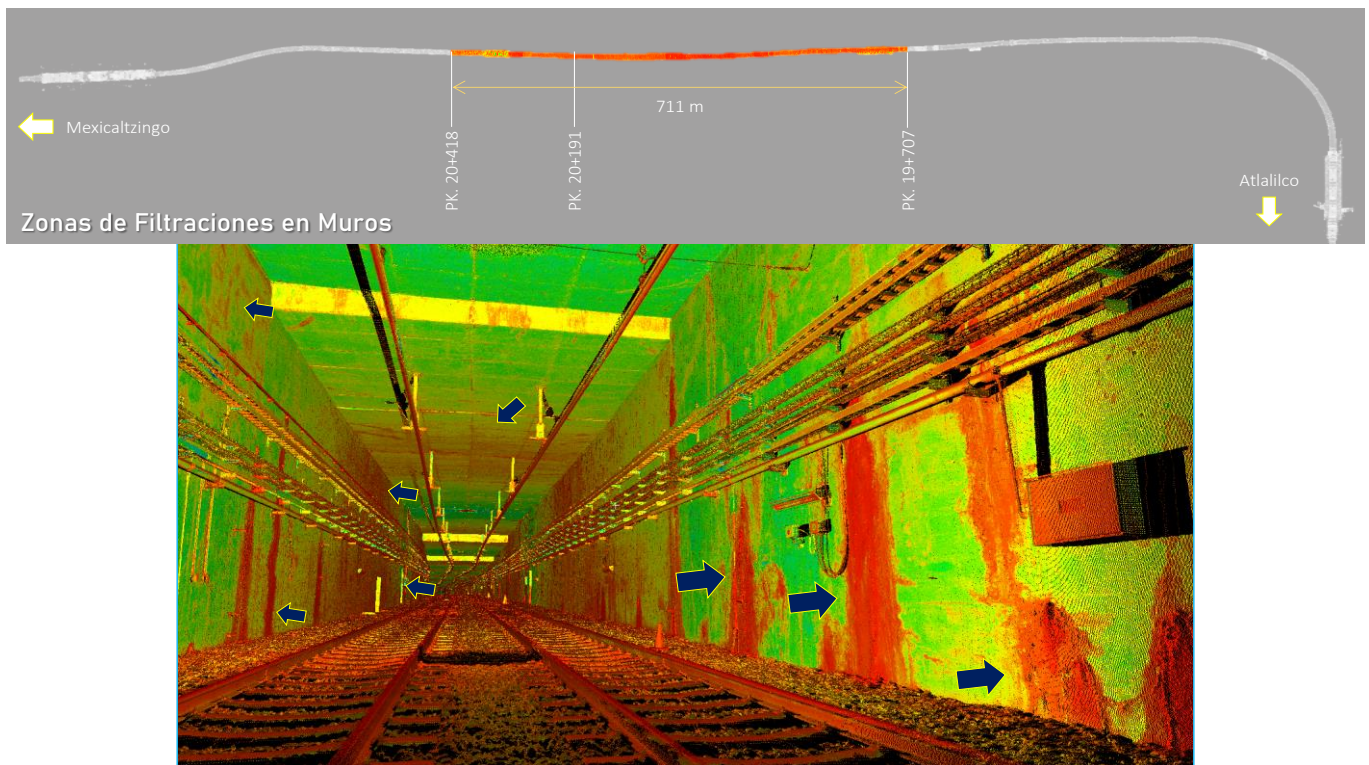
ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 20+148 tramo Mexicaltzingo– Atlalilco



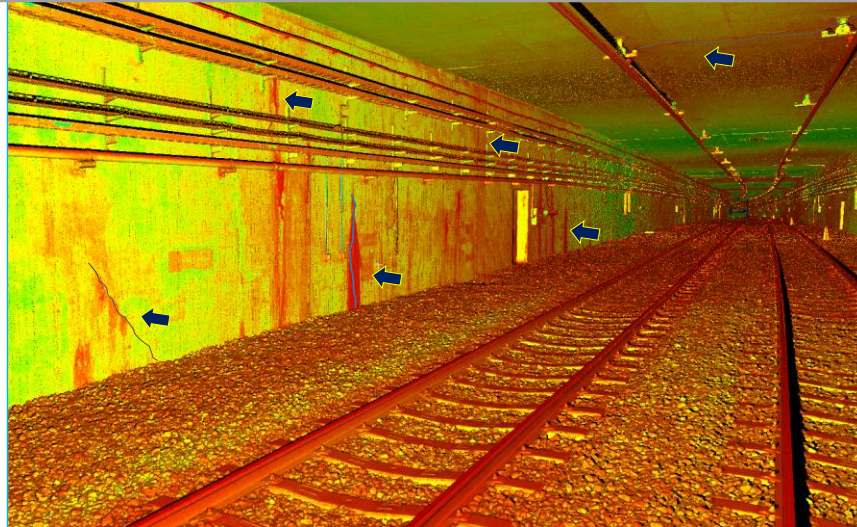
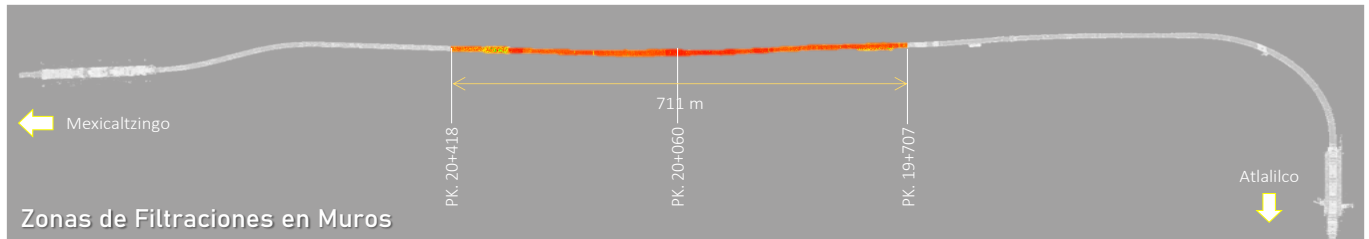
ZONA DE FILTRACIÓN 2
Cad. PK. 20+348 tramo Mexicaltzingo– Atlalilco



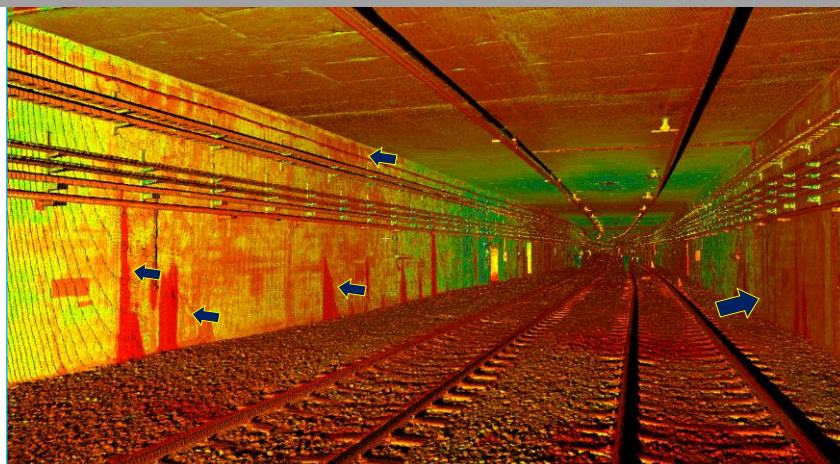
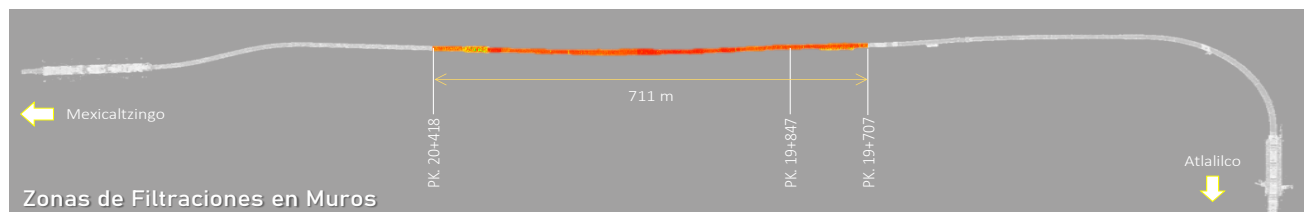
ZONA DE FILTRACIÓN 3. Dentro de las Filtraciones, existen fisuras sobre la estructura
Cad. PK. 20+318 tramo Mexicaltzingo— Atlalilco



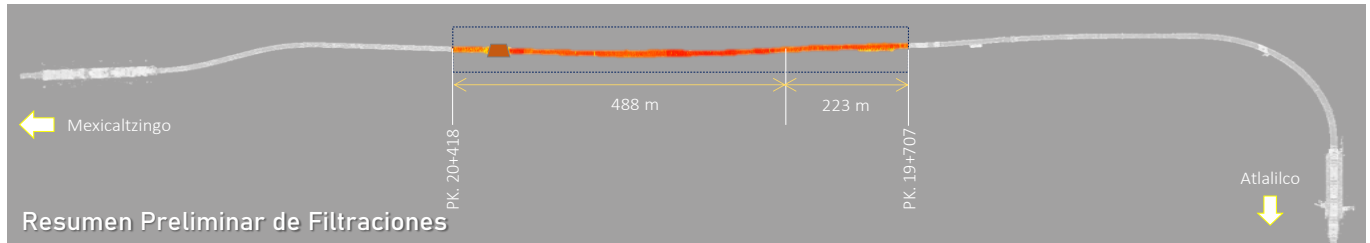
ZONA DE FILTRACIÓN 4. Dentro de las Filtraciones, existen fisuras sobre la estructura
Cad. PK. 20+191 tramo Mexicaltzingo— Atlalilco



ZONA DE FILTRACIÓN 5. Dentro de las Filtraciones, existen fisuras sobre la estructura
Cad. PK. 20+060 tramo Mexicaltzingo– Atlalilco

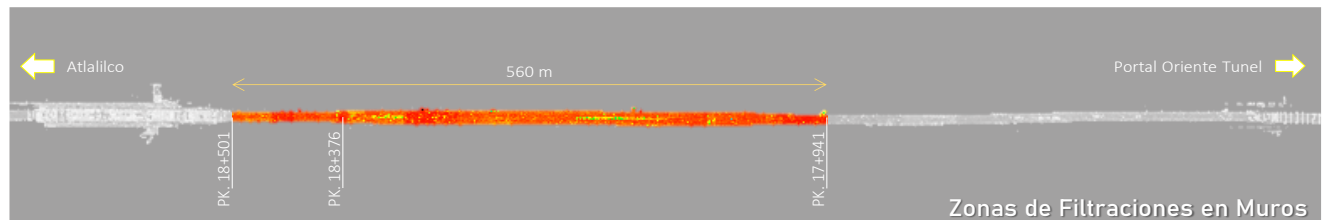


ZONA DE FILTRACIÓN 6. Dentro de las Filtraciones, existen fisuras sobre la estructura
Cad. PK. 19+858 tramo Mexicaltzingo– Atlalilco

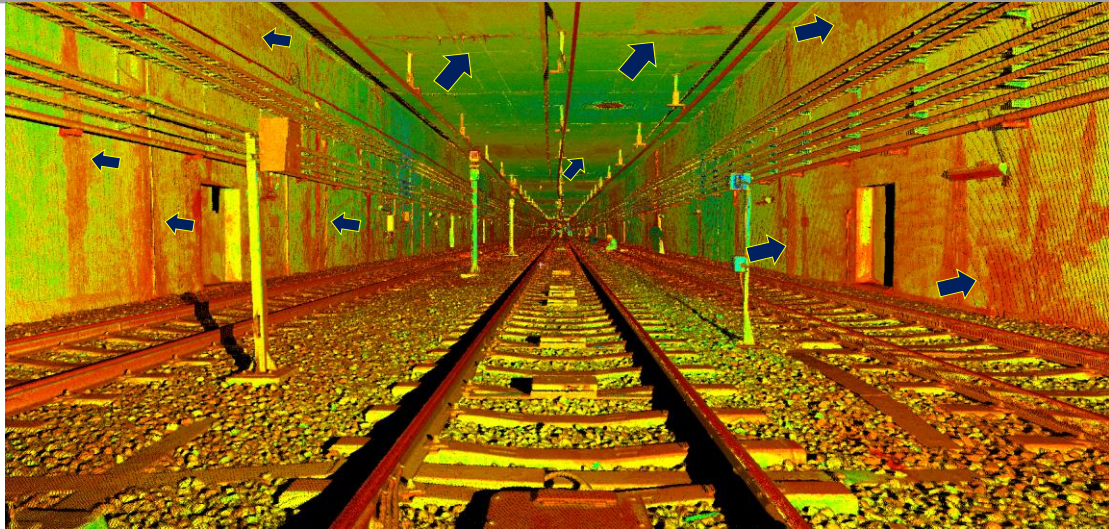
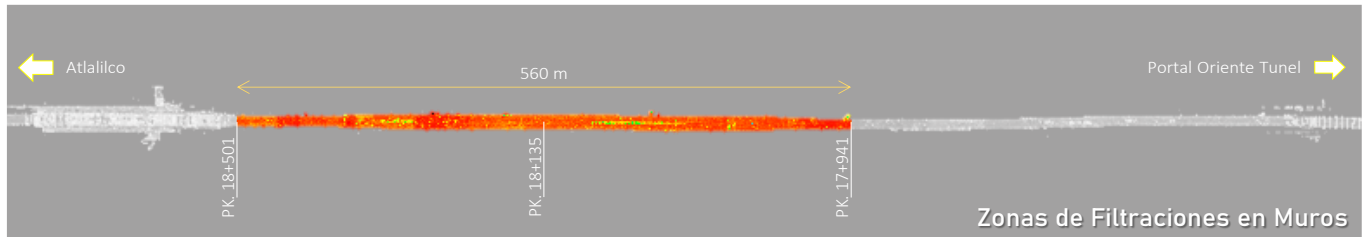


38 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

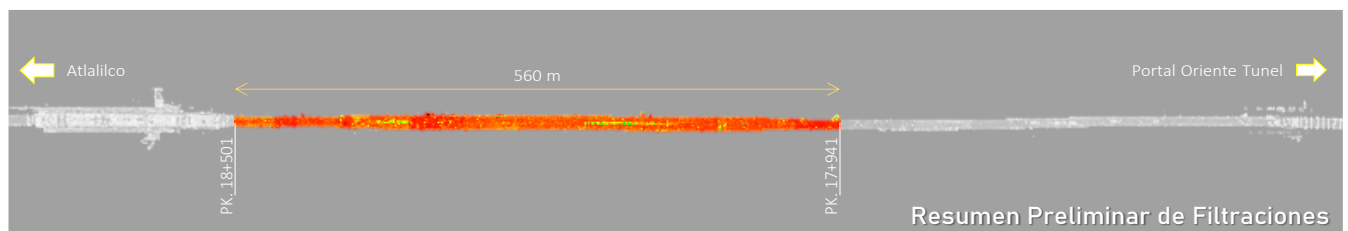
Tramo 9. Atlalilco – Portal Oriente



ZONA DE FILTRACIÓN 1. Dentro de las Filtraciones, existen fisuras sobre la estructura
Cad. PK. 18+376 tramo Atlalilco – Portal Oriente Tunnel



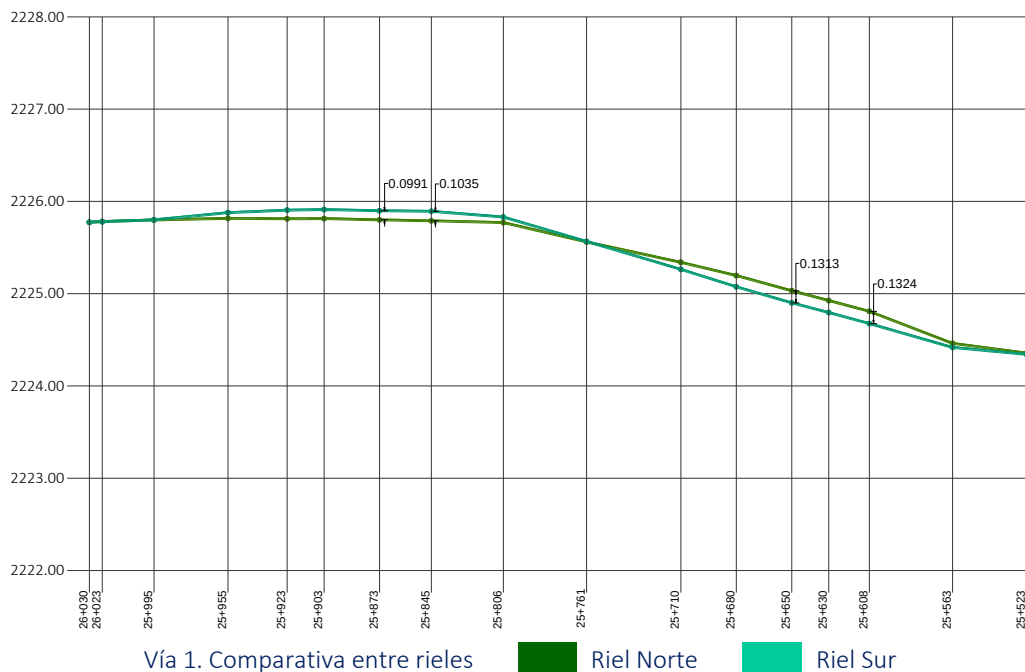
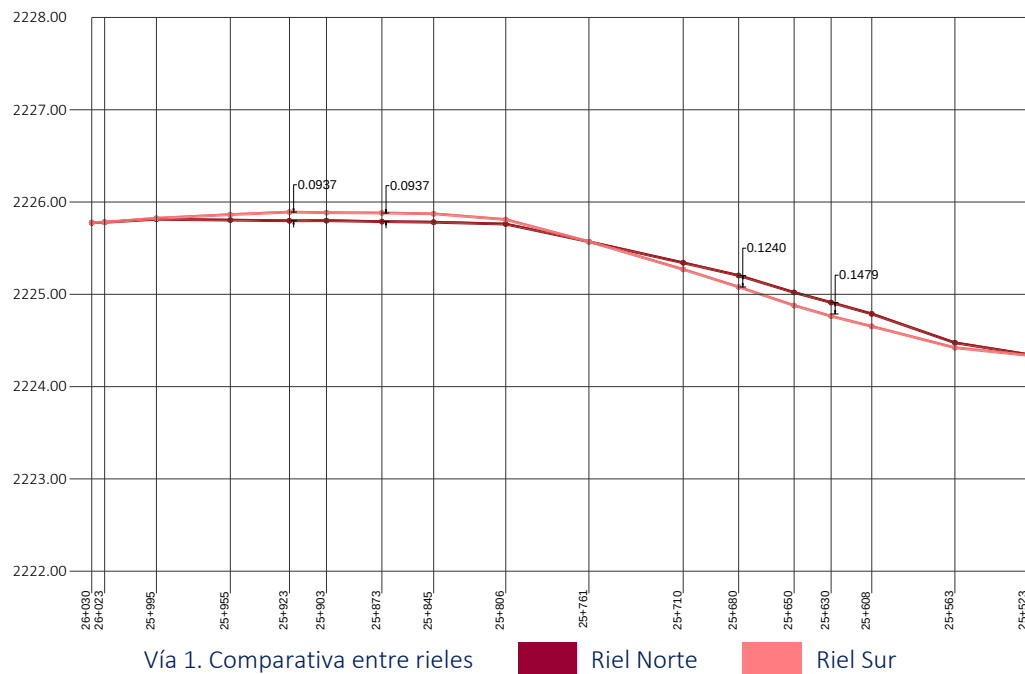
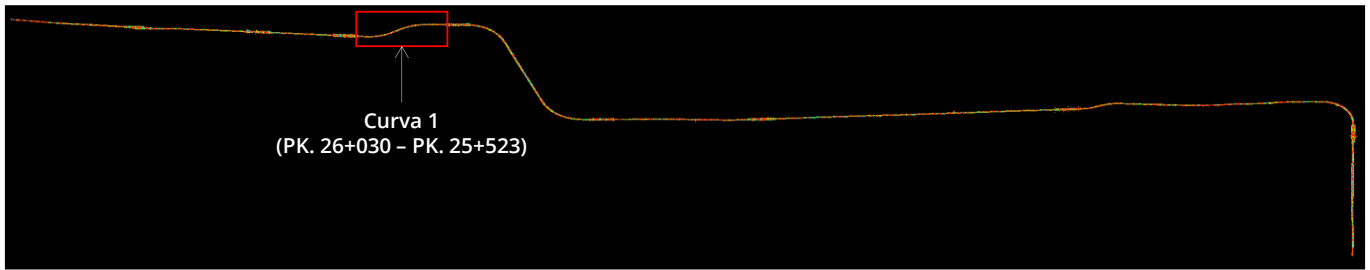
ZONA DE FILTRACIÓN 2. Dentro de las Filtraciones, existen fisuras sobre la estructura
Cad. PK. 18+135 tramo Atlalilco – Portal Oriente Tunnel



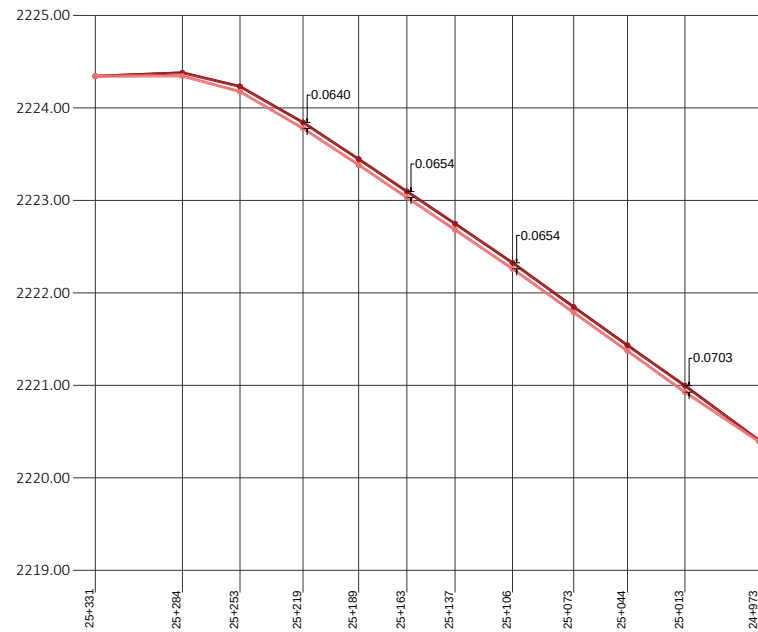
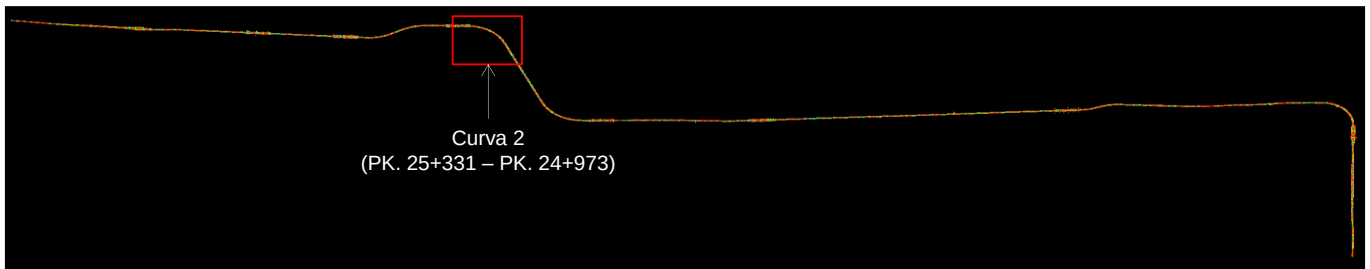
58 % del tramo; presenta filtraciones en la estructura del túnel

3.4 Análisis de Rieles en Curvas del tramo subterráneo

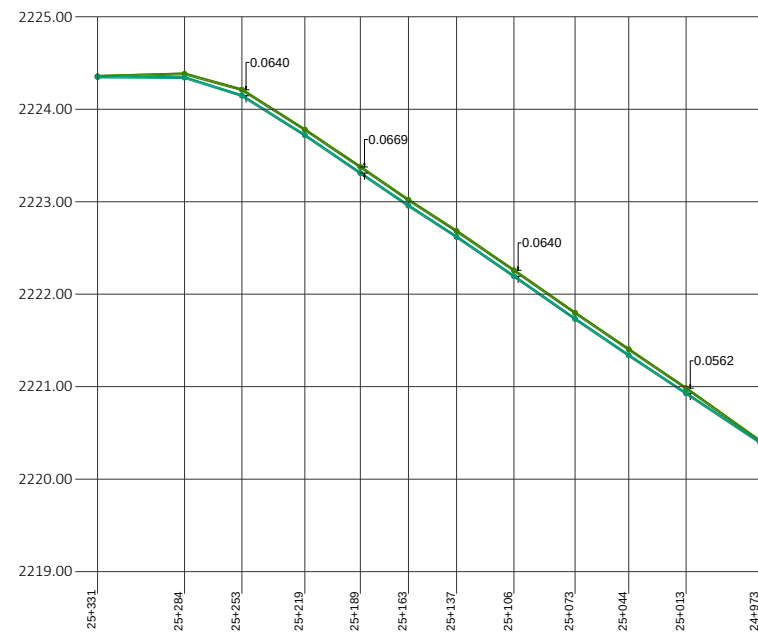
Curva 1 entre estaciones: Zapata – Parque de los Venados (PK. 26+030 – PK. 25+523)



Curva 2 entre estaciones: Parque de los Venados – Eje Central (PK. 25+331 – PK. 24+973)

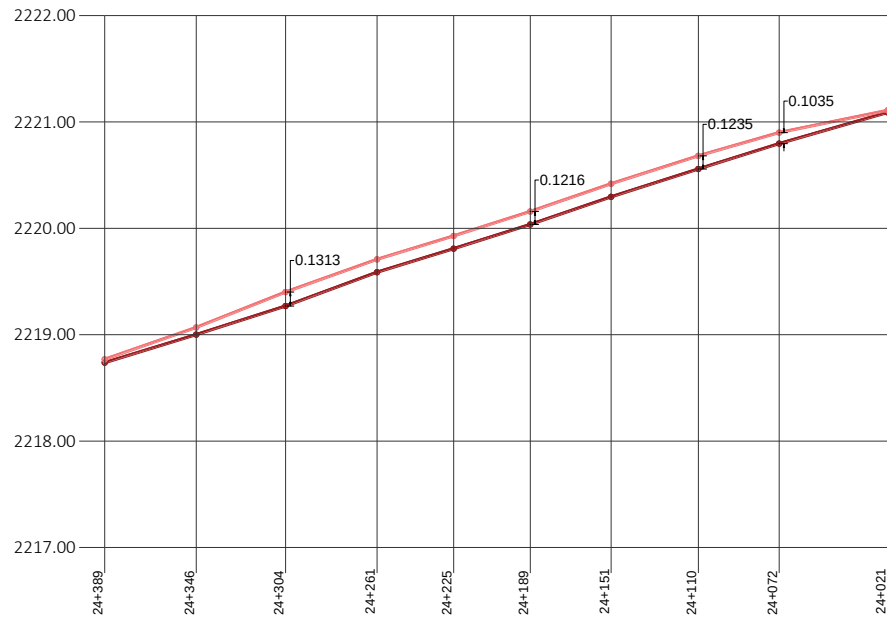
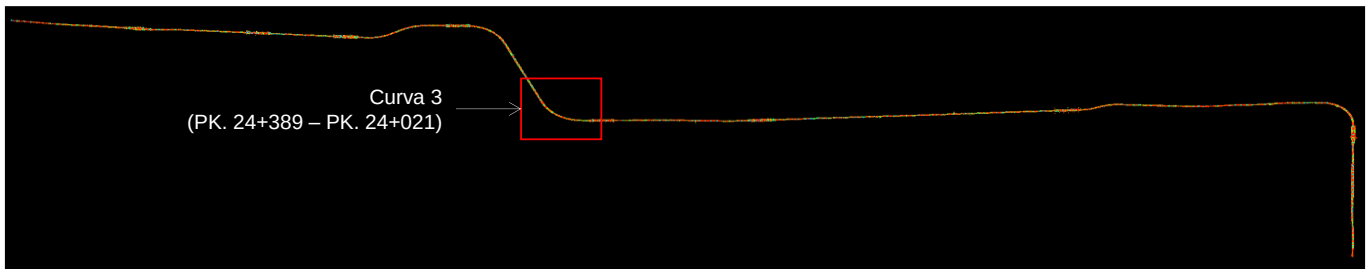


Vía 1. Comparativa entre rieles ■ Riel Norte ■ Riel Sur



Vía 1. Comparativa entre rieles ■ Riel Norte ■ Riel Sur

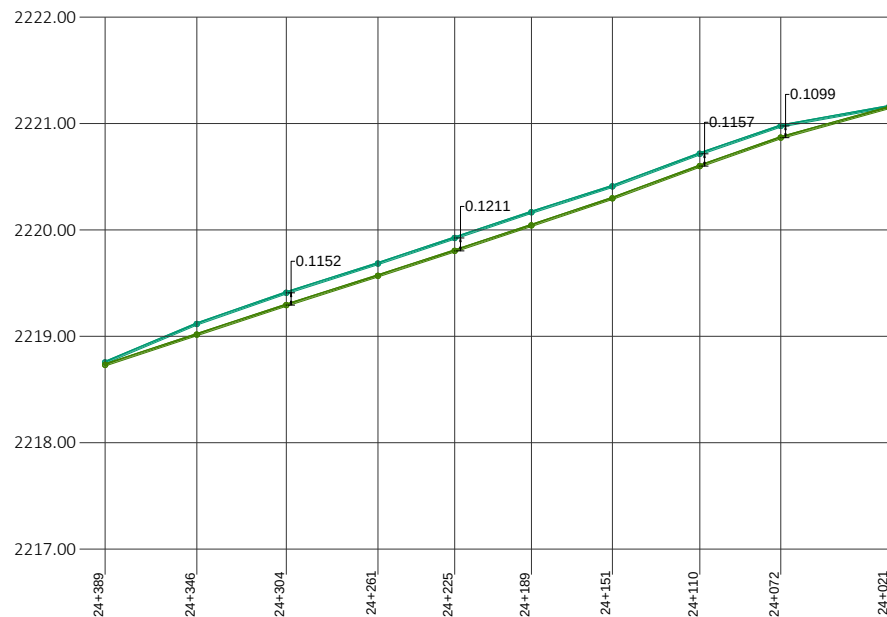
Curva 3 entre estaciones: Parque de los Venados – Eje Central (PK. 24+389 – PK. 24+021)



Vía 1. Comparativa entre rieles

Riel Norte

Riel Sur

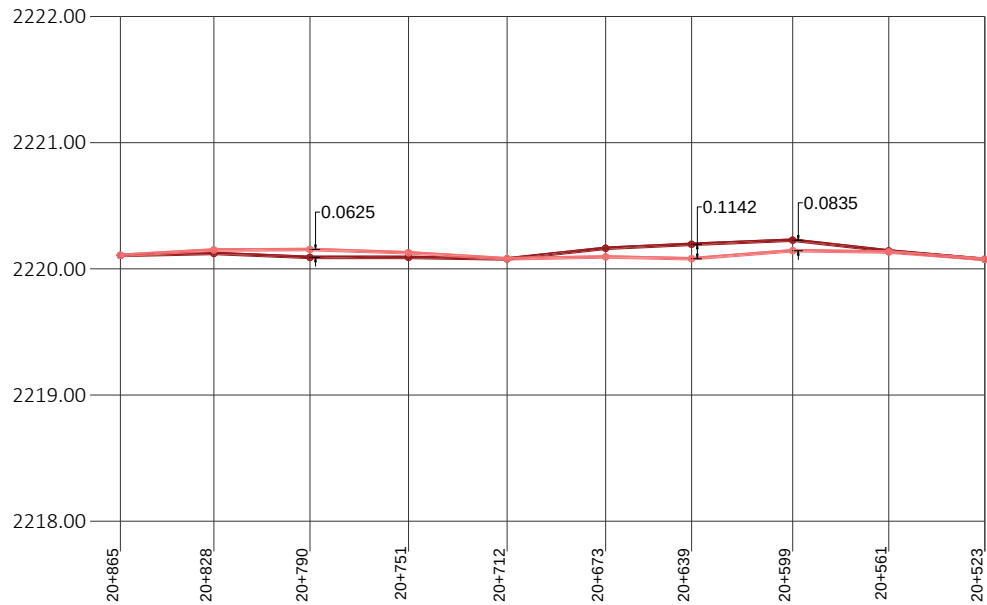
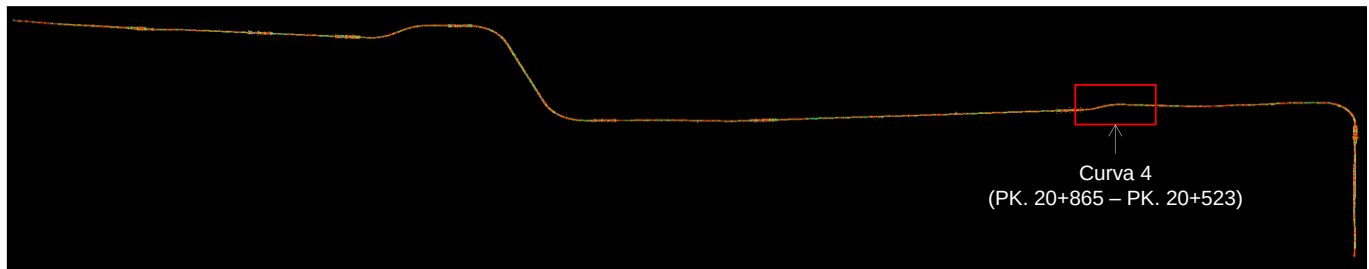


Vía 1. Comparativa entre rieles

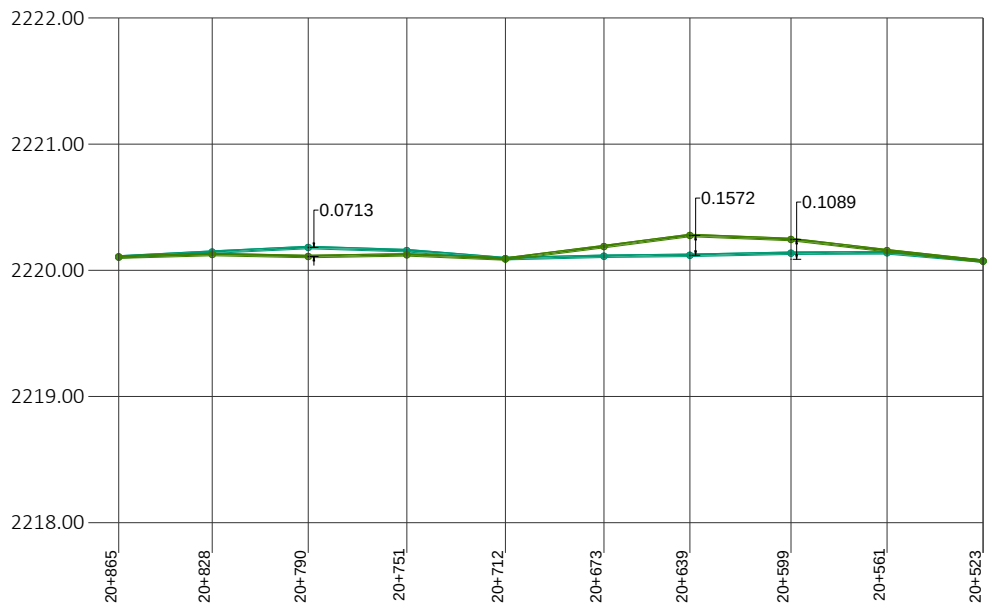
Riel Norte

Riel Sur

Curva 4 entre estaciones: Mexicaltzingo – Atlalilco (PK. 20+865 – PK. 20+523)

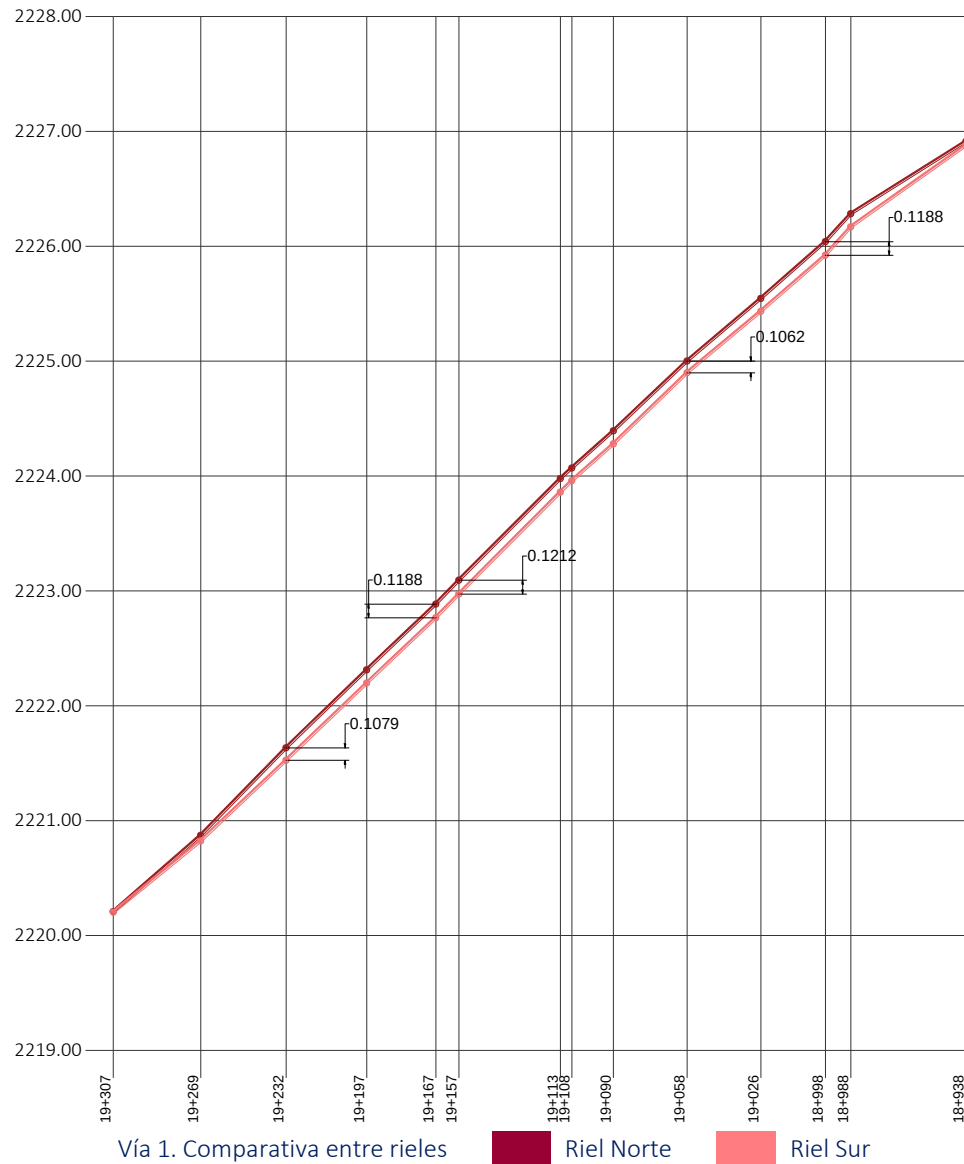
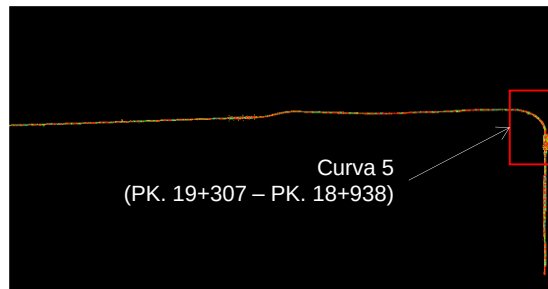


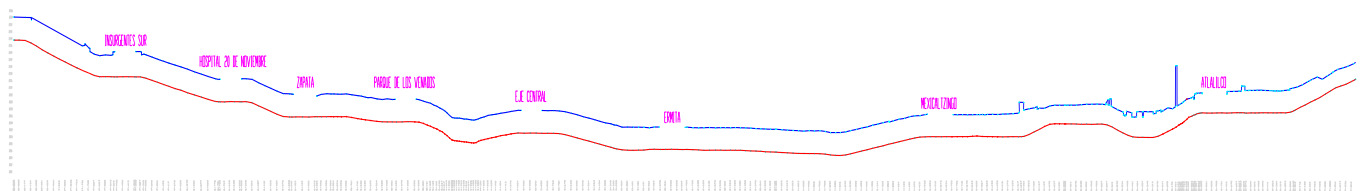
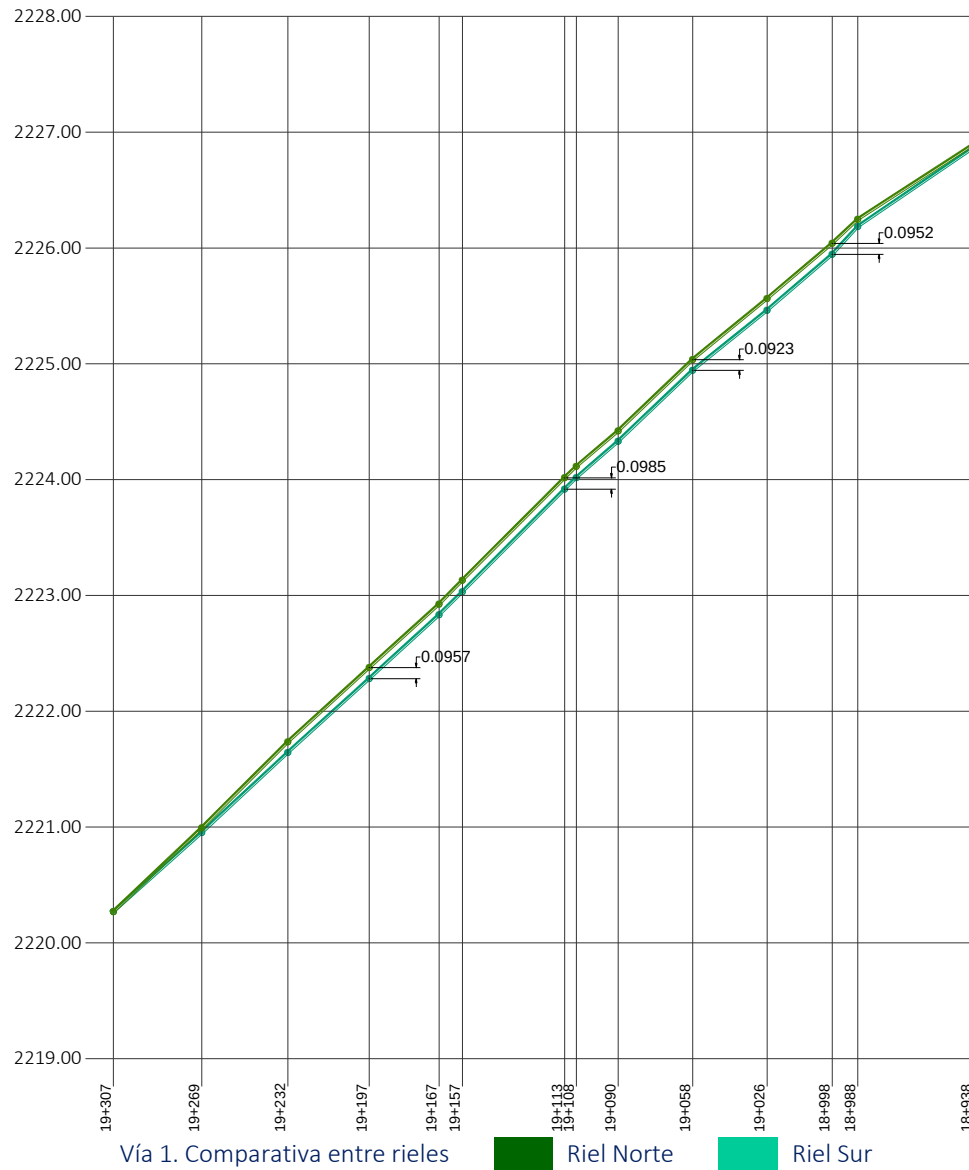
Vía 1. Comparativa entre rieles Riel Norte Riel Sur



Vía 1. Comparativa entre rieles Riel Norte Riel Sur

Curva 5 entre estaciones: Mexicaltzingo – Atlalilco (PK. 19+307 – PK. 18+938)





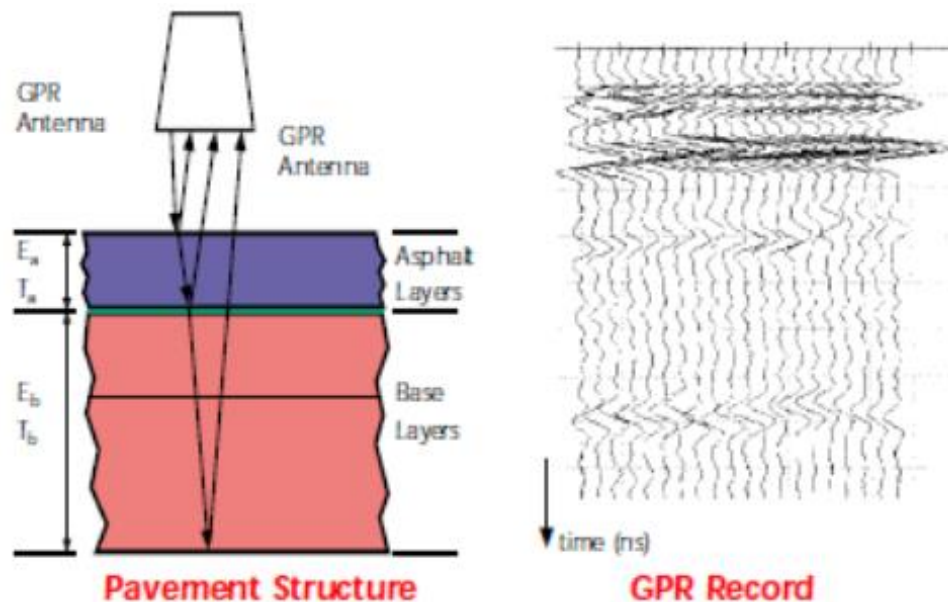
Perfil general del tramo subterráneo de la línea 12 del STC Metro.

4 MICROONDAS DE ALTA FRECUENCIA

4.1 Método utilizado

El estudio con microondas de alta frecuencia es un método de pulso-eco que mide los espesores de las capas que conforman los suelos. Funciona como un ultrasonido, pero en lugar de ondas de sonido, usa ondas de radio para penetrar las estructuras. Las antenas son montadas en un vehículo para que el movimiento de éste transmita pulsos cortos de radio en el pavimento.

Como la energía viaja a través de la estructura del pavimento, los ecos se crean en los límites de diferentes materiales (como la base de una estructura de concreto asfáltico). El tiempo de llegada y la intensidad de los ecos se pueden usar para calcular el espesor de las capas y otras propiedades; así como el contenido de humedad.

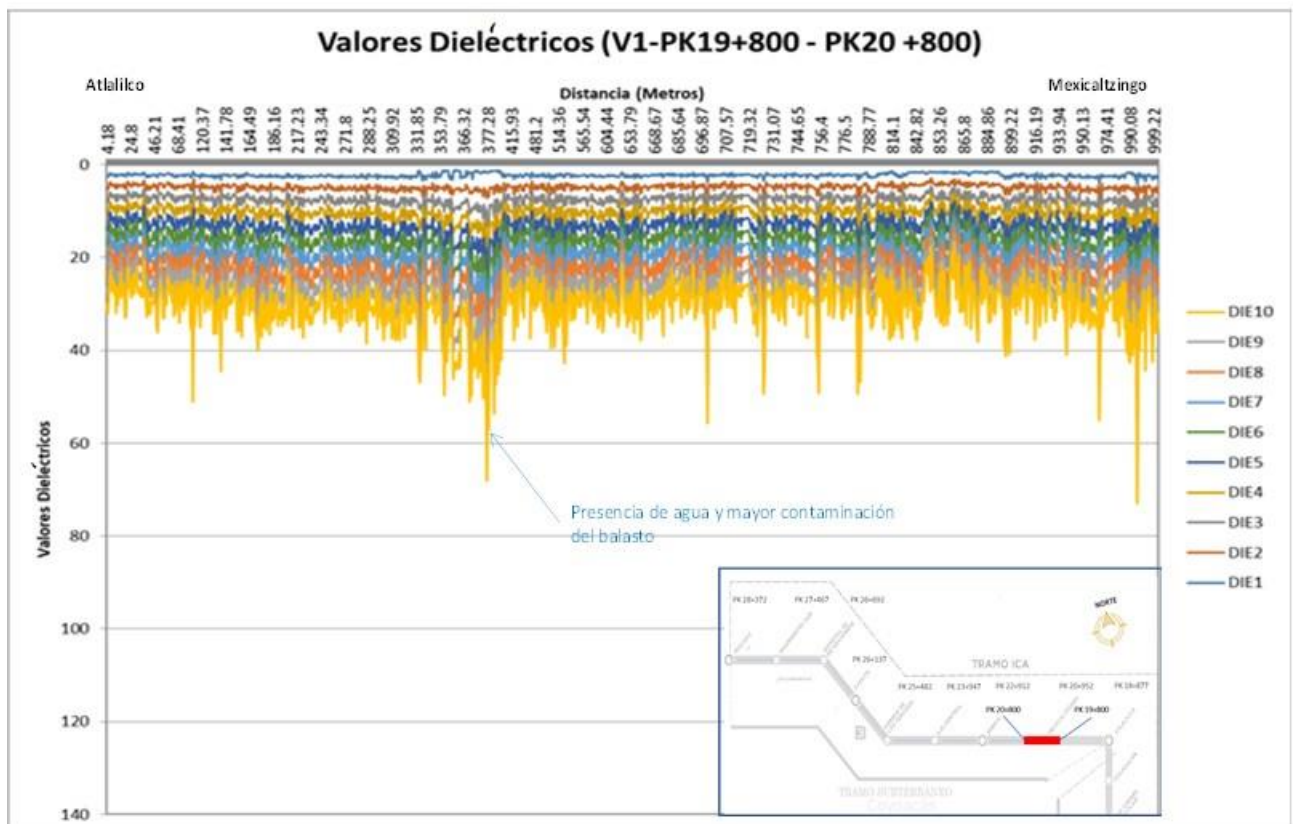
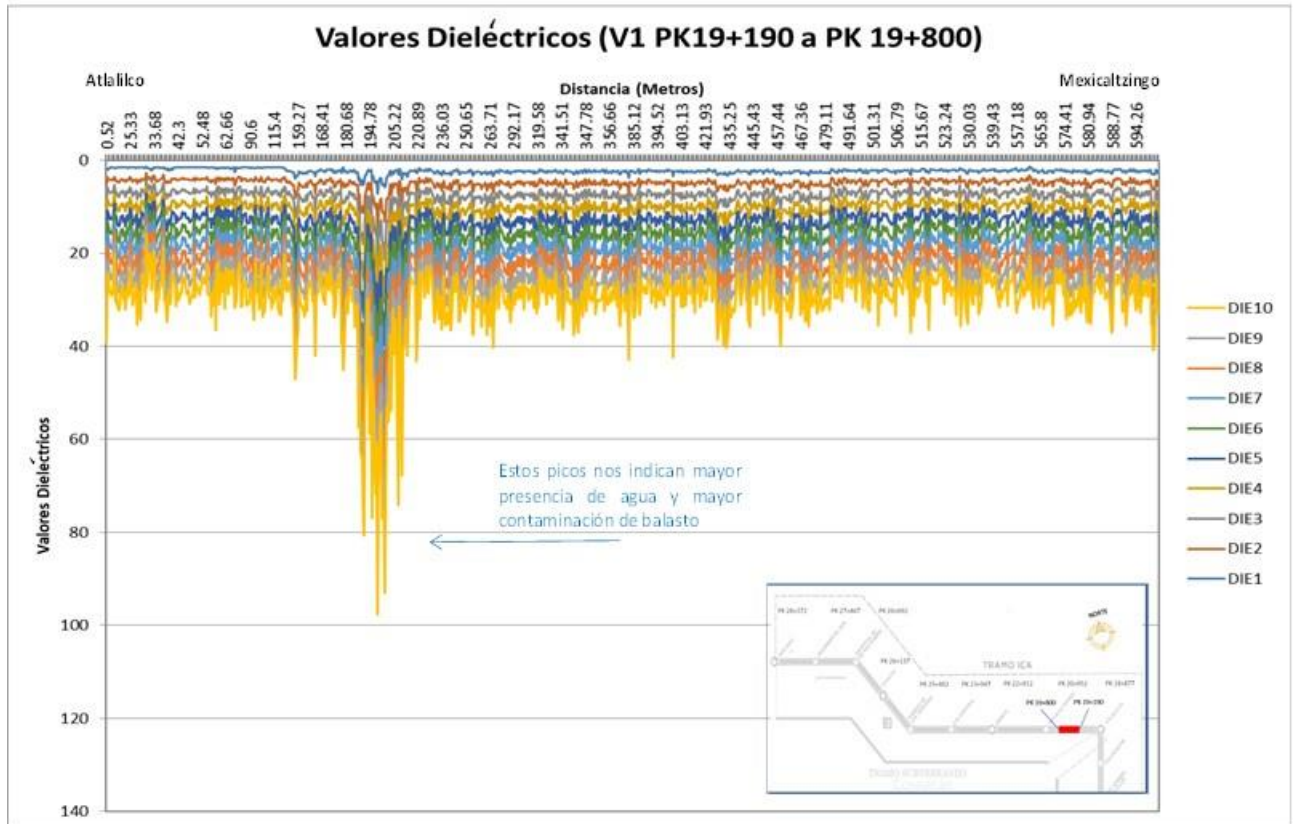


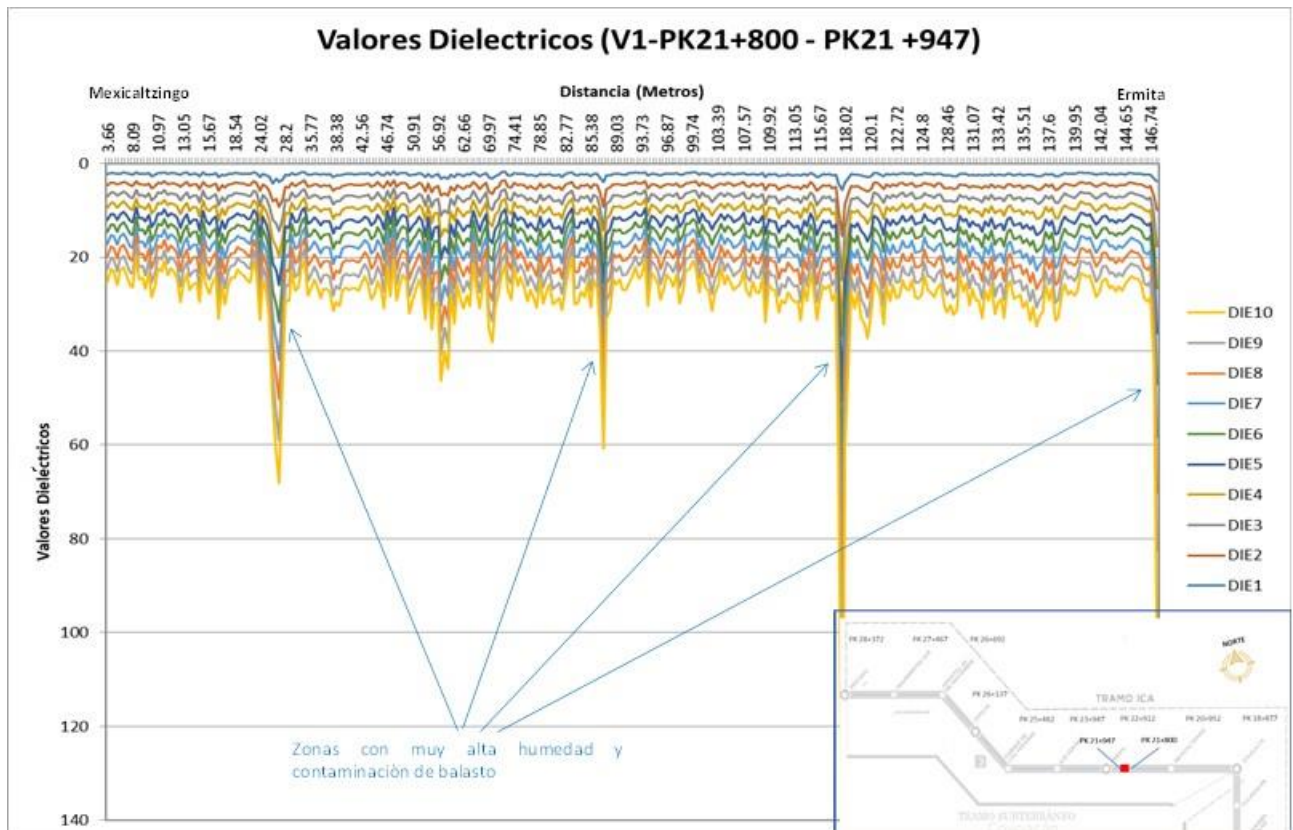
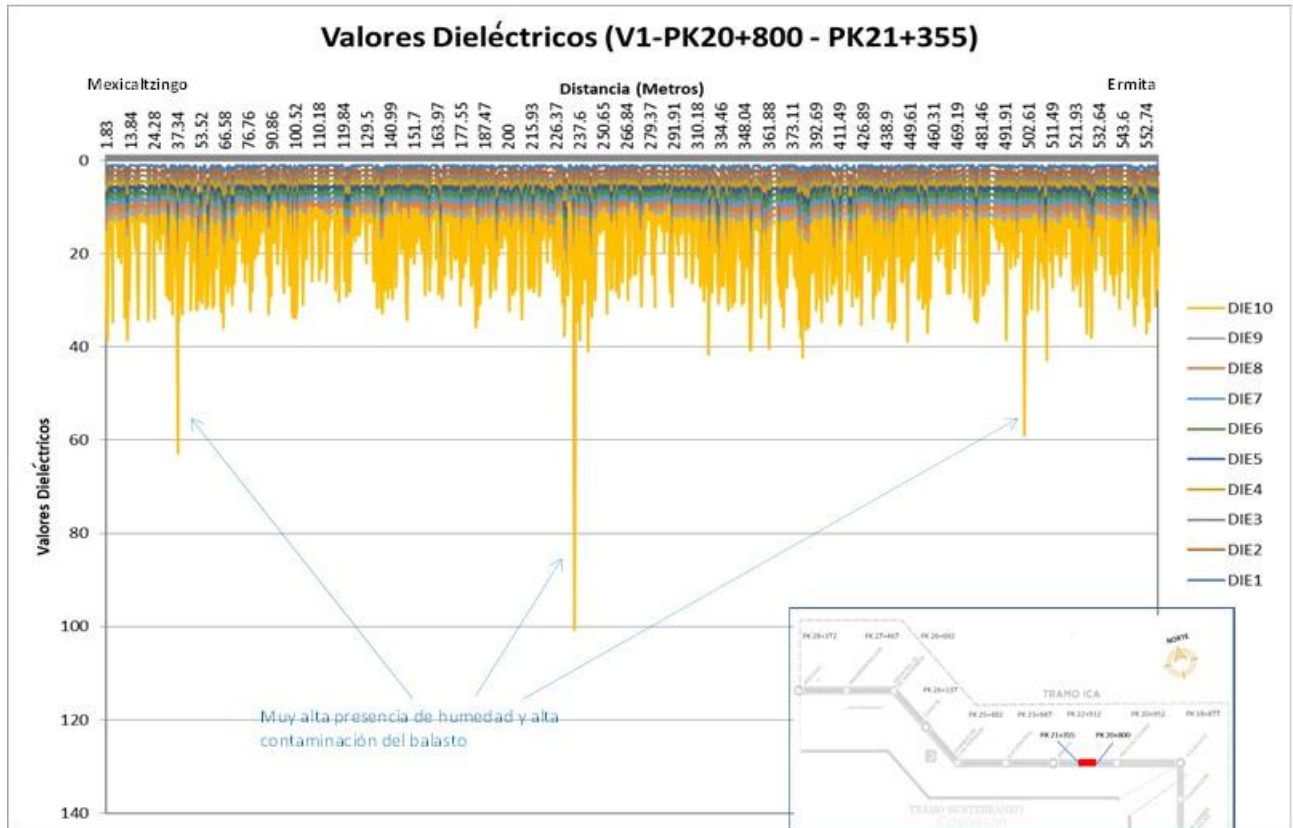
4.2 Ventajas del sistema

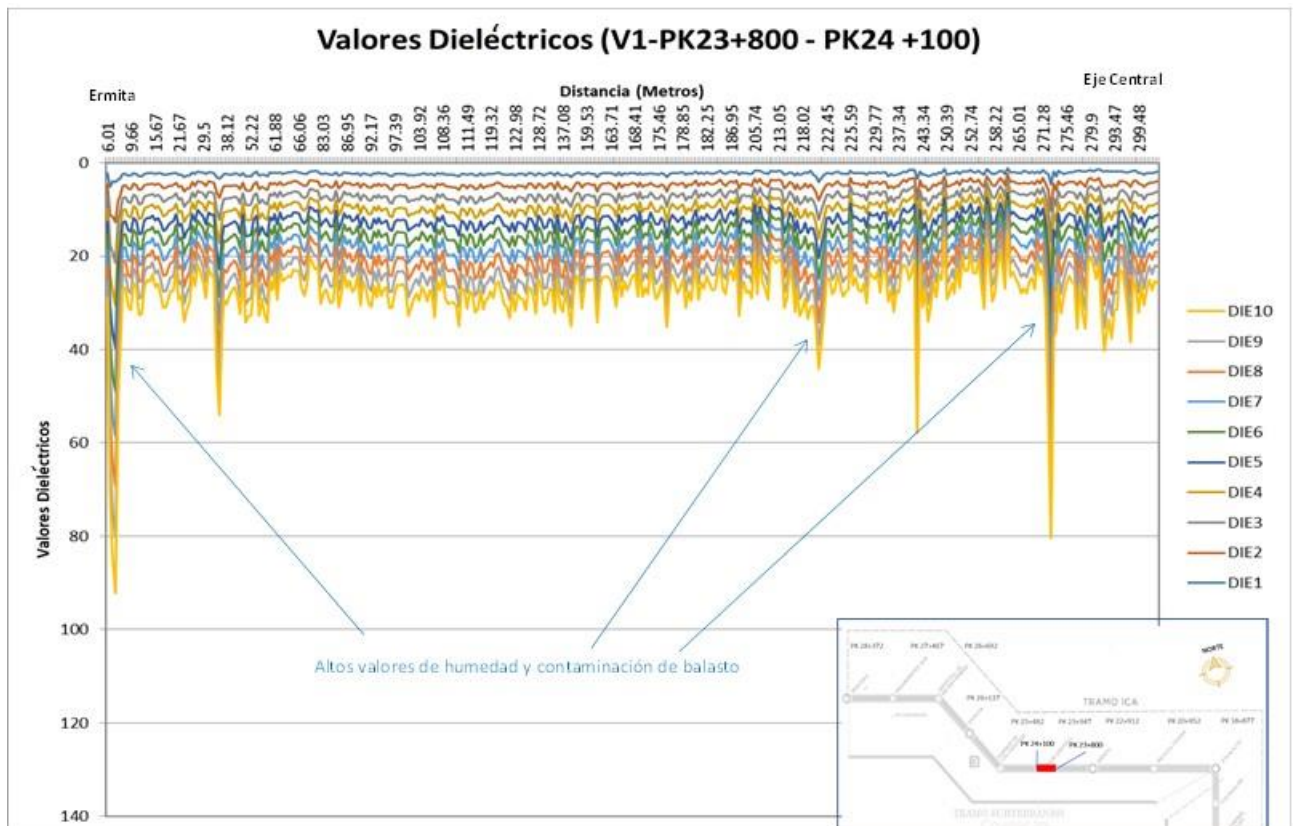
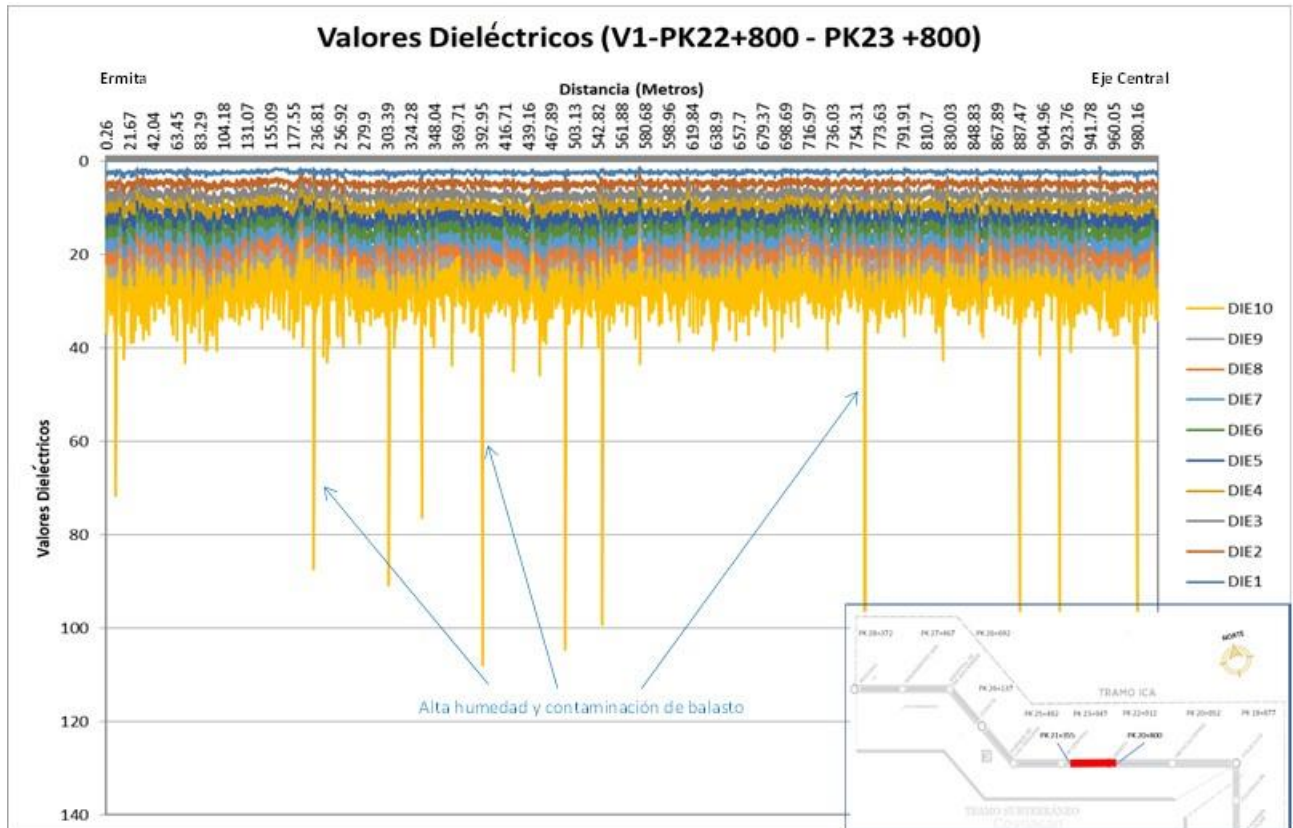
- El sistema de microondas adquiere datos listos para su análisis y uso.
- Examinamos las superficies de forma rápida.
- Las microondas pueden revelar otras condiciones que no son visibles en la superficie (valores dieléctricos).
- El sistema fue rápido y eficiente durante la adquisición de datos.
- El estudio se realizó de forma no destructiva.

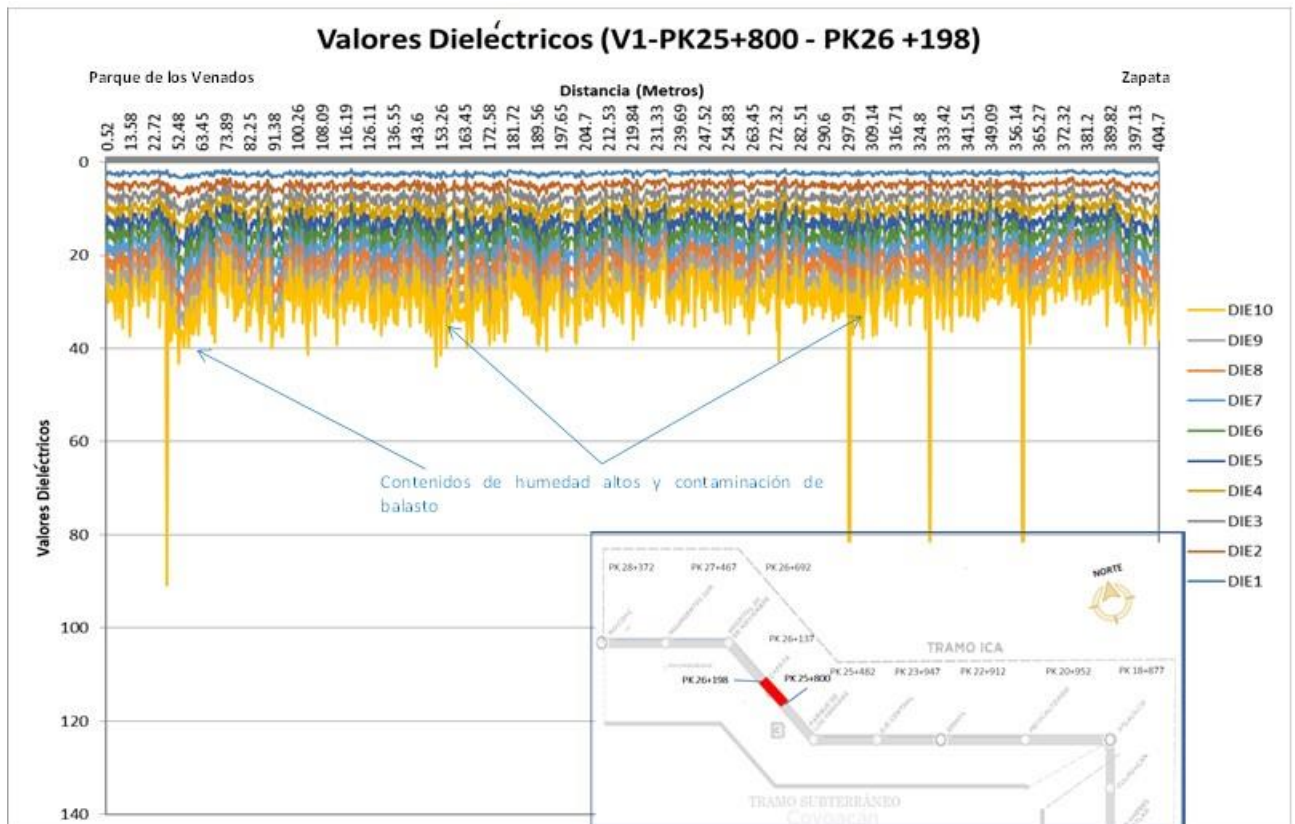
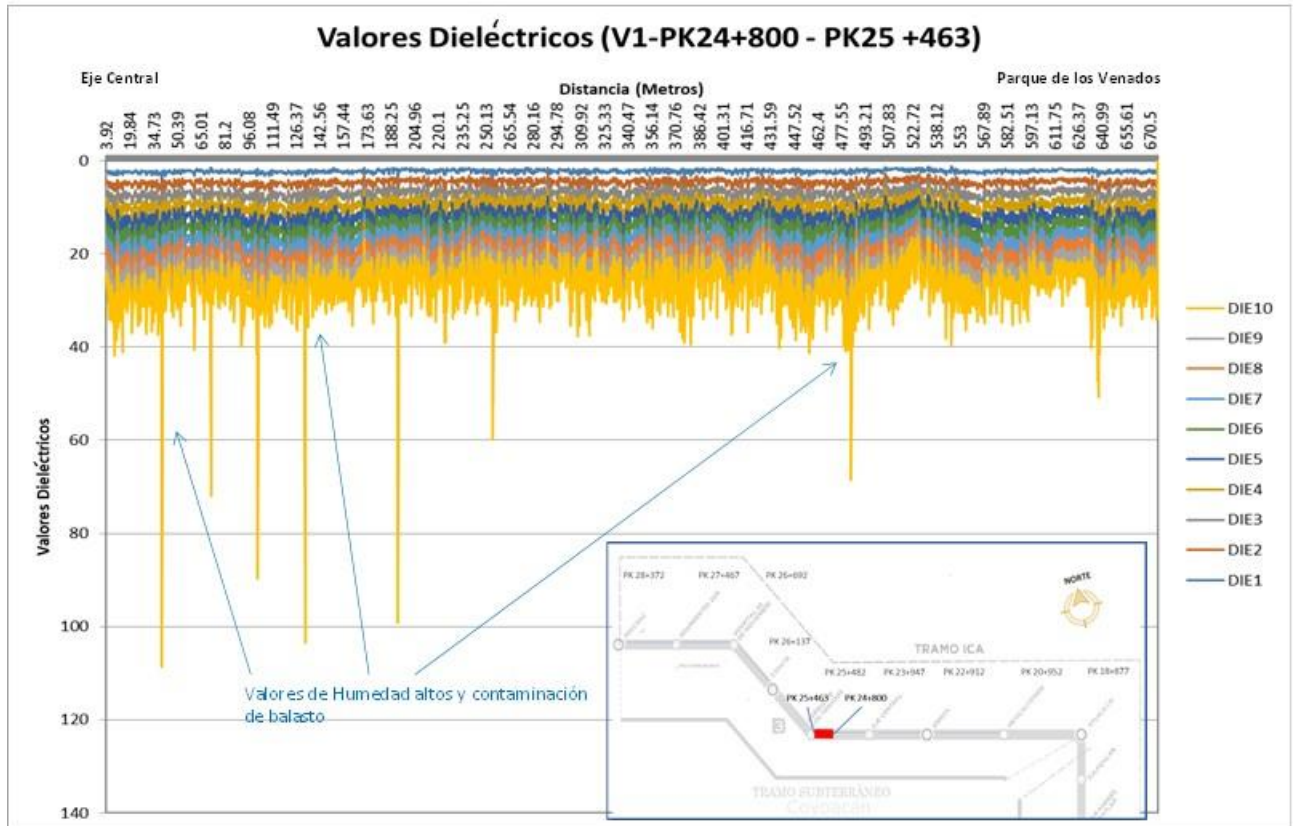
4.3 Conclusiones de los resultados del estudio de microondas:

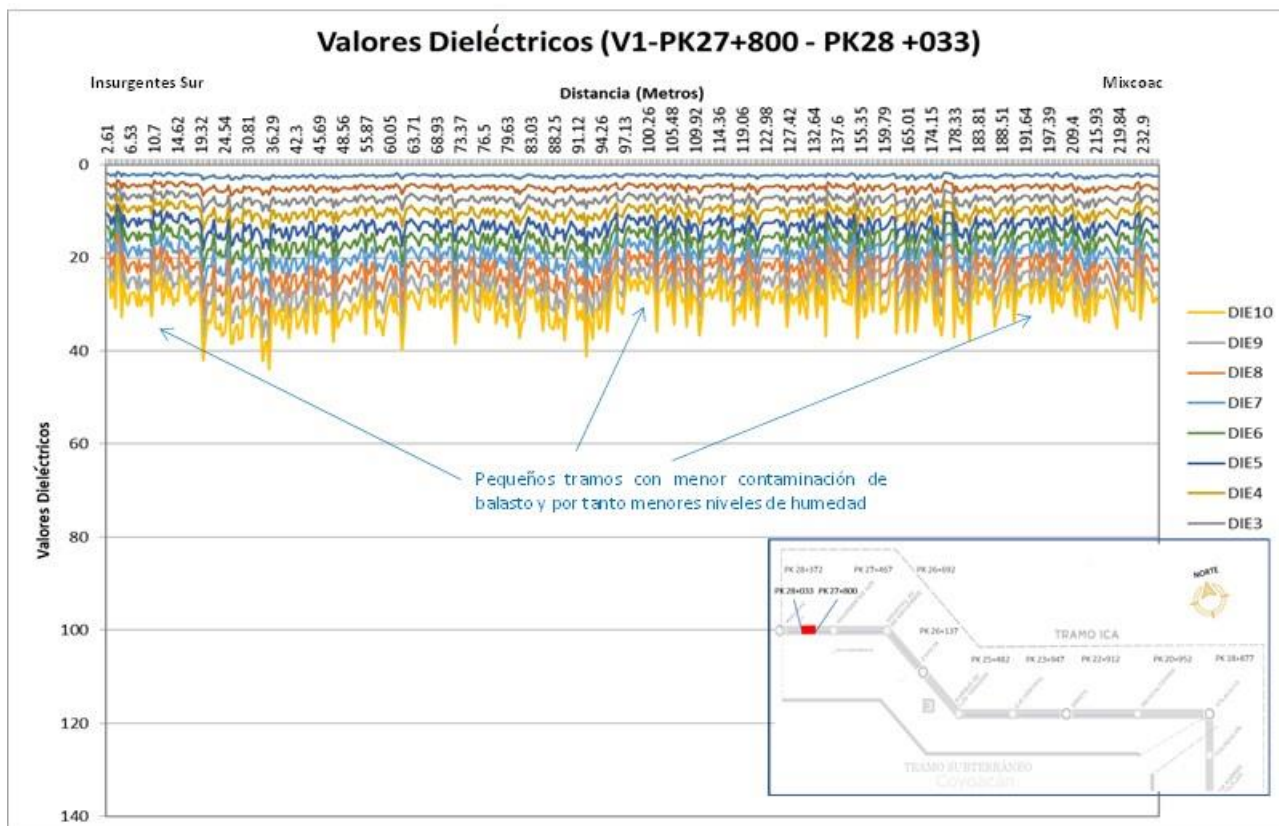
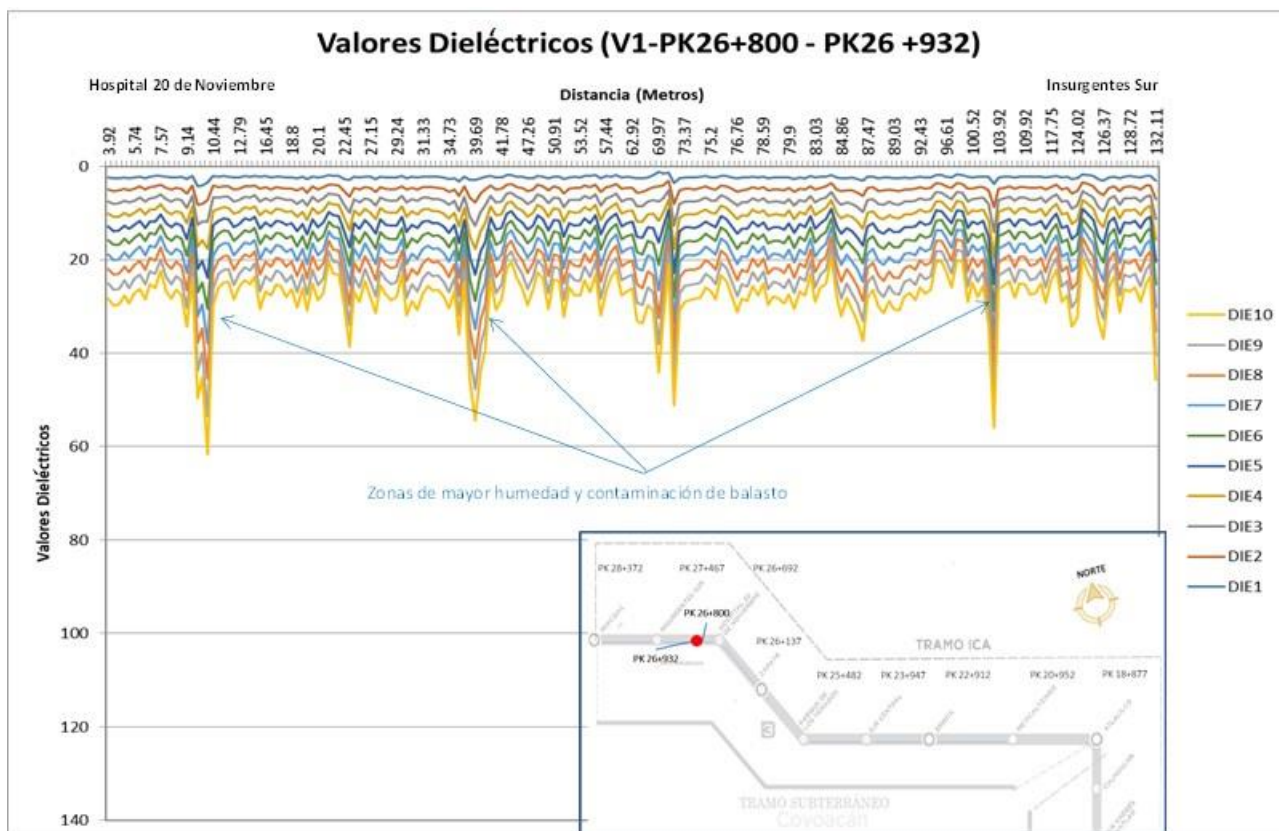
- Los **perfiles dieléctricos** nos muestran zonas con valores muy altos y que coinciden con los perfiles geoelectricos del estudio de resistividad eléctrica, lo que nos indica la presencia de humedad superficial que se encuentran debajo de la losa de concreto, afectando así la capacidad de carga del subsuelo.











5 SONDEOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

5.1 Fundamentos de los métodos utilizados

La exploración geoeléctrica ayuda a determinar la estratigrafía presente en el subsuelo, la ubicación aproximada del nivel freático y algunas de sus propiedades físicas como la naturaleza cohesiva o el fracturamiento. Este tipo de estudio se fundamenta en las propiedades eléctricas de los materiales que constituyen el subsuelo del sitio, el cual tiene un comportamiento determinado al paso de la corriente eléctrica.

Dicho comportamiento se manifiesta en líneas de campo o flujo eléctrico constante para materiales homogéneos. Por ello, cuando los valores y características de estos campos varían, indican un cambio de materiales o una discontinuidad dentro de un mismo depósito. En términos generales, el método asocia los altos valores resistivos aislados y sin relación al contexto geológico con discontinuidades del terreno.

La integración de información es muy importante. Las experiencias adquiridas al aplicar esta metodología en la exploración de cavernas, oquedades, rellenos, estratos permeables, zonas de debilidad o interferencias, indican que existe buena resolución debido a que se presenta un alto contraste resistivo entre las zonas de discontinuidad y el terreno. Las cavernas, fracturas, rellenos artificiales, estratos permeables, interferencias, etc. se caracterizan por presentar anomalías de alta resistividad, mientras que las zonas arcillosas o con altos contenidos de humedad corresponden con anomalías de baja resistividad.

La distribución de los valores de resistividad también es importante puesto que indica si la estratificación es homogénea o si se encuentran presentes estructuras que distorsionan el comportamiento esperado para una estratificación normal.

Los métodos eléctricos de resistividad consisten en inyectar corriente al terreno mediante dos electrodos que son clavados en el mismo, conocidos como A y B. El campo eléctrico así generado se monitorea a través de mediciones de diferencias de potencial ΔV entre otros dos electrodos, conocidos como M y N. El cociente de la corriente inyectada I entre la diferencia de potencial ΔV multiplicado por K , que es la constante geométrica del arreglo empleado, determina el valor del parámetro medido, conocido como resistividad aparente, en unidades ohm-m, y que físicamente representa la dificultad que encuentra la corriente eléctrica para fluir a través del material. Para determinar la continuidad lateral y a profundidad de los diferentes paquetes de suelos que constituyen los materiales de cobertura, se realiza la exploración a través de dispositivos asimétricos, como son los sondeos Wenner, Dipolo-Dipolo y Dipolo Gradiente, entre otros, consisten en colocar dos electrodos de corriente, A y B (dipolo de corriente).

El electrodo de corriente móvil se desplaza, alejándose del dipolo de potencial M N, en intervalos de la misma separación "a", por lo que las mediciones de corriente inyectada al terreno y diferencias de potencial resultantes se realizan para cada cambio de electrodos "n", mejor conocido como nivel de exploración. Se inyecta corriente directa (CD) al terreno mediante los electrodos A y B; el campo eléctrico así generado se monitorea a través de mediciones de diferencias de potencial ΔV entre los electrodos M y N.

Los valores de resistividad aparente se ubican espacialmente e interpretan cualitativamente en una pseudo-sección eléctrica, la cual se construye por la interpolación de los valores de resistividad aparente asignados en la dirección vertical que parte del centro del dipolo de potencial. Estos valores se interpolan y la sección así

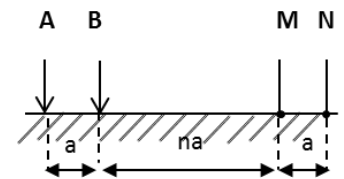
configurada se interpreta en función de la distribución espacial de las iso-líneas de resistividad aparente.

Rangos típicos de resistividad de los materiales:

Rocas/materiales típicos	Rango de resistividad en Ω m
Ígneas	100 - 1000000
Caliza	100 – 10000
Arenisca	100 – 1000
Arena y grava	600 - 10000
Arcilla	10 – 100
Arcilla húmeda no consolidada	20
Suelo	1 – 10
Agua dulce	3 – 10
Barrera de perforación hidráulica	4.5
Agua de mar	0.2 - 1
Cobre	0.0000002

5.2 Método Dipolo-Dipolo

Este arreglo consiste en ubicar en un extremo los electrodos de corriente A y B separados a una distancia “a”, mientras que en el extremo contrario a una distancia de “n” veces “a” de los primeros, se colocan los electrodos de potencial M y N separados entre sí por una distancia “a”. La imagen de la derecha representa el dispositivo Dipolo- Dipolo. Electrodos de corriente A y B, electrodos de potencial M y N (Modificada de Loke, 2010). La profundidad media de investigación para este arreglo depende tanto del espaciamiento “a” como del factor “n”, además obviamente de las características propias del terreno (Loke 2010). El factor geométrico de este dispositivo se expresa como: $K=\pi n \frac{n+1}{n+2} a$.



5.3 Tomografía de resistividad eléctrica

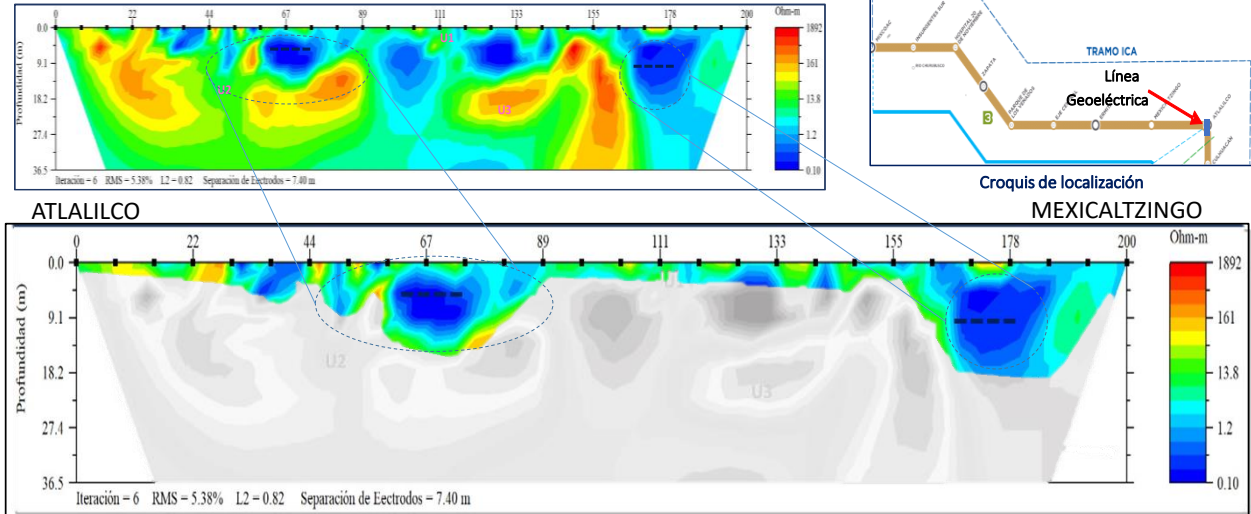
La tomografía eléctrica es una técnica que permite obtener imágenes bidimensionales de la distribución de la resistividad verdadera en el subsuelo. Dicha técnica fue diseñada combinando los métodos de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Calicata Eléctrica, y es ampliamente utilizada en diversos campos de investigación.

En cualquiera de los casos de aplicación de esta técnica se requiere que la información obtenida sea lo más confiable posible, y para ello es indispensable que la adquisición de datos en campo sea llevada a cabo con precisión y que el procesamiento de los datos e inversión se realicen con un mínimo margen de error.

La tomografía eléctrica se destaca, con respecto a los métodos eléctricos convencionales, por tener un proceso de adquisición de datos totalmente automatizado ya que se cuenta con software capaz de procesar eficazmente un gran volumen de información.

En general, para llevar a cabo estudios de este tipo se emplean 2 electrodos por los que entra y sale del terreno una corriente eléctrica (a estos electrodos se les denomina electrodos de corriente) y 2 electrodos entre los cuales se medirá una diferencia de voltaje (electrodos de potencial).

Línea Geoelectrica 1. Dirección "estación Atlalilco"

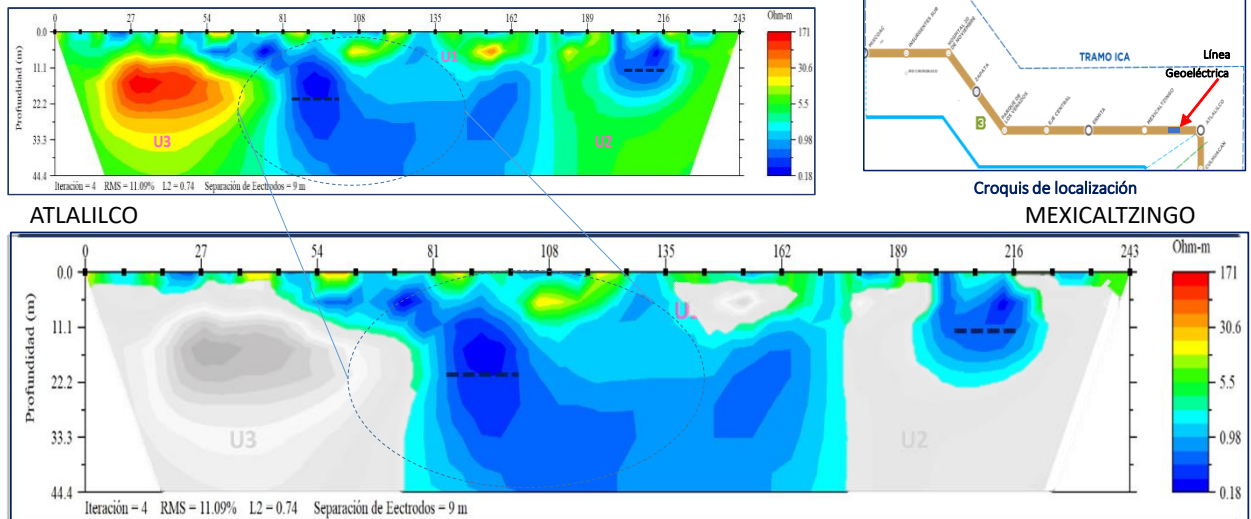


Perfil Geoelectrico 01.

SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 200 m	
Mayo del 2021	

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, en el tramo que esta sobre la estación Atlalilco obteniendo datos desde el punto kilométrico 18+780 hasta el 18+980 con una profundidad de 36 m, presentando humedad superficial hasta los 18 m.

Línea Geoelectrica 2. Dirección "tramo Atlalilco-Mexicaltzingo"

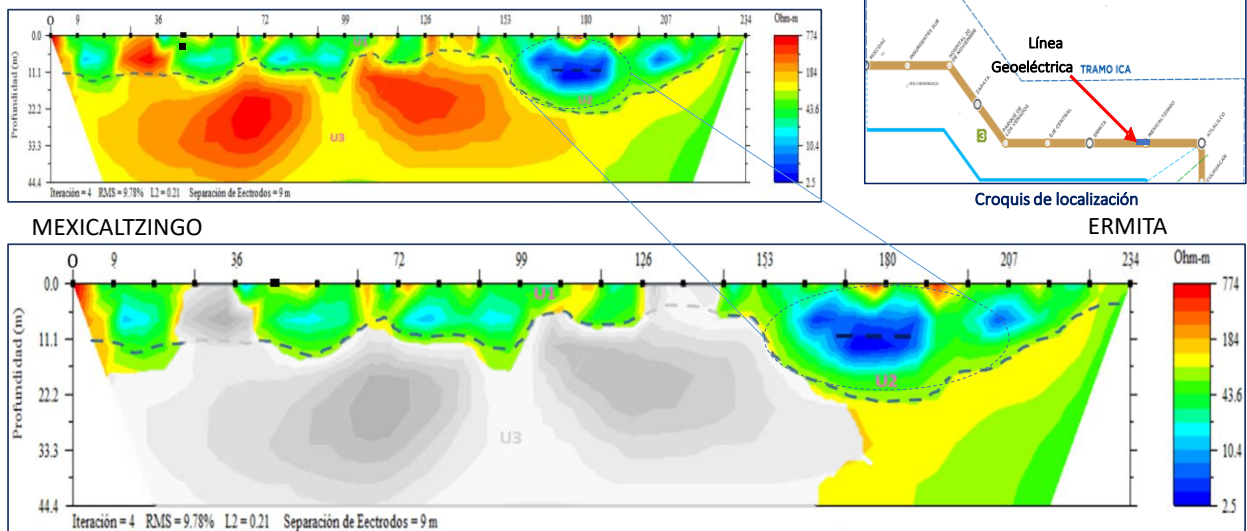


Perfil Geoelectrico 02.

SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 243 m	
Mayo del 2021	

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, en el tramo que va de la estación Atlalilco-Mexicaltzingo obteniendo datos desde el cadenamiento 20+190 hasta el cadenamiento 20+440 con una profundidad de 44 m, con presencia de humedad superficial.

Línea Geoelectrica 3. Dirección “estación Mexicaltzingo”

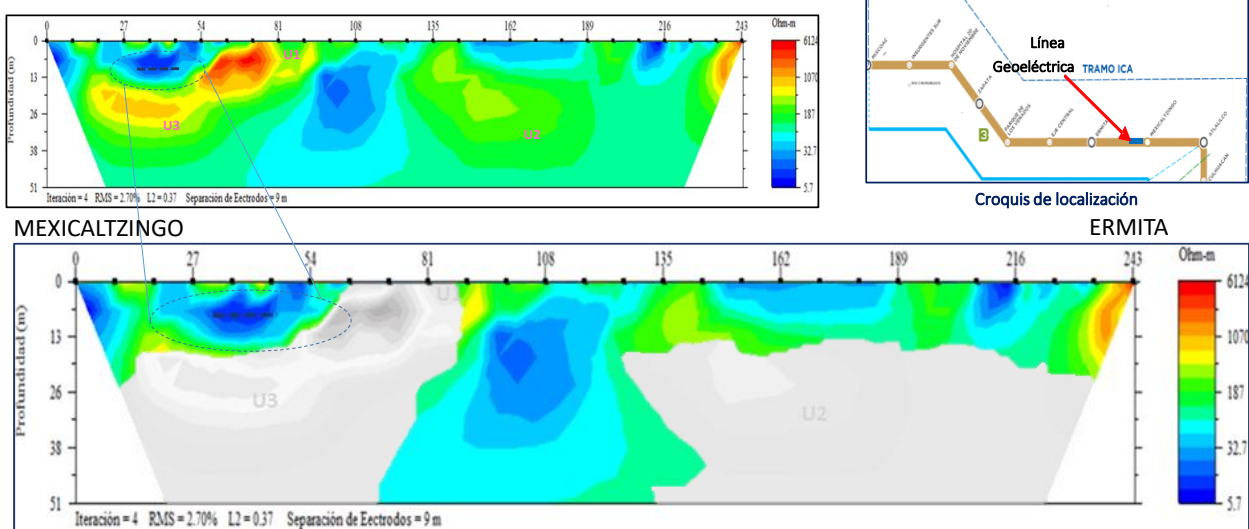


Perfil Geoelectrico 03.

SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
— Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
— Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
— Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 234 m Mayo del 2021	

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, sobre la estación Mexicaltzingo obteniendo datos desde el punto kilométrico 20+865 hasta el 21+100 con una profundidad de 44 m y presencia de humedad a partir de los 5 m.

Línea Geoelectrica 4. Dirección “tramo Mexicaltzingo-Ermita”

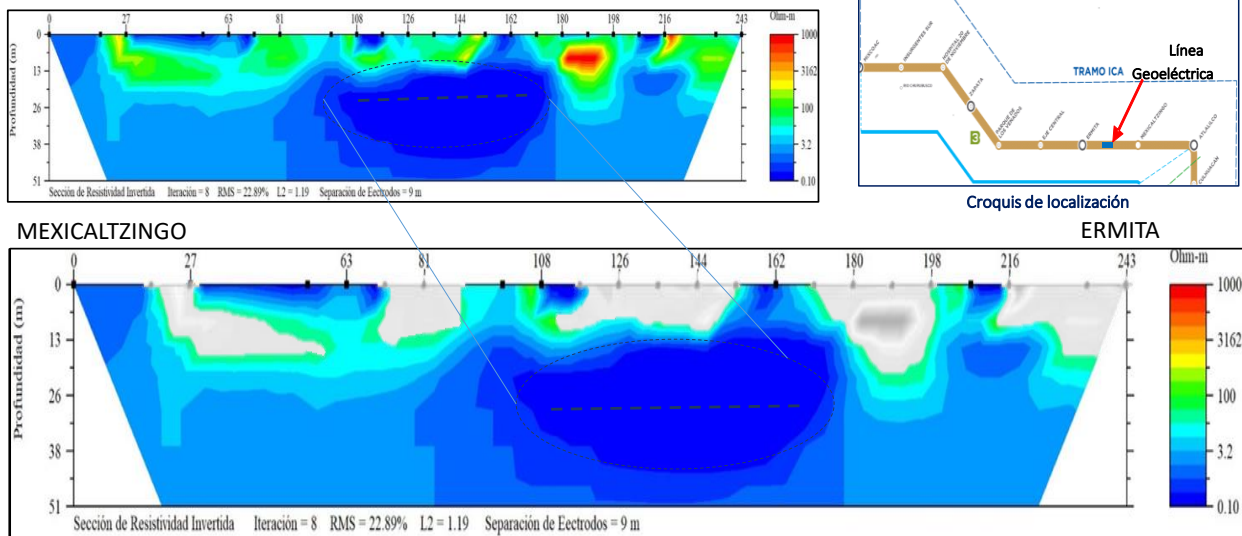


Perfil Geoelectrico 04.

SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
— Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
— Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
— Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 243 m Mayo del 2021	

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del metro, en el tramo que va de la estación Mexicaltzingo-Ermita obteniendo datos desde el cadenamiento 21+040 hasta el cadenamiento 21+280 con una profundidad de 50 m, con presencia de humedad superficial.

Línea Geoelectrica 5. Dirección "tramo Mexicaltzingo-Ermita"

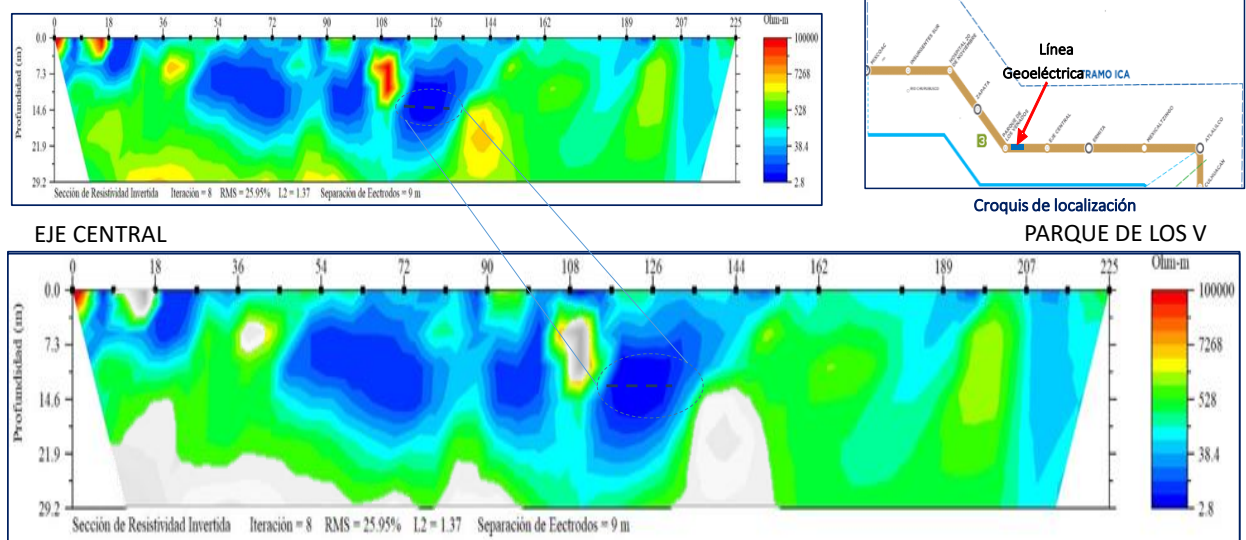


SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
— Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
— Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
— Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.

Longitud de la línea de estudio= 243 m Mayo del 2021

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del metro, en el tramo que va de la estación Mexicaltzingo-Ermita obteniendo datos desde el punto kilométrico 21+640 hasta el 21+800 con una profundidad de 50 m, con presencia de humedad a partir de los 10 m.

Línea Geoelectrica 7. Dirección "tramo Eje central-Parque de los venados"

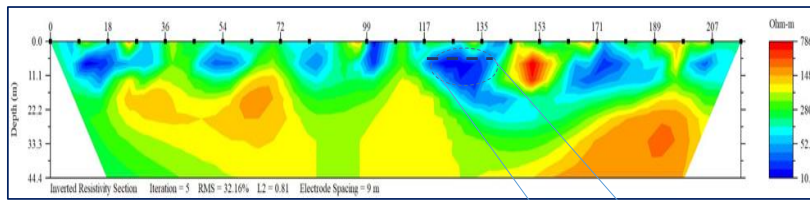


SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
— Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
— Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
— Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.

Longitud de la línea de estudio= 225m Mayo del 2021

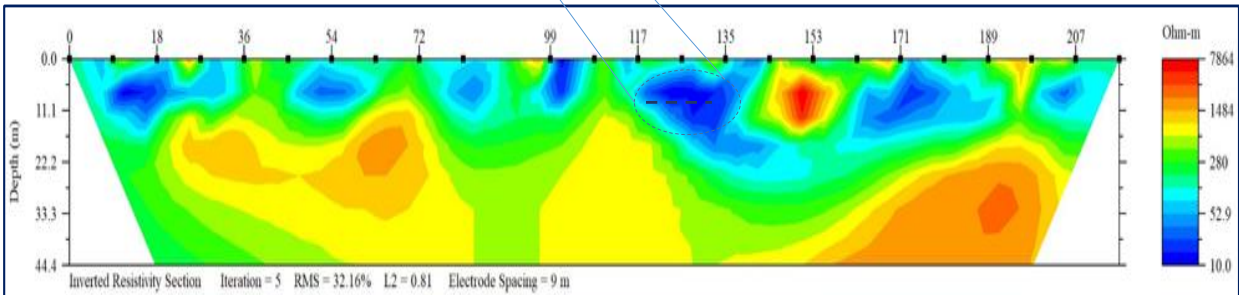
La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, en el tramo que va de la estación Eje central-Parque de los venados obteniendo datos desde el punto kilométrico 24+740 hasta el cadenamiento 24+980 con una profundidad de 44 m, con presencia de humedad superficial.

Línea Geoelectrica 6. Dirección "tramo Mexicaltzingo-Ermita"



Croquis de localización
ERMITA

MEXICALTZINGO

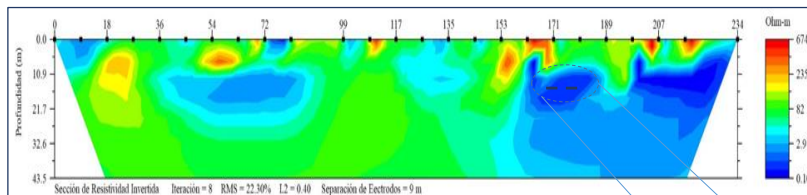


Perfil Geoelectrico 06.

SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
— Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
— Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
— Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 216m	Mayo del 2021

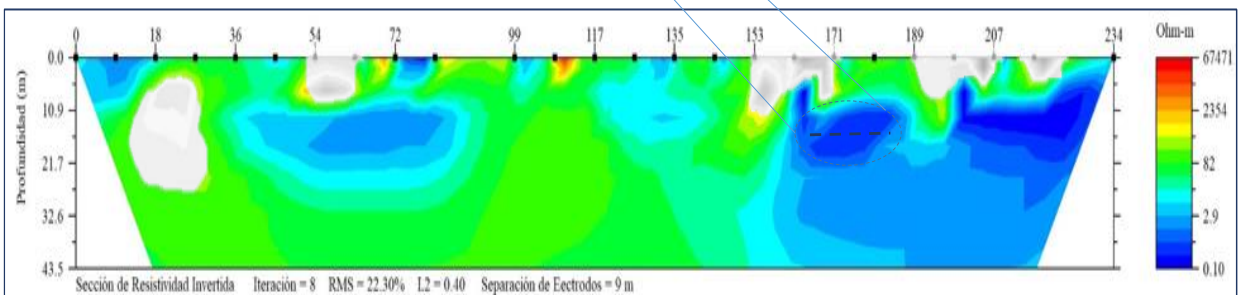
La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del metro, en el tramo que va de la estación Mexicaltzingo-Ermita obteniendo datos desde el punto kilométrico 21+900 hasta el 22+140 con una profundidad de 51 m y con presencia de humedad superficial.

Línea Geoelectrica 8. Dirección "Estación Zapata"



Croquis de localización
20 DE NOVIEMBRE

ZAPATA

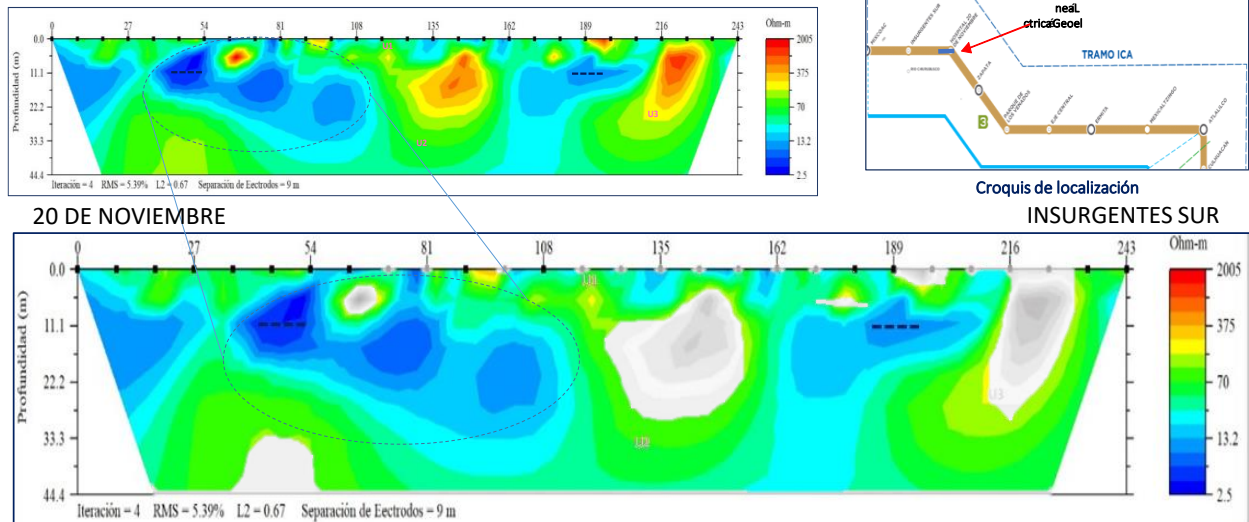


Perfil Geoelectrico 08.

SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
— Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
— Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
— Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 234 m	Mayo del 2021

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, en el tramo que va sobre la estación Zapata obteniendo datos desde el punto kilométrico 26+020 hasta el 26+260 con una profundidad de 43 m y presencia de humedad al centro del perfil.

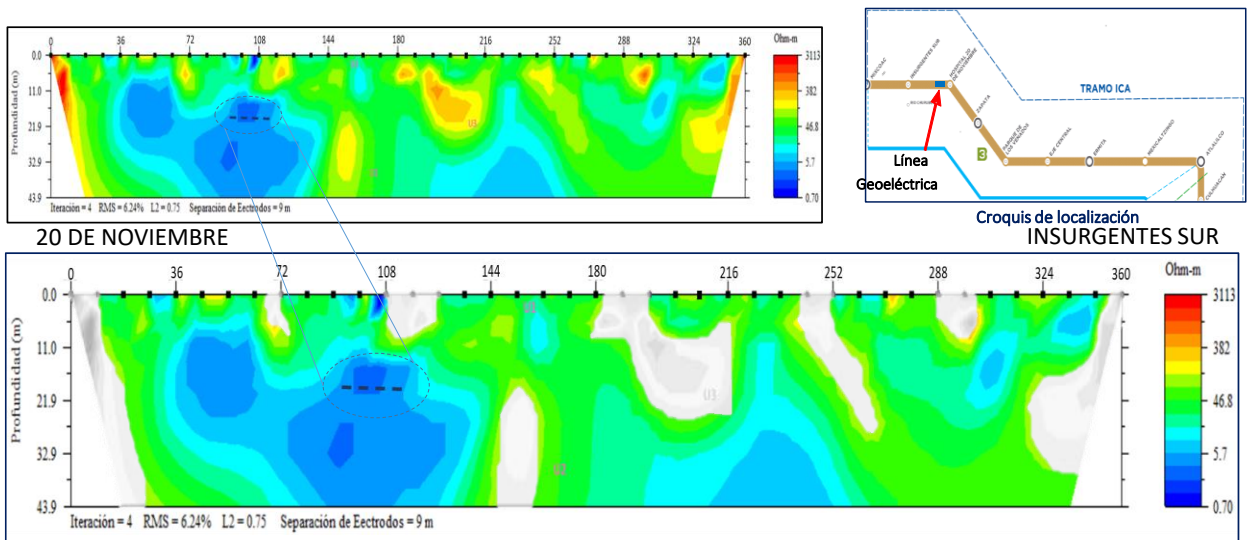
Línea Geoelectrica 9. Dirección "estación 20 de noviembre- insurgentes"



SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 243 m	
Mayo del 2021	

La línea geoelectrica se realizó al centro del túnel entre las dos vías del túnel, en el tramo que va entre la estación 20 de noviembre e insurgentes obteniendo datos desde el punto kilométrico 26+530 al 26+775 con una profundidad de 44 m y presencia de humedad superficial.

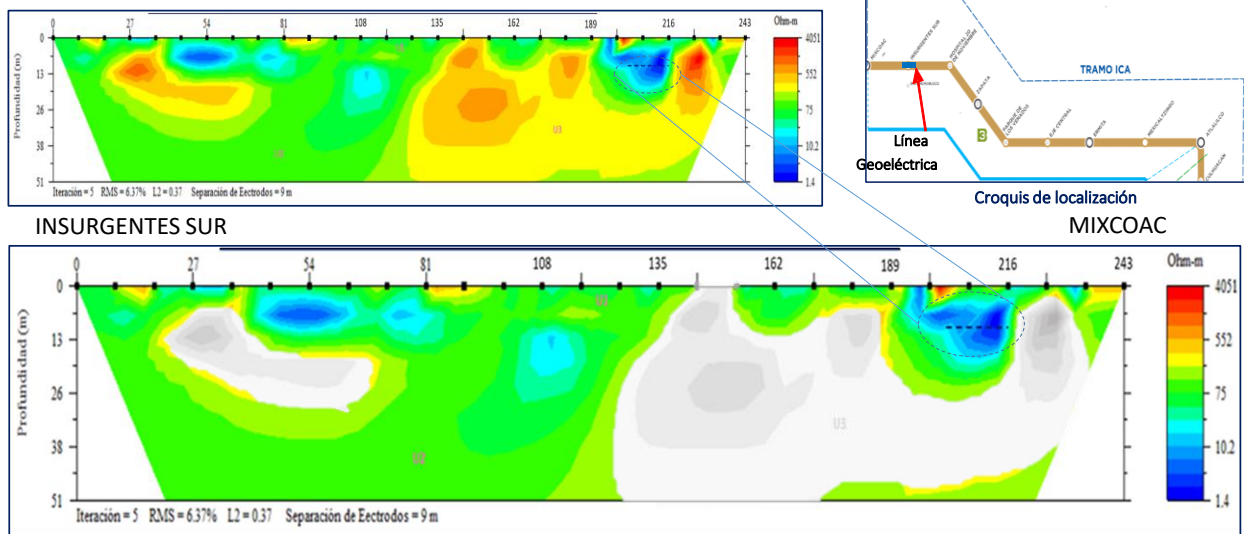
Línea Geoelectrica 10. Dirección "tramo 20 de noviembre-Insurgentes"



SIMBOLOGÍA	POSIBLE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
Zona de humedad	U1 Material de terraplén del túnel.
Posible zona de agrietamiento del suelo	U2 Materiales de características arcillosos.
Contacto entre capas	U3 Probables depósitos de arenas compactas y grava.
Longitud de la línea de estudio= 360 m	
Mayo del 2021	

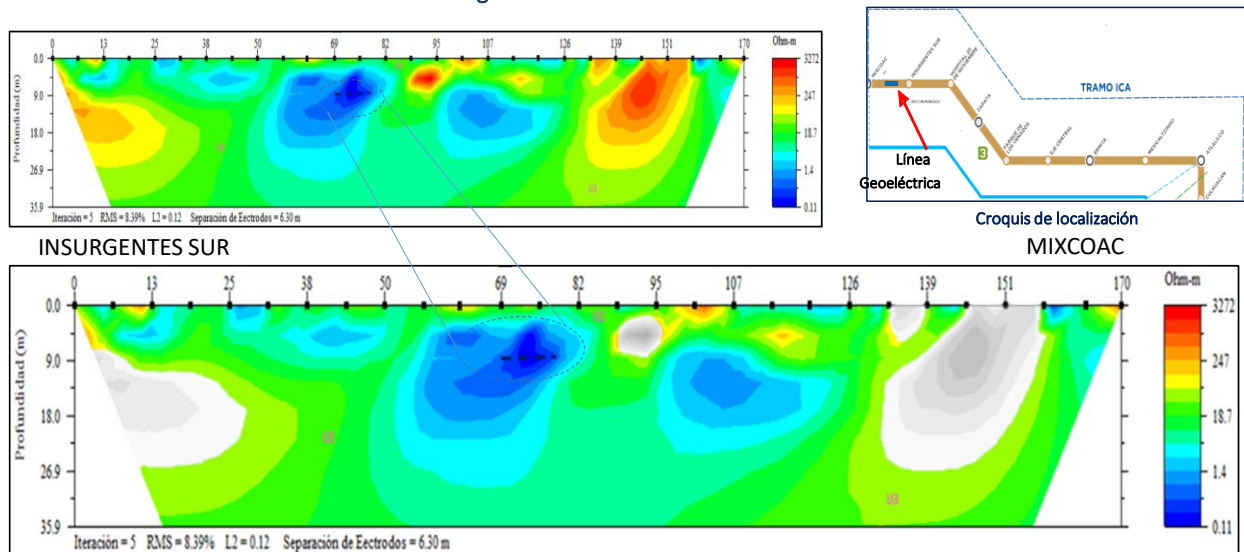
La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, en el tramo que va entre la estación 20 de noviembre-insurgentes obteniendo datos desde el punto kilométrico 26+775 al 27+140 con una profundidad de 44 m y presencia de humedad a partir de los 10 m.

Línea Geoelectrica 11. Dirección "Estación Insurgentes Sur"



Perfil Geoelectrico 11.

Línea Geoelectrica 12. Dirección "tramo Insurgentes-Mixcoac"



Perfil Geoelectrico 12.

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, en el tramo que va sobre la estación Insurgentes obteniendo datos desde el punto kilométrico 27+390 al 27+635 con una profundidad de 51 m y presencia de humedad a partir de los 6 m.

La línea geoelectrica se realizó al centro entre las dos vías del túnel, en el tramo entre la estación Insurgentes-Mixcoac obteniendo datos desde el punto kilométrico 27+710 al 27+880 con una profundidad de 36 m, con presencia de humedad a partir de los 5 m.

6 EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE BALASTO

6.1 Antecedentes

Derivado de la recurrente necesidad de mantenimiento de la estructura de vía en la línea 12 del Metro, en particular en la zona de túnel comprendida entre las estaciones de Mixcoac y Atlalilco, se desarrolla un análisis de los materiales que conforman las capas granulares de la citada vía.

La línea 12 del Metro es un sistema de rodadura férrea. En la Figura 1 se presenta el ícono de la línea citada.

Figura 1 Ícono Línea 12 del Metro de la CDMX



Fuente: metro.cdmx.gob.mx

La Línea tiene una longitud total de 23 kilómetros con 722 metros; sólo 20 kilómetros con 278 metros son los que se ponen en servicio y el resto es usado para realizar maniobras. Tiene un total de 20 estaciones, mostradas en la Tabla 1, de las cuales 4 son de correspondencia (una de ellas es Terminal), 15 de paso y 1 terminal.

Tabla 1. Estaciones del Metro en la Línea 12.

N.º de Estación	Nombre	Ícono	N.º de Estación	Nombre	Ícono
1	Mixcoac		11	San Andrés Tomatlán	
2	Insurgentes Sur		12	Lomas Estrella	
3	Hospital 20 de Noviembre		13	Calle 11	

4	Zapata		14	Periférico Oriente	
5	Parque de los venados		15	Tezonco	
6	Eje Central		16	Olivos	
7	Ermita		17	Nopalera	
8	Mexicaltzingo		18	Zapotitlán	
9	Atlalilco		19	Tlaltenco	
10	Culhuacán		20	Tláhuac	

6.2 Zona de estudio

La zona de estudio comprende entre la estación Mixcoac y metros delante de la estación Atlalilco como se muestra en la Figura 2, esta zona de estudio se encuentra en la delegación Benito Juárez de la CDMX.

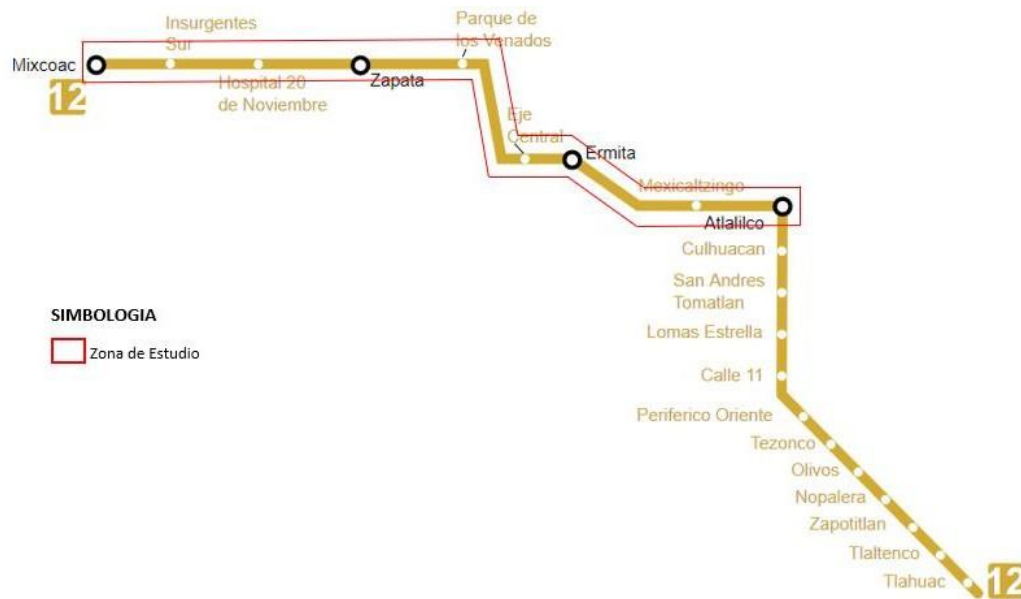


Figura 2 Zona de Estudio Línea 12

6.3 Fisiografía

El territorio donde se ubica presenta en su totalidad una superficie plana generalmente constituida por suelos de origen lacustre (aluvial) con una ligera pendiente hacia el oeste y sur oeste de la zona, la mayor altura se encuentra ubicada a 2280 metros sobre el nivel del mar y la parte más baja aproximadamente a los 2249 metros. Antiguamente en la zona de pendiente fluían los ríos La Piedad, Mixcoac y Puerta Grande (Barranca del Muerto); en la actualidad el cauce de los ríos está entubado, encausando sus aguas a través del viaducto Miguel Alemán y Río Churubusco respectivamente. Figura 3.



Figura 3 Fisiografía

6.4 Geología

Desde el punto de vista estratigráfico en la CDMX existen 3 tipos de zonas:

La Zona I de lomas, conformada por gravas, arenas, bloques, basaltos y piroclastos; Zona II de transición conformada por arcilla, arena y grava; y la zona III Lacustre conformada por tobas, limos, arcillas y arenas.

La zona de estudio se encuentra ubicada principalmente en la zona III, integrada por depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla.

Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros, los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser de 50 metros.

Las unidades litológicas de la zona datan de la era (C) Cenozoico y del periodo (Q) Cuaternario, entre la roca o suelo predomina el suelo con una porción aluvial del 5.26% lacustre del 94.74% de toda la superficie. Figura 4.

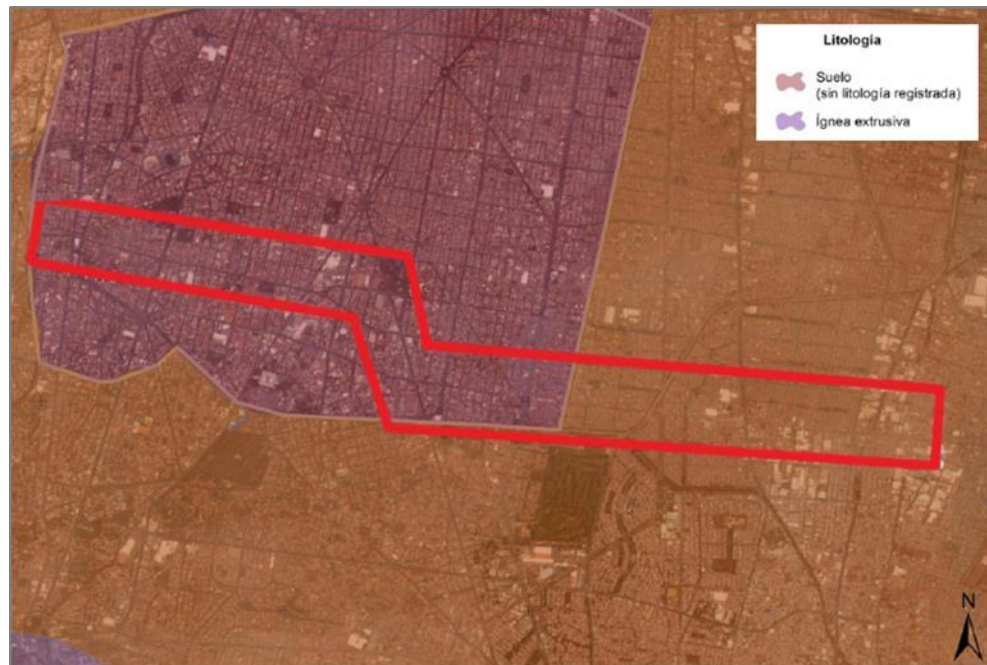


Figura 4. Geología.

6.5 Geomorfología

La zona sólo cuenta con una unidad geomorfológica; el origen del relieve es exógeno acumulativo (lacustre) y se encuentra a una altitud aproximada de 2240 metros sobre el nivel del mar, además presenta pendientes que van de los 1° a 3°. Está compuesta principalmente de sedimentos provenientes de las elevaciones más cercanas (Sierra de las Cruces) y que a lo largo del tiempo geológico se han ido depositando sobre rocas volcánicas y sedimentarias. Es una planicie de dimensión considerable de poca inclinación con depósitos exógenos lacustres, su morfología es horizontal ya que depende principalmente de antiguos ambientes lacustres, los sedimentos pueden ser variados y de distintos tamaños (arenas, limos y arcillas), la superficie que ocupa la planicie lacustre es de 27 km². Figura 5.

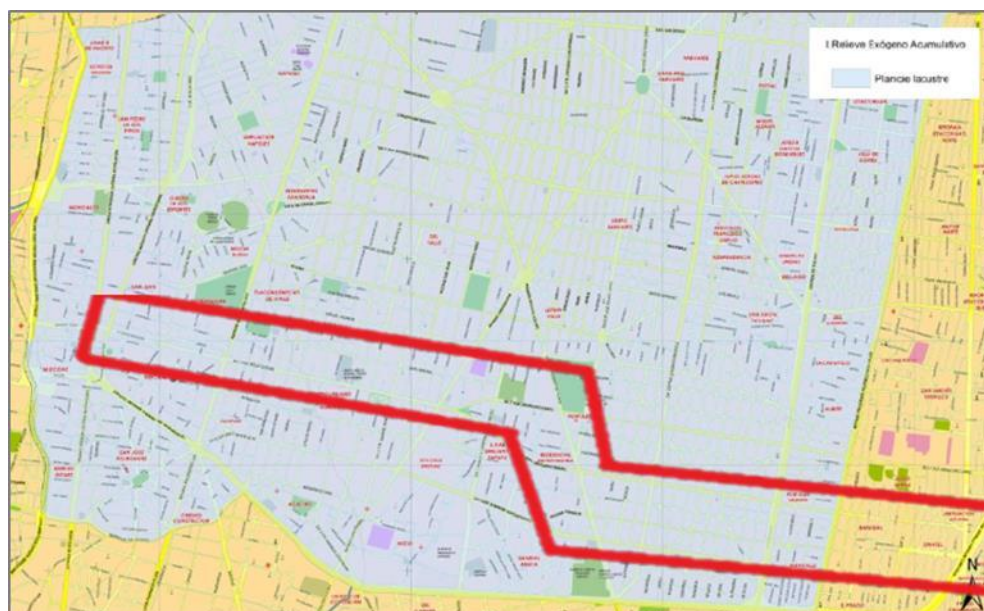


Figura 5. Geomorfología.

6.6 Edafología

Los suelos FEOZEMS se caracterizan por presentar un horizonte superficial, por lo general mayor de 25 cm de espesor enriqueciendo con materia orgánica (mayor de 1%) y buen contenido de nutrientes.

Feozem Háplico. Cubre el 70% de la zona, su origen se fundamenta en los procesos biológicos que lo originan, son de textura media, con estructura granular en la parte más superficial y bloques subangulares en la siguiente capa que en conjunto con la porosidad, confieren al suelo buenas condiciones aeróbicas y por lo tanto un buen drenaje interno, lo que permite la penetración de las raíces y la infiltración del exceso de agua, por lo que tiene buena capacidad de retención de humedad aprovechable.

Feozem (háplico) Gléyico: cubre el 30% de la zona con un subsuelo de varios colores, esta propiedad es posible causada por la inundación del suelo en algunas partes durante la época de lluvias. Figura 6.

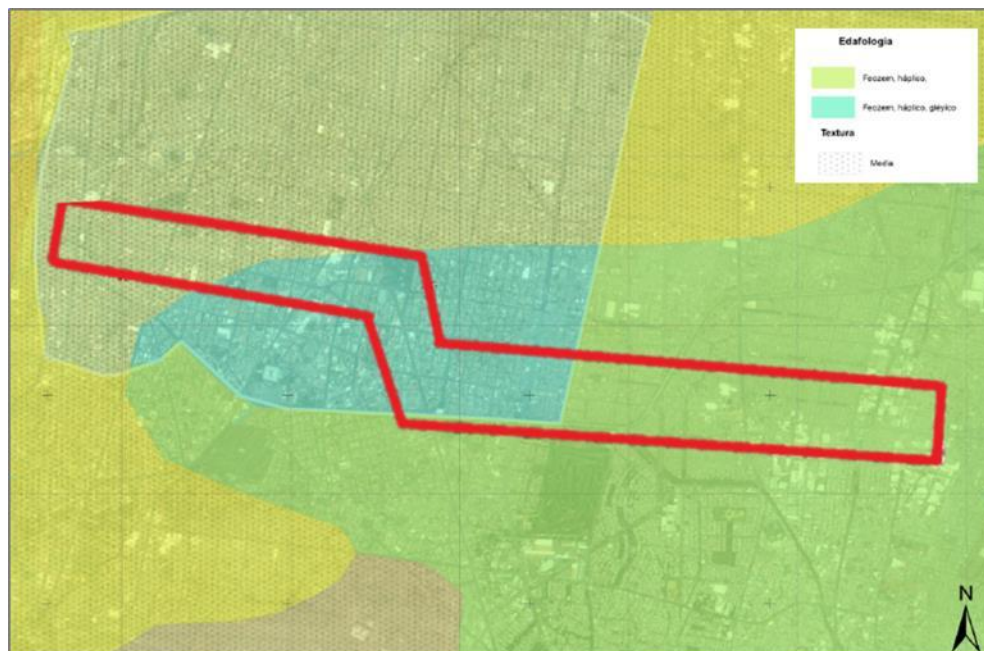


Figura 6. Edafología.

6.7 Hidrografía

Los únicos cursos de agua que sobreviven en la zona corren entre barrancas que han sido ocupadas por los asentamientos humanos, lo que pone en peligro tanto a los habitantes como a los ecosistemas asociados. El crecimiento de la población y la contaminación han generado que se pierdan cauces y ríos, siendo estos mismos utilizados como receptores de aguas residuales.

Las corrientes perennes que llevan flujo todo el año, los ríos La Piedad y Churubusco, se encuentran entubados en su totalidad y forman parte de la red primaria de drenaje.

Se localizan algunas zonas susceptibles de inundación, principalmente por falta de mantenimiento en las redes de drenaje y en algunas zonas específicas. Figura 7.



Figura 7. Hidrografía.

6.8 Exploración geotécnica

Se realizaron 9 pozos para la inspección visual del material que conforma las capas granulares de la vía, de tal manera que se cuenta con un sondeo por cada inter-estación. Los sitios se definieron considerando singularidades observadas en el trayecto de la vía, tales como humedades en el material o fugas de agua en la estructura del túnel, los sondeos se realizaron entre las dos vías como se aprecia en la Figura 8.



Figura 8. Localización de sondeos en la sección transversal del túnel.

A continuación, se presenta la relación de sondeos realizados con algunas observaciones de cada sitio. Los sondeos realizados dentro en la Línea 12 se ubicaron dentro de los tramos previamente identificados. Se realizó una inspección visual en el sitio para identificar las zonas en las que se presentaban singularidades en la estructura, infiltraciones o fugas de agua, que pudieran perjudicar la superficie y de esta forma ubicar en puntos definidos visualmente como críticos la ubicación de los sondeos. En la Figura 9, se muestran algunas infiltraciones de agua de la estructura de la línea encontradas durante la inspección visual.



Figura 9. Filtraciones presentes en las paredes del túnel.

Se realizaron un total de nueve (9) sondeos consistentes en pozos a cielo abierto, de tal manera que se cuenta con un sondeo por cada inter-estación, para profundidades máximas entre 50 cm y 70 cm.

Cadenamiento 28+060. Estructura de pilotes. Inter-estación: Mixcoac-Insurgentes Sur.

De 0 a 0.37 m de profundidad, se presenta basalto; a partir de una profundidad de 0.37 m y hasta el fondo de la exploración, el material presenta humedad.

El sondeo se realizó hasta una profundidad de 65 cm, en donde se presentó un geotextil en el fondo, que coincide con el que se observa en los bordes de la vía.



Figura 10. Sondeo del cadenamiento 28+060, inter-estación Mixcoac-Insurgentes Sur.

Cadenamiento 27+340. Estructura Circular. Inter-estación: Insurgentes Sur-20 Nov Mixcoac- Insurgentes Sur.

De 0 m a 0.31 m de profundidad, se presenta basalto; después de los 0.31 m de profundidad el balasto presenta finos. De 0.31m a 0.47m el balasto presenta material fino. De 0.47 m a 0.71 m el balasto presenta material fino y con presencia de humedad.

El pozo se realizó hasta una profundidad de 71 cm, sin presentarse el geotextil encontrado en otros sondeos ni se aprecia cambio de estrato.



Figura 11. Sondeo del cadenamiento 27+340, inter-estación Insurgentes Sur-20 Noviembre.

Cadenamiento 26+320. Estructura Circular. Inter-estación: 20 Nov-Zapata

De 0 m a 0.31 m de profundidad, se presenta balasto; después de los 0.31 m a 0.56 m de profundidad el balasto con presencia de finos.

El pozo se realizó a una profundidad de 0.56 m, profundidad para la cual presentó un geotextil en el fondo, que coincide con el que se observa en los bordes de la vía.



Figura 12. Sondeo correspondiente al cadenamiento 26+320, inter-estación 20 de Noviembre - Zapata.

Cadenamiento 25+470. Estructura Circular. Inter-estación: Zapata-Parque de los Venados

Se realizó un pozo a 63 cm de profundidad, el material observado corresponde a balasto homogéneo, sin presencia de fino; el pozo se realizó a un lado de la presencia de una gotera del techo del túnel.



Figura 13. Sondeo correspondiente al cadenamiento 25+470, inter-estación Zapata-P. Venados.

Cadenamiento 24+740. Estructura Circular. Inter-estación: P. Venados–Eje Central

Desde la superficie y hasta 0.48 m de profundidad, se observa un balasto con material fino. De 0.48 m a 0.56 m se observa basalto sin finos; a partir de 0.48m y hasta 0.65 m se aprecia balasto con finos. El pozo se realizó hasta una profundidad de 0.72 m y no se encontró material en la parte inferior que correspondiera a otra capa.



Figura 14. Sondeo correspondiente al cadenamiento 24+740, inter-estación Parque de los Venados–Eje Central.

Cadenamiento 23+597. Estructura Circular. Inter-estación: Eje Central-Ermita

Desde la superficie y hasta 0.25 m, presencia de balasto; de 0.25 m a 0.45 m balasto homogéneo; de 0.45 m a 0.54 m balasto homogéneo. El pozo se realizó hasta una profundidad de 0.54 m.



Figura 15. Sondeo correspondiente al cadenamiento 23+597, inter-estación Eje Central-Ermita.

Cadenamiento 21+030. Estructura Circular. Inter-estación: Ermita-Mexicaltzingo

De 0 m a 0.35 m presencia de balasto; de 0.35 m a 0.59 m basalto con finos.

El sondeo se realizó hasta una profundidad de 0.59 m, en la cual presentó un geotextil en el fondo, mismo que coincide con el observado en los bordes de la vía.



Figura 16. Fotografías del pozo del cadenamiento 21+030, inter-estación Ermita-Mexicaltzingo.

Cadenamiento 20+345. Zona de transición. Inter-estación: Mexicaltzingo-Atlalilco.

Desde la superficie y hasta 0.20 m de profundidad, se presenta balasto; desde 0.20 m a 0.44 m se presenta el balasto con abundantes finos; de 0.44 m a 0.48m se aprecia un material húmedo con granulometría menor a la que corresponde a un balasto con presencia de finos.

El sondeo se realizó hasta una profundidad de 0.55 m, en los cuales no se observaron cambios en el material encontrado después de los 20 cm.



Figura 17. Sondeo realizado en el cadenamiento 20+345, inter-estación Mexicaltzingo-Atlalilco.

Cadenamiento 18+490. Estructura de cajón. Inter-estación: Atlalilco-Portal Oriente

De 0 m a 0.33 m se observa balasto; de 0.33 m a 0.46 m se observa balasto con presencia de humedad. El sondeo se realizó hasta una profundidad de 0.50 m, en la cual se evidenció un geotextil en el fondo, que coincide con el que se observa en los bordes de la vía.



Figura 18. Sondeo realizado en el cadenamiento 20+345, inter-estación Mexicaltzingo-Atlalilco.

6.9 Ensayes

Se realizaron una serie de ensayos con deflectómetro de impacto ligero, LWD por sus siglas en inglés, para las ubicaciones mostradas en la Tabla 2; asimismo, se pueden apreciar los módulos determinados para cada sitio. En la Figura 19 se presenta gráficamente los resultados relacionados con el cadenamiento del sitio en donde se realizaron las determinaciones del módulo E_{LWD} .

Tabla 2. Módulos de determinados con LWD.

Inter-Estaciones	Cadenamiento	Módulo Promedio (Mpa)
Mixcoac - Insurgentes Sur	28+060	60.45
Mixcoac - Insurgentes Sur	27+780	48.00
Mixcoac - Insurgentes Sur	27+739	46.37
Mixcoac - Insurgentes Sur	27+715	48.92
Mixcoac - Insurgentes Sur	27+660	62.61
Mixcoac - Insurgentes Sur	27+550	61.63
Insurgentes Sur - 20 de Noviembre	27+340	61.23
Insurgentes Sur - 20 de Noviembre	27+185	81.30
20 de Noviembre-Zapata	26+320	70.43
Zapata - Parque de los Venados	25+470	50.05
Parque de los Venados - Eje Central	24+740	65.34
Eje Central - Ermita	23+597	50.45
Ermita - Mexicaltzingo	22+470	49.33
Ermita - Mexicaltzingo	21+030	50.50
Mexicaltzingo - Atlalilco	20+345	44.42
Atlalilco - Portal Oriente	18+490	36.95

Promedio	55.50
Desvest	11.25
C.V. (%)	20.3%

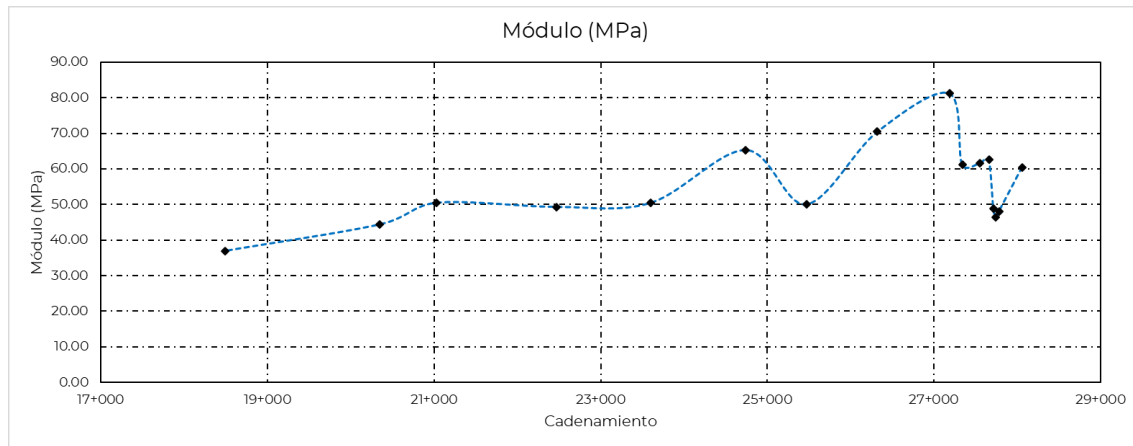


Figura 19. Módulos determinados con LWD contra Cadenamiento.

El deflectómetro de impacto ligero (LWD) permite un ensayo dinámico de carga de placa desarrollado para la determinación del módulo (E_{LWD}) de suelos y materiales de relleno no ligados.

El ensayo consiste en someter al suelo a una carga de impulso aplicada a través de una placa de acero en forma de disco. El mecanismo de carga consiste en una masa que, una vez liberada, cae a lo largo de una guía hasta que impacta con un sistema de amortiguación. La unidad del amortiguamiento está unida a la placa, que a su vez está en contacto con el suelo. Una vez que la masa impacta a la unidad del amortiguamiento, el LWD y el suelo se mueven juntos en un modo acoplado.

El sistema LWD-suelo es análogo a un sistema de masa-resorte-amortiguador de dos grados de libertad. Un sensor de velocidad (geófono) registra la velocidad o la aceleración de los movimientos de la placa o del suelo en función de la posición del sensor. La posición y el tipo del sensor de desviación son diferentes en los distintos dispositivos LWD. Una vez finalizado el ensayo, se calcula el desplazamiento máximo mediante integraciones sencillas de las velocidades. El historial de carga y la carga máxima se determinan mediante una celda de carga.

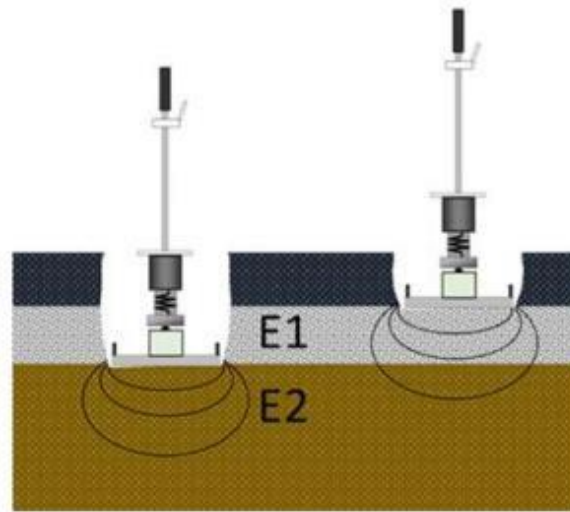


Figura 21. Mediciones con LWD en sistemas de 1 y de 2 capas.

Los LWD se utilizan generalmente para determinar el módulo de las capas de la subrasante o de la base. En otras palabras, se utilizan para evaluar sistemas de una o dos capas, como se muestra en la Figura 21. El módulo se calcula mediante la ecuación de Boussinesq.

$$E = \frac{2k_s(1 - \nu^2)}{Ar_0}$$

En donde:

$$k_s = \left| \frac{F_{Pico}}{W_{Pico}} \right|$$

A = Factor de distribución de esfuerzos

ν = relación de Poisson

r_0 = Radio del plato de carga

Esta ecuación supone que el medio de ensayo es un continuo semi-infinito linealmente elástico, isótropo y homogéneo. Se asumen dos de los parámetros necesarios para determinar el módulo, el factor de forma para la distribución de la tensión de contacto entre la placa y el suelo (A) y la relación de Poisson (ν).

6.9.1 Desgaste Los Ángeles

Se realizaron ensayos de desgaste Los Ángeles para materiales representativos del balasto muestreado en el sitio. En la Tabla 3 se presentan los resultados de tres ensayos realizados. De igual forma, en las Figuras 22 a 24 se pueden apreciar los materiales antes y después del ensaye.

Tabla 3 Resultados de desgaste Los Ángeles

Muestra	IS20210602-08	IS20210602-06	IS20210602-07
Procedencia	23+600	18+490	26+320
Profundidad (m)	0.45 a 0.54	0 a 0.33	0 a 0.31
Desgaste Los Ángeles	13.00%	13.00%	18.00%



Figura 22 Material antes del ensaye de desgaste Los Ángeles



Figura 23 Material después del ensaye de desgaste Los Ángeles.



Figura 24 Agregado grueso después del ensaye de desgaste Los Ángeles.

6.9.2 Densidad y absorción

Para las mismas muestras a las cuales se les determinó la resistencia al desgaste Los Ángeles, se obtuvo la densidad y absorción correspondiente. En la Tabla 4 se presentan los resultados de dichos ensayos. Las Figuras 25 y 26, muestran procesos del ensayo de densidad y absorción correspondientes.

Tabla 4 Resultados del ensaye de Densidad y absorción.

Muestra	IS20210602-08	IS20210602-06	IS20210602-07
Procedencia	23+600	18+490	26+320
Profundidad (m)	0.54	0 a 0.33	0 a 0.31
Absorción %	0.91%	0.85%	0.86%
Densidad seca	2.64	2.66	2.67
Densidad SSS	2.67	2.68	2.70
Densidad aparente	2.71	2.72	2.74



Figura 25 Preparación de muestras para densidad y absorción de las muestras de balasto.



Figura 26 Determinación de densidad y absorción de las muestras de balasto.

6.9.3 Análisis granulométrico.

Se realizaron ensayos granulométricos sobre muestras representativas del material muestreado de las capas granulares que forman parte de la estructura de la vía.

Dichos ensayos corresponden a materiales que presentaban diferentes características granulométricas detectadas a simple vista al momento de realizar el sondeo con base en pozos a cielo abierto.

En las Figuras 27 a 32 se pueden apreciar las curvas granulométricas comparadas contra la zona granulométrica definida como 24, de acuerdo a lo establecido para este tipo de elemento.

	COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES
--	---

Folio No. 1,536**IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS**

Fecha: 2021-06-02 Ensayo No. 1

Nombre proyecto/servicio: Análisis del material de balasto en zona de túneles de la línea 12 del metro Clave
 proyecto/servicio: S/N Realizó: Mario Antonio Pérez González
 Identificación muestra: IS20210602-06 Profundidad muestra: 0 a 0.33 m Descripción
 de la muestra: Material de balasto Línea 12
 Procedencia: Cadenamiento 18+490 Subtramo Atlalilco - Portal Oriente
 Masa muestra total: 37005.0 g Masa granulometría fina: 50.8 g

Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa	Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa
No.	mm	g	%	%	No.	mm	g	%	%
2 1/2 in	63.5	0	0.0%	100.0%	No. 10	2.000	0.1	0.0%	0.36%
2 in	50.8	6142	16.6%	83.4%	No. 20	0.840	1.4	0.0%	0.36%
1 1/2 in	38.1	10973	29.7%	53.7%	No. 40	0.400	1.9	0.0%	0.35%
1 in	25.4	19485	52.7%	1.1%	No. 60	0.250	2.1	0.0%	0.35%
3/4 in	19.05	270.16	0.7%	0.4%	No. 100	0.149	5.1	0.0%	0.33%
3/8 in	12.7	0	0.0%	0.4%	No. 200	0.074	4.7	0.0%	0.32%
1/4 in	9.52	0	0.0%	0.4%	Pasa No. 200	---	32.2	0.1%	0.23%
3/16 in	6.35	0	0.0%	0.4%	SUMA	---	47.5	---	---
No. 4	4.75	1.17	0.0%	0.4%		---	---	---	---
Pasa No. 4	---	50.8	0.1%	0.2%		---	---	---	---
SUMA	---	36922.13	---	---		---	---	---	---

Observaciones:
El material corresponde a material de balasto y se ajusta en su mayoría a la denominación 24 de acuerdo con las especificaciones de Ferromex.
Para la malla de 1 pulgada el material que pasa es el 1.1% en lugar del 11% mínimo de la especificación.

OperadorNombre y firma: Mario Antonio Pérez GonzálezSupervisóNombre y firma: Ing. Alfonso Pérez Salazar

"Este reporte no puede ser alterado, ni reproducido parcialmente sin la autorización escrita del Instituto Mexicano del Transporte ." "El reporte de prueba se refiere exclusivamente a la muestra analizada."

Norma de referencia: ASTM C 136-14

Rev. 13; Fecha: 20210503

F1 IT-006

Figura 27 Granulometría para el material del cadenamiento 18+490.



COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES

Folio No. 1,536

IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

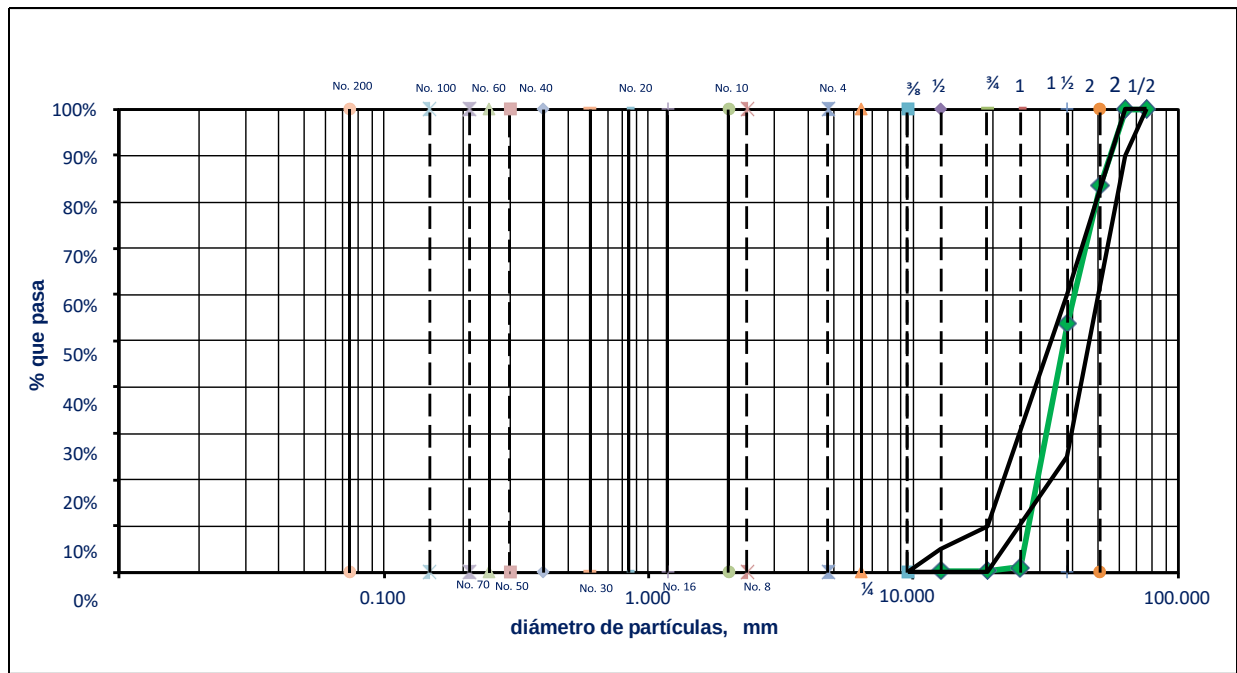


Figura 27 Cont. Granulometría para el material del cadenamiento 18+490.



Figura 28 Muestra IS 20210602-06 cadenamiento 18+490 profundidad 0 a 0.33m

	COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES

Folio No. 1,538**IT-006 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS**

Fecha: 2021-06-02 Ensayo No. 1

Nombre proyecto/servicio: Análisis del material de balasto en zona de túneles de la línea 12 del metroClave

proyecto/servicio: S/N Realizó: Mario Antonio Pérez González

Identificación muestra: IS20210602-07 Profundidad muestra: 0 a 0.31 m Descripción

de la muestra: Material de balasto Línea 12

Procedencia: Cadenamiento 26+320 Subtramo 20 de noviembre - Zapata

Masa muestra total: 38720.0 g Masa granulometria fina: 297.68 g

Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa	Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa
No.	mm	g	%	%	No.	mm	g	%	%
2 1/2 in	63.5	0	0.0%	100.0%	No. 10	2.000	3.59	0.01%	0.84%
2 in	50.8	1207.5	3.1%	96.9%	No. 20	0.840	23.41	0.06%	0.78%
1 1/2 in	38.1	14410.42	37.2%	59.7%	No. 40	0.400	24.79	0.06%	0.71%
1 in	25.4	18258.53	47.2%	12.5%	No. 60	0.250	26.29	0.07%	0.64%
3/4 in	19.05	3667.5	9.5%	3.0%	No. 100	0.149	26.57	0.07%	0.58%
3/8 in	12.7	760.35	2.0%	1.1%	No. 200	0.074	53.21	0.14%	0.44%
3/16 in	9.52	77.82	0.2%	0.9%	Pasa No. 200	---	127.78	0.33%	0.11%
1/8 in	6.35	0	0.0%	0.9%	SUMA	---	285.64	---	---
No. 4	4.75	10.21	0.0%	0.8%	---	---	---	---	---
sa No. 4	---	297.68	0.8%	0.08%	---	---	---	---	---
SUMA	---	38690.01	---	---	---	---	---	---	---

Observaciones:
El material corresponde a material de balasto y se ajusta en su mayoría a la denominación 24 de acuerdo con las especificaciones de Ferromex.
Para la malla de 2 pulgadas el material que pasa es el 96.9% en lugar de 60% máximo de la especificación.

OperadorNombre y firma: Mario Antonio Pérez GonzálezSupervisóNombre y firma: Ing. Alfonso Pérez Salazar

"Este reporte no puede ser alterado, ni reproducido parcialmente sin la autorización escrita del Instituto Mexicano del Transporte ." "El reporte de prueba se refiere exclusivamente a la muestra analizada."

Norma de referencia: ASTM C 136-14

Rev. 13; Fecha: 20210503

F1 IT-006

Figura 29 Granulometría para el material del cadenamiento 26+320.



Folio No. 1,538

IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

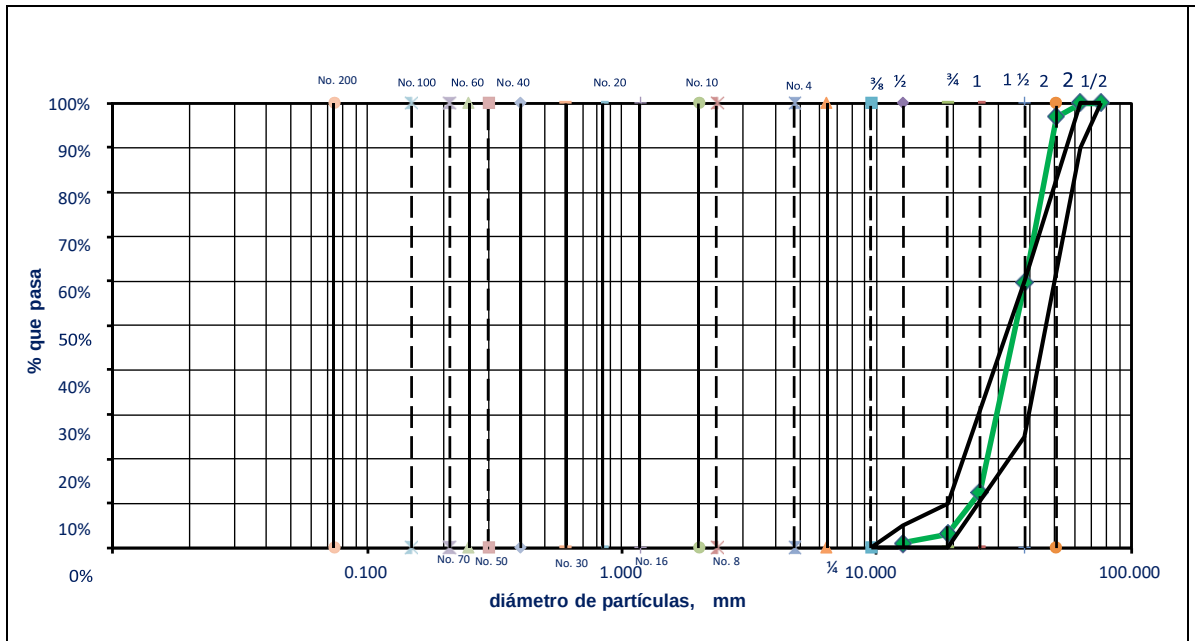


Figura 29 Cont. Granulometría para el material del cadenamiento 26+320.



Figura 8 Material retenido en las mallas de 2" y 1 1/2"



**COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES**

Folio No. 1,537

IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Fecha: 2021-06-02

Ensayo No. 1

Nombre proyecto/servicio: Análisis del material de balasto en zona de túneles de la línea 12 del metroClave
 proyecto/servicio: S/N Realizó: Mario Antonio Pérez González
 Identificación muestra: IS20210602-08 Profundidad muestra: 0.45 a 0.54 m
 Descripción de la muestra: Material de balasto Línea 12
 Procedencia: Cadenamiento 23+600 Subtramo Eje Central - Ermita
 Masa muestra total: 40634.0 g Masa granulometría fina: 167.5 g

Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa	Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa
No.	mm	g	%	%	No.	mm	g	%	%
2 1/2 in	63.5	0	0.0%	100.0%	No. 10	2.000	0.60	0.00%	0.49%
2 in	50.8	208	0.5%	99.5%	No. 20	0.840	8.80	0.02%	0.47%
1 1/2 in	38.1	14675	36.1%	63.4%	No. 40	0.400	14.20	0.03%	0.43%
1 in	25.4	23012	56.6%	6.7%	No. 60	0.250	16.12	0.04%	0.39%
3/4 in	19.05	2444	6.0%	0.7%	No. 100	0.149	15.80	0.04%	0.35%
1/2 in	12.7	89.35	0.2%	0.5%	No. 200	0.074	22.62	0.06%	0.30%
3/8 in	9.52	6.39	0.0%	0.5%	Pasa No. 200	---	85.48	0.21%	0.09%
1/4 in	6.35	0	0.0%	0.5%	SUMA	---	163.62	---	---
No. 4	4.75	0	0.0%	0.5%		---	---	---	---
sa No. 4	---	167.5	0.4%	0.1%		---	---	---	---
SUMA	---	40602.24	---	---		---	---	---	---

Observaciones:
El material corresponde a material de balasto y se ajusta en su mayoría a la denominación 24 de acuerdo con las especificaciones de Ferromex.
Para la malla de 2 pulgadas el material que pasa es el 99.5% en lugar de 60% máximo de la especificación.

Operador

Nombre y firma: Mario Antonio Pérez GonzálezSupervisó

Nombre y firma: Ing. Alfonso Pérez Salazar

"Este reporte no puede ser alterado, ni reproducido parcialmente sin la autorización escrita del Instituto Mexicano del Transporte ." "El reporte de prueba se refiere exclusivamente a la muestra analizada."

Norma de referencia: ASTM C 136-14

Rev. 13; Fecha: 20210503

F1 IT-006

Figura 30 Granulometría para el material del cadenamiento 23+600.



Folio No. 1,537

IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

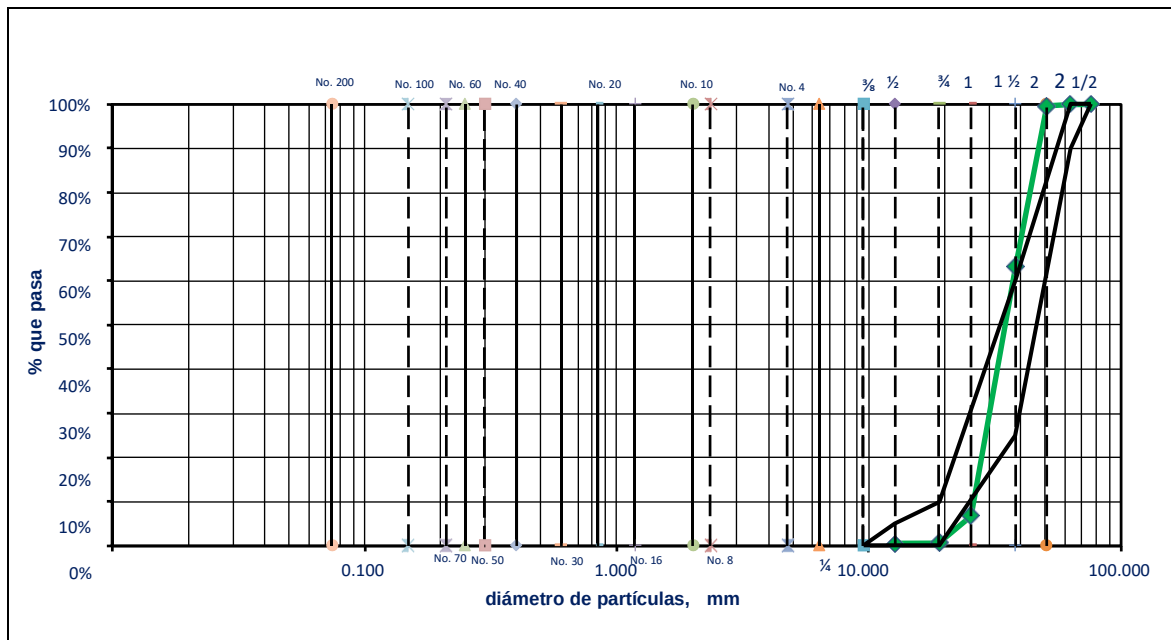


Figura 30 Cont. Granulometría para el material del cadenamiento 23+600.

	COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES
---	---

Folio No. 1,539**IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS**

Fecha: 2021-06-03 Ensayo No. 1

Nombre proyecto/servicio: Análisis del material de balasto en zona de túneles de la línea 12 del metroClave

proyecto/servicio: S/N Realizó: Miguel Ángel Cervantes Nieto

Identificación muestra: IS20210602-09 Profundidad muestra: 0 a 0.33 m Descripción

de la muestra: Material de balasto Línea 12

Procedencia: Cadenamiento 24+740 Subtramo Parque de los Venados - Eje Central

Masa muestra total: 7628.5 g Masa granulometría fina: 422 g

Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa	Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa
No.	mm	g	%	%	No.	mm	g	%	%
2 1/2 in	63.5	0	0.0%	100.0%	No. 10	2.000	92.5	1.2%	4.40%
2 in	50.8	407	5.3%	94.7%	No. 20	0.840	57.7	0.8%	3.65%
1 1/2 in	38.1	2701.5	35.4%	59.3%	No. 40	0.400	39.1	0.5%	3.14%
1 in	25.4	2103	27.6%	31.7%	No. 60	0.250	31.8	0.4%	2.72%
3/4 in	19.05	636.5	8.3%	23.3%	No. 100	0.149	29.3	0.4%	2.34%
1/2 in	12.7	769.5	10.1%	13.3%	No. 200	0.074	65.7	0.9%	1.47%
3/8 in	9.52	317.5	4.2%	9.1%	Pasa No. 200	---	100.1	1.3%	0.16%
3/16 in	6.35	0	0.0%	9.1%	SUMA	---	416.1	---	---
No. 4	4.75	265	3.5%	5.6%		---	---	---	---
sa No. 4	---	422	5.5%	0.1%		---	---	---	---
SUMA	---	7622	---	---		---	---	---	---

Observaciones:
El material corresponde a material de balasto y se ajusta en su mayoría a la denominación 24 de acuerdo con las especificaciones de Ferromex.
A partir de la malla de 1 pulgada, el material retenido es mayor que el límite superior de la zona granulométrica 24; de tal manera que el material es más fino que lo estipulado en dicha denominación.

OperadorNombre y firma: Miguel Ángel Cervantes NietoSupervisóNombre y firma: Ing. Alfonso Pérez Salazar

"Este reporte no puede ser alterado, ni reproducido parcialmente sin la autorización escrita del Instituto Mexicano del Transporte ." "El reporte de prueba se refiere exclusivamente a la muestra analizada."

Norma de referencia: ASTM C 136-14

Rev. 13; Fecha: 20210503

F1 IT-006

Figura 31 Granulometría para el material del cadenamiento 24+740.



Folio No. 1,539

IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

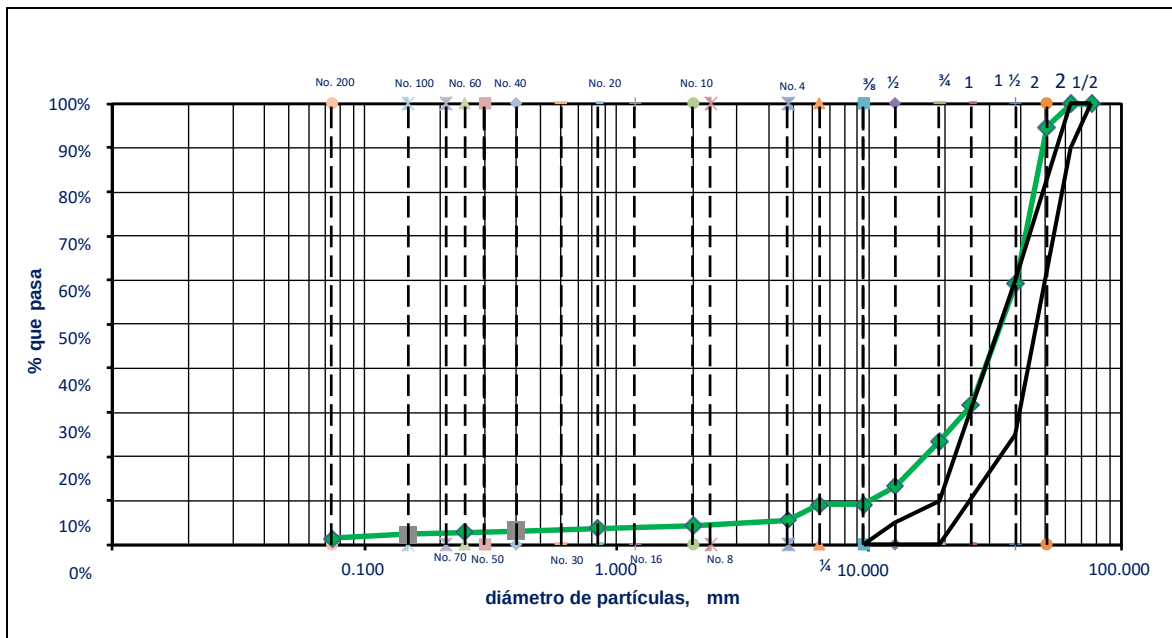


Figura 31 Cont. Granulometría para el material del cadenamiento 24+740.



**COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES**

Folio No. 1,540

IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Fecha: 2021-06-03

Ensayo No. 1

Nombre proyecto/servicio: Análisis del material de balasto en zona de túneles de la línea 12 del metroClave
 proyecto/servicio: S/N Realizó: Miguel Ángel Cervantes Nieto
 Identificación muestra: IS20210602-09 Profundidad muestra: 0.44 a 0.48 m
 Descripción de la muestra: Material de balasto Línea 12
 Procedencia: Cadenamiento 20+345 Subtramo Mexicaltzingo - Atlalilco
 Masa muestra total: 5422.0 g Masa granulometría fina: 1440 g

Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa	Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa
No.	mm	g	%	%	No.	mm	g	%	%
2 1/2 in	63.5	0	0.0%	100.0%	No. 10	2.000	565.5	10.4%	16.16%
2 in	50.8	378.86	7.0%	93.0%	No. 20	0.840	317.5	5.9%	10.30%
1 1/2 in	38.1	375.5	6.9%	86.1%	No. 40	0.400	148.3	2.7%	7.57%
1 in	25.4	1653.5	30.5%	55.6%	No. 60	0.250	78.2	1.4%	6.13%
3/4 in	19.05	649.5	12.0%	43.6%	No. 100	0.149	73.8	1.4%	4.76%
1/2 in	12.7	211.5	3.9%	39.7%	No. 200	0.074	83.2	1.5%	3.23%
3/8 in	9.52	206.5	3.8%	35.9%	Pasa No. 200	---	166.1	3.1%	0.16%
1/4 in	6.35	0	0.0%	35.9%	SUMA	---	1432.7	---	---
No. 4	4.75	505	9.3%	26.6%		---	---	---	---
sa No. 4	---	1440	26.6%	0.0%		---	---	---	---
SUMA	---	5420.36	---	---		---	---	---	---

Observaciones:

El material corresponde a material de balasto y se ajusta en su mayoría a la denominación 24 de acuerdo con las especificaciones de Ferromex.

A partir de la malla de 1 pulgada, el material retenido es mayor que el límite superior de la zona granulométrica 24; de tal manera que el material es más fino que lo estipulado en dicha denominación.

Operador

Nombre y firma: Miguel Ángel Cervantes NietoSupervisó

Nombre y firma: Ing. Alfonso Pérez Salazar

"Este reporte no puede ser alterado, ni reproducido parcialmente sin la autorización escrita del Instituto Mexicano del Transporte ." "El reporte de prueba se refiere exclusivamente a la muestra analizada."

Norma de referencia: ASTM C 136-14

Rev. 13; Fecha: 20210503

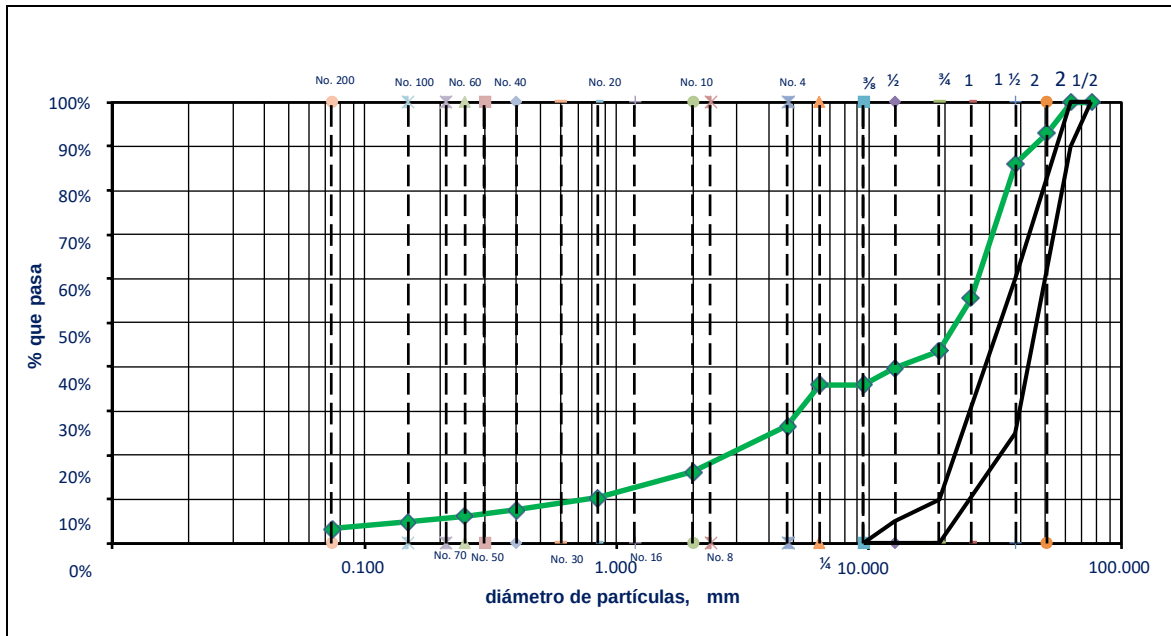
F1 IT-006

Figura 32 Granulometría para el material del cadenamiento 20+345.



Folio No. 1,540

IT-006ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS



6.10 Análisis de resultados

En los sondeos realizados en la estructura granular de la vía del tramo subterráneo de la línea 12 del Metro no se aprecian cambios significativos de estratos, por lo que se infiere que se trata de un solo estrato de espesor variable de balasto entre 0.50 m y 0.70 m, en el que subyace un geotextil y sin que se haya podido detectar o descartar la presencia de un estrato diferente por debajo de éste.

A partir de los ensayos realizados, se puede destacar que, en general, el material muestreado de dicho estrato superior al geotextil, cuenta con una composición granulométrica gruesa que se apega a la zona denominada 24 para material de balasto, de acuerdo con lo establecido. Para algunos cadenamientos evaluados, y en determinados estratos, se aprecia presencia de materiales más finos que la malla 3/8", que corresponde al límite inferior de la zona granulométrica 24 antes citada; particularmente en lo que corresponde al sondeo realizado en el cadenamiento 24+740. Lo anterior se hace muy notorio en el sondeo correspondiente al cadenamiento 20+345, en donde se aprecia que prácticamente toda la curva granulométrica se encuentra fuera de los límites de la citada zona 24, y hacia la parte fina de la gráfica.

Es importante destacar la presencia de humedades en el balasto en algunos sitios a lo largo de la vía. En cuanto a los ensayos de Módulo de LWD se aprecia que el valor promedio corresponde a 55.5 MPa, con valores mínimos del orden de 40 MPa para los cadenamientos 18+490 y 20+345. Los valores máximos se aprecian en los cadenamientos 26+320 y 27+185 con valores de 70 y 80 MPa, respectivamente. De los ensayos de desgaste Los Ángeles se puede apreciar que el material posee una dureza adecuada, con un desgaste máximo de 18%, muy inferior al 30% establecido en especificaciones. En lo que respecta a la absorción, en todos los casos evaluados, este valor resultó menor que el 1% solicitado para este tipo de material. La densidad en todos los casos fue superior al 2.6 Ton/ m³ definido para el material a utilizar como capa de balasto; en este caso se consideró que el material corresponde a un basalto.

6.11 Conclusiones

La estructura granular de la vía de la línea 12 del Metro está constituida en su parte superior por un material de balasto de origen ígneo extrusivo; no se aprecian cambios significativos de estratos, por lo que se infiere que se trata de un solo estrato de espesor variable de balasto entre 0.50 m y 0.70 m, en el que subyace un geotextil; no se pudo detectar o descartar la presencia de un estrato diferente por debajo de éste y antes de la profundidad a la que se encuentra la losa del túnel. En general, el material muestreado presenta una composición granulométrica que se apega a la zona denominada 24 para material de balasto, de acuerdo con lo establecido. Para algunos cadenamientos evaluados, y en determinados estratos, se aprecia presencia de materiales más finos que la malla 3/8", que corresponde al límite inferior de la zona granulométrica 24. Es importante destacar la presencia de humedades en el material de balasto, presentes en algunos sitios a lo largo de la vía. En cuanto a los ensayos de Módulo de LWD, se aprecia que el valor promedio corresponde a 55.5 MPa, con valores mínimos del orden de 40 MPa para los cadenamientos 18+490 y 20+345. Los valores máximos se aprecian en los cadenamientos 26+320 y 27+185 con valores de 70 y 80 MPa, respectivamente. El material analizado cumple con los requerimientos de desgaste Los Ángeles, densidad y absorción en concordancia con lo establecido en especificaciones ferroviarias para este material. Es importante poder contar con la estructura establecida en el proyecto de construcción de la vía, con la finalidad de constatar la cantidad y calidad de las capas colocadas en la vía de la zona de interés. Lo anterior con la finalidad de realizar la exploración geotécnica complementaria que permita establecer las causas de las deformaciones presentes en la vía en estudio.

6.12 Bibliografía del capítulo 6

- 1 Gobierno de la Ciudad de México. (2021). Antecedentes Línea 12. Obtenido de <https://www.metro.cdmx.gob.mx/acerca-del-metro/mas-informacion/informacion-linea-12/antecedentes-linea-12>
- 2 Gobierno de la Ciudad de México. (2021). Línea 12. Obtenido de <https://www.metro.cdmx.gob.mx/la-red/linea-12-2>
- 3 Secretaría de Desarrollo Social. (9 de noviembre de 2012). Atlas de Riesgos de la Delegación Benito Juárez . D.F., México, México.
- 4 Afsharikia, Z., & Schwartz, C. (2018). Modulus Based Compaction QC/QA Using LWD.University of Maryland, College Park, USA.
- 5 Schwartz, C., Afsharikia, Z., & Khosravifar, S. (2017). Standardizing Lightweight Deflectometer Modulus Measurements for Compaction Quality Assurance. MARYLAND DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.
- 6 Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2020). Suelos y Materiales para Terracerías-Grado de Compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD). México

7 PETROGRAFÍA DEL BALASTO

7.1 Muestras

Se recibieron tres bolsas de plástico donde se contenía balastros clasificados como: 18+ 490, 23+600 y 26+320.



Figura 1. Piezas obtenidas de la muestra 26+320.



Figura2. Piezas obtenidas de la muestra 23+600.



Figura 3. Piezas obtenidas de la muestra 26+320.

7.2 Preparación de las muestras

Se seleccionó una pieza por cada bolsa de plástico y con un disco de desbaste se formaron dos caras planas. Una de las caras fue pulida mediante lijas. Las lijas que se emplearon fueron desde la lija 180 hasta la 4000. Posteriormente, se pasaron al pulido a espejo con paño y alúmina de tamaños de partícula de 1, 0.3 y 0.05 μm . Las muestras ya pulidas se atacaron con nital isopropílico al 2%.

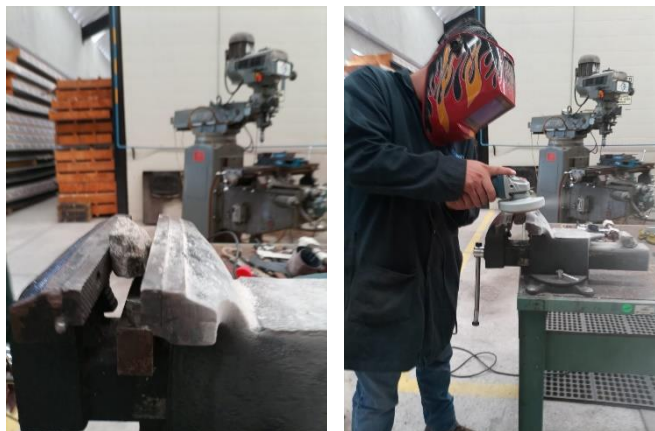


Figura 4. Desbaste para formar superficies planas.



Figura 5. Preparación petrográfica de las muestras.

7.3 Petrografía con microscopía óptica y zona selecciona para el análisis químico por microscopía electrónica de barrido.

7.3.1 Cadenamiento 18+490

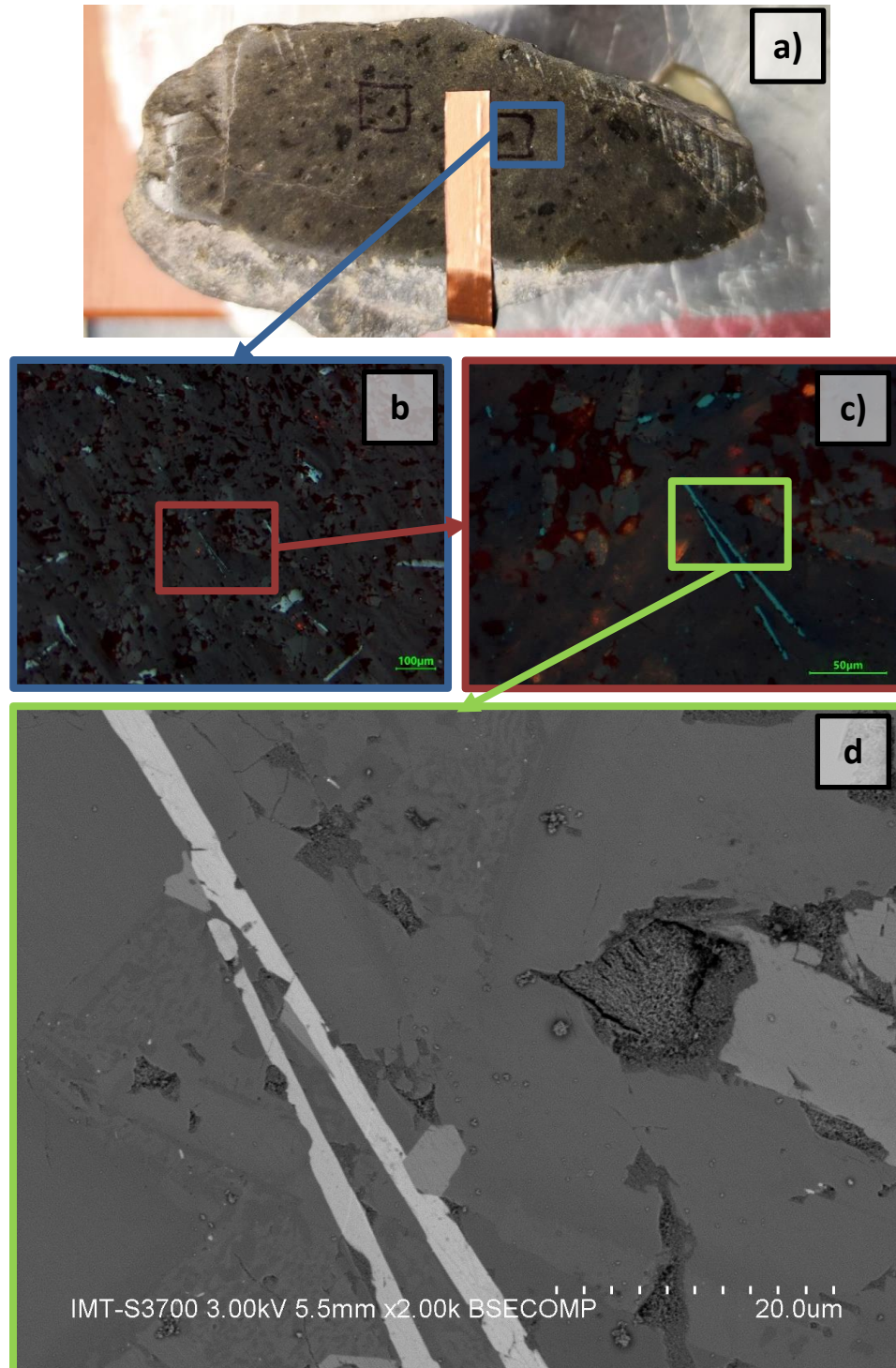


Figura 6. a) Muestra preparada y atacada 18+490, b) y c) Observación de la petrografía con microscopía óptica y d) Observación de la petrografía con microscopía electrónica de barrido

7.3.2 Cadenamiento 23+600

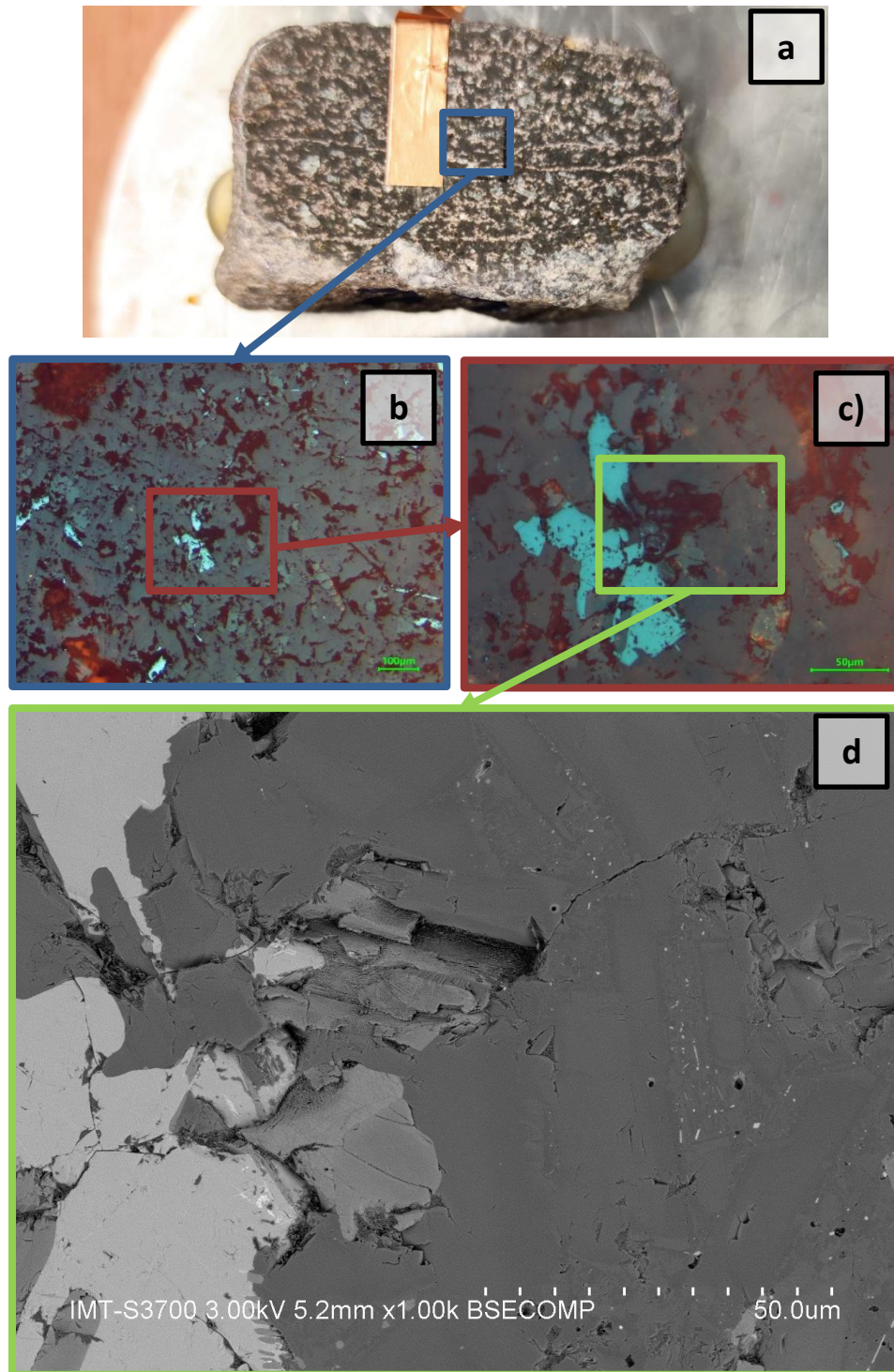


Figura 7. a) Muestra preparada y atacada 23+600, b) y c) Observación de la petrografía con microscopía óptica y d) Observación de la petrografía con microscopía electrónica de barrido

7.3.3 Cadenamiento 26+320

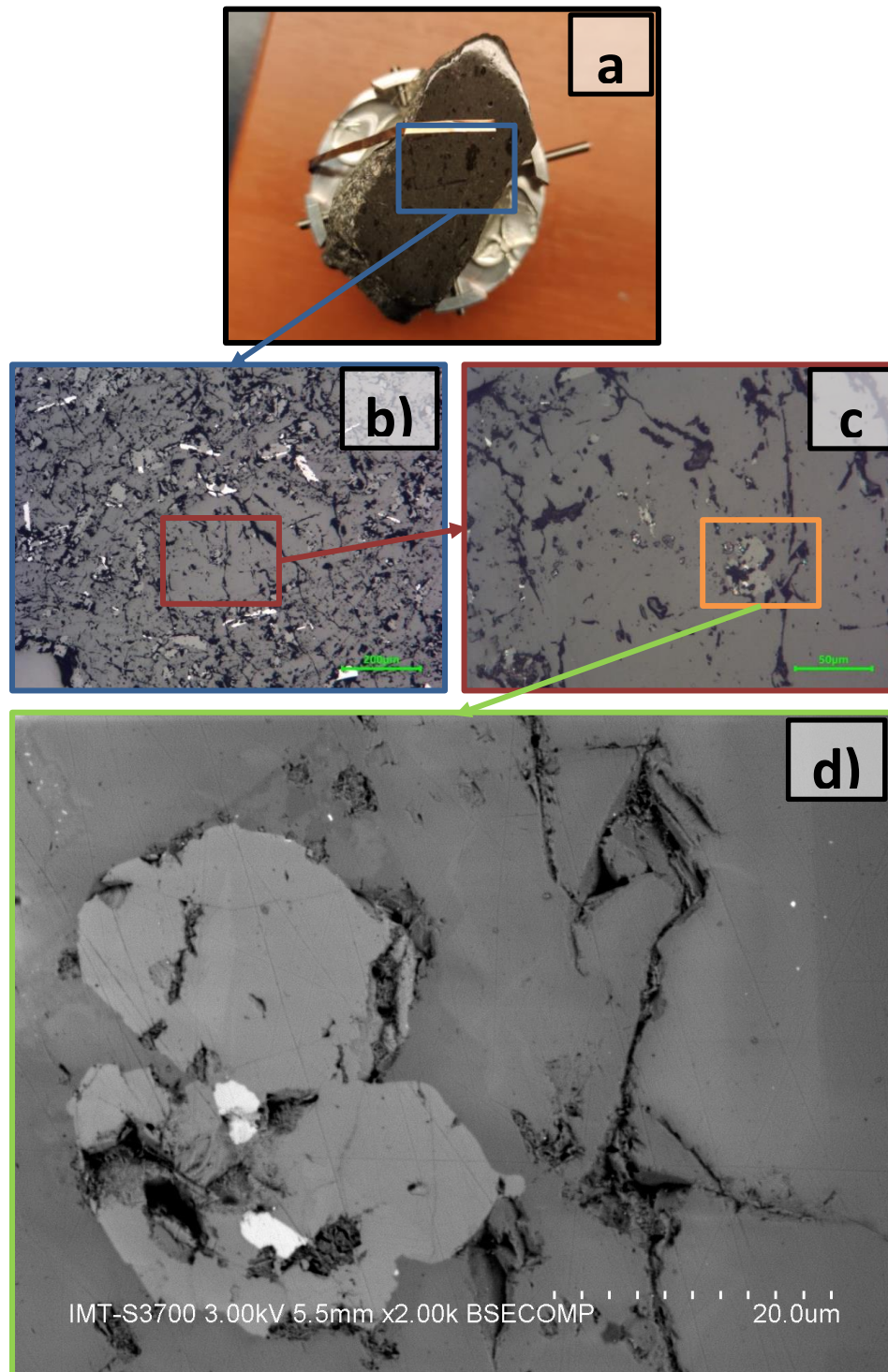


Figura 8. a) Muestra preparada y atacada 26+320, b) y c) Observación de la petrografía con microscopía óptica y d) Observación de la petrografía con microscopía electrónica de barrido.

7.4 ANÁLISIS QUÍMICO CON EL DETECTOR EDS DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.

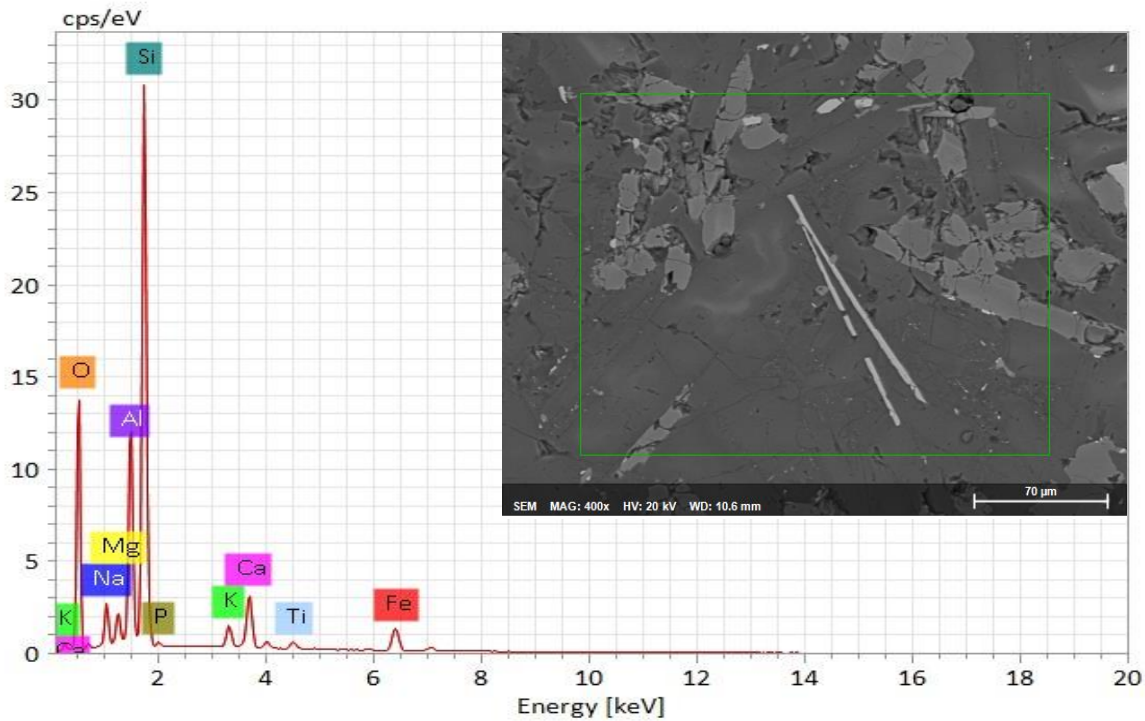


Figura 9. Área analizada por EDS y espectro obtenido

Tabla 1. Composición química por elementos del área analizada.

Elemento	No. at.	Neto	Masa [%]	Masa Norm. [%]	at. [%]	error abs. [%] (1 sigma)	error rel. [%](1 sigma)
Oxígeno	8	109361	37.12	46.87	62.65	4.19	11.28
Magnesio	12	15698	1.53	1.93	1.70	0.11	7.25
Aluminio	13	117873	9.42	11.89	9.43	0.48	5.05
Silicio	14	315092	21.31	26.92	20.50	0.93	4.38
Fósforo	15	1842	0.18	0.23	0.16	0.03	18.81
Azufre	16	0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.57
Calcio	20	41937	4.44	5.60	2.99	0.16	3.53
Titanio	22	5858	0.81	1.02	0.45	0.05	6.25
Cromo	24	95	0.01	0.02	0.01	0.00	11.16
Manganeso	25	271	0.05	0.06	0.02	0.00	7.05
Hierro	26	22019	4.32	5.46	2.09	0.14	3.33
		Sum	79.19	100	100		

Tabla 2. Composición química por óxidos del área analizada.

Elemento	No. at.	Neto	Masa [%]	Masa Norm. [%]	at. [%]	Óxidos	error abs. [%](1 sigma)	rel. error [%](1 sigma)
Silicio	14	312572	22.46	46.26	50.61	SiO2	0.98	4.37
Aluminio	13	114707	8.96	18.45	21.01	Al2O3	0.45	5.07
Calcio	20	41078	5.43	11.18	8.57	CaO	0.19	3.43
Hierro	26	21856	5.38	11.07	6.09	FeO	0.17	3.22
Sodio	11	18072	2.29	4.71	6.29	Na2O	0.17	7.65
Potasio	19	16439	1.94	4.00	3.14	K2O	0.09	4.46
Magnesio	12	12653	1.17	2.41	3.04	MgO	0.09	7.79
Titanio	22	5808	0.94	1.93	1.24	TiO2	0.05	5.82
Oxígeno	8	113456	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
		Sum	48.56	100	100			

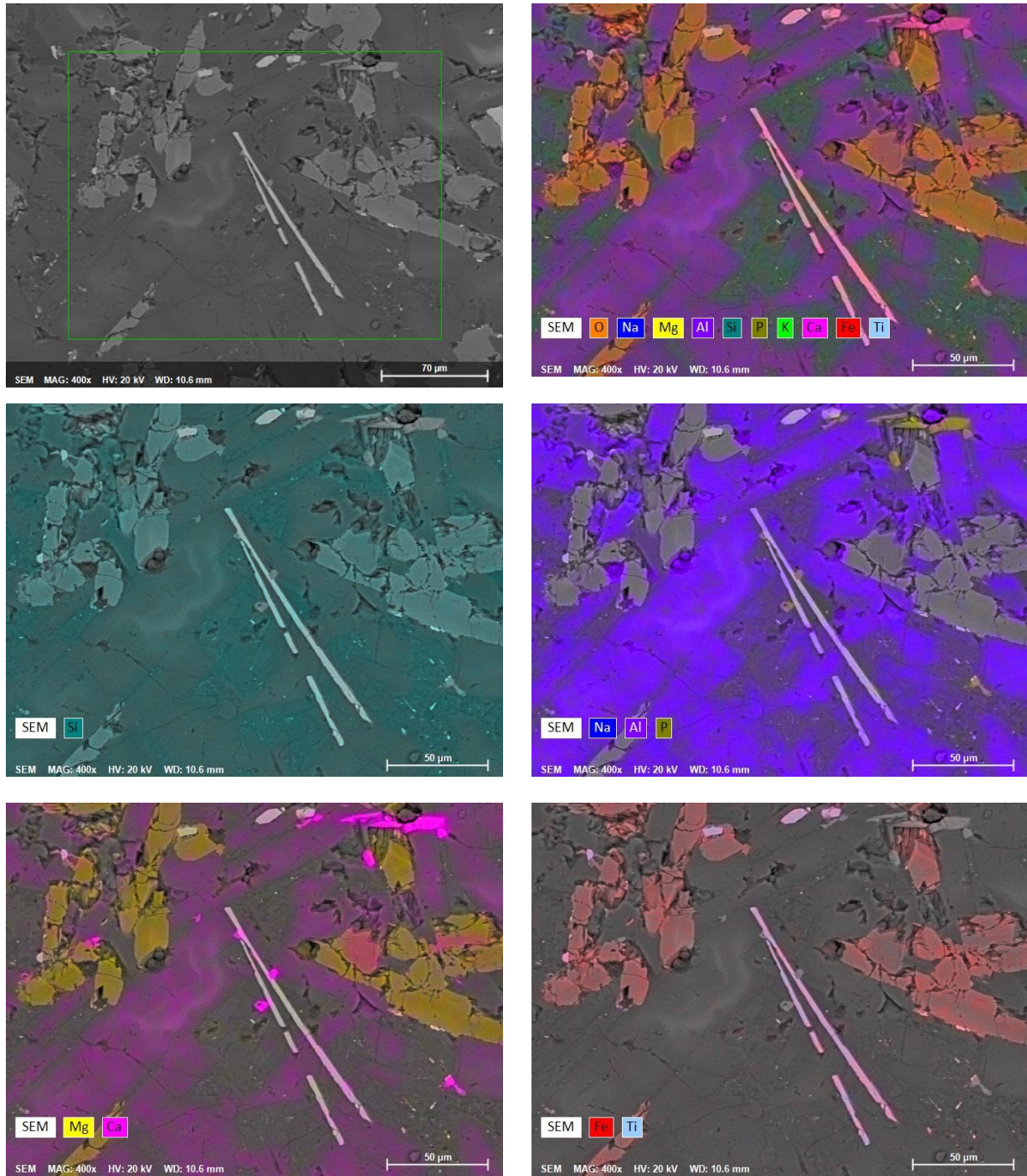


Figura 10. Mapeo del área analizada.

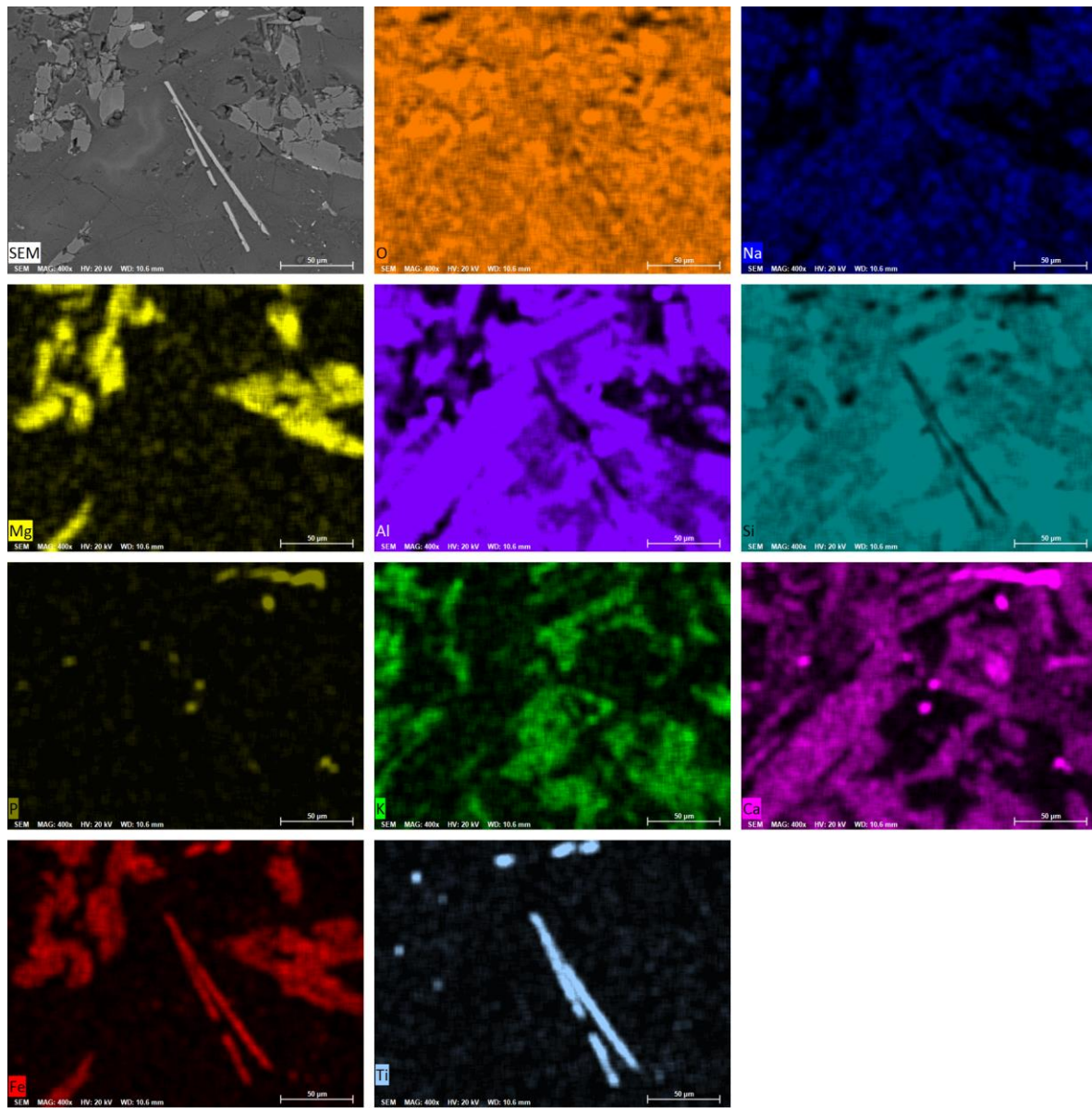


Figura 11. Mapeo por elemento

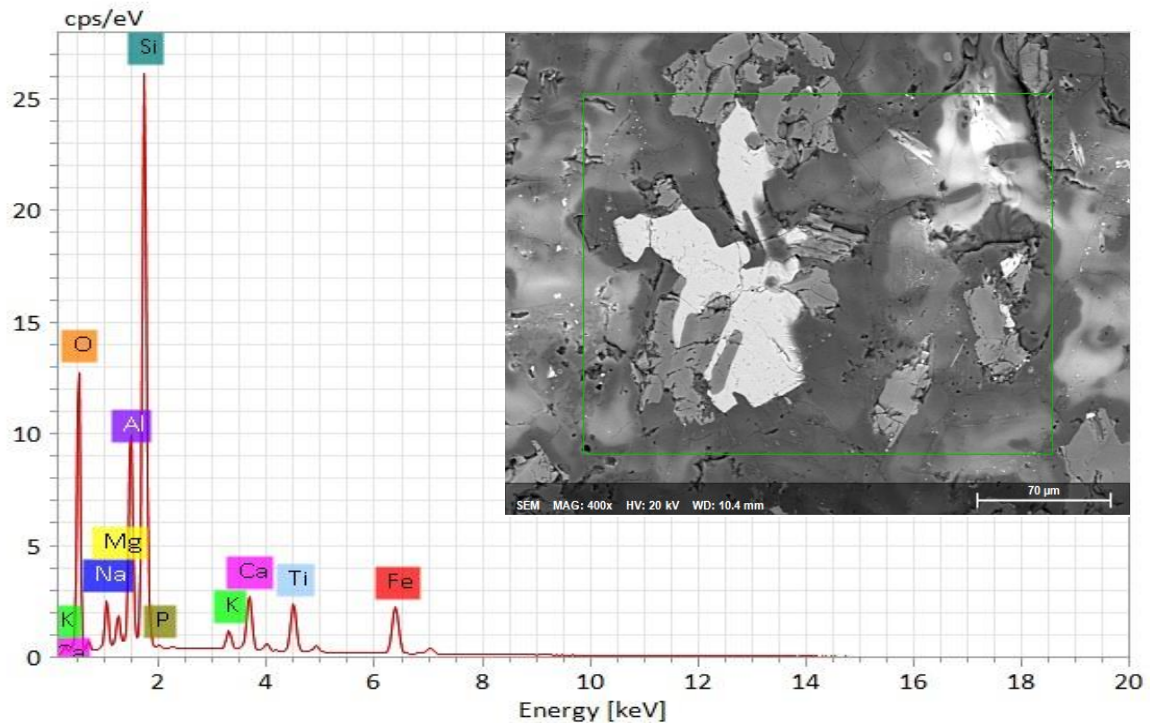


Figura 12. Área analizada por EDS y espectro obtenido

Tabla 3. Composición química por elementos del área analizada.

Elemento	No. at.	Neto	Masa [%]	Masa Norm. [%]	at. [%]	error abs. [%] (1 sigma)	error rel. [%](1 sigma)
Oxígeno	8	100391	38.71	45.68	63.14	4.38	11.33
Magnesio	12	13088	1.46	1.73	1.57	0.11	7.35
Aluminio	13	96097	8.64	10.20	8.36	0.44	5.08
Silicio	14	267737	19.61	23.15	18.23	0.86	4.39
Fósforo	15	1223	0.12	0.15	0.10	0.03	25.50
Azufre	16	65	0.01	0.01	0.00	0.00	14.10
Calcio	20	35742	3.67	4.34	2.39	0.13	3.66
Titanio	22	33194	4.53	5.34	2.47	0.15	3.39
Cromo	24	93	0.01	0.02	0.01	0.00	11.24
Manganeso	25	476	0.08	0.10	0.04	0.03	35.16
Hierro	26	38004	7.88	9.30	3.68	0.24	3.03
		Sum	84.73	100	100		

Tabla 4. Composición química por óxidos del área analizada.

Elemento	No. at.	Neto	Masa [%]	Masa Norm. [%]	at. [%]	Óxidos	error abs. [%](1 sigma)	error rel. [%](1 sigma)
Oxígeno	8	100377	38.06	45.18	62.68		4.31	11.33
Magnesio	12	13075	1.47	1.74	1.59	MgO	0.11	7.35
Aluminio	13	96085	8.66	10.28	8.46	Al ₂ O ₃	0.44	5.08
Silicio	14	267733	19.68	23.36	18.46	SiO ₂	0.86	4.39
Fósforo	15	1230	0.13	0.15	0.11	P ₂ O ₅	0.03	25.28
Azufre	16	69	0.01	0.01	0.01		0.00	13.74
Calcio	20	35740	3.69	4.38	2.42	CaO	0.13	3.66
Titanio	22	33195	4.55	5.40	2.50	TiO ₂	0.15	3.38
Cromo	24	91	0.01	0.02	0.01	Cr ₂ O ₃	0.00	11.34
Manganeso	25	476	0.09	0.10	0.04	MnO	0.03	35.05
Hierro	26	38004	7.91	9.39	3.73	FeO	0.24	3.02
		Sum	84.24	100	100			

3.

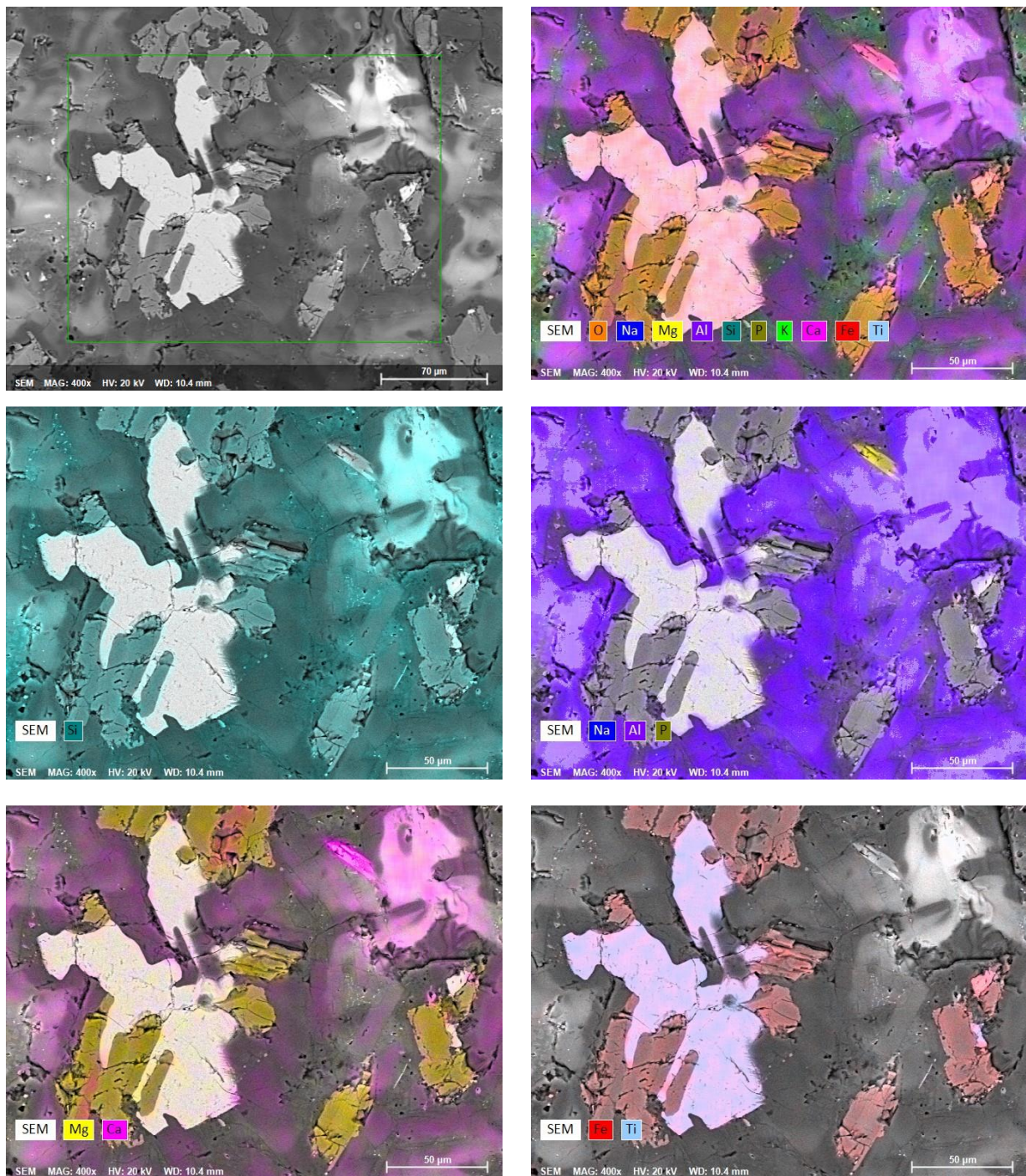


Figura 13. Mapeo del área analizada.

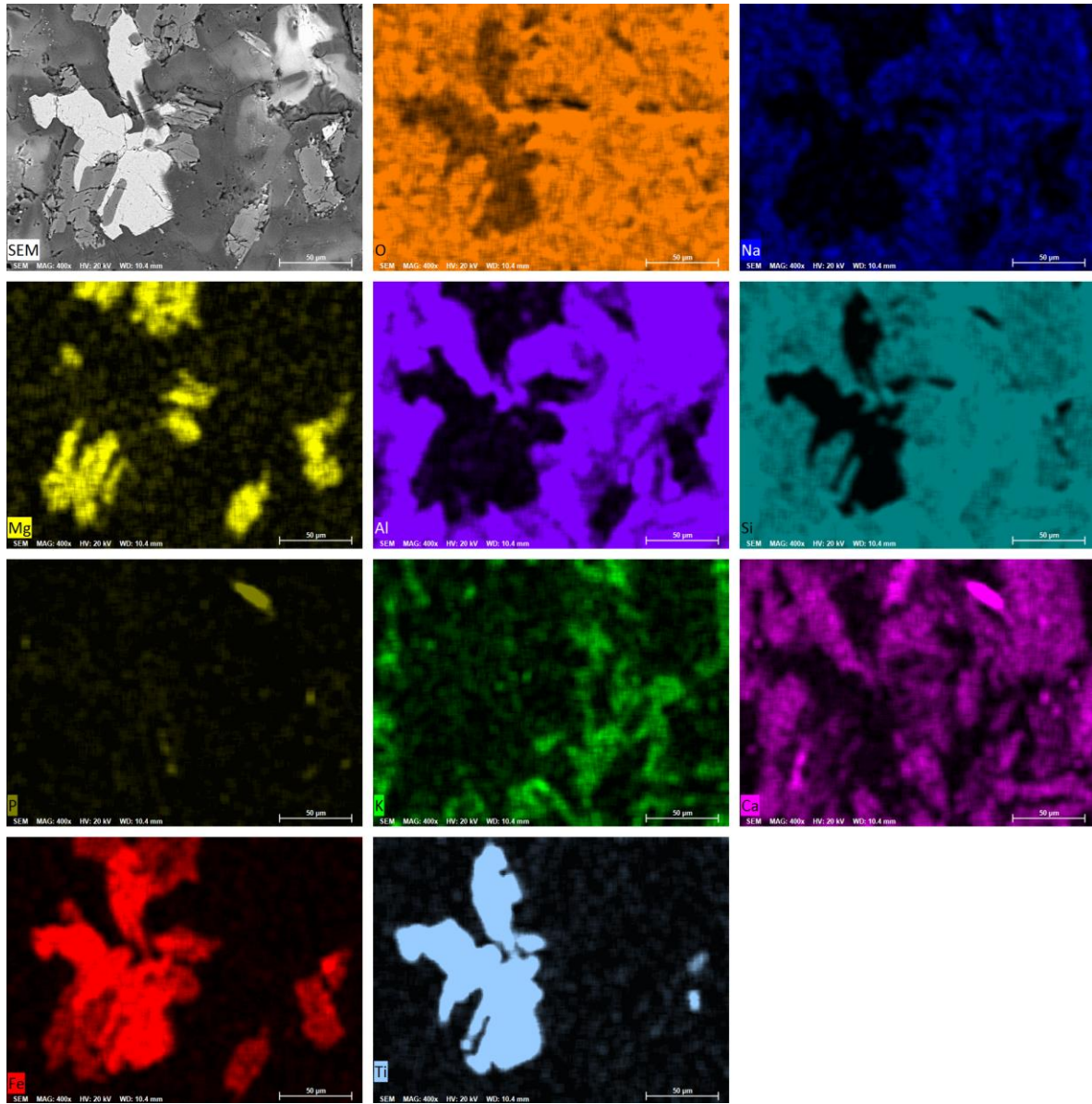


Figura 14. Mapeo por elemento

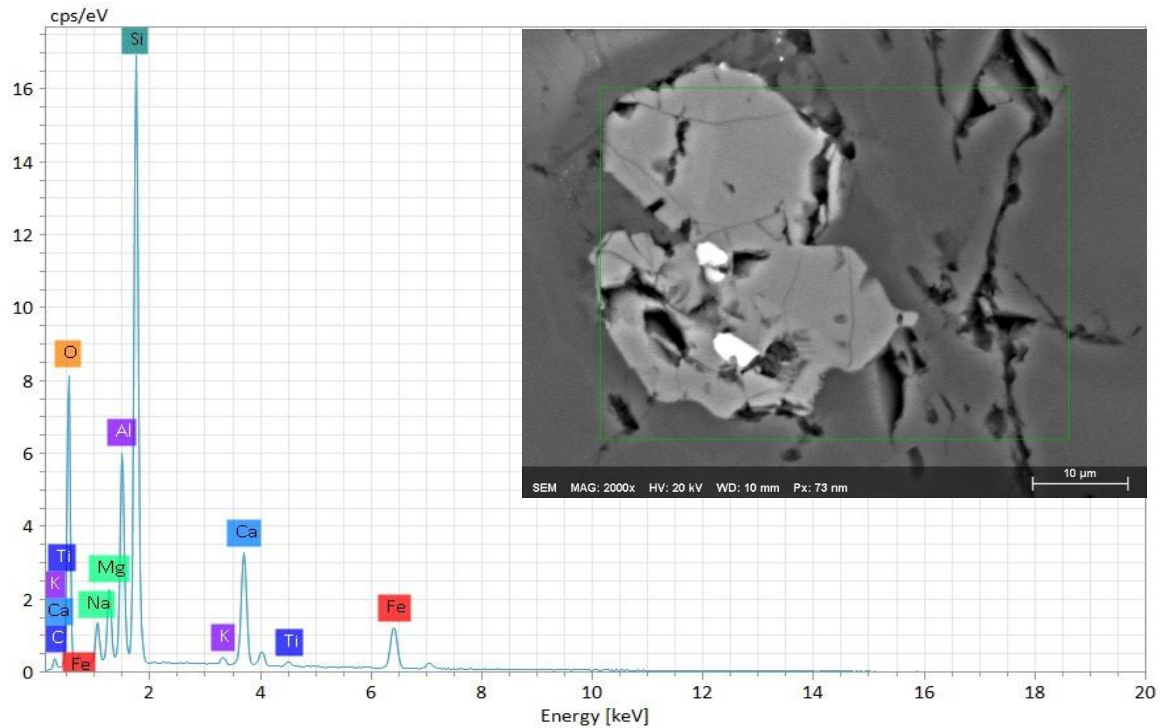


Figura 15. Área analizada por EDS y espectro obtenido

Tabla 5. Composición química por elementos del área analizada.

Elemento	No. at.	Neto	Masa [%]	Masa Norm. [%]	at. [%]	error abs. [%] (1 sigma)	error rel. [%] (1 sigma)
Oxígeno	8	41525	37.53	44.45	61.22	4.51	12.03
Magnesio	12	12869	3.23	3.83	3.47	0.21	6.42
Aluminio	13	38860	8.14	9.64	7.87	0.42	5.14
Silicio	14	119981	20.33	24.08	18.89	0.89	4.40
Fósforo	15	0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.87
Azufre	16	150	0.03	0.04	0.03	0.00	9.97
Calcio	20	31439	7.59	8.99	4.94	0.25	3.32
Titanio	22	1244	0.40	0.47	0.22	0.04	10.48
Cromo	24	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68
Manganeso	25	353	0.14	0.17	0.07	0.03	23.75
Hierro	26	14918	7.04	8.33	3.29	0.22	3.16
		Sum	84.44	100	100		

Tabla 6. Composición química por óxidos del área analizada.

Elemento	No. at.	Neto	Masa [%]	Masa Norm. [%]	at. [%]	Óxidos	error abs. [%] (1 sigma)	error rel. [%] (1 sigma)
Silicio	14	119072	23.42	41.60	46.55	SiO ₂	1.03	4.38
Calcio	20	31094	9.34	16.60	13.01	CaO	0.30	3.26
Aluminio	13	37822	8.62	15.31	17.83	Al ₂ O ₃	0.44	5.12
Hierro	26	14798	8.50	15.10	8.50	FeO	0.26	3.10
Magnesio	12	11806	3.10	5.50	7.12	MgO	0.20	6.47
Sodio	11	6476	2.39	4.24	5.80	Na ₂ O	0.19	7.83
Titán	22	1249	0.49	0.88	0.58	TiO ₂	0.05	9.29
Potasio	19	1658	0.44	0.78	0.62	K ₂ O	0.04	9.91
Oxígeno	8	43437	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
		Sum	56.30	100	100			

}

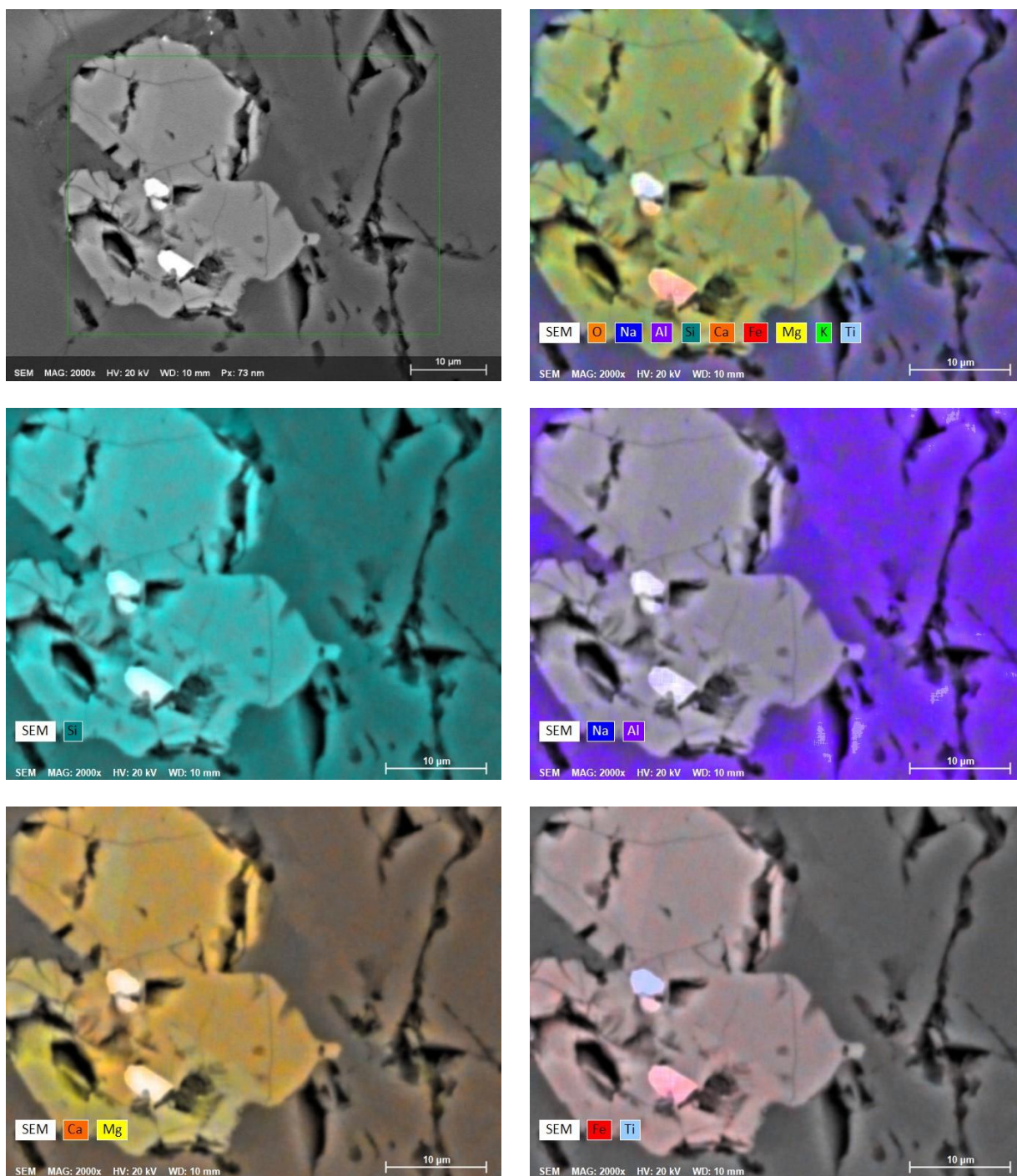


Figura 16. Mapeo del área analizada.

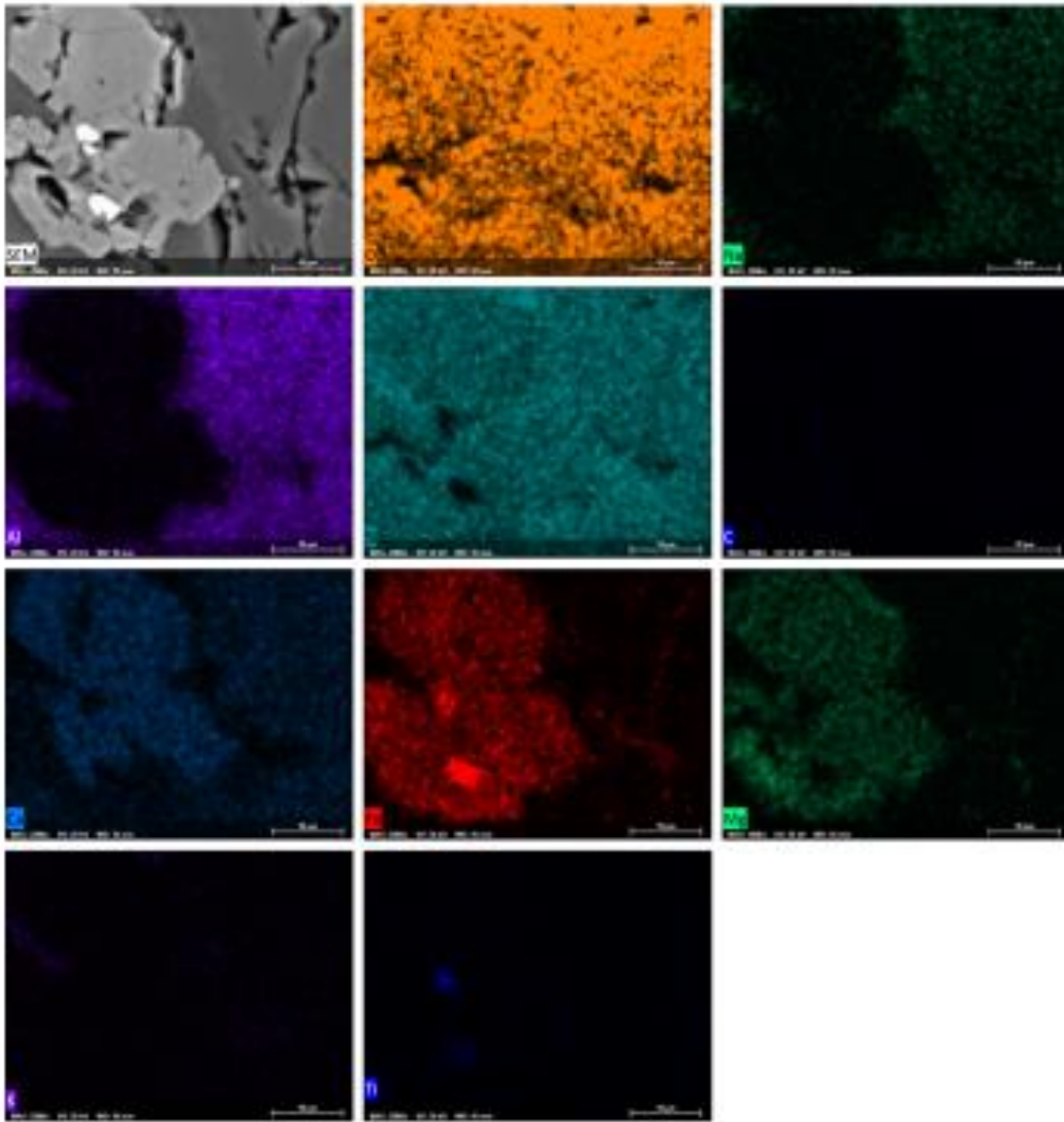


Figura 17. Mapeo por elemento

8 INFORME DE INSPECCIÓN VISUAL CONJUNTA CON PERSONAL DEL METRO Y DE LA EMPRESA A CARGO DE LA CONSERVACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA.

En el recorrido de inspección visual se observó que los hallazgos mencionados el pasado 12 de mayo del presente, ya fueron corregidos.

El tramo inspeccionado a pie se realizó el 31 de mayo del presente entre las estaciones Mixcoac y Ermita, y entre Ermita y Atlalilco el día 1 de junio del presente, en los cuales se pudo constatar visualmente que la vía está en las siguientes condiciones:

Riel: Se observa en buenas condiciones, con algunos puntos de mantenimiento en curvas con esmerilado reciente para eliminar defectos superficiales de shelling y spalling, con la finalidad de mejorar la interacción rueda-riel. Y evitar el desarrollo de los defectos y alargar la vida útil del riel. En PK 20+180 en vía 2 se detectó riel C en espiral de entrada en hilo inferior con defectos de corrugación en una distancia aproximada de 10 metros y 3 grapas elásticas rotas a consecuencia del mismo defecto. (se observaron varias grapas relevadas por el mismo defecto).

Durmiente de concreto: no se observaron durmientes dañados, ni desalineados.

Fijación elástica y elementos de sujeción: Se observa en buenas condiciones y estable, sin permitir corrimiento lineal a los rieles de la vía. (sólo en 2 curvas se detectó grapas rotas sumando un total de 7 piezas solamente y otras que ya se habían relevado).



Balasto: En una prueba física realizada en campo golpeando 2 piedras del balasto de aproximadamente 2", se observó una falta de dureza ya que estas se seccionaron al primer impacto, así mismo se observa la degradación prematura de la piedra la cual pudiera estar fuera de norma. Se recomienda el relevo gradual en su totalidad de este material sin interrumpir las inspecciones para observar su comportamiento y posibles desviaciones en la geometría de la vía, así como pruebas de tenacidad, dureza, densidad y absorción. En algunos puntos entre

la estaciones Ermita y Atlalilco se observaron trabajos recientes de nivelación mecanizada donde quedó pendiente completar la sección de balasto.

Drenaje: Se observan filtraciones de la parte superior de la estructura del túnel que caen directamente al cuerpo de la vía, deteriorando de forma paulatina sus componentes, los cuales pudieran provocar aguachinamientos que conllevarían a defectos geométricos en la vía por el drenaje insuficiente. Entre las estaciones Ermita y Atlalilco se observaron filtraciones con escurrimiento continuo al centro de ambas vías y afectando un soporte de la catenaria en PK 21+650. Es recomendable que se realicen trabajos de sellado primeramente en las filtraciones que escurren directamente al cuerpo de la vía.



Geometría de vía: En recorrido efectuado a bordo de la dresina, se sintieron golpes de vía, por lo cual es recomendable se realice una inspección con vehículo geométrico de vía con eje de carga para detectar defectos geométricos bajo cargas dinámicas.

Aparatos de cambio: Se observa que son inspeccionados para detectar defectos geométricos y físicos en sus componentes, las piezas de madera de los aparatos se observan en buen estado, estando en condiciones aceptables de operación.

Lubricación de escantillón: Se observa lubricación en las caras laterales del hongo del riel.

Conclusión: Visualmente la vía está en condiciones de operación, ya que los desgastes observados son mínimos, sólo se podría determinar la condición exacta de la vía con precisión, una vez que se obtengan los reportes actualizados de los carros detectores de geometría de vía y de ultrasonido de riel. Esto con la finalidad de determinar si está en condiciones de operar de manera segura.

9 REVISIÓN A LAS MEDICIONES GEOMÉTRICAS DE VÍA

Derivado de las inspecciones de vía llevadas a cabo por los expertos del IMT, personal del STC Metro y de su Sindicato Nacional, se solicitó que hubiera también una inspección con el propósito llevar a cabo mediciones geométricas de la vía en forma dinámica mediante el vehículo de vía denominado Multicalzadora 08-16 3s No. 1139. **Esta revisión fue implementada por la empresa responsable del mantenimiento de la Línea 12, TSO.** Se indicó que ese vehículo era aceptado conforme a la normatividad como carro detector de defectos geométricos de vía, sin embargo, los expertos en vías de este Instituto Mexicano del Transporte entienden que dicho vehículo es especializado para trabajar la vía en la alineación, calzado y nivelación de vía.

El análisis generado por el operador de la Multicalzadora es el siguiente:

**RELACION DE DEFECTOS DETECTADOS CON MULTICALZADORA 08-16 3S N° 1139 DE TSO.
A LAS VIA 1 Y 2 DE LA LINEA 12 DEL METRO ENTRE LAS ESTACIONES DE ATLALILCO Y MIXCOAC**

CANTIDAD DE DEFECTOS POR VIA	NUMERO DE VIA	KILOMETRO	A	KILOMERO	DEFECTOS
5	1	19+014	PUNTUAL		LINEA Y NIVEL
	1	19+434	A	19+482	LINEA
	1	20+203	PUNTUAL		LINEA
	1	20+570	PUNTUAL		PERALTE
	1	26+031	PUNTUAL		LINEA
8	2	18+885	PUNTUAL		LINEA
	2	19+376	PUNTUAL		LINEA
	2	19+817	A	20+234	LINEA, PERALTE, NIVEL
	2	23+023	PUNTUAL		LINEA
	2	23+056	A	23+162	PERALTE, NIVEL
	2	23+306	A	23+486	LINEA
	2	25+771	PUNTUAL		LINEA
	2	27+810	A	28+020	LINEA, NIVEL

13 DEFECTOS DETECTADOS.

NOTA: ES NECESARIO SEAN CORREGIDOS LOS DEFECTOS GEOMETRICOS DETECTADOS ANTES DE PONER LA VIA EN OPERACION. LA MULTICALZADORA DA RENDIMIENTO DE 500 MT. POR HORA POR LO QUE SE RECOMIENDA ALINEAR, CALZAR Y NIVELAR LA LONGITUD DE VIAS 1 Y 2 COMO TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DE GEOMETRIA DE LA VIA, ENTRE ATLALILCO Y MIXCOAC

Independientemente del análisis que llevó a cabo el operador del equipo en cuestión, los expertos en vías ferroviarias del Instituto Mexicano del Transporte hicieron su propio análisis concluyendo lo siguiente:

**TRAMOS DE VIA CON DEFECTOS GEOMETRICOS QUE SON NECESARIOS TRABAJAR CON
ALINEACION, CALZADO Y NIVELACION MECANIZADA. (VERSION IMT.)**

DEFECTOS/VIA	VIA	DE KILOMETRO	A	KILOMETRO	LONGITUD KMS.
11	1	19.000		19.150	0.150
	1	19.230		20.580	1.350
	1	20.945		21.145	0.200
	1	22.950		23.400	0.450
	1	23.845		23.900	0.055
	1	24.435		24.455	0.020
	1	24.850		27.870	3.020
	1	25.250		25.650	0.400
	1	26.031		26.051	0.020
	1	26.150		26.250	0.100
	1	26.780		27.380	0.600
	1	27.760		28.060	0.300

TOTAL KILOMETROS 6.665

9	2	18.885		18.905	0.020
	2	19.376		19.396	0.020
	2	19.780		20.400	0.620
	2	20.925		21.050	0.125
	2	22.725		23.600	0.875
	2	24.480		24.580	0.100
	2	25.470		26.020	0.550
	2	26.450		27.380	0.930
	2	27.500		28.050	0.550

TOTAL KILOMETROS 3.750

Independientemente de los tramos señalados como con defectos geométricos de vía por el operador del equipo, es importante incluir los tramos de vía que tienen defectos continuos de línea y/o nivel por el riesgo que representa la resonancia que causa a los trenes, aún estando dentro del parámetros que ellos tienen normados y que desconoce el IMT.

Es necesario que cuando se trabaje en el desgolpeo mecanizado (alineación, calzado y nivelación) de estos defectos de vía se complete la sección de balasto para que no quede escasa con el consecuente debilitamiento de su resistencia transversal.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los distintos estudios y levantamientos que han sido descritos en este documento y presentado sus resultados, son concluyentes en cuanto las condiciones actuales del tramo subterráneo. Las diferentes tecnologías utilizadas en los levantamientos se complementan y permiten presentar un diagnóstico puntual respecto la problemática que se presenta.

Se llevaron a cabo los levantamientos vectorial robotizado, microondas de alta frecuencia, resistividad eléctrica, deflectómetro de impacto, calas a las capas de balasto, sin olvidar las inspecciones visuales por expertos de la propia Institución.

Del mismo modo, y a partir del diagnóstico de la situación actual y las conclusiones, se generan una serie de recomendaciones que se desarrollan más adelante.

CONCLUSIONES.

1. Como resultado de la inspección visual inicial llevada a cabo en subestructura, superestructura, riel, durmientes de concreto, balasto, soldadura aluminotérmica y aparatos de cambio de vía, se encontraron filtraciones en la estructura del túnel que causan aguachinamientos, provocando defectos geométricos en la vía (línea, nivel y peralte) y que degradan prematuramente el balasto, pudiendo ocasionar el vencimiento de la fijación elástica y/o ruptura por el sobreesfuerzo al que trabajaría y en casos extremos fisuras o la ruptura de durmientes. Por otra parte, se observa que no existen desplazamientos longitudinales de los rieles que conforman la vía, señal de que las fijaciones trabajan correctamente a esta fecha.
2. A partir del levantamiento vectorial robotizado se identificaron a lo largo de 9,140 metros (longitud del tramo subterráneo menos las estaciones):
 - a. 13 zonas con filtraciones, con una longitud que presenta daños en al menos 2,025 metros.
 - b. 1,168 filtraciones puntuales.
 - c. 1,054 metros con filtraciones continuas; esto equivale a que el 31% del tramo subterráneo tiene problemas de filtraciones.
 - d. El tramo con mayor afectación es el interestación entre las estaciones Zapata y Parque de los Venados con un 69% afectado por filtraciones.
 - e. El menor es de Insurgentes Sur a Hospital 20 de Noviembre con un 3%.
 - f. Existen dos zonas con exceso de filtraciones, la primera de Mixcoac a Insurgentes Sur, y la segunda entre los cadenamientos 20+190 y 20+900 entre las estaciones Mexicaltzingo y Atlalilco.
3. Como resultado del levantamiento con microondas de alta frecuencia se obtuvieron los perfiles dieléctricos del tramo subterráneo en medio de las dos vías en tramos de 1,000 m. Los diez perfiles dieléctricos muestran presencia de humedad y contaminación de balasto y por lo menos 40 puntos con mayor presencia de humedad y por lo tanto mayor contaminación del balasto; derivado del agua que por capilaridad contamina y que se refleja en los defectos geométricos que detectó la multicalzadora.

4. Como resultado del estudio de resistividad/conductividad eléctrica se obtuvieron 12 perfiles geoelectrónicos correspondientes a distintos cadenamientos a lo largo del tramo subterráneo. La profundidad promedio de estudio fue de 40 metros y se obtuvo que:
 - a. El 50% de los perfiles muestran humedad superficial.
 - b. La otra mitad, humedad presente a partir de los 5 – 10 m de profundidad
5. Como resultado de las pruebas de materiales de la subestructura se identifica que la estructura granular del tramo subterráneo está constituida en su parte superior por un material de balasto de origen ígneo extrusivo, sin cambio significativo de estratos.
 - a. Se infiere que es un solo estrato de espesor variable de balasto de entre 0.50 y 0.70 m en el que subyace un geotextil.
 - b. No se pudo identificar o descartar la presencia de un estrato diferente por debajo de éste y antes de la profundidad a la que se encuentra la losa.
 - c. La composición granulométrica se apega a los parámetros de material de balasto según parámetros de vías ferroviarias.
 - d. En algunos cadenamientos hay material más fino que la malla de 3/8" que corresponde al límite inferior de la zona granulométrica.
 - e. Se destaca la presencia de humedad en el material de balasto presente en varios sitios a lo largo de la vía, como se puede observar entre Ermita y Atlalilco.
6. Las pruebas de deflectómetro de impacto muestran que el valor promedio corresponde a 55.5 MPa, con valores mínimos de 40 MPa y máximo de 80MPa. El material analizado cumple con los requerimientos de desgaste Los Ángeles, densidad y absorción en concordancia con especificaciones ferroviarias. Es importante contener las filtraciones de agua para que no sufra degradación prematura y trabaje en las condiciones idóneas.
7. Como resultado de la inspección visual en compañía de personal del STC Metro y su Sindicato Nacional se observó que las actividades de mantenimiento han continuado y muchas de las observaciones de la primera inspección visual han sido corregidas. Cumpliendo con las recomendaciones, la vía estaría en condiciones de operación.
8. Como resultado de la revisión a las mediciones geométricas de la vía realizadas en conjunto con TSO, empresa responsable del mantenimiento de la Línea 12, se establece lo siguiente:
 - a. El vehículo de vía con el que se realizó la revisión a opinión de los expertos del Instituto Mexicano del Transporte, es más certero en la detección de defectos de línea, nivel y peralte que de manera visual.
 - b. Según el STC Metro está aceptado su uso conforme a su normatividad, lo cual no fue soportado documentalmente.
 - c. Independientemente de los tramos señalados con defectos geométricos por parte del operador de TSO, es importante incluir los tramos de vía que tienen defectos continuos de línea y/o nivel por el riesgo que representa la vibración que causa a los trenes, aún estando dentro de los parámetros que se manejan como normatividad, mismos que no fueron compartidos.
 - d. En esta condición se encuentra el 50% de la vía (6.7 km en la vía 1 y 3.8 km en la vía 2).

9. Como resultado de la evaluación integral se puede concluir que:
- a. El exceso de filtraciones ha causado una degradación y contaminación del balasto a través de juntas constructivas y grietas en las estructuras de concreto del tramo subterráneo. Es de vital importancia eliminar las filtraciones.
 - b. Agua y suelos finos, por capilaridad emigran hacia el balasto, lo cual habla de problemas existentes de drenaje que provoca deformaciones plásticas en la subestructura y daños prematuros a los componentes de la superestructura, lo cual se refleja en defectos geométricos, y en casos extremos, daños a durmientes, fijaciones elásticas y vencimiento o despunte de rieles, además de altos costos de mantenimiento.
 - c. Por último, la vida útil de la vía depende del buen drenaje que tenga, una vía con drenaje deficiente está condenada a su aniquilamiento prematuro. Es de la máxima importancia y urgencia reparar el sistema de drenaje.

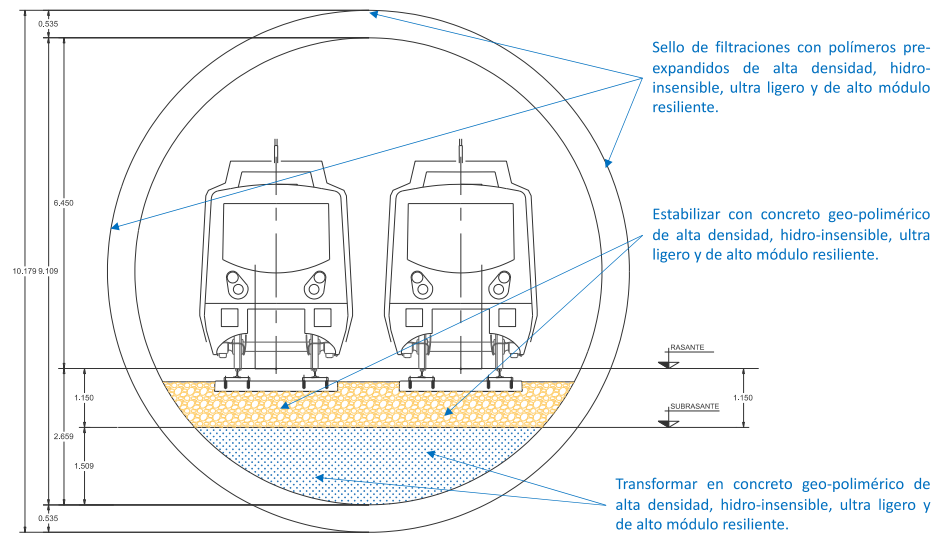
RECOMENDACIONES

El Instituto Mexicano del Transporte a partir del diagnóstico realizado con los diferentes estudios, levantamientos y pruebas recomienda lo siguiente:

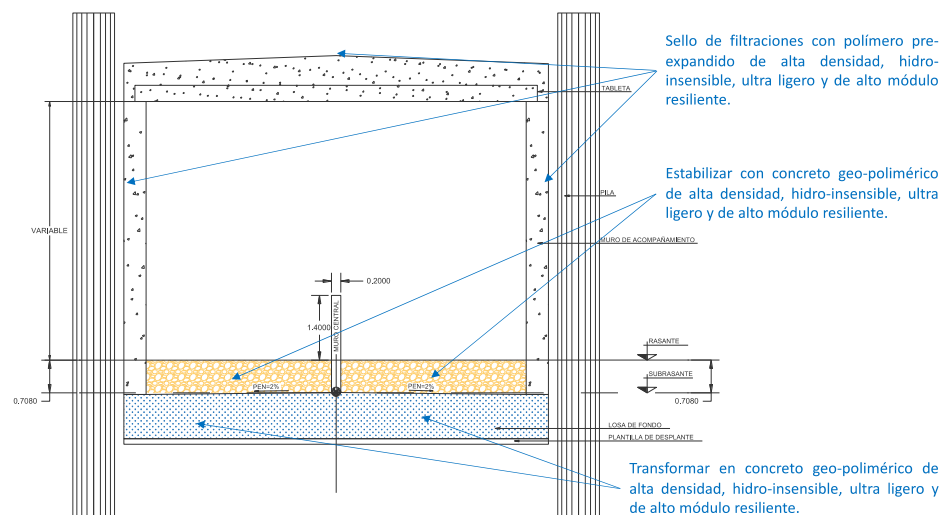
1. Realizar inspección ultrasónica de rieles por lo menos 3 veces al año (o más, si así lo marca su normatividad).
2. Realizar un monitoreo láser en periodos no mayores a 6 meses, para poder realizar comparativas con la línea base que se establezca.
3. Cuando se trabaje en el desgolpeo mecánico (alineación, calzado y nivelación) de los defectos de vía, hay que completar la sección de balasto para que no quede escasa con el consecuente debilitamiento de su resistencia transversal.
4. Eliminar de inmediato las filtraciones de agua mediante inyecciones de materiales ultra ligeros de alta densidad.
5. Estabilizar la subestructura utilizando materiales con altos módulos resilientes para asegurar una subestructura estable que no sufra deformaciones plásticas y resolver las existentes con los mismos materiales mediante inyecciones.
6. Reparar integralmente el drenaje utilizando perforadoras direccionales.
7. Limpiar el balasto en algunas zonas y cambiar el que esté fuera de especificaciones en otras, realizando los trabajos de nivelación de forma mecanizada e intensiva.
8. Estabilizar mediante inyección de materiales con alto módulo resiliente las zonas deformables con carga dinámica a partir de la revisión a la geometría de la vía realizada por TSO.

9. Relevar durmientes dañados, rieles despuntados o con deformaciones y soldaduras fuera de parámetros en caso de encontrarse después del análisis con equipo especializado.
10. La solución esquemática para la reparación de las filtraciones y la estabilización de balasto es la siguiente:

SECCIÓN TIPO T-01



SECCIÓN TIPO C-02A

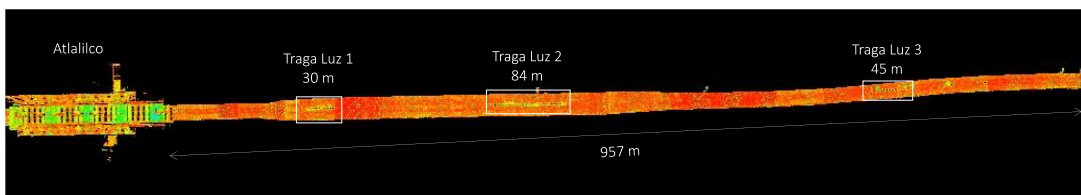


11. Mantener las mediciones periódicas de la multicalzadora y los equipos del IMT de forma permanente para documentar los resultados de las estabilizaciones y con ello el mejoramiento sustancial y sostenido de la seguridad del tramo subterráneo. Dar prioridad a las zonas con golpe de vía y deformaciones plásticas, en las curvas, así como los tramos de transición antes y después de las curvas.

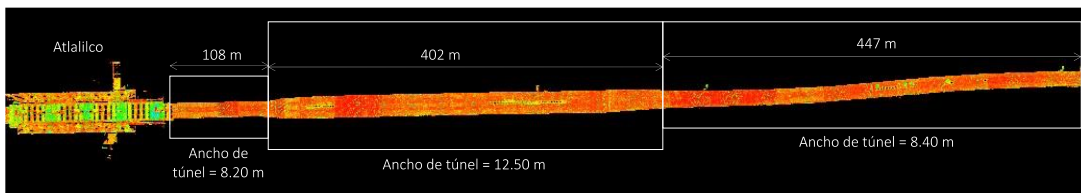
Observación y comentario final: Si se resuelven los problemas anteriores, que se podrían resolver en pocos meses (4-6 meses), se podría poner en operación el tramo subterráneo de la Línea 12 con un alto nivel de seguridad y comodidad para los usuarios entre las estaciones: Mixcoac y Atlalilco, con ello estarían operativas las correspondencias con las Líneas: 7, 3, 2 y 8.

Quizás el taller de mantenimiento se podría instalar temporalmente en la parte de túnel de triple vía que está entre Atlalilco y Culhuacán. La ubicación del taller NO fue analizada por el IMT y queda en manos de los expertos del STC-Metro de Línea 12, en el entendido que no operará por largo plazo el tramo elevado.

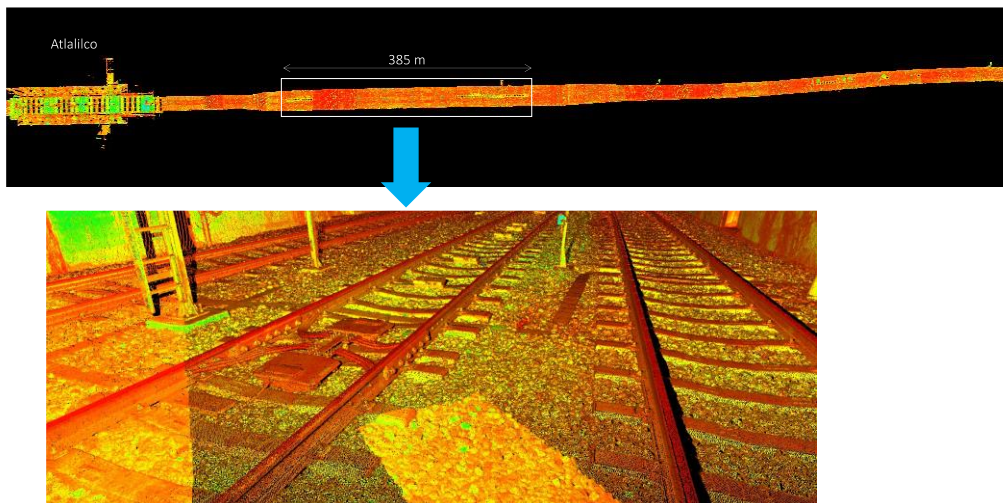
ESQUEMA 1

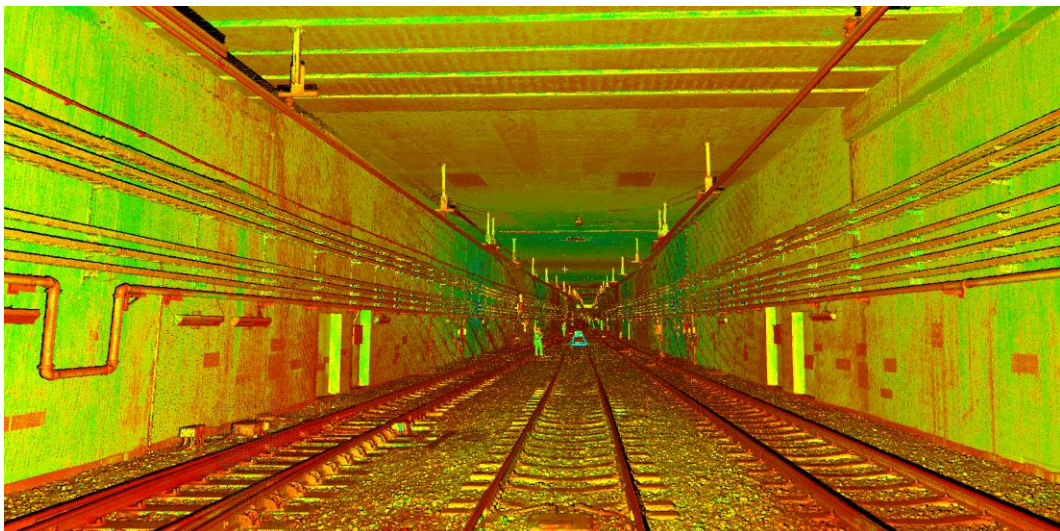


ESQUEMA 2



ESQUEMA 3





11 ANEXOS

11.1 ANEXO FOTOGRÁFICO DE SONDEOS CON LWD

Reporte fotográfico

Sondeos con deflectómetro ligero de impacto (LWD)

Figura 9 Punto de interés para pruebas de LWD debido a filtraciones de agua, cadenamiento 27+340.



Figura 10 LWD en pruebas sobre punto de interés, cadenamiento 27+340.



Figura 11 LWD en punto con filtraciones agua, cadenamiento 26+320.



Figura 12 LWD en punto con filtraciones de agua, cadenamiento 25+470.



Figura 13 Filtraciones con fuerte goteo de agua, cadenamiento 25+470



Figura 14 Pruebas con LWD en zona de transición cadenamiento 20+345.



Figura 15 Material en zona de transición cadenamiento 20+345



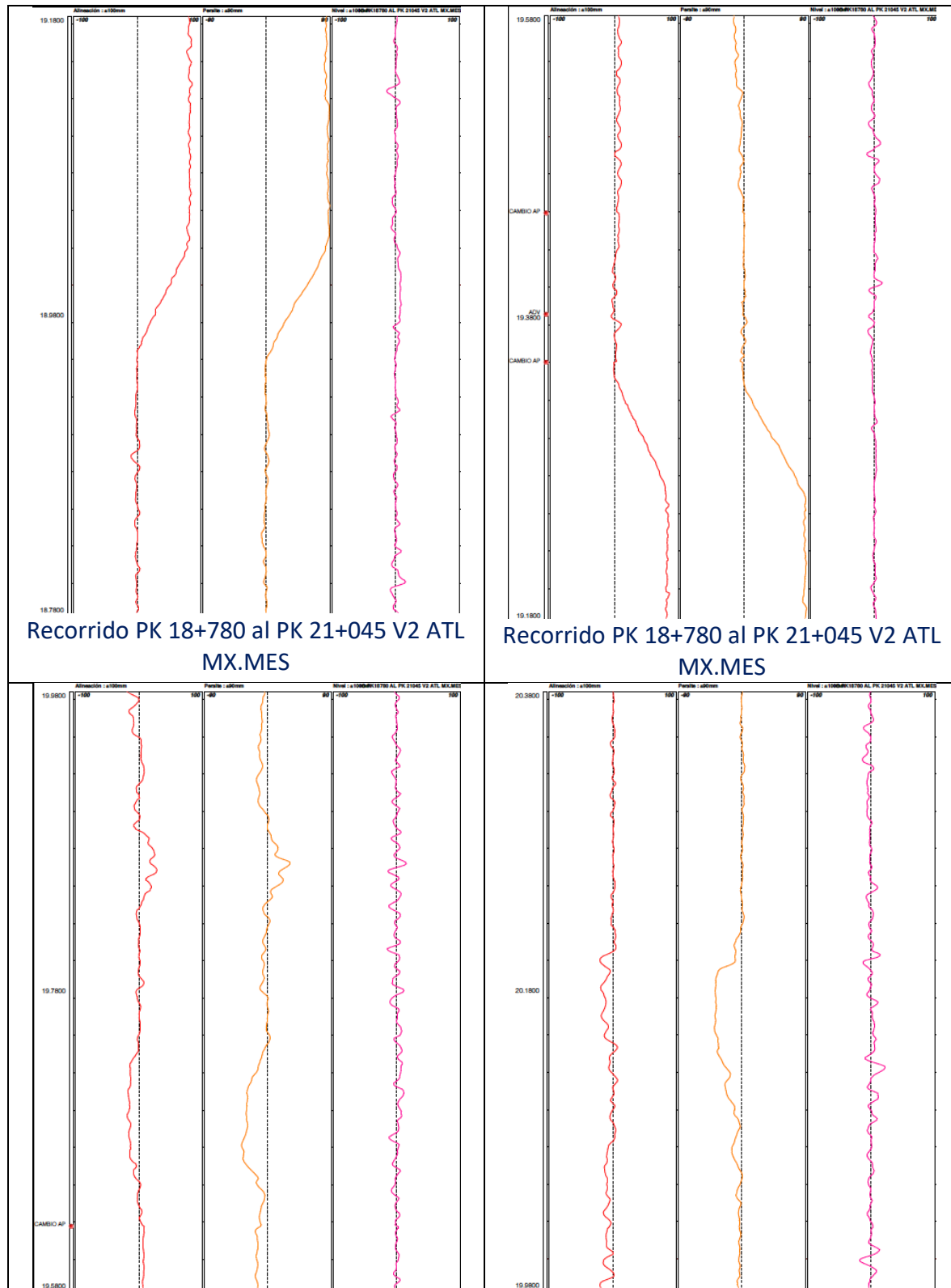
Figura 16 Materiales de zona de transición, cadenamiento 20+345

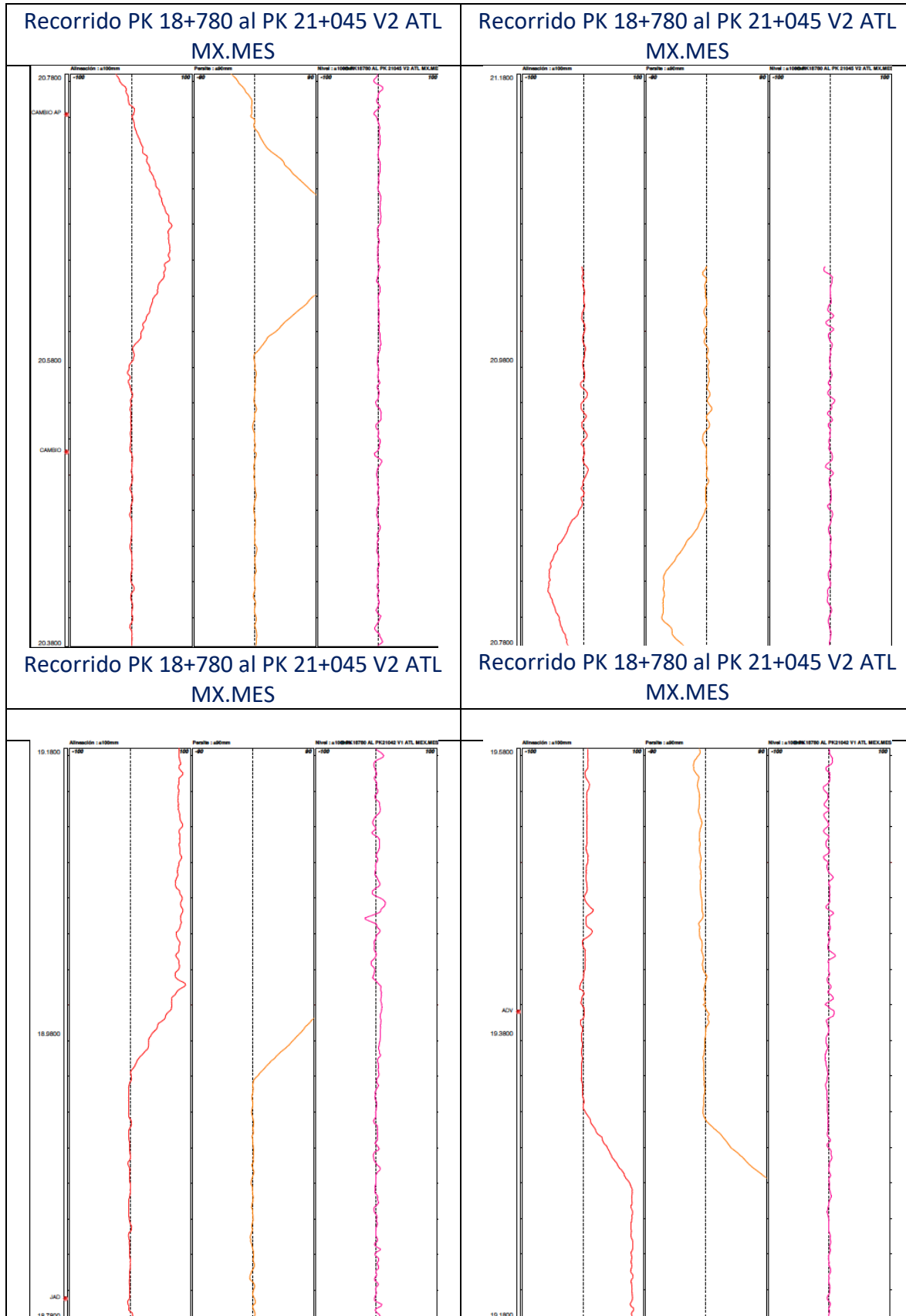
Evaluaciones con deflectómetro ligero de impacto (LWD)

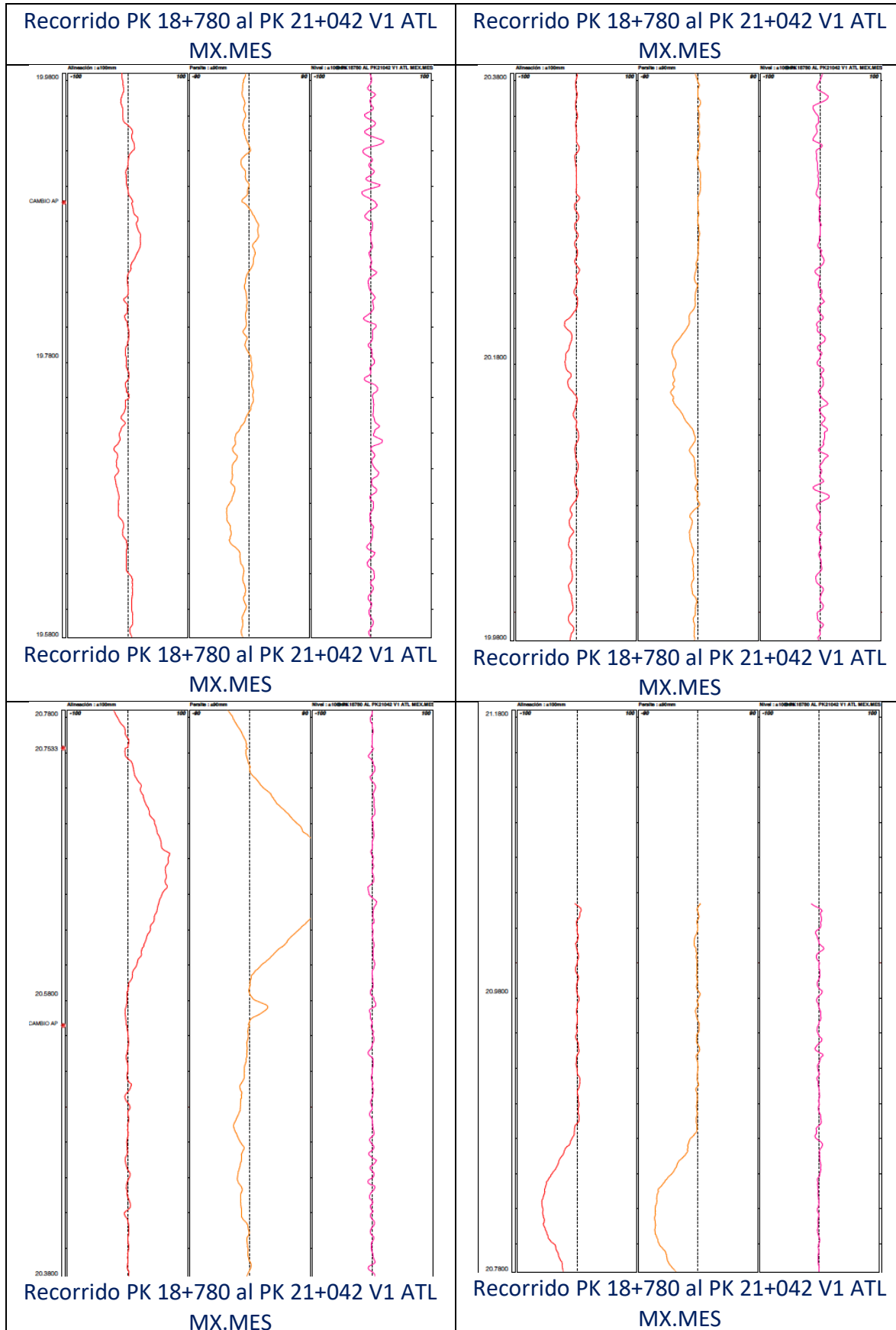
Medición LWD Línea 12					
Inter-Estaciones	Sección Túnel	Cadenamiento	Cadenamiento	Módulo (MPa)	
Mixcoac - Insurgentes Sur	Pilas	28+060	28+060	28+060	58.30
				28+060	60.81
				28+060	62.25
		27+780	27+780	27+780	46.47
				27+780	46.66
				27+780	50.87
		27+739	27+739	27+739	46.12
				27+739	42.91
				27+739	50.07
		27+715	27+715	27+715	47.44
				27+715	48.87
				27+715	50.46
Insurgentes Sur - 20 de Noviembre	Circular	27+340	27+340	27+340	61.71
				27+340	61.67
				27+340	61.67
		27+185	27+185	27+185	82.73
				27+185	77.83
				27+185	83.33
20 de Noviembre-Zapata	Circular	26+320	26+320	26+320	68.88
				26+320	69.92
				26+320	72.49
Zapata - Parque de los Venados	Circular	25+470	25+470	25+470	48.76
				25+470	50.02
				25+470	51.36
Parque de los Venados - Eje Central	Circular	24+740	24+740	24+740	64.66
				24+740	65.87
				24+740	65.50
Eje Central - Ermita	Circular	23+597	23+597	23+597	49.07
				23+597	50.55
				23+597	51.73
Ermita - Mexicaltzingo	Circular	22+470	22+470	22+470	49.54
				22+470	50.46
				22+470	48.00
		21+030	21+030	21+030	49.75
				21+030	49.71
				21+030	52.03
Mexicaltzingo - Atlalilco	Transición	20+345	20+345	20+345	42.12
				20+345	46.70
				20+345	44.44
Atlalilco - Portal Oriente	Rectangular	18+490	18+490	18+490	35.31
				18+490	34.95
				18+490	35.37
				18+490	35.86
				18+490	39.00
				18+490	41.22

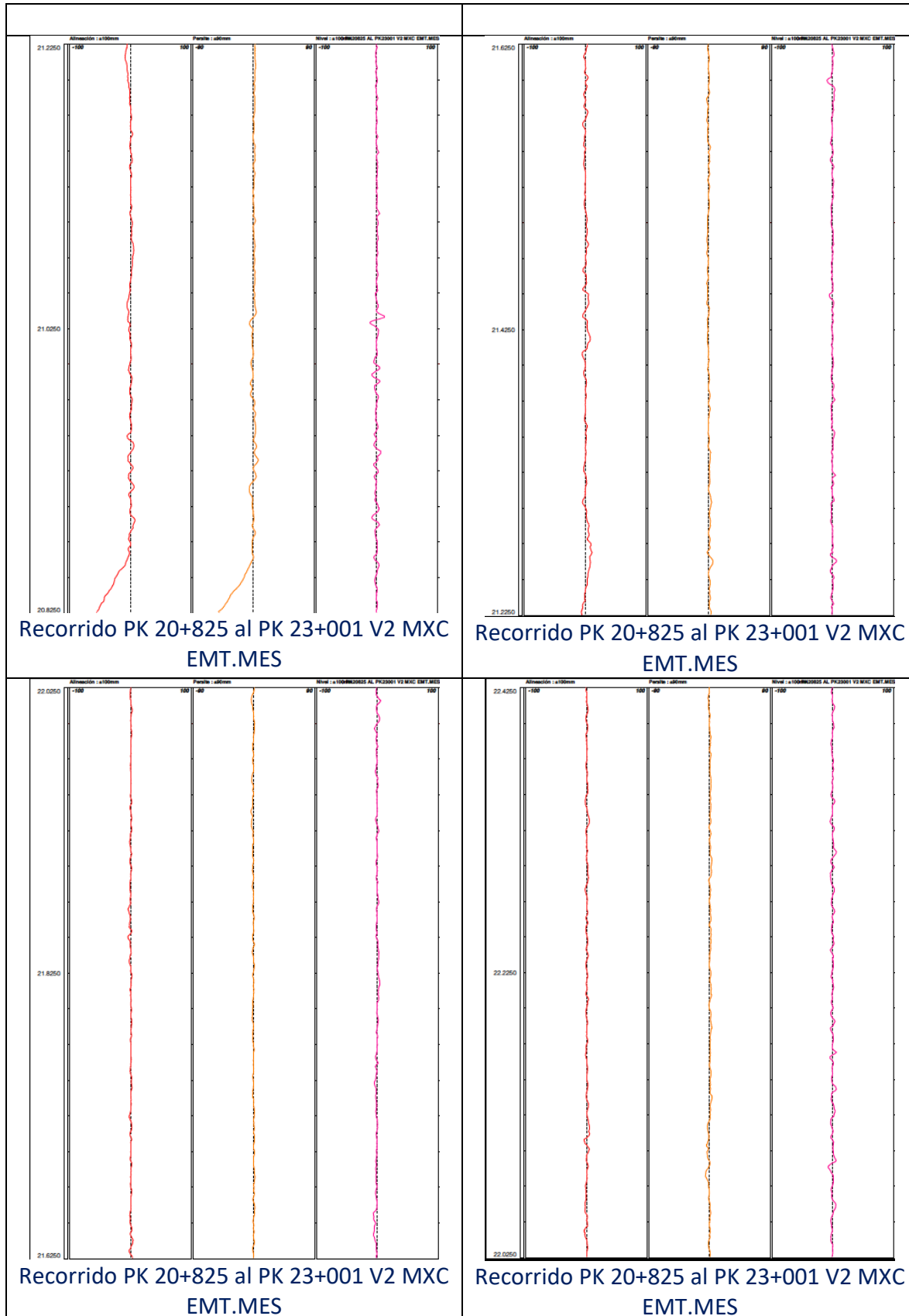
11.2 ANEXO DE MEDICIONES GEOMÉTRICAS DE TSO

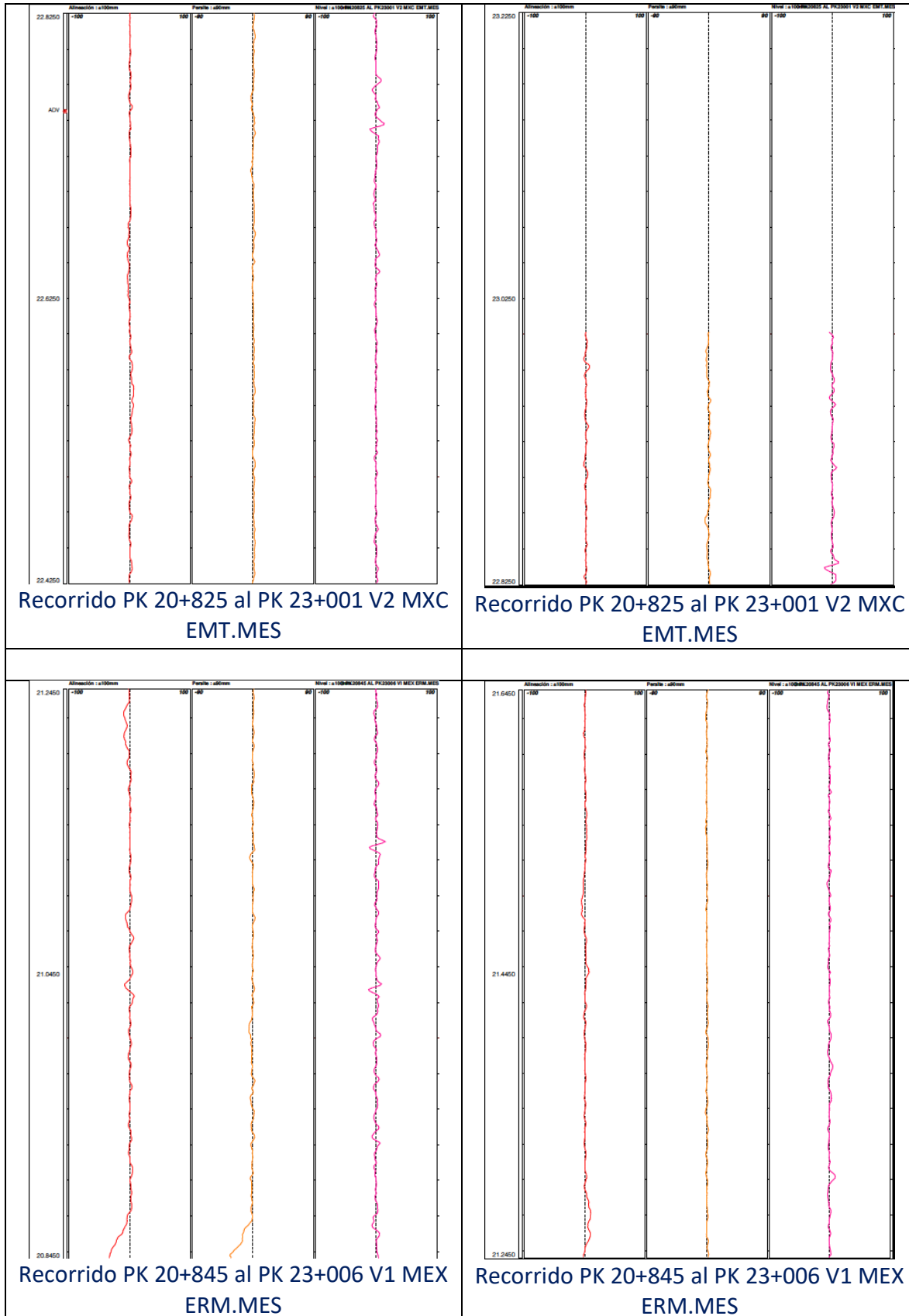
Los resultados de las mediciones son las siguientes:

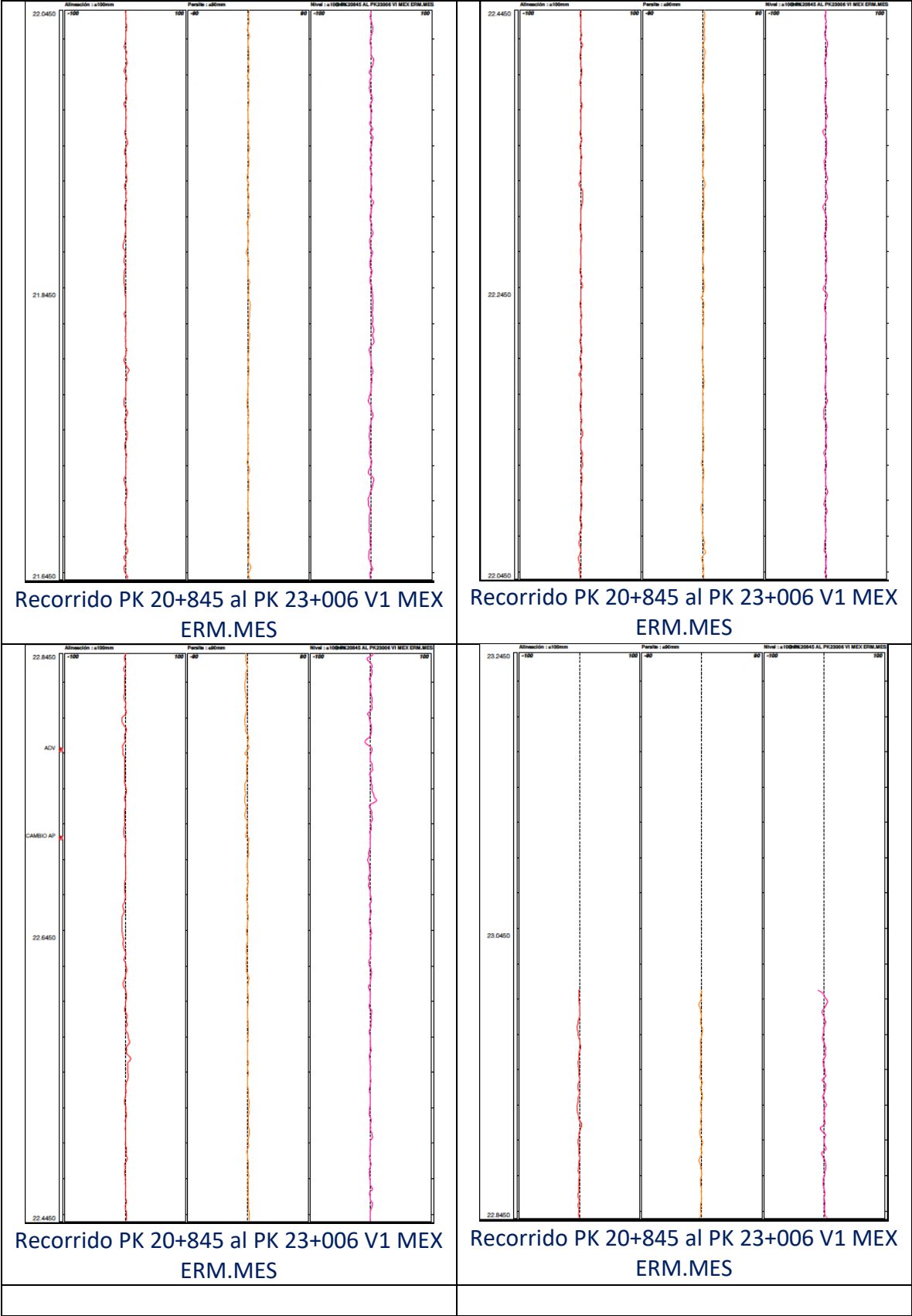


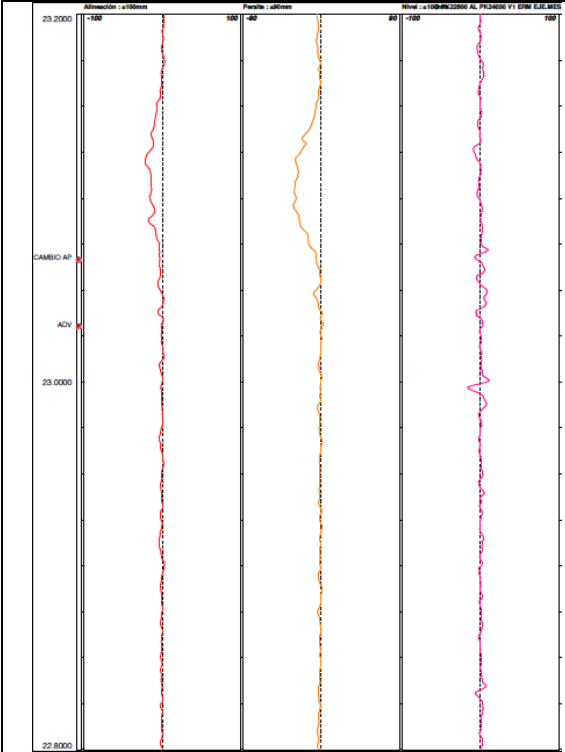




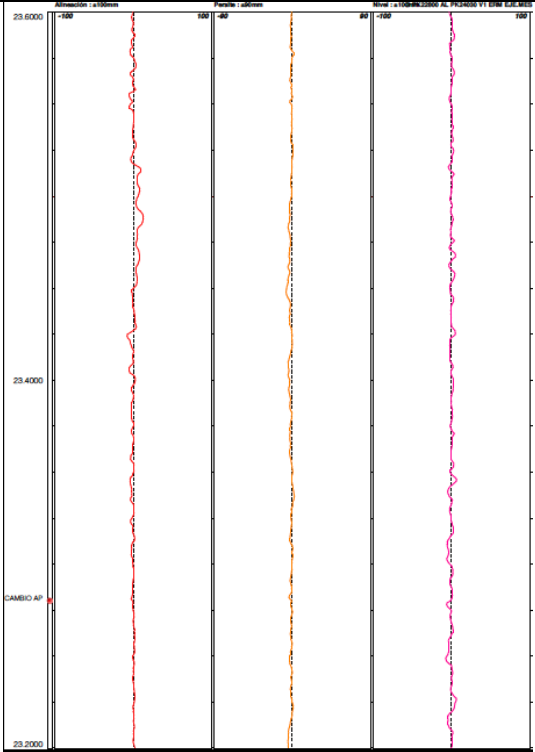




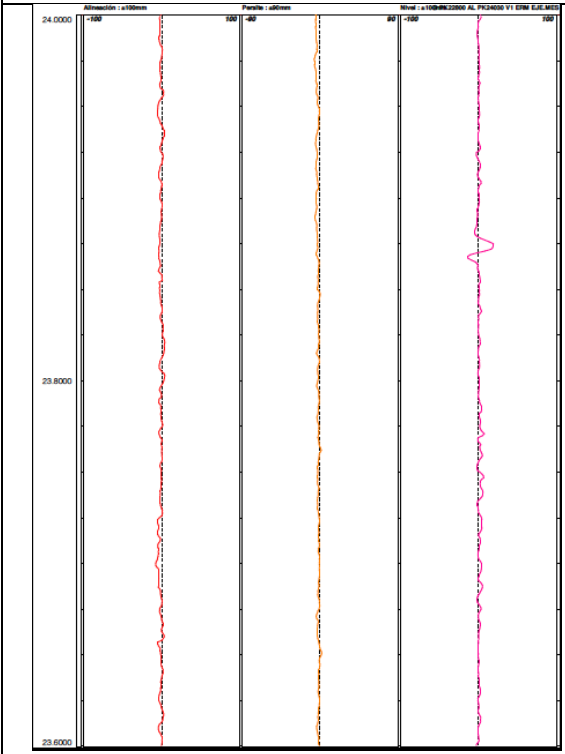




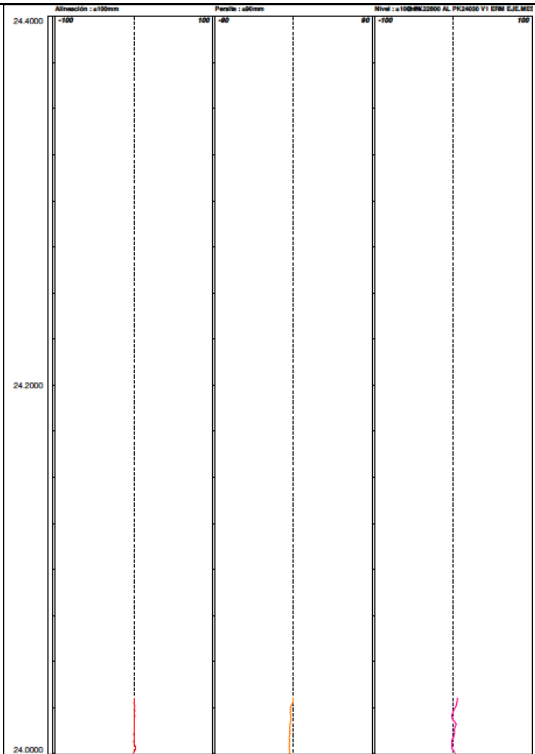
Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V1 ERM
EJE.MES



Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V1 ERM
EJE.MES



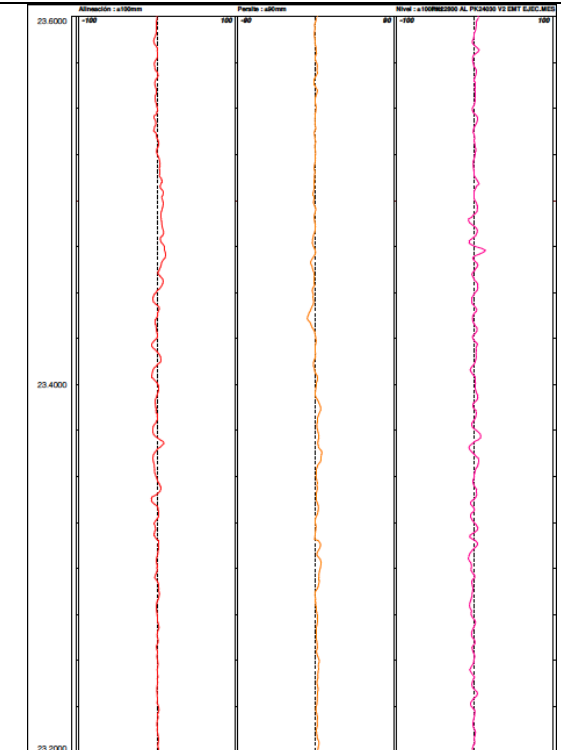
Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V1 ERM
EJE.MES



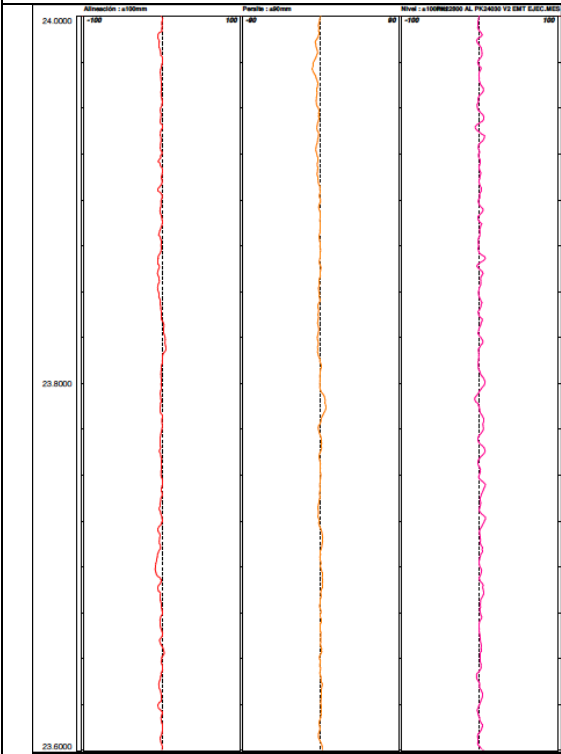
Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V1 ERM
EJE.MES



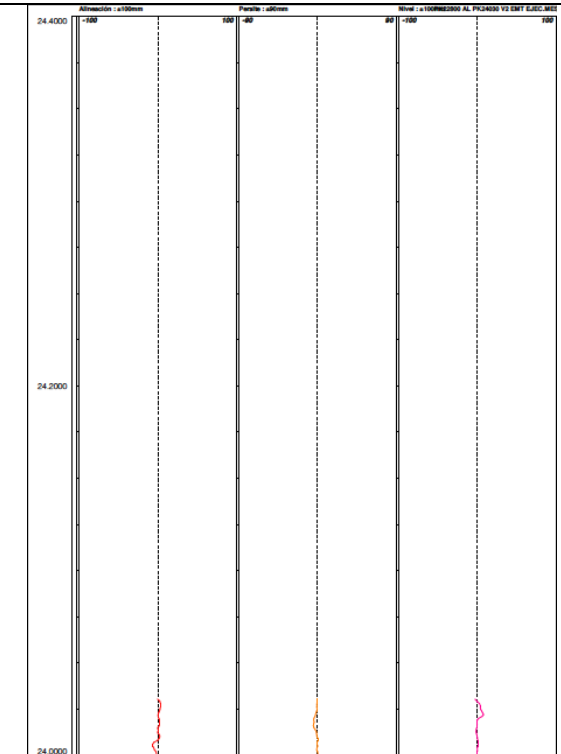
Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V2 EMT EJEC.MES



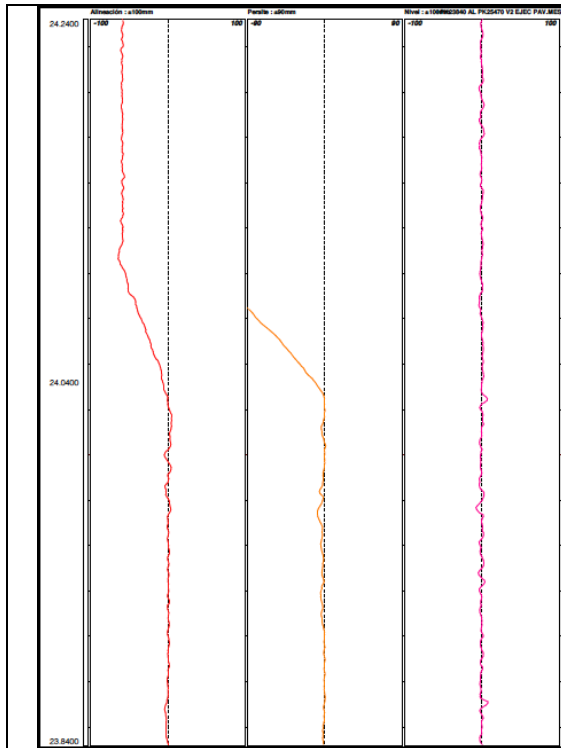
Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V2 EMT EJEC.MES



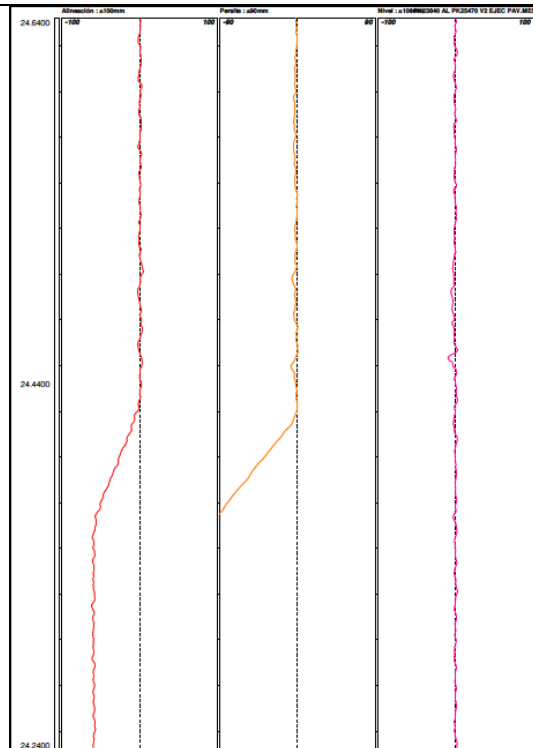
Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V2 EMT EJEC.MES



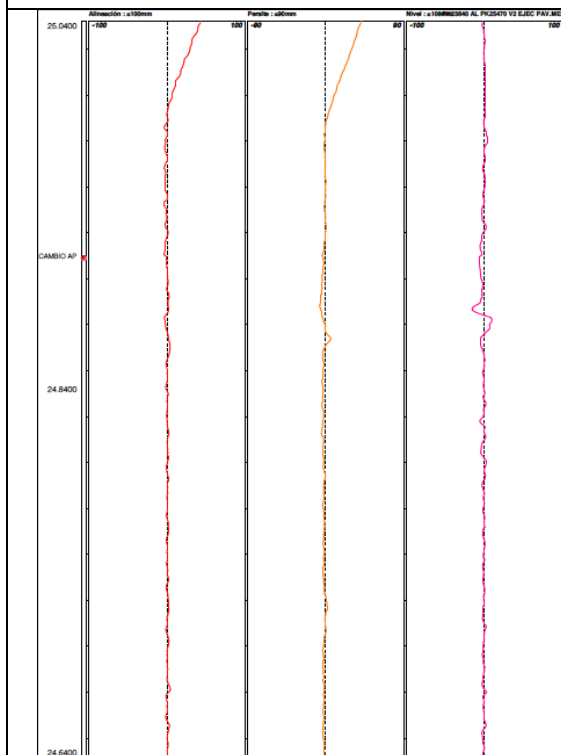
Recorrido PK 22+800 al PK 24+030 V2 EMT EJEC.MES



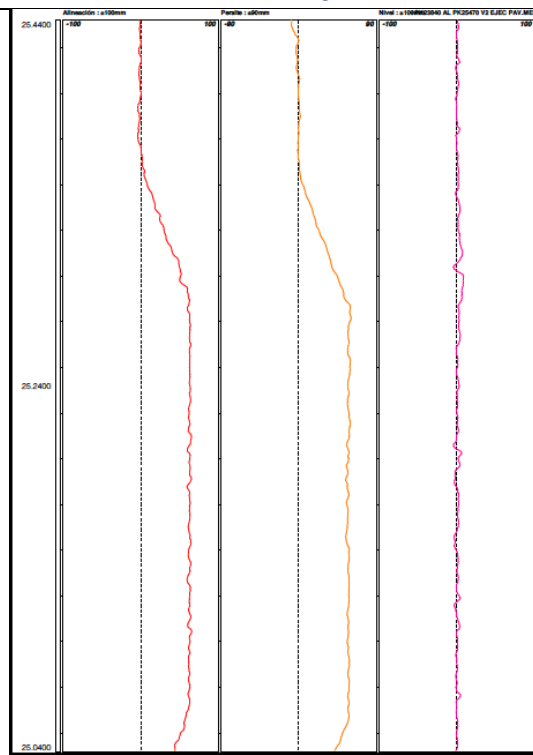
Recorrido PK 23+840 al PK 25+470 V2 EJE C
PAV.MES



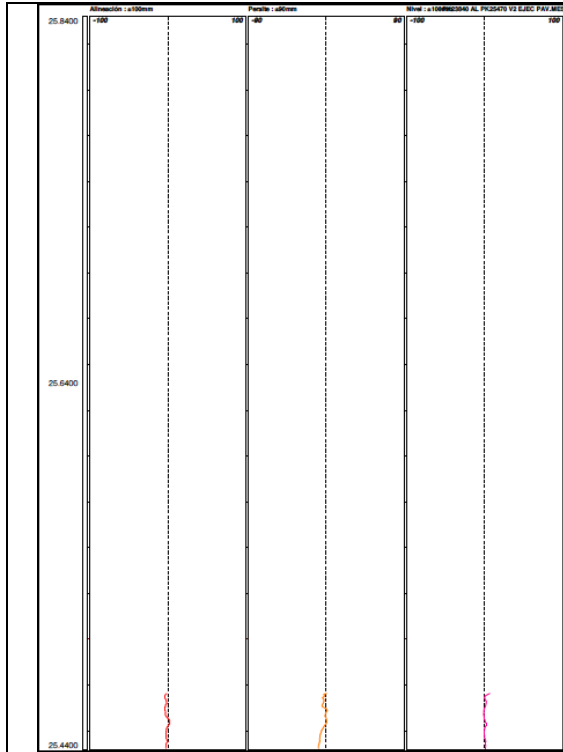
Recorrido PK 23+840 al PK 25+470 V2 EJE C
PAV.MES



Recorrido PK 23+840 al PK 25+470 V2 EJE C
PAV.MES



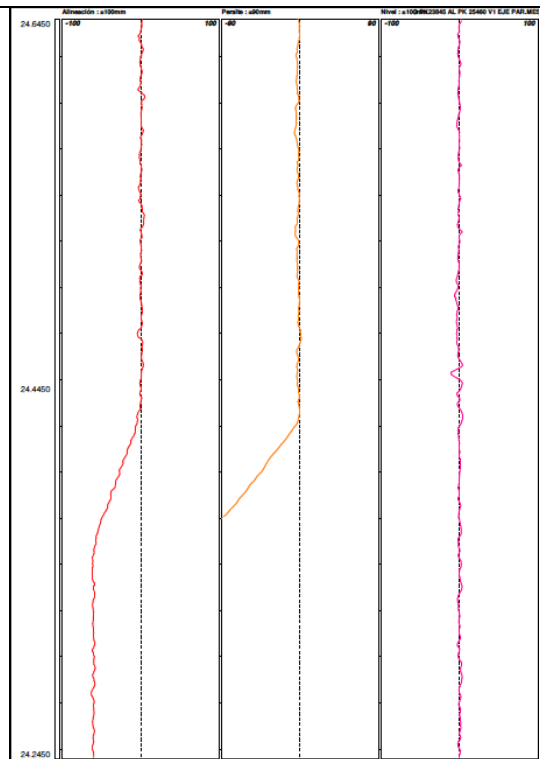
Recorrido PK 23+840 al PK 25+470 V2 EJE C
PAV.MES



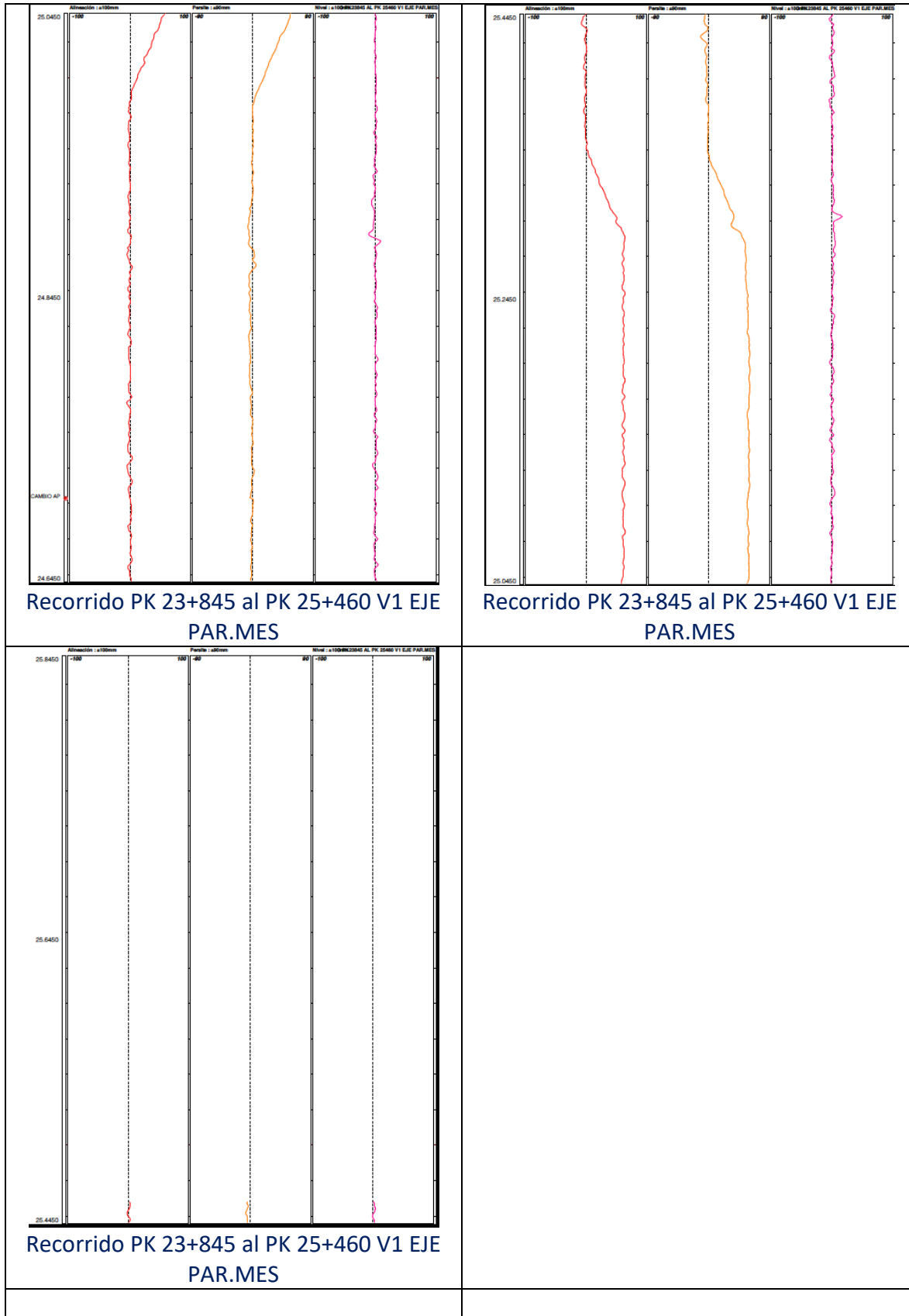
Recorrido PK 23+840 al PK 25+470 V2 EJE
PAV.MES

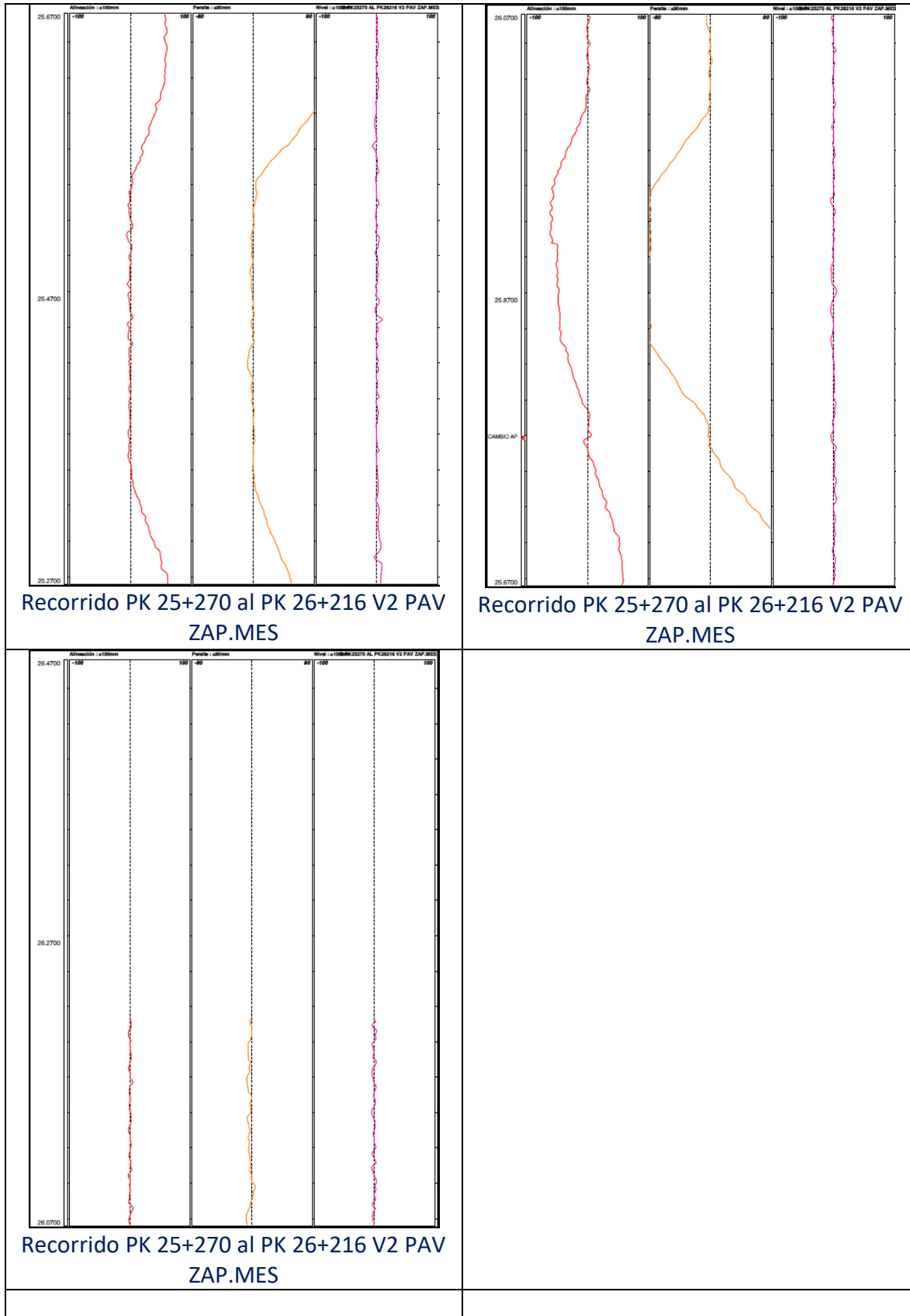


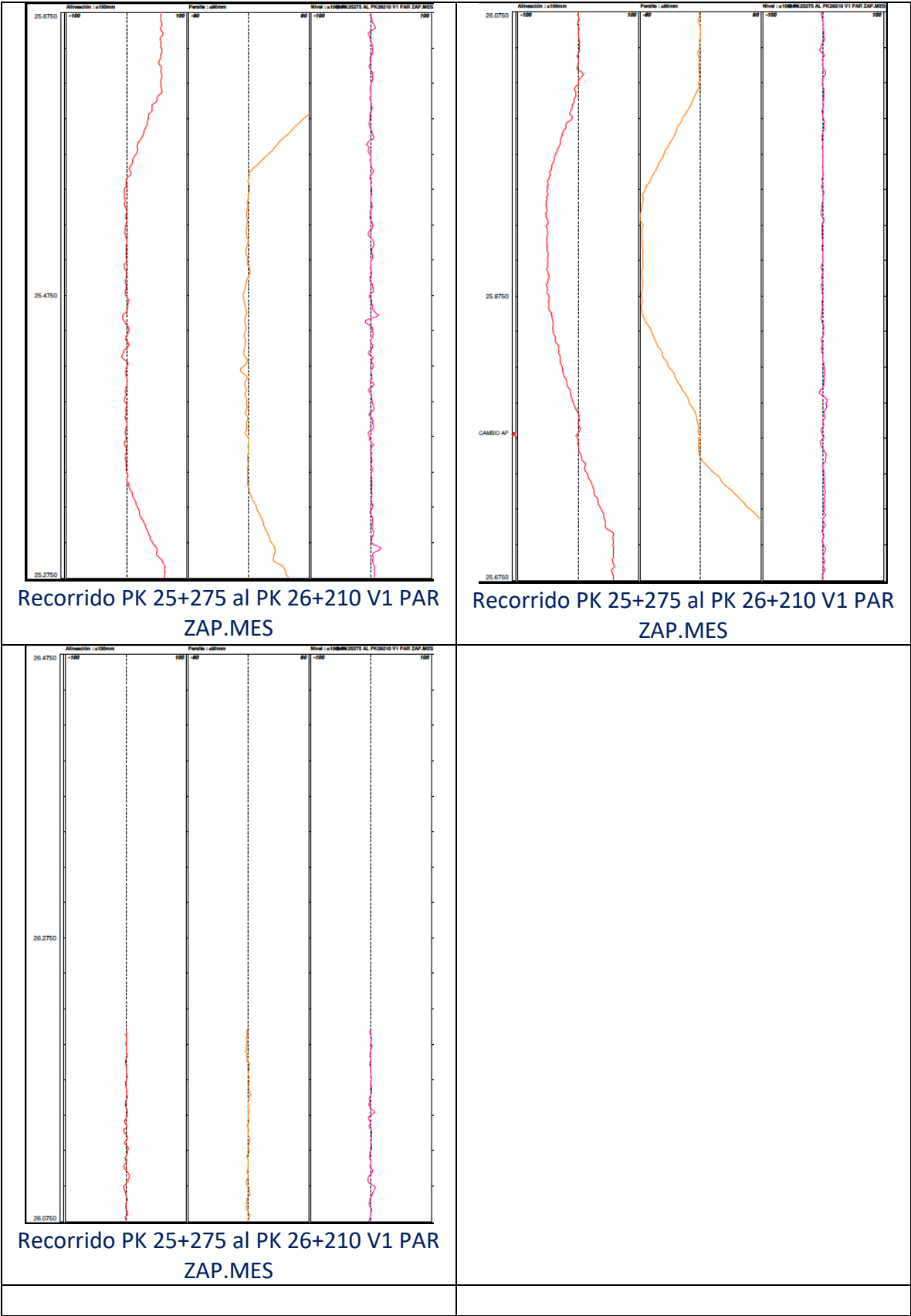
Recorrido PK 23+845 al PK 25+460 V1 EJE
PAR.MES

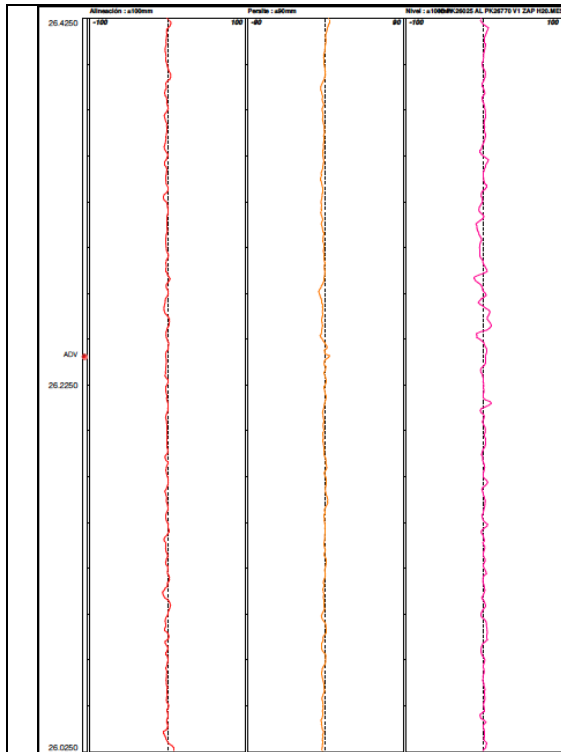


Recorrido PK 23+845 al PK 25+460 V1 EJE
PAR.MES

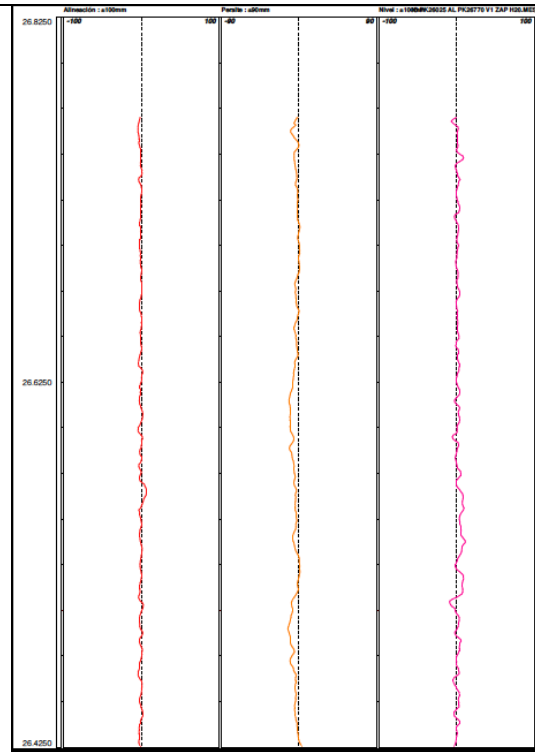




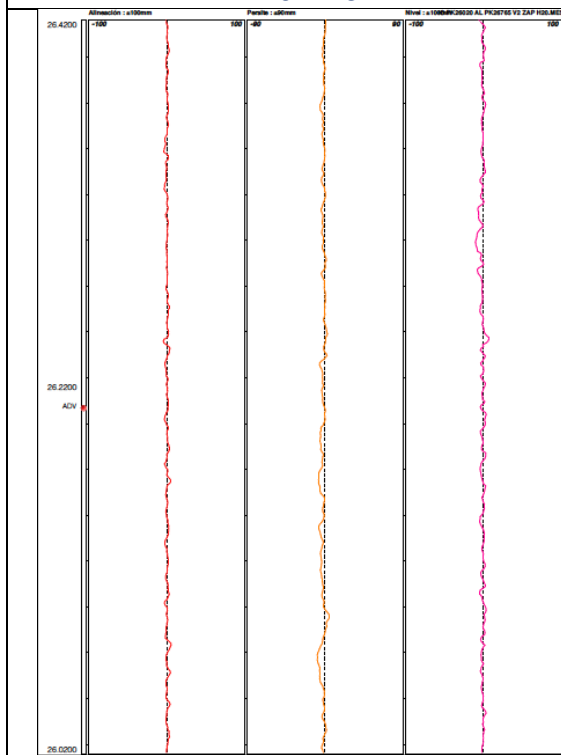




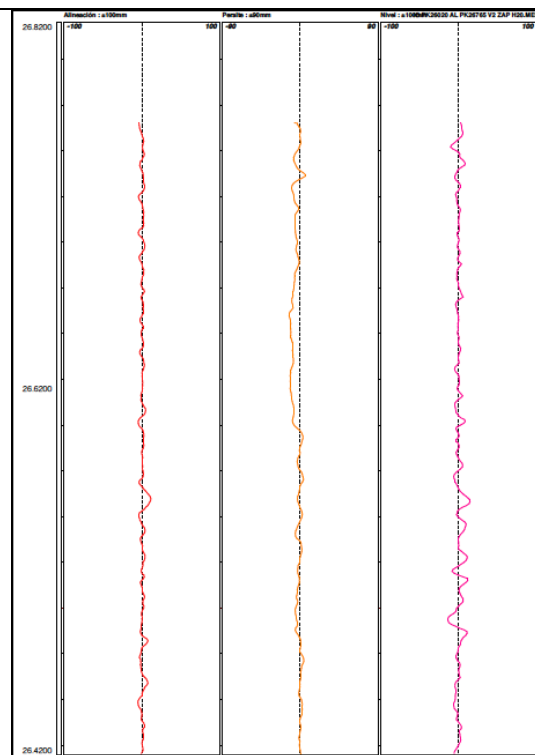
Recorrido PK 26+025 al PK 26+770 V1 ZAP
H2O.MES



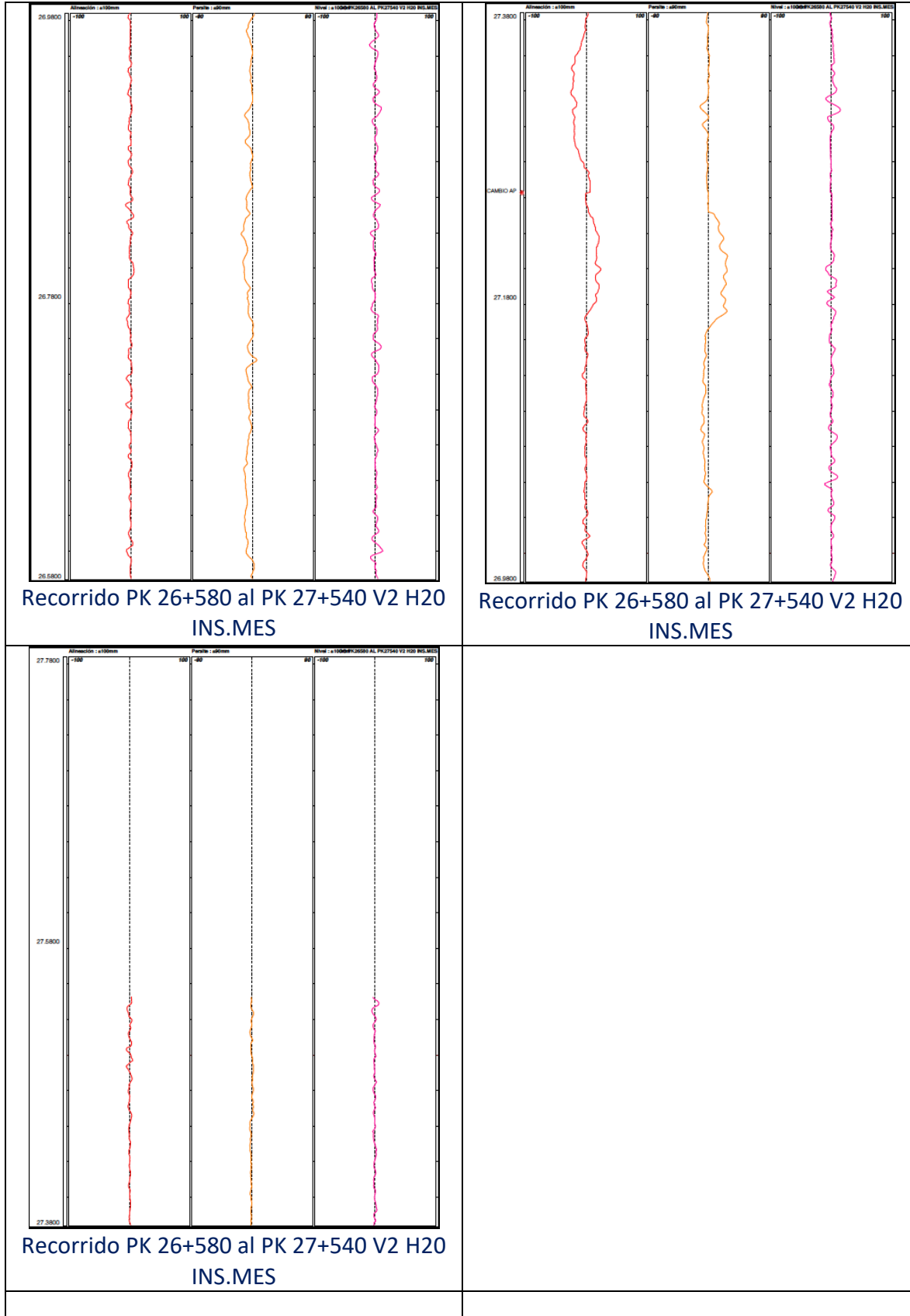
Recorrido PK 26+025 al PK 26+770 V1 ZAP
H2O.MES

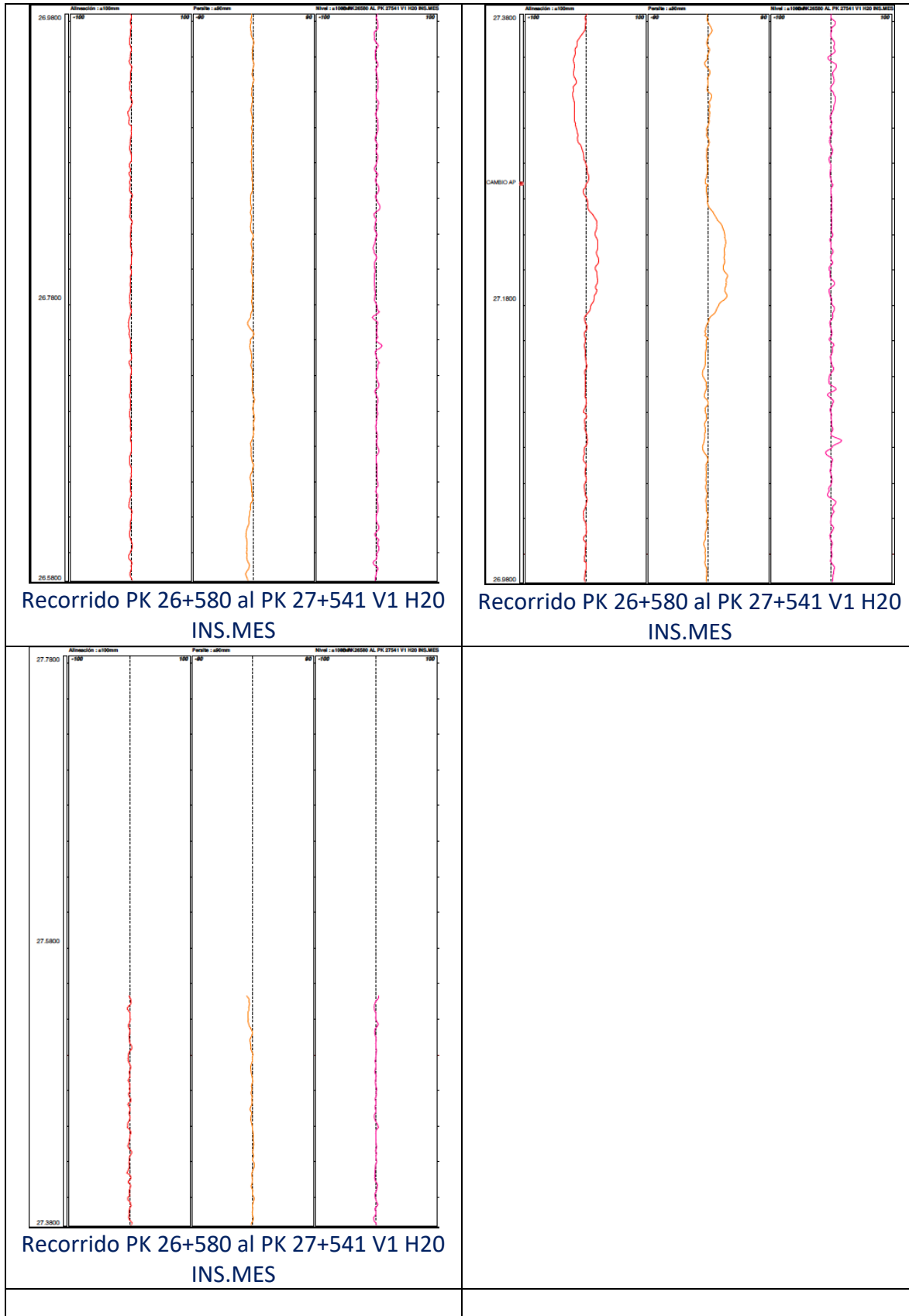


Recorrido PK 26+020 al PK 26+765 V2 ZAP
H2O.MES



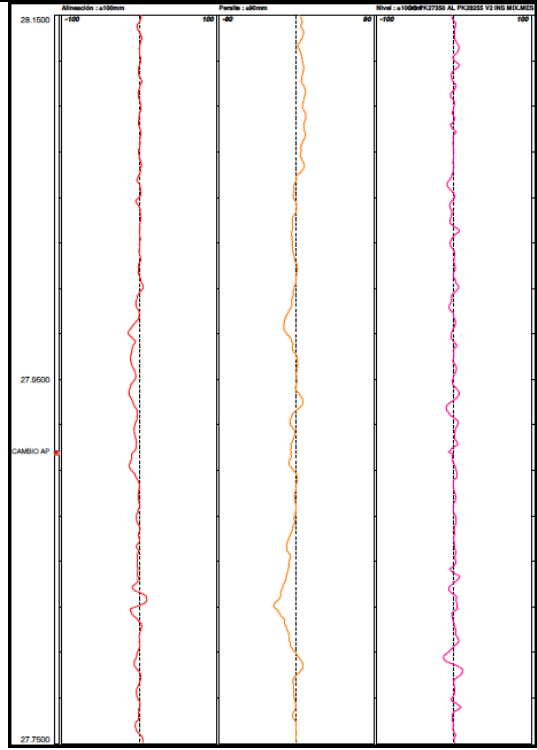
Recorrido PK 26+020 al PK 26+765 V2 ZAP
H2O.MES



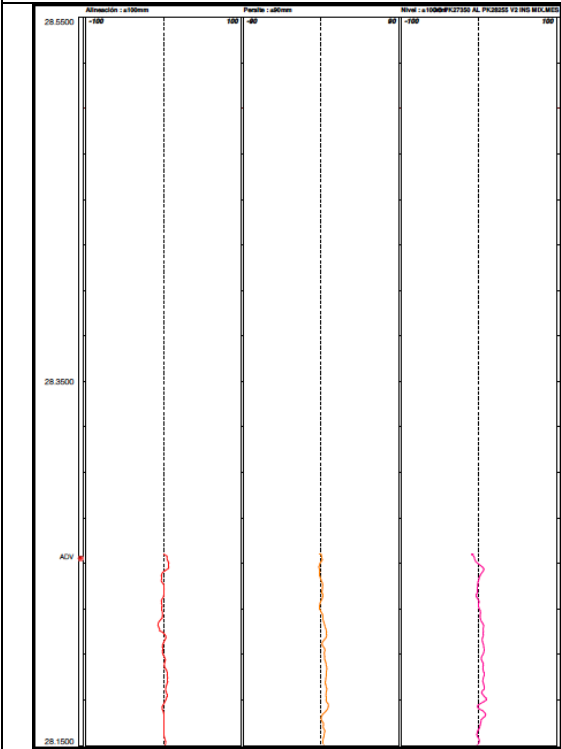




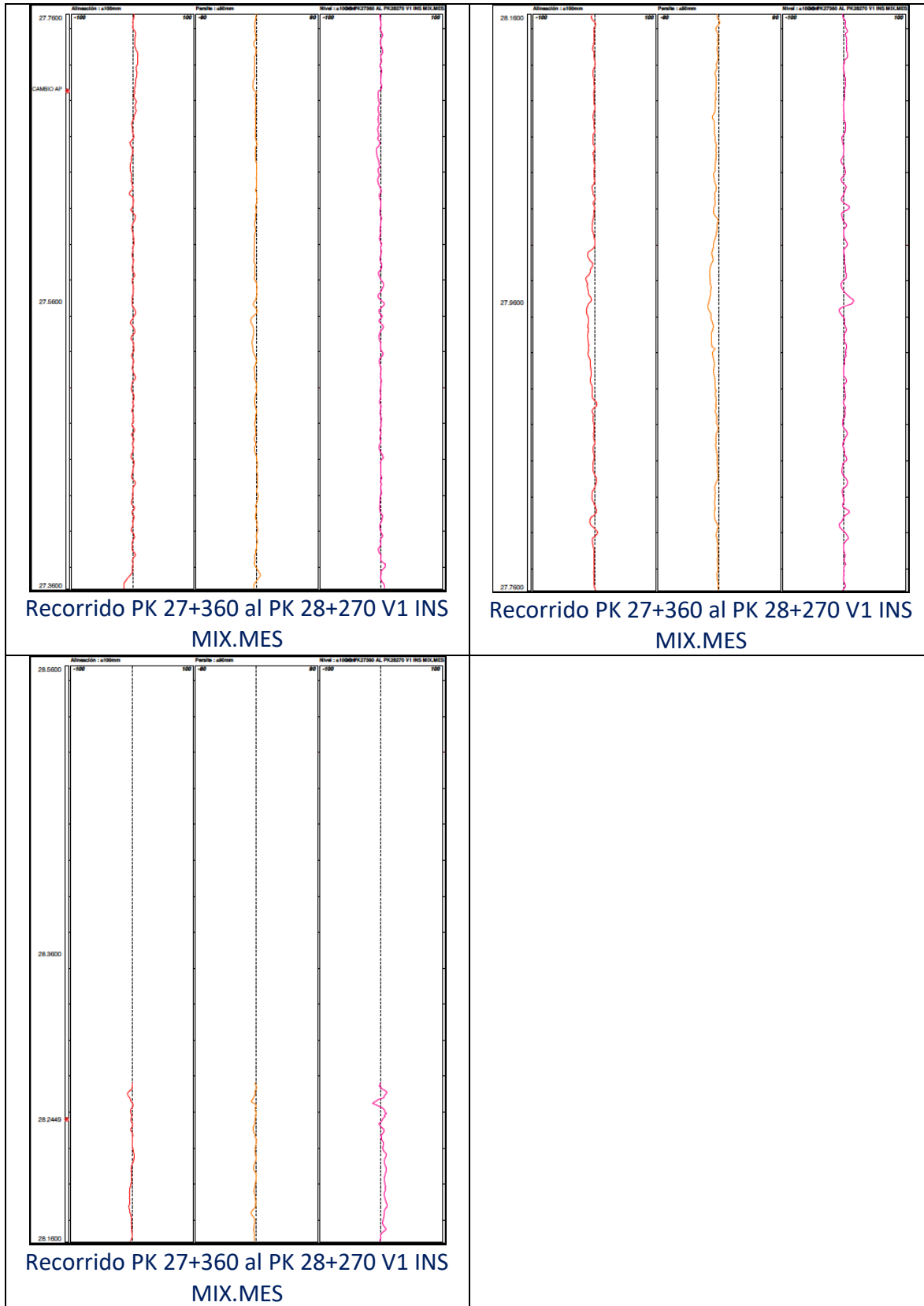
Recorrido PK 27+350 al PK 28+255 V2 INS
MIX.MES



Recorrido PK 27+350 al PK 28+255 V2 INS
MIX.MES



Recorrido PK 27+350 al PK 28+255 V2 INS
MIX.MES



11.3 REPORTE SYSTRA L12-DIAG-VIA-1179-MX-INF-1

Metro de la Ciudad de México
L12-DIAG-VIA-1179-MX-INF-1

07/07/2015

METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO DIAGNÓSTICO DEL TÚNEL DE LA LÍNEA 12

Informe final



SYSTRA
MEXISTRA



1. INTRODUCCIÓN

La línea 12 del metro de la Ciudad de México fue abierta al público el 30 de octubre del 2012 y es operada con material rodante de tipo ferroviario construido por CAF.

La línea 12 se localiza al sur de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente. Tiene una longitud total de vía de 26.4 km, de los cuales 26.28 km son utilizados para servicio de pasajeros. (aproximadamente 11 km corren en túnel de Mixcoac a Atlalilco).

Durante la etapa de realización de pruebas previa a la puesta en servicio de la línea, se empezó a detectar un desgaste ondulatorio prematuro en algunas zonas de curva. Ya en operación, se empezaron a observar fallas estructurales de la vía, al presentarse en el sistema piezas dañadas (durmientes, fijaciones del riel, ruptura de fijaciones de aparatos de dilatación) y una generalización del desgaste ondulatorio del riel en curvas acompañado de desgaste anormal de las ruedas de los trenes que afectaron al funcionamiento y la seguridad de la operación de la línea. Por todo ello, el 12 de marzo del 2014 el servicio de pasajeros fue suspendido entre las estaciones Tláhuac y Atlalilco.

De acuerdo al programa del primer contrato, en su informe de diagnóstico, SYSTRA detectó un cierto número de fallas, particularmente al nivel del diseño, de la realización y del mantenimiento, que permiten explicar las problemáticas encontradas sobre la línea 12, en su tramo en viaducto. En el marco del anterior contrato, SYSTRA emitió una lista de acciones correctivas a implementar.

Este peritaje constaba de 5 fases:

1. Un diagnóstico
2. Una lista de acciones correctivas a realizar
3. Un proyecto ejecutivo
4. La supervisión del trabajo de rehabilitación con una dirección técnica del proyecto durante los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre 2014
5. Una asistencia a la certificación con el fin de poder reanudar la operación de la línea en seguridad con un nivel de mantenimiento aceptable

Como recordatorio, el diagnóstico se estableció en base a:

- La documentación técnica del proyecto.
- Las inspecciones de los diferentes sistemas (vía, material rodante, obra civil).
- Las notas de cálculo.
- Los estudios y pruebas realizadas por TSO,
- Las pruebas dinámicas realizadas en la vía.

En este contexto, la Secretaría de Obras y Servicios del GDF solicitó una prestación a MEXISTRA con el fin de conocer las causas y dar solución a la problemática presentada en el tramo en túnel de la Línea 12 incluyendo los sistemas de vía, plataforma de la vía y sistema de drenaje.

Metro de la Ciudad de México

Diagnóstico del túnel de la línea 12

Informe final

L12-DIAG-VIA-1179-MX-06-1

07/01/2015

Página
14/197



Fase 2: Validación de la realización "in situ"

MEXISTRA ha realizado un análisis in situ de la vía y del túnel (subcapa y drenaje) con el fin de verificar su conformidad con respecto a los documentos de especificaciones técnicas. También se ha utilizado el levantamiento topográfico realizado por la empresa TSO, así como los análisis de la calidad del balasto, de los durmientes y de las fijaciones realizados por un laboratorio de la SNCF durante la primera prueba.

Fase 3: Recopilación de los datos de validación de los sistemas instalados

- * Análisis de los documentos de validación de los subsistemas túnel (subcapa y drenaje), vía y material rodante.
 - o MEXISTRA dedicó una especial atención a la verificación de los ensayos que han permitido validar el rendimiento esperado de las interfaces de estos subsistemas.
- * Análisis de los documentos de validación de la integración de los subsistemas.

Fase 4: Evaluación de las condiciones operacionales

MEXISTRA audió la organización implementada para el respeto de las condiciones de operación y de mantenimiento nominal. Para ello, se tomó conocimiento de los manuales de operación y mantenimiento.

El presente informe presenta el resultado preliminar de esta etapa de análisis de las fallas del tramo en túnel de la Línea 12.

Metro de la Ciudad de México

Diagnóstico del túnel de la línea 12

Informe final

L12-DIAG-MIA-1175-MEX-INF-1

07/01/2015

Página
12/497



7. INSPECCIÓN VISUAL DEL TÚNEL.

Se ha realizado una inspección visual del tramo en túnel de la línea 12. El objetivo de este peritaje fue obtener un diagnóstico preliminar del sistema de drenaje y un diagnóstico de la vía y de sus elementos.

Se ha realizado la inspección visual en el tramo de la línea donde se mantiene el servicio comercial (entre las estaciones Atlalilco y Mixcoac). Todo este tramo se construyó en túnel.

Las zonas objeto de la inspección son representativas del conjunto de la línea e incluyen la mayor parte de las curvas de radio pequeño (inferiores a 500 m) donde se han detectado los desórdenes más importantes presentes en la línea.

La inspección visual ha sido realizada por los expertos de MEXISTRA en un recorrido a pie sobre ambas vías.

Esta inspección visual ha permitido presentar el estado en que se encuentran actualmente las zonas objeto del mismo para el diagnóstico.

7.1 Constataciones generales luego de la inspección visual

La inspección visual pone en evidencia degradaciones y anomalías importantes en las siguientes ubicaciones:

- Componentes de la vía,
- Balasto,
- Sistema de drenaje.

Nota: En esta fase, la capa sub-balasto, de grava arena no se ha retirado, además no se han tomado muestras para análisis en laboratorio.

La inspección visual genera dudas, y por lo tanto, fue necesario la realización de ensayos geotécnicos adicionales.

Estos sondeos geotécnicos han sido realizados mediante penetrómetros dinámicos, muestras con pruebas en laboratorio y ensayos con georadar en el tramo en túnel de la línea 12.

El objetivo fue:

- Determinar la naturaleza y el espesor de las capas de base existentes,
- Determinar la naturaleza del terreno de apoyo,
- Recopilar la información necesaria para una posible rehabilitación de la capa de base de la vía,
- Confirmar el estatus y el diseño del sistema de drenaje

Memo de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

L12-DIAG-VIA-1179-MX-INF-1

07/07/2015

Página
46/497



7.2 Diferentes componentes de la vía

Los principales defectos observados son:

- Rieles: desgaste ondulatorio, desgaste lateral, desgaste vertical, aplastamiento, deformación por fluencia del metal, fisuras, head-checking, desnivelaciones de la superficie de rodadura,
- Soldaduras aluminotérmicas: defectos de geometría, defectos visuales,
- Durmientes: rotura, fisuras y grietas, desgaste anormal del concreto,
- Fijaciones del riel: apriete excesivo, aflojamiento y rotura
- Fijaciones del conrraniel: aflojamiento y rotura,
- El balasto está contaminado con finos
- La geometría de la vía: defectos de nivelación, defectos de alineación de la vía.

Nota: Debido al mantenimiento realizado por MA/TSD muchos elementos han sido reemplazados. Estas operaciones ayudarán a reducir la gravedad de los daños.

Los defectos están principalmente ubicados en las curvas de radio inferior o igual a 800 m: el número y la gravedad de los defectos constatados están ligados al valor del radio de la curva (cuanto más pequeño es el radio, más grande es el número y la gravedad de las fallas).

Los defectos afectan sobre todo a los rieles (sobre las dos filas). Los defectos de riel, especialmente los que se refieren a la superficie de circulación, generan las vibraciones que ocasionan otras degradaciones:

- Rupturas de fijaciones del riel,
- Deterioro de la nivelación,
- Desgaste del balasto (atrición).

8. EXAMEN DE LOS COMPONENTES DE LA VÍA FÉRREA

8.1 Rieles

El riel es de tipo 115 RE de matiz 900; proviene del proveedor TataSteel Francia (Corus Hy).

Las vías están constituidas por largo riel soldado (LRS) formadas a partir de rieles elementales de 38 m soldados en vía por aluminotermia.

Los defectos graves se acumulan sobre las curvas de radio inferior o igual a 800 m y su frecuencia depende del radio de curvatura.

Se observan configuraciones similares en la mayoría de las curvas:

- La entrada y salida a la curva primero es marcada por la aparición de fisuras transversales

Metro de la Ciudad de México

Diagnóstico del túnel de la línea 12

Informe final

112-SMG-VIA-1179-MX-INF-1

07/07/2015

Página
47/497

SYSTRA
MEXISTRA

La granulometría del balasto observada no es conforme a la norma EN 13450 (d=25mm, D=50 mm).



Foto 9. Muchos elementos pequeños PK 23+800

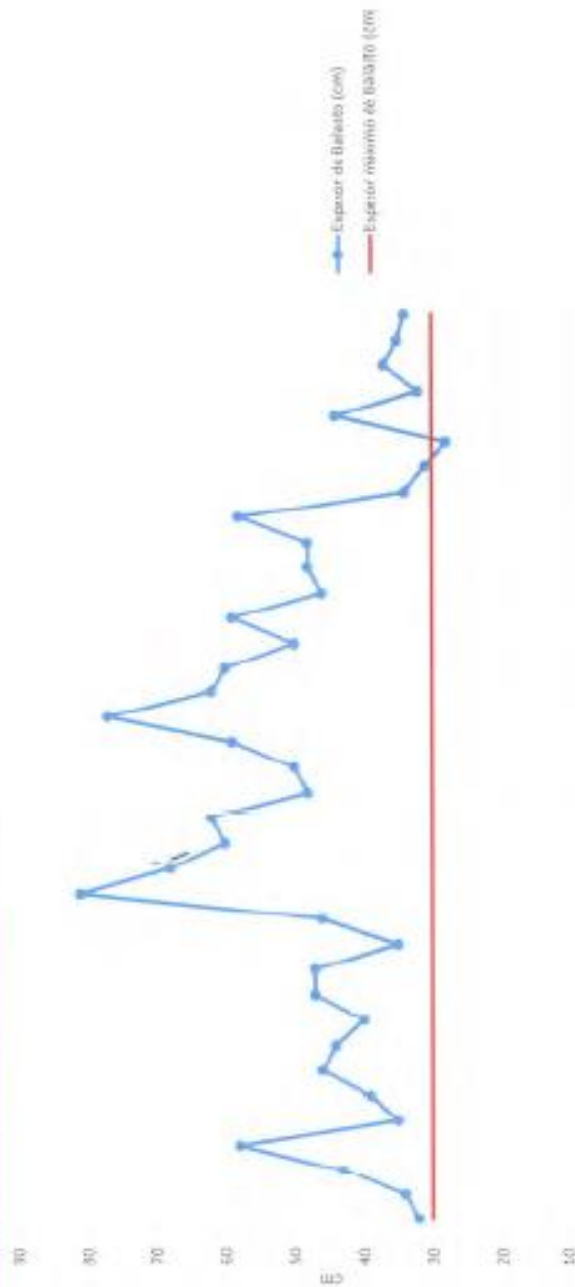
Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

L12-DIAG-VIA-1179-MX-INF-1
07/07/2015

Página
55/497



1.5.2 Diagrama del espesor de balasto en el túnel



18+620 19+000 19+400 19+850 20+300 20+750 21+200 21+650 22+100 22+550 23+000 23+450 23+900 24+350 24+800 25+250 25+700 26+150 26+600 27+050 27+500 27+950 28+400 28+850 29+300

Figura 9. El espesor de balasto en el túnel varía de 28 a 81 cm

Centro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

[Signature]
[Signature]
[Signature]

111-DIAG-VIA-1175-MX-MF-1

07/07/2018

Página
56/697

SYSTRA
MEXISTRA



Foto 34: Desgaste ondulatorio – Aparato de vía 13/23

8.8 Síntesis del análisis de los componentes de la vía

Los reemplazos y los ajustes de los componentes de la vía, como parte del mantenimiento correctivo llevado a cabo por IMA-TSO, han ayudado a mitigar parcialmente los problemas. Sin embargo, para evitar el desgaste acelerado de los distintos componentes de la vía, es necesario proceder a las mismas medidas correctivas que se adoptan en el viaducto.

Tal como se ha indicado anteriormente, la mayoría de los defectos (y los más graves) conciernen a los rieles y afectan a las curvas de radio inferior a 500 m. Los problemas de interacción riel/rueda e interfaz infraestructura/material rodante parecen ser la causa de la mayoría de los defectos que afectan a los rieles, pero estas situaciones no deben dejar de lado otras causas de las averías y problemáticas de la línea 12.

Así, según las constataciones hechas en la visita de la vía, el origen de las degradaciones puede ser clasificado en dos categorías:

- Problemas de diseño y de ejecución:
 - Mala interacción riel/rueda e interfaz infraestructura/material rodante: desgaste de los rieles en curva
 - Fabricación: agrietamiento y rotura de durmientes, composición del balasto
 - Puesta en ejecución: soldaduras, presión excesiva de las fijaciones, defectos de geometría
- Consecuencias de los defectos de riel y de rueda:
 - Agravación de los defectos de rieles
 - Agravación de los defectos de durmientes

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

112-DAG-VIA-L175-MX-INF-1

07/02/2015

Página
62/897



9.2 Perfil longitudinal

Sin observación.

10. SINTESIS DEL ANALISIS DEL SISTEMA COMPLETO VÍA FÉRREA

Los diferentes componentes de la vía (rieles, durmientes, sistema de fijación) tomados individualmente son conformes a las normas internacionales. Sin embargo, se encuentran en los límites de las tolerancias permitidas por dichas normas. Ver el documento SYSTRA "Informe final de análisis línea 12-VF-REV2.10", capítulo 3.4 "examen de los componentes de la vía férrea" MEX-S117-REP-0012-B del 29/08/2014.

Las rupturas de ciertos componentes son la consecuencia del desgaste ondulatorio y no la causa de éste.

La calidad geométrica de la vía (medida y registrada por la máquina MES0 del STC) es irregular. La lectura de los registros permite evidenciar defectos de nivelación longitudinal y transversal de la vía y mala calidad geométrica de las soldaduras. El reemplazo masivo de los durmientes en ciertas zonas ha tenido, igualmente, efectos sobre el deterioro de la geometría.

El desgaste ondulatorio está presente solamente en las curvas con radios inferiores a los 350 m y en las vías desviadas de aparatos. El único punto común entre estas zonas es el radio pequeño: los aparatos se colocan sin peralte y se recorren a velocidad reducida.

El elemento determinante en la causa del desgaste ondulatorio también es el trazo de la vía con curvas de radios inferiores a los 350 m. La velocidad, la baja calidad del balasto, el peralte pronunciado y la calidad irregular de la geometría de la vía son factores agravantes y no son la causa de la aparición del desgaste ondulatorio.

Metro de la Ciudad de México

Diagnóstico del túnel de la línea 12

Informe final

L12-01AG-VIA-1179-MX-INF-1

07/07/2015

Página
67/837

11. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA PLATAFORMA.

11.1 Presentación de los análisis preliminares

Con el fin de analizar el buen funcionamiento del sistema de drenaje, MEXISTRA ha realizado una inspección visual del tramo en túnel de la línea 12. El objetivo de este peritaje fue realizar un diagnóstico preliminar del sistema de drenaje.

Esta inspección visual se realizó en el tramo de la línea entre las estaciones CULHUACAN y MIXCOAC. Todo este tramo se encuentra en túnel.

Las zonas objeto de la inspección son representativas del conjunto de la línea e incluyen la mayor parte de las curvas de radio pequeño inferiores a 500 m, donde se observan los desórdenes más importantes presentes en la línea.

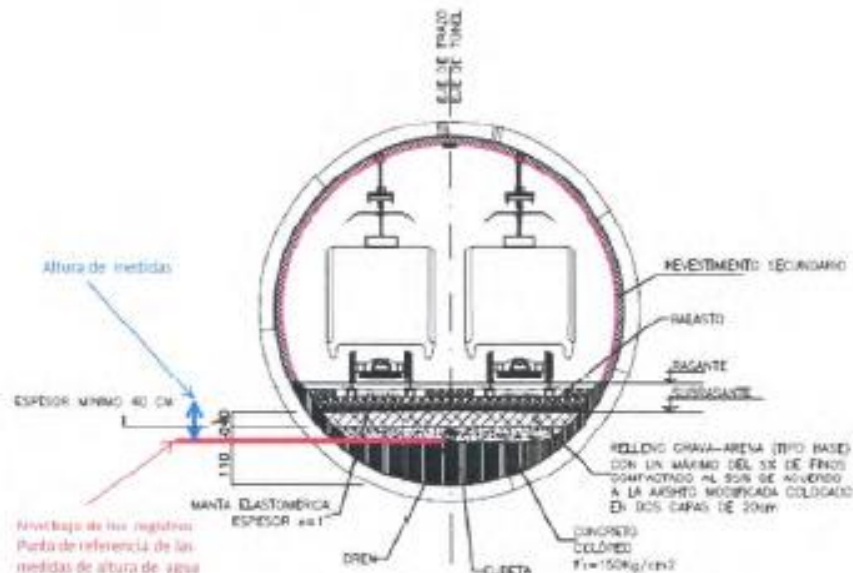


Figura 11. Esquema de la medición de altura de agua en la subcapa

Metro de la Ciudad de México

Diagnóstico del túnel de la línea 12

Informe final

L12-DIAG-VIA-1179-MX-INF-1

07/01/2015

Página
68/157



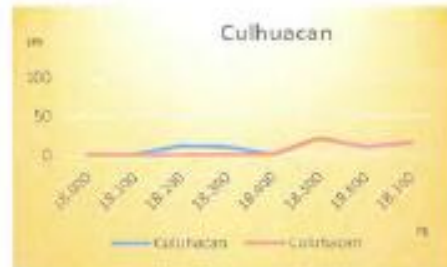
11.2 Mediciones.

Durante la inspección visual del túnel, se han realizado ensayos con el fin de comprobar el buen funcionamiento del drenaje del túnel.

Los niveles de agua varían de 0 cm a 90 cm (estación Eje Central). Se observan las siguientes conclusiones en varias estaciones:

Se muestran a continuación las áreas con problema de drenaje (principalmente vía 1). Los gráficos siguientes presentan los tirantes de agua en la vía 1 y 2.

CULHUACÁN



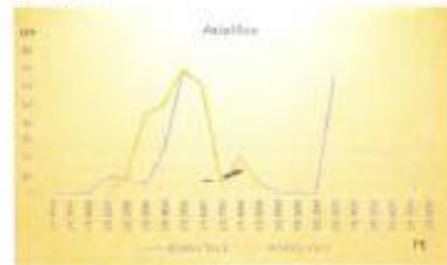
PK 18+000 – 18+700

Presencia de agua. El espesor varía entre 0 y 20 cm.

El espesor del balasto varía entre 22 y 43 cm

Balasto húmedo y con muchos finos

ATLAILCO



PK 19+020 – 20+800

Presencia de agua. El espesor varía entre 0 y 70 cm.

Espesor varía del balasto entre 28 y 46 cm

Balasto húmedo y con muchos finos

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

L12-DIAG-VIA-1179-MX-INF-1

07/02/2015

Página
66/497



11.3 Análisis específico intertramo Eje Central – Parque de los Venados.

Se limpiaron los registros del intertramo de la estación Eje Central a estación Parque de los Venados del registro ubicado en el PK 24+210 al registro ubicado en el PK 24+887.

Tras observar que no existe ningún tapón dentro de la tubería que interfiera en el recorrido del agua hacia el cárcamo, se bombó el agua contenida en el registro del PK 24+700 al registro del PK 24+730, lo cual permitió que el nivel del agua que se encontraba en los registros anteriores bajara.

El único problema que se presenta es que la pendiente de la tubería no es constante y de acuerdo a los planos, lo que permite la aparición de puntos bajos.

MEXISTRA realizará un levantamiento topográfico que determine la posición exacta del ducto para así poder definir la acción correctiva correspondiente.

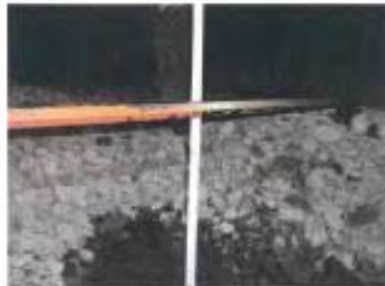


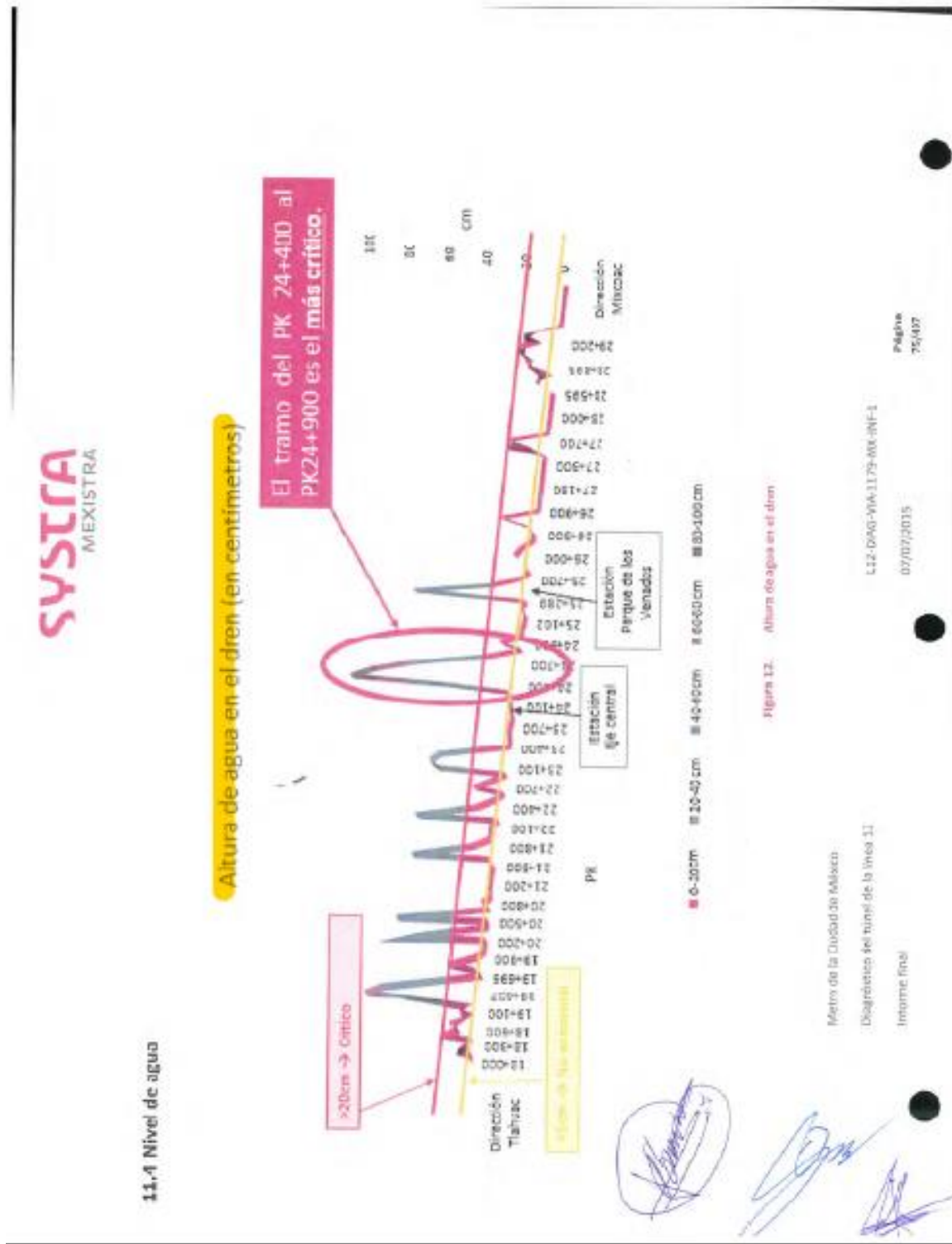
Foto 15. Problema de punto bajo. Éste está en el PK 24+500, y la bomba está ubicada al km 24+888.

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final



L12-DIAG-VIA-1179-MX-Inf-1
07/07/2015





11.5 Conclusión del análisis preliminar

Se reconocen las siguientes irregularidades:

- Con una longitud total de 11,3 km, el túnel tiene un total de 5,7 km de zonas con problema de drenaje (con el criterio agua >5 cm). 23 zonas críticas tienen problemas con un tirante de agua > 20 cm.
- Muchas zonas tienen elementos externos en el sistema de drenaje.
- Mala calidad de la subcapa
- Altura importante de balasto
- El balasto tiene muchos finos
- El balasto está desgastado en la totalidad del túnel (muchos elementos son demasiado pequeños debido a las actividades de bateo reforzado para rectificar la compactación inicial insuficiente que permitió una buena nivelación de la vía desde la construcción original)
- Ubicación e integridad del sistema de drenaje

De acuerdo con las primeras investigaciones, se recomendó:

- Limpiar los registros del sistema de drenaje retirando la basura y cuerpos extraños que se han detectado, durante los recorridos de inspección
- Mantener una campaña de inspección sistemática a lo largo del sistema de drenaje para prever cualquier problema con el agua

Sin embargo, estas primeras investigaciones ponen de relieve varios riesgos:

- Mala instalación del sistema de drenaje
- Problemas de calidad o de degradación de la subcapa

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final



112-DIAG-MV-3175-MX-INF-1

07/01/2015



Página
76/497



12. ANÁLISIS DETALLADO DE LA PLATAFORMA DEL TÚNEL

12.1 Introducción

Para confirmar o no las dudas explicadas en el capítulo anterior y después de una limpieza del sistema de drenaje, se ha realizado un análisis detallado y pruebas para:

- Confirmar la ubicación del sistema de drenaje en el suelo
- Calificar los desempeños del relleno de la subcapa y ver si se puede mantener o si se debe cambiar
- Calificar exactamente el suelo
- Calificar el concreto

La especificación de estas pruebas fue entregada al mismo tiempo que el informe de diagnóstico preliminar del túnel (véase documento Especificaciones técnicas para las investigaciones de la plataforma del túnel, Ref L12-TRA-OC-1075-SY-INF-2).

12.2 Estudio del proyecto "AS DESIGN"

El área del túnel objeto de la presente versión del diagnóstico se extiende del inter-tramo "Culhuacán – Atlalico" hasta la estación Mixcoac.

MEXSTRA confirma que a pesar de estas peticiones no ha recibido todos los planos "As-Built".

En ciertas zonas, los planos no tienen la misma información en los documentos, por ejemplo en el tramo "Parque de los Venados hasta Eje Central":

- PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-01
- PMDF-10-IHS-612255-III-0001-32052-P-00 (Ver las figuras 13 y 17)
- DP L 12 004 14

Además hay errores en el plano PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-01 al nivel de la sección 4.

El documento DP L 12 004 14 parece tener la

12.2.1 Estudio del proyecto "As design" de la plataforma

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la Línea 12
Informe final

L12-DIAG-VIA-5129-MX-
INF-1

02/02/2014

Página
77/457

12.2.2 Conclusiones relativas al diseño de la plataforma del túnel

MEXISTRA confirma que hay muchas dudas sobre el diseño final de las diferentes configuraciones de la plataforma, en efecto, los planos que nos han sido entregados no parecen estar actualizados (particularmente en la sección entre las estaciones "Parque de los Venados" y "Eje Central") por razón que existen varias versiones.

En el tramo con túnel con escudo, de acuerdo con la estructura de la plataforma que no es la óptima (por razón que tiene grava arenal), el sistema de drenaje debería estar perfectamente diseñado y realizado para asegurar que no haya contaminación de la capa de grava arenal por el agua. En el caso contrario, eso puede conducir a una degradación del grado de compactación o del material de la grava arena que conducirían a problemas de nivelación de la vía.

En los otros tramos, los planos que tenemos no presentan problemas específicos de diseño al nivel de la plataforma de la vía.

12.2.3 Características de la subcapa del tramo en túnel con escudo

12.2.3.1 Presentación

La selección del material de relleno que se utiliza como sub-base de la capa de balasto, sobre la que se apoyan los durmientes del sistema de vías, se basó en las recomendaciones del AREMA (American Railroad Engineering Manual). Esta norma define las características geotécnicas suficientes para recibir los esfuerzos que le transmitirán los trenes, distribuidos a través de los propios durmientes del sistema de vías y de la capa de Balasto de 30 cm de espesor (bajo el lecho inferior del durmiente) en la que se apoyan.

Según las especificaciones de PMDF, se había previsto utilizar un espesor no menor a 30 cm para la capa de balasto y no menor a 40 cm para la capa de relleno de grava-arena (sub-balasto).

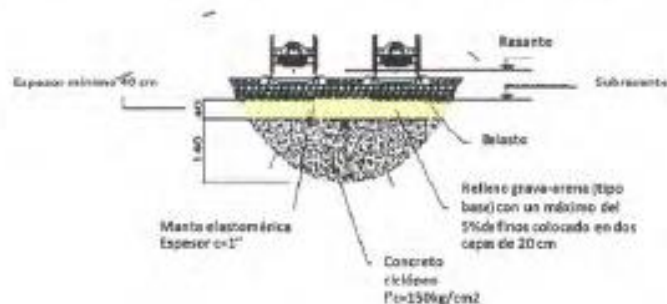


Figura 21. Relleno grava-arena (tipo base)

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final



L12-DIAG-VA-1179-MX-
INF-1
07/07/2025

Página
09/497





Este concreto, compuesto de bloques de piedra y cantos rodados, no requiere una resistencia mecánica muy elevada, puesto que debe asegurar un rol de relleno únicamente. En consecuencia, la resistencia a la compresión mínima para este concreto debe ser de 100 kg / cm² (10 MPa) en 28 días, utilizando, para realizar las pruebas mecánicas, un cubo de concreto de tamaño 15x15x15 cm.

12.2.4.2 Conclusiones relativas al concreto ciclópeo

Los requerimientos del proyecto son normales y dentro de las normas.

12.2.5 Sistema de drenaje

12.2.5.1 Presentación

MEXISTRA recuerda que los presupuestos para tener un túnel completamente impermeable son muy elevados y que no es recomendable para las aplicaciones de tipo ferrocarriles, por lo que se debe tener un sistema de drenaje en adecuación con el diseño de la estructura de la plataforma y de su composición. En el túnel de la Línea 12 y de acuerdo al suelo de México hay riesgos de desplazamientos de la estructura del túnel y entonces la aparición de filtraciones.

En los tramos en cajón y en túnel tradicional, los planos que tenemos no presentan problemas específicos de diseño al nivel del principio de funcionamiento del sistema de drenaje. Sin embargo, estos planos solo son secciones tipo, los cuales no detallan el sistema de drenaje completo (registro, tubería, cárcamos...).

En el tramo con túnel con escudo MEXISTRA recuerda que la plataforma está basada sobre una subcapa de grava y arena por lo que se requiere que el sistema de drenaje debe ser perfectamente diseñado (forma de captación de las filtraciones, pendientes, desempeños de evacuación del agua, bombas) y realizado (calidad de realización). El capítulo siguiente presenta el análisis específico del proyecto de este tramo de acuerdo con los riesgos.

12.2.5.2 Análisis del proyecto del sistema de drenaje en el tramo en túnel con escudo

MEXISTRA recuerda que los planos que nos han sido entregados no parecen ser actualizados (particularmente en la sección entre las estaciones "Parque de los Venados" y "Eje Central").

El drenaje de este tramo se ha construido según los principios siguientes:

- El tubo de drenaje principal está en el eje del túnel con registros cada 30 m y coladeras cada 10 m entre registros
- Adicionalmente, en estaciones se encuentran 2 tuberías laterales conectadas a la principal en cabeza de estación
- El relleno de balasto permite el escurrimiento superficial hacia las coladeras las cuales descargan a tuberías de PVC de 20 cm con conducción por gravedad a cárcamos pluviales en las cabeceras de las estaciones.

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la Línea 12
Informe final

112-DIAG-VIA-11.29-MX
INF-1
07/07/2015

Página
30/407



La determinación del diámetro de la tubería de drenaje del sistema de vías, toma en cuenta lo establecido en los términos de referencia, en cuanto al diámetro mínimo y al hecho de que deben de trabajar por gravedad (a superficie libre), cuidando que las condiciones de velocidad del agua, se conserven dentro del rango permisible.

El tipo de material considerado para la tubería y piezas especiales es de P.V.C. sanitario. Su ensamble e instalación se realiza mediante un anillo de hule, la velocidad del flujo del agua en la tubería se considera en un intervalo permisible de 0.3 a 3.0 m/s.

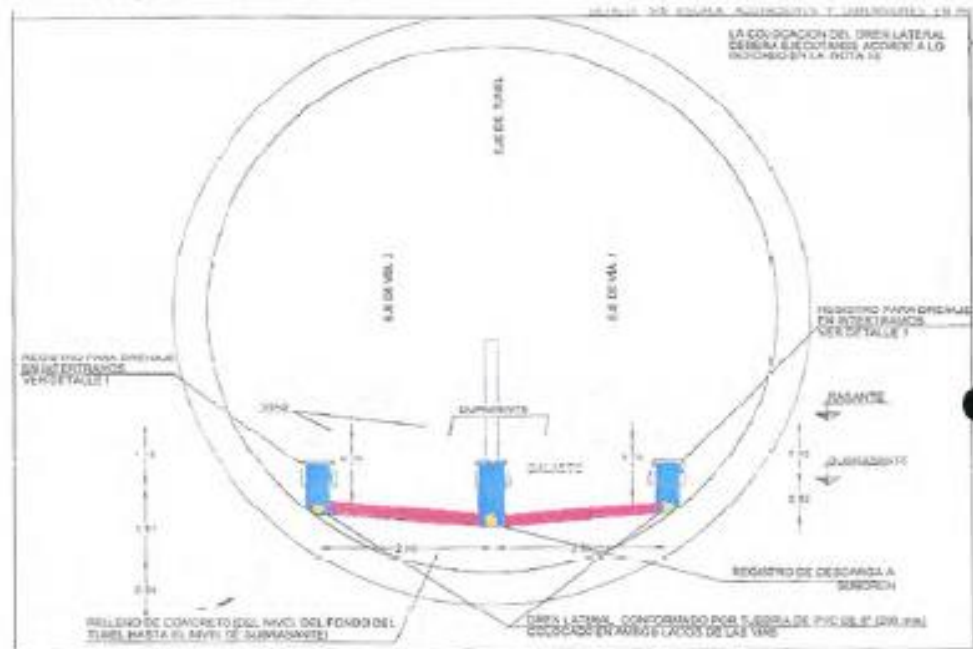


Figura 32. Sección transversal del sistema de drenaje con las celdillas de piso (pá 24+680 al pág 25+253)

Metro de la Ciudad de México
 Diagnóstico del túnel de la línea 12
 Informe Final

LIJ-DIAG-UIA-1179-MX-
 INF-1

07/07/2015

Página
 51/459



12.2.5.3 Conclusiones relativas al sistema de drenaje

En el tramo en túnel con escudo, los planos de sección "As design" que tenemos permiten confirmar que el diseño del sistema de drenaje previsto no permite asegurar que no haya contaminación de la grava arena en caso de filtraciones importantes, en particular:

- Inexistencia del sistema de recuperación de aguas de escorrente sobre el paramento, lo que provoca que el agua que escurre sobre los muros llegue hacia el balasto, y la capa debajo de este.
- El dren central presenta entradas situadas en la base del balasto (al nivel de la membrana elastómera). No hay perforaciones en el tubo que permiten recolectar el agua en caso que esta quede atrapada al infiltrarse en la capa sub-rasante debajo del balasto, incrementando los problemas de mantenimiento de la vía. Además, el tamaño del dren es bastante pequeño (diámetro 20 cm).

En los otros tramos, los planos que tenemos no presentan problemas específicos de diseño al nivel del principio de funcionamiento del sistema de drenaje. Sin embargo, estos planos solo son secciones tipo, los cuales no detallan el sistema de drenaje completo (registro, tubería, cárcamos...).

Metro de la Ciudad de México
Dignatario del túnel de la línea 12
Informe final

117-DIAS-VIA-1179-MX-
INF-1

02/07/2015

Página
56/437

Como se puede observar en general el material usado corresponde a una grava mal graduada, con finos cuyo porcentaje varía de 3 hasta 18%. La proporción de los elementos finos se determina sobre la base de la malla 0,075 (200), norma ASTM D-422. MEXISTRA confirma que de manera general, la subcapa no cumple con los requerimientos de la norma (solo 4 muestras cumplen con el valor máximo de finos de 5%).

Los documentos entregados por DGOP a MEXISTRA permiten confirmar que esta situación existe desde las etapas de construcción, por ejemplo, en el documento PMDF-11-MS-612290-III-0301-51442-E-00, se puede observar lo siguiente:

- Recuerdo de las especificaciones al principio del documento:

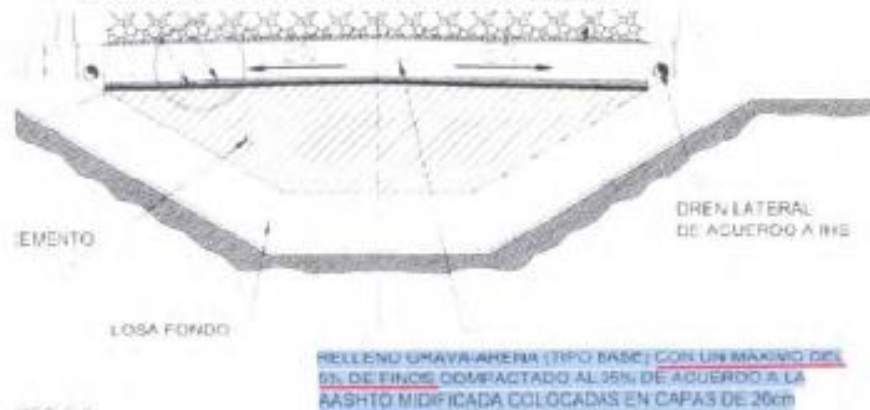


Figura 54. Estratos del documento PMDF-11-MS-612290-III-0301-51442-E-00

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

L12-DIAG-VIA-1179-MX-
INI-1
02/10/2013

Página
115/457



Como se puede observar, en relación con el límite líquido, el material cuyo porcentaje varía de 19,5% hasta 29,1% no cumple con los requerimientos de la norma ASTM D-422, en efecto 25,8% de las muestras tienen resultados superiores al valor máximo permitido de 25% (con un valor promedio de 23,3%).

Además, en relación con el índice plástico, MEXISTRA confirma que ninguna muestra del material cumple con el requerimiento de la norma ASTM D-422. En efecto, los resultados varían de 7,3% hasta 13,5% (con un valor promedio de 9,85%) cuando el valor máximo permitido es de 6%.

12.3.5.4 Prueba con cono dinámico de penetración.

El Cono Dinámico de Penetración, DCP, fue desarrollado en 1956 por SCALA; posteriormente estudios realizados en campo por Lunne y Ishai (1987) y Kley (1975) han sido básicos para la evaluación principalmente de los suelos y las diversas capas que conforman la estructura de pavimentos (subrasantes, sub-bases y bases).

La utilización del Cono Dinámico de Penetración, DCP se ha difundido en Inglaterra, Australia, Canadá, Nueva Zelanda y Estados Unidos, dado que se ha constituido en un instrumento de uso práctico y económico. Se utiliza este instrumento esencialmente para evaluar la resistencia de suelos y de las diversas capas de la estructura de pavimentos, además, con este equipo se puede estimar el Valor Relativo de soporte en campo. Además, detecta simultáneamente el grado de heterogeneidad que puede encontrarse en una sección y la uniformidad de compactación del material, de una manera rápida, continua y bastante precisa.

El DCP tiene la ventaja de su simplicidad y economía de uso.

El Cono Dinámico de Penetración (CDP) mide la penetración dinámica por impacto, de un cono de acero, a través del terreno natural o rellenos levemente cementados.

El CDP es un sistema no destructivo, capaz de medir la capacidad estructural in situ del suelo de apoyo, está conformado por una varilla de acero especial de 20 mm de diámetro y 1000 mm de longitud y 4,4 kg de peso. En su extremo inferior presenta un cono de acero templado de 60 grados y 20 mm de diámetro.

El CDP está introducido en el suelo por un martillo deslizante de 30 Kg, que cae desde una altura siempre igual de 200 mm. Para realizar las lecturas posee una regla de medición sujeta al instrumento por dos soportes, un soporte superior unido al yunque que sirve de referencia para las lecturas y un soporte inferior fijo a la regla y unido a la barra de penetración.

Metro de la Ciudad de México
Dirección de Tránsito de la Línea 12
Informe Final

L12-DIAG-WA-1179-NX-
INF-1

07/07/2015

Página
120/127

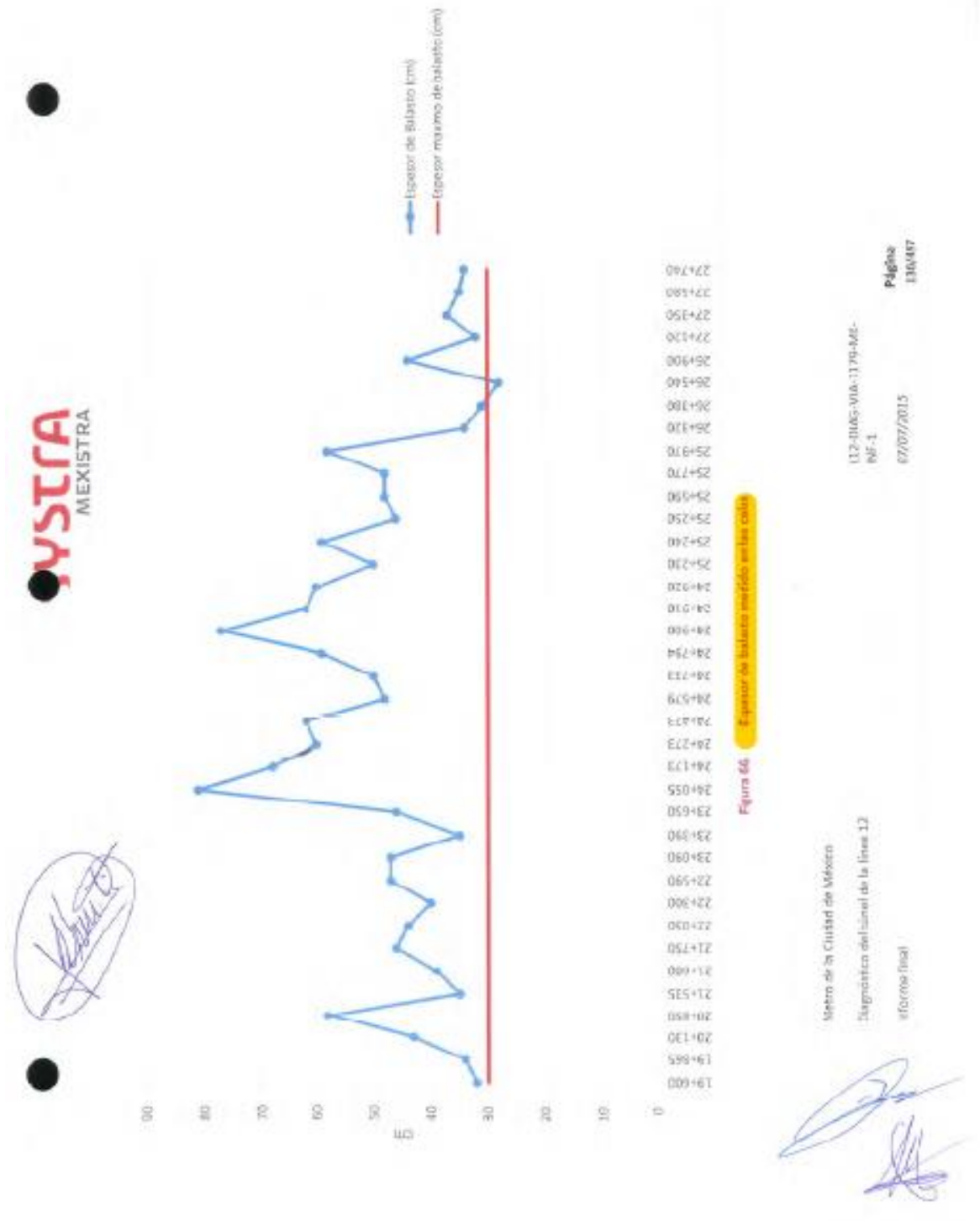
Para poder confirmar el grado de compactación del relleno se realizaron pruebas de compactación en campo directamente en la capa de relleno, mediante la técnica de cono de arena, de esta manera se determina el peso volumétrico del material in situ y así se puede calcular el grado de compactación real de campo.

[illegible]

Figura 61. Ejemplos de resultados de granulometría (muestra PK 24+733)

07/07/2015

Página 12 de 427





El gráfico siguiente permite comparar los niveles de cada capa del proyecto y en el túnel.

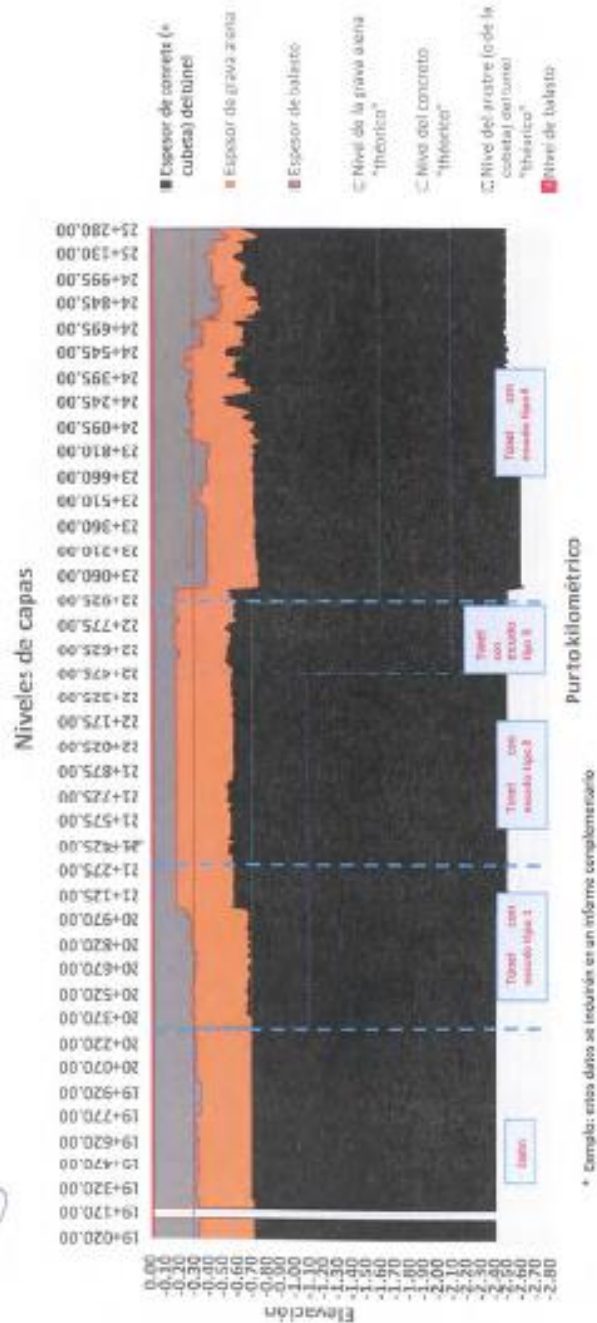


Figura 68. Niveles de las capas previstas en el proyecto y actuales por mediciones con generador

Metro de la Ciudad de México
 Diagnóstico del túnel de la línea 12
 Informe final

U2-DIAG-VIA-1179-ME
 RUT-1
 07/07/2015

Página
 138/167



11.3.3.2 Confusiones relacionadas a las espesuras de las capas

Es difícil disociar la capa de concreto y la cubeta, sin embargo, no es el más relevante.

MEXISTRA confirma que el "As Built" no respeta las especificaciones, en efecto, en la mayor parte del túnel:

- La capa de grava arena tiene un espesor menor al valor mínimo de 40 cm como lo requiere la memoria de cálculo PMDF 11 MS 612000 III 0311 05467 M 00 para soportar la vía.
- El espesor de la capa de balasto es superior al máximo (30 cm) especificado en las normas.
- En la mayor parte del túnel, no existe la manta elastomérica como especificado en los planos "As design" o "As Built".

11.3.3.3 Análisis del sistema de drenaje

11.3.3.3.1 Recomendatoria de los comentarios y de las conclusiones del análisis del diseño del sistema de drenaje en el tramo en túnel con escudo

En el tramo con túnel con escudo MEXISTRA recuerda que la plataforma está basada sobre una subcapa de grava y arena por lo que se requiere que el sistema de drenaje deba ser perfectamente diseñado (punto de captación de las filtraciones, pendientes, desempeños de evacuación del agua, bombas) y realizado (calidad de realización).

Los planos de sección "As design" han permitido confirmar que el sistema de drenaje previsto no es óptimo en caso de filtraciones importantes, en particular:

- Inexistencia del sistema de recuperación de aguas de escumamiento sobre el paramento, lo que provoca que el agua que escurre sobre los muros llegue hacia el balasto, y a la capa debajo de este.
- El dren central presenta entradas situadas en la base del balasto (al nivel de la membrana elastomérica o de la capa de grava arena). No hay perforaciones en el tubo que permitan permitir reventar el agua en caso que esta quede atrapada al infiltrarse en la capa subyacente debajo del balasto, incrementando los problemas de mantenimiento de la vía. Además, el tamaño del dren es bastante pequeño (diámetro 20 cm).

Sin embargo, MEXISTRA confirma la presencia importante de filtraciones y de llegadas de agua significativas en el túnel a través de las juntas de dovelas. Estas llegadas de agua son de importancia considerable en comparación con otros túneles construidos con los mismos métodos mecanizados.

En general, el vacío existente entre el terreno natural y el revestimiento (dovelas) es rellenado por inyección a la par del avance del escudo, esto junto con la implantación de juntas entre las dovelas, lo cual permite asegurar un buen nivel de impermeabilización de la obra, aún si se pudieran presentar algunas infiltraciones puntuales. Se plantean algunos cuestionamientos tanto en la realización de inyecciones como en las juntas entre dovelas. Además el contexto geológico de las

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe Final

L12-DIAG-VIA-1179-MX
INF-1
07/07/2015

Página
139/497



obras situadas en formaciones aluviales en los cuales habrán consolidaciones y asentamientos a mediano y largo plazo, no ayudará a la situación.

12.3.9.2 Funcionamiento del sistema de drenaje

Al inicio del contrato se realizaron investigaciones en el túnel con el fin de comprobar el buen funcionamiento del drenaje del túnel.

En el inter-tramo de la estación Eje Central a la estación Parque de los Venados, se limpiaron los registros desde el Pk 24+210 hasta el registro ubicado en el Pk 24+887. Se bombeó el agua del registro del Pk 24+700 al registro del Pk 24+730, lo cual permitió que el nivel del agua que se encontraba en los registros anteriores bajara, sin embargo los niveles de agua siempre quedaron anormalmente elevados, es decir que el sistema de drenaje no es suficiente en este tramo.

En el tramo en túnel tradicional aunque se puede observar filtraciones importantes en ciertas zonas el balasto está seco lo que permite confirmar que el sistema de drenaje está suficiente. Sin embargo, se puede observar elementos exteriores en el sistema de drenaje.



Foto 17: Filtraciones en el PK 27+393

Secretaría de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

L12-COAG-VIA-1179-MX-
INF-1
02/07/2015

Página
140/482

SYSTRA
MEXISTRA



Foto 23. Balasto con mucha humedad (P+19+600)

En este tramo MEXISTRA estima que los elementos ajenos son la causa del mal funcionamiento del sistema de drenaje.

12.3.9.3 Levantamiento topográfico

Para poder conocer las características del drenaje en el tramo en túnel, y entender las causas del nivel alto de agua, se llevaron a cabo trabajos de topografía en el interior del túnel tomando como bases la poligonal de TSO y su geoposicionamiento en coordenadas UTM.

Los resultados (planos) están incluidos en un informe complementario.

Con el levantamiento topográfico del drenaje se obtuvieron la posición horizontal y vertical de cada uno de los registros, así como la elevación de la clave del tubo y del arrastre hidráulico de los pozos que no estén azolvados.

La información fue procesada y representada en un plano donde se pueden apreciar en planta y perfil la localización de todos los registros de campo, la trayectoria de las tuberías y los diversos niveles tomados por la topografía.

De la revisión de la información se pudo observar que en general el tramo presenta pendientes que parten de las cabeceras de las estaciones hacia el interior del túnel, existiendo un cárcamo de bombeo en el cadenamiento 24+886.80. Sin embargo, éste no es el punto más bajo del sistema, el

Metro de la Ciudad de México
Diagnostico del túnel de la línea 12
Informe final

L12-DIAG-VIA-1179-ATX
INF-1
07/07/2015

Página
144/457



Sin embargo, a pesar de las acciones descritas anteriormente, se sigue observando un nivel de agua anormal en los registros.

En efecto, el nivel del agua varía de 0 cm a 90 cm (estación Eje Central). Eso se explica por el hecho de que la bomba funciona solo ocasionalmente (la activación es manual y por lo tanto genera una operación aleatoria) y no está instalada de acuerdo con los planos del consorcio. En efecto la bomba está colocada encima del nivel de relleno (y no por debajo como se indica en los planos del consorcio), lo que no permite bombear toda el agua.

12.3.9.5 Conclusiones sobre el sistema de drenaje

En primer lugar, MEXISTRA recuerda que un túnel no es completamente impermeable, por eso es importante canalizar el agua. De acuerdo con la cantidad de agua en el túnel y el nivel freático, podemos concluir que el agua viene principalmente de filtraciones en la parte alta del túnel.

En relación con el sistema de drenaje, MEXISTRA concluye lo siguiente:

- En el tramo en túnel con escudo:
 - De acuerdo con los planos que tenemos, el diseño no tiene la capacidad de asegurar un drenaje adecuado del agua en el túnel.
 - La realización del sistema de drenaje no cumplió con las expectativas.
- En los tramos en cajón y en túnel tradicional:
 - De acuerdo con los planos que tenemos, el diseño tiene la capacidad de asegurar un drenaje adecuado del agua en el túnel.
 - El sistema de drenaje tiene muchos elementos ajenos que no permiten un buen funcionamiento del mismo.

Metro es la Capital de México
 Símbolo del túnel de la línea 12
 Gobierno Bial

112-0165-VIA-1170-MX-
 INF-1
 03/02/2015

Página
 25/497

12.4 Resumen y acciones correctivas

Este capítulo es un resumen de las conclusiones de MEXISTRA.

Las acciones correctivas presentadas en este capítulo son preliminares y se detallarán en el documento "Informe final de acciones correctivas del tramo en túnel".

12.4.1 Rieles

12.4.1.1 Conformidad con las especificaciones técnicas

El riel es de tipo 115 RE de matiz 900; proviene del proveedor TataSteel Francia (Corus Hy).

La geometría del riel Re115 instalado está de conformidad con la geometría proporcionada por Arem 2003 Volume 1 Track – Chapter 4- Rail.

Las pruebas de calificación al riel realizadas por los laboratorios de prueba de la SNCF [dureza, flexión, composición metalúrgica y composición química] están de conformidad con la norma EN 13 674-1 Rieles Vignole de masa superior o igual a 46kg/m.

El riel no presenta defectos de fabricación, sin embargo, su puesta en obra es criticable (calidad de las soldaduras, ausencia de liberación de tensiones).

12.4.1.2 Acciones Correctivas

La instalación de vías deberá ser rectificada. MEXISTRA se asegurará de la correcta redacción de los procedimientos y de su correcta aplicación.

12.4.2 Durmientes

12.4.2.1 Conformidad con las especificaciones técnicas

La verificación geométrica de los durmientes no amerita ningún comentario. Las dimensiones y las tolerancias son respetadas; sin embargo, al acumularse las tolerancias de los durmientes con las del sistema de fijación del riel, se encuentran en el rango inferior de valores que da un ancho de vía de entre 1435mm (trocha nominal) y 1434mm (trocha ligeramente inferior). La trocha actual medida es de 1433.5mm.

12.4.2.2 Verificación del sistema calidad durante la producción

PRET e ITISA son empresas certificadas y poseen un sistema de calidad.

Sin embargo, desde la puesta en servicio de la circulación de los trenes, se mostró que muchos de los durmientes de PRET presentaban defectos, como la reacción alcalina, derivados de la calidad del concreto. Se puede deducir que el sistema de calidad de esta empresa presentó defectos debido a que la reacción alcalina se manifiesta habitualmente en un periodo más largo.

En cuanto a los durmientes de ITISA que se rompieron, se trata de un problema de instalación y no de fabricación.

12.4.2.3 Acciones Correctivas

Se recomienda el remplazo de los durmientes agrietados.

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
[Formato Tisa]

132-DIAG-VIA-1179-NTS
BNT-1
05/07/2015

Página
155/167



12.4.3 Fijaciones

12.4.3.1 Conformidad con las especificaciones técnicas

La fijación Nablá Evolución fue la elegida para la línea 12 en su conjunto.

El diseño de la placa plástica de asiento sobre el riel no es óptimo para el uso de dicha fijación en rieles RE115. Los próximos suministros previstos por el fabricante Railtech corregirán esta ligera anomalía.

Sin embargo, esta anomalía no es perjudicial ya que no ha habido ninguna ruptura del sistema de fijación en curvas de radio superior a 350 m (ninguna ruptura en el alineamiento recto).

Las rupturas constatadas son consecuencia del fuerte desgaste ondulatorio de los rieles.

12.4.3.2 Verificación del sistema calidad a través de la producción

Railtech ha entregado su sistema de aseguramiento de la calidad y su producción está en conformidad con sus procesos de aseguramiento.

Railtech ha realizado varias series de pruebas (conforme a la norma Arema 2003 y la norma EN 13 146-1 a 9) que resultaron concluyentes y positivos.

12.4.3.3 Análisis de la instalación de la vía

Durante la visita a la línea, se desmontaron algunas fijaciones para su examen. Se constató que el interior de las fundas estaba contaminado. Esta contaminación puede tener como consecuencia fisuras de durmientes debido al rechazo de los tornillos por la presión. El origen de esta contaminación no puede ser determinada.

12.4.3.4 Acciones correctivas

Se cambiará el aislante para que sea compatible con el riel RE115 en curvas de radios mayores e iguales a 550 m. Respecto a curvas de radios menores a 550 m, se utilizarán nuevas fijaciones.

12.4.4 Balasto

12.4.4.1 Conformidad con las especificaciones técnicas

El balasto es piedra de tipo basáltico.

En la "especificación" técnica "mexicana" para la provisión del balasto, se precisa que el balasto es el resultado de la trituración de rocas extraídas de canteras de piedras duras (granito, diorita, pórfido, cuarcita, basalto, etc.).

Dureza: la dureza del balasto se define teniendo en cuenta la resistencia al desgaste (ensayo Micro Deval seco y húmedo) y la resistencia a la fractura (ensayo Los Ángeles).

- En la especificación técnica (véase Suministro y colocación de balasto C4, ref. L12-EST-VIA-1275-SY-INF 1) se proporciona el método de cálculo para determinar el coeficiente de dureza instantánea (DRI) y dureza global (DRG) con los valores de ensayo de Deval y Los Ángeles.
- DRI mini: 15

Metro de la Ciudad de México
Diagnóstico del túnel de la línea 12
Informe final

4.12 DIAG-VIA-1179-MD
INF-1
02/02/2018

Página
156/187



12.4.8. Capa de grava arena

12.4.8.1 Conformidad con las especificaciones técnicas de la capa de grava arena

La capa de relleno está conformada primordialmente por una grava de granulometría inadecuada con arena, teniendo un promedio de 62% de gravas, 29% de arenas y 9% de finos [el porcentaje máximo de finos es de 18%].

La capa de relleno tiene una compactación variable de 69 a 97%. Tomando como base las normas para pavimentos, se considera que el grado de compactación determinado es escaso e insuficiente.

Además, la grava arena de manera esto casi totalmente saturada por agua, lo que empeora su mala compactación y que tardará en secarse.

La subcapa en su generalidad no corresponde al diseño y no cumple con los requerimientos técnicos de una vía ferroviaria. En su estado actual, no permite una buena duración de la nivelación de la vía.

MEXISTRA confirma que la mala nivelación de la grava arena genera espesores de balasto anormales, hasta 81 cm para mantener la vía a su nivel.

12.4.8.2 Acciones correctivas

Ver capítulo 12.4.11

12.4.9. Capa de concreto ciclópeo

12.4.9.1 Conformidad con las especificaciones técnicas del concreto ciclópeo

Se observó que el concreto ciclópeo muestreado es denso, sin burbujas de aire, lo cual se confirmó en el laboratorio, determinándose que tiene una masa volumétrica de 2.02 t/m^3 .

Los ensayos de compresión realizados a los núcleos de concreto reportaron que este tiene una resistencia mínima de 293 kg/cm^2 (28.7 MPa).

MEXISTRA confirma lo observado en campo, que dicho concreto es masivo, sano y cumple con los requerimientos del proyecto. Conforme a los resultados del punto anterior de resistencia a la compresión, el concreto ciclópeo es aceptable.

12.4.9.2 Acciones correctivas

Referido al concreto ciclópeo y de acuerdo con las conclusiones de MEXISTRA: No se requieren acciones correctivas.

12.4.10. Sistema de drenaje

12.4.10.1 Conformidad con las especificaciones técnicas del sistema de drenaje

Se confirma llegadas de agua significativas en el túnel a través de las juntas de dovelas. Estas llegadas de agua son considerablemente importantes en comparación con otros túneles construidos con los mismos métodos mecanizados. En general, el vacío existente entre el terreno natural y el revestimiento (dovelas) es rellenado por inyección a la par del avance de la tuneladora, esto junto con la implantación de juntas entre las dovelas, lo cual permite asegurar

Metro de la Ciudad de México
 Diagnóstico del túnel de la línea 12.
 Informe final



CLL-DUAP-VIA-STC-MX
 106-1
 07/02/2023

Página
 158/167





- Realizar un nuevo sistema de drenaje (reubicando los registros en contacto con durmientes).
- Reemplazar el balasto (según el capítulo 12.4.4.4)

13. ETAPAS SIGUIENTES

En base a las conclusiones del presente documento, se desarrollarán a continuación:

- Informe complementario (incluyendo los resultados georadar y de topografía)
- Informe de acciones correctivas final (Lista de las acciones correctivas)
- Informe de proyecto ejecutivo final (Proyecto ejecutivo final que describe con detalles las acciones correctivas)

En la espera de la rehabilitación del túnel, MEXISTRA, confirma que se puede operar la línea 12 de manera segura en el tramo subterráneo por al menos un año, reforzando las medidas de mantenimiento preventivo.

Metro de la Ciudad de México
Diseño del túnel de la línea 12
Informe final

117-DIAGN-1175-100
INF-1
07/07/2018

Página
181/497