



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis del comportamiento estructural de tres edificios históricos a partir de los registros del sistema de monitoreo continuo implementado durante la construcción de la línea tres del tren ligero de Guadalajara, Jalisco.

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Alejandro Enrique Pérez Araujo

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Abraham Roberto Sánchez Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres por todo su apoyo a lo largo de mi vida. Gracias.

Agradecimientos.

A mis padres, por enseñarme a ser la mejor persona que puedo ser.

A mis hermanos, Arisbeth, Israel y Daniela, por cuidarme y apoyarme cuando lo necesitaba.

A mis amigos, por la ayuda y cariño que me han brindado desde que los conocí. Mención especial para Ivar, Óscar y Sergio.

A mi novia, Aketzali, por apoyarme e inspirarme a crecer personal y profesionalmente

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ingeniería y los profesores que la integran, por los conocimientos que me han brindado para mi formación a lo largo de los años.

Al Instituto de Ingeniería, por la oportunidad para trabajar en el proyecto y continuar con mi formación profesional.

Al Ing. Roberto Sánchez y su equipo, por todo su apoyo para la elaboración de este trabajo, al brindarme información y guía para ello.

A mis sinodales, por sus comentarios y sugerencias para realizar un mejor trabajo de tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	9
1.1 Objetivos	9
1.1.1 Objetivo general.	9
1.3.2 Objetivos específicos.	9
1.2 Justificación.....	9
1.3 Alcance de la tesis.....	10
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	15
2.1 Entorno	15
2.1.1 El crecimiento demográfico y la problemática de movilidad en la Zona Metropolitana de Guadalajara.	15
2.1.2 Línea 3 del tren ligero de Guadalajara.....	19
2.1.3 Conservación de edificios históricos.....	21
2.2 Construcción de túneles	21
2.2.1 Uso de tuneladoras tipo EBP para la construcción de túneles.....	21
2.2.2 Subsistencia superficial sobre túneles a poca profundidad.	23
2.2.3 Monitoreo durante construcción y operación de túneles.....	25
CAPÍTULO 3. SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO	31
3.1 Limitantes para desplazamientos y deformaciones	31
3.1.1 Umbrales de control.	31
3.2 Inmuebles históricos	33
3.2.1 Catedral Metropolitana de Guadalajara.	33
3.2.2 Templo de San José de Gracia.	34
3.2.3 Templo de San Francisco de Asís.....	34
3.3 Composición del sistema	36
3.3.1 Nivelación topográfica mediante puntos fijos.....	37
3.3.2 Medición de inclinaciones verticales.....	38
2.3.3 Medición de desplazamientos en tres direcciones.....	38
2.3.5 Subsistemas adicionales.....	40
3.4 Localización de instrumentos	41
3.4.1 Instrumentos en San José de Gracia.....	41
3.4.2 Instrumentos en Catedral Metropolitana.....	45
3.4.3 Instrumentos en San Francisco de Asís.	50
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE DATOS.....	57
4.1 Metodología.....	57
4.2 Análisis en Templo de San José de Gracia.....	58
4.2.1 Análisis de asentamientos registrados.	58
4.2.2 Análisis de desplazamientos laterales de muros.	63
4.2.3 Daños presentados en el inmueble.	76
4.2.4 Análisis causa-consecuencia entre desplazamientos y daños.....	76

4.3 Análisis en Catedral Metropolitana.....	78
4.3.1 Análisis de asentamientos registrados.	78
4.3.2 Análisis de desplazamientos laterales de muros.	83
4.3.3 Daños presentados en el inmueble.	97
4.3.4 Relaciones causa-consecuencia entre desplazamientos y daños.	98
4.4 Análisis en Templo de San Francisco de Asís.....	100
4.4.1 Análisis de asentamientos registrados.	100
4.4.2 Análisis de desplazamientos laterales de muros.	105
4.4.3 Daños presentados en el inmueble.	116
4.4.4 Relaciones causa-consecuencia entre desplazamientos y daños.	116
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	121
REFERENCIAS.....	125
ANEXOS.	129

RESUMEN

En esta tesis se presenta el análisis de los desplazamientos laterales y verticales registrados en tres inmuebles históricos mediante un sistema de monitoreo continuo, implementado en cada uno de ellos, durante la construcción del túnel que forma parte de la infraestructura correspondiente a la línea 3 del tren ligero de Guadalajara. Como parte de este análisis, la información recabada se asocia con los daños producidos en dichos inmuebles, principalmente como consecuencia del fenómeno de subsidencia superficial originado durante la excavación del túnel.

ABSTRACT

This thesis presents the analysis of vertical and lateral displacements developed in three historical buildings using a continuous monitoring system, implemented on these during the construction of the tunnel part of the Line 3 of the Guadalajara light rail's infrastructure. In this analysis, the acquired information is associated with the damages presented in these buildings because of the surface subsidence produced by the tunnel excavation.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento demográfico, diversas ciudades alrededor del mundo han expandido su extensión territorial. Como consecuencia de esta demanda de espacio, ha surgido el fenómeno de metropolización en diversas urbes del planeta. Ejemplos de este fenómeno global son las zonas metropolitanas de Los Ángeles o Nueva York, en Estados Unidos; Tokio, en Japón; y Seúl, en Corea del Sur.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (Herrera 2008)

Una Zona Metropolitana es el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 000 o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de interacción socioeconómica.

En el país se han identificado más de 90 zonas metropolitanas entre las que resaltan la Zona Metropolitana del Valle de México, la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), y la Zona Metropolitana de Monterrey, por su relevancia socioeconómica.

El crecimiento demográfico de estas zonas tiene como consecuencia la necesidad de ampliar y mejorar sus servicios públicos, entre ellos los relacionados con la movilidad. Para mejorar la problemática del traslado de los habitantes de estas áreas, se implementan planes de movilidad y se crea infraestructura aprovechando de forma eficiente el espacio disponible en la ciudad. Ejemplo de esto es la construcción de vías de transporte subterráneas, que aprovechan el subsuelo como parte de la ciudad.

La creación de las obras subterráneas en zonas urbanas presenta un reto de ingeniería pues, además de tomar en cuenta la estructura propia, se deben considerar las consecuencias en la infraestructura existente. En el caso particular de la línea tres del tren ligero de Guadalajara, el trazo del eje del túnel atraviesa de norte a sur el centro histórico, en donde se encuentran diversos inmuebles

considerados patrimonio de la ciudad y la nación; por lo que fue necesario implementar diversas medidas para reducir el riesgo de daños en estos inmuebles.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) solicitó el apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM) para evaluar los efectos de la construcción del túnel sobre los edificios patrimoniales localizados en las inmediaciones de este. En respuesta, el IIUNAM desarrolló un amplio programa de investigación y acciones para mitigar y corregir las afectaciones que pudieran ser causadas durante la construcción de la obra.

El desarrollo de esta tesis surge a partir de este programa, en donde se interpreta la información obtenida por el sistema de monitoreo continuo de los edificios para detectar, de manera oportuna, anomalías en el comportamiento de las estructuras y advertir sobre estos resultados para llevar a cabo las medidas correctivas pertinentes. Además, se analizan los criterios utilizados para determinar los umbrales de control que deben limitar este tipo de estructuras; esto debido a que, en la normatividad nacional, no existen precedentes para estos casos.

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y ALCANCES

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y ALCANCE

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general.

Analizar los efectos de la construcción de la línea 3 del tren ligero de la ciudad de Guadalajara, Jalisco en tres edificios históricos: a) Templo de San José de Gracia, b) Catedral Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara; y c) Templo de San Francisco de Asís; considerando los daños observados en dichos inmuebles y las lecturas obtenidas a través del sistema de monitoreo continuo implementado en estos. Se emplean los subsistemas de: i) Nivelación topográfica de puntos de referencia fijos en fachadas, ii) Medición de la rotación de elementos verticales mediante inclinómetros, y iii) Medición de desplazamientos en tres direcciones ortogonales de puntos de referencia fijos en fachadas, utilizando un grupo de estaciones totales automatizadas.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Determinar la relación entre los desplazamientos laterales y distorsiones presentados, y el patrón de asentamientos de los inmuebles mediante los registros del sistema de monitoreo continuo.
- Asociar los daños observados en las estructuras con el comportamiento registrado por el sistema de monitoreo.
- Evaluar los umbrales de control propuestos para el proyecto de la línea 3 del tren ligero de Guadalajara, a partir del comportamiento observado.
- Establecer las ventajas y limitaciones del monitoreo remoto de edificios históricos mediante la comparación de las lecturas obtenidas.

1.2 Justificación

El crecimiento urbano en la ZMG ha generado la necesidad de implementar medios de transporte para trasladar a los habitantes del área en sus actividades diarias. Actualmente se han construido líneas de tren ligero como solución a la problemática de movilidad, diseñadas con base en las necesidades de los usuarios.

En el caso de la línea 3 del tren ligero, la ruta cruza de norte a sur pasando por el centro histórico de la ciudad a través de un túnel. La excavación de esta obra tiene como consecuencia el desarrollo de subsidencia superficial; fenómeno que provoca asentamientos diferenciales a lo largo del trazo, afectando a los edificios localizados en sus inmediaciones.

Aunado a esto, en las inmediaciones del túnel, se encuentran diversos inmuebles que forman parte del patrimonio histórico del país. Debido a su valor cultural, fue necesario dar seguimiento a su comportamiento estructural, vigilando que este no excediera los límites establecidos para evitar daños en su integridad. Sin embargo, en el ámbito internacional y, particularmente, en México, existe poca información relacionada con los desplazamientos que un inmueble de estas características puede tolerar sin presentar afectaciones; por ello, para los edificios estudiados en el presente trabajo los límites utilizados fueron propuestos previamente por el proyectista.

Para el seguimiento, se implementó un sistema de monitoreo continuo que genera una amplia cantidad de información sobre el comportamiento estructural de los edificios, que debe ser procesada para su interpretación ingenieril. Esto motivó el desarrollo de la presente tesis.

A partir del sistema de monitoreo continuo se obtuvieron los registros de desplazamientos y rotación de las estructuras, los cuales se asociaron con los daños que ocurrieron en los inmuebles. Esta información se revisó para proponer medidas que limiten el desarrollo de asentamientos diferenciales en estructuras patrimoniales que pudieran verse afectadas en el futuro por obras similares.

1.3 Alcance de la tesis.

La tesis aquí presentada forma parte de un proyecto de gran escala desarrollado por el Instituto de Ingeniería como solicitud de la STC para el monitoreo de los inmuebles históricos del centro de la ciudad de Guadalajara durante la construcción de la línea 3 del tren ligero.

En este trabajo se estudian los desplazamientos y daños presentados en tres templos de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, localizados en diferentes zonas a lo

largo del eje del túnel. El análisis se realizó mediante un programa de procesamiento numérico, con información obtenida de una base de datos, en la que se registran las lecturas de los diferentes subsistemas implementados en los inmuebles como parte del sistema de monitoreo de la obra.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Entorno

2.1.1 El crecimiento demográfico y la problemática de movilidad en la Zona Metropolitana de Guadalajara.

La ZMG, también denominada Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), se localiza en el área central del estado de Jalisco, y comprende 8 municipios de este. De acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2018), es la segunda más poblada de la República mexicana, detrás de la Zona Metropolitana del Valle de México.

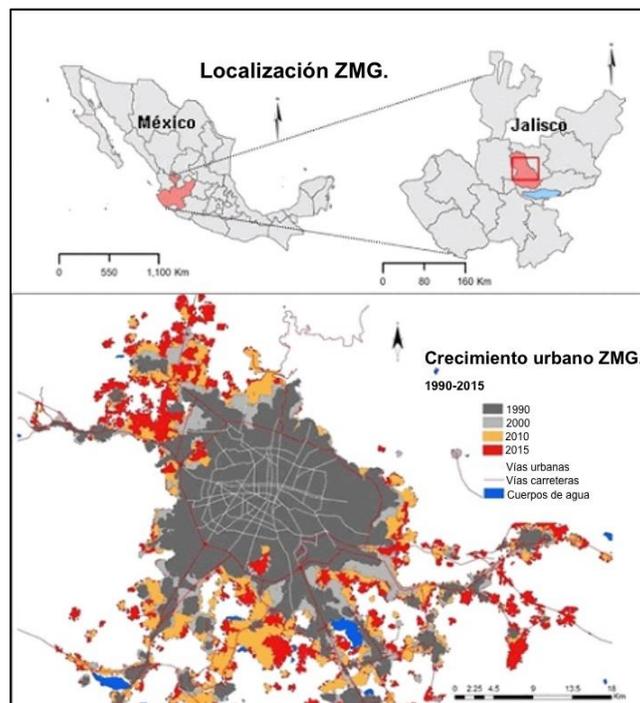


Figura 1 Ubicación y crecimiento urbano de la ZMG (González y López 2018)

Desde mediados del siglo pasado, la ZMG ha presentado un alto crecimiento demográfico, concentrándose en diferentes anillos de urbanización a lo largo del tiempo. La mancha urbana se expandió desde el municipio de Guadalajara a los municipios de Tlaquepaque y Zapopan, primer anillo de urbanización, entre las décadas de 1960 y 1970; y, en la década de 1990, se expandió al segundo anillo debido al impulso industrializador y a las condiciones geográficas (Venegas, A. y Castañeda, P. 2005).

Tabla 1 Población y Tasa de Crecimiento Anual (TCA) por municipio y total en la ZMG. Elaboración propia con datos del INEGI (2019).

Año	Guadalajara		San Pedro Tlaquepaque		Zapopan		Tonalá		Tlajomulco de Zúñiga		El Salto		Juanacatlán		Ixtlahuacán de los Membrillos		ZMG	
	Población	TCA	Población	TCA	Población	TCA	Población	TCA	Población	TCA	Población	TCA	Población	TCA	Población	TCA	Población	TCA
1940	229,235	-	11,486	-	8,685	-	3126	-	3,485	-	-	-	2,587	-	1,881	-	260,485	-
1950	380,226	65.9%	33187	188.9%	27,115	212.2%	11486	267.4%	18,608	433.9%	8290	-	4,763	84.1%	6,454	243.1%	490,129	88.2%
1960	740,394	94.7%	56,199	69.3%	54,562	101.2%	15,880	38.3%	26,207	40.8%	9,014	8.7%	5,235	9.9%	7,682	19.0%	915,173	86.7%
1970	1,199,391	62.0%	100,945	79.6%	155,488	185.0%	24,648	55.2%	35,145	34.1%	12,367	37.2%	5,501	5.1%	10,652	38.7%	1,544,137	68.7%
1980	1,626,152	35.6%	177,324	75.7%	389,081	150.2%	52,158	111.6%	50,697	44.3%	19,887	60.8%	8,081	46.9%	12,310	15.6%	2,335,690	51.3%
1990	1,650,205	1.5%	339,649	91.5%	712,008	83.0%	168,555	223.2%	68,428	35.0%	38,281	92.5%	10,068	24.6%	16,674	35.5%	3,003,868	28.6%
1995	1,633,216	-1.0%	449,238	32.3%	925,113	29.9%	271,857	61.3%	100,797	47.3%	70,085	83.1%	11,513	14.4%	20,598	23.5%	3,482,417	15.9%
2000	1,648,319	0.9%	474,178	5.6%	1,001,021	8.2%	337,149	24.0%	123,619	22.6%	83,453	19.1%	11,792	2.4%	21,605	4.9%	3,701,136	6.3%
2005	1,600,940	-2.9%	563,006	18.7%	1,155,790	15.5%	408,729	21.2%	220,630	78.5%	111,436	33.5%	11,920	1.1%	23,420	8.4%	4,095,871	10.7%
2010	1,495,189	-6.6%	608,114	8.0%	1,243,756	7.6%	478,689	17.1%	416,626	88.8%	138,225	24.0%	13,218	10.9%	41,060	75.3%	4,434,877	8.3%
2015	1,460,148	-2.3%	664,193	9.2%	1,332,272	7.1%	536,111	12.0%	549,442	31.9%	183,437	32.7%	17,955	35.8%	53,045	29.2%	4,796,603	8.2%

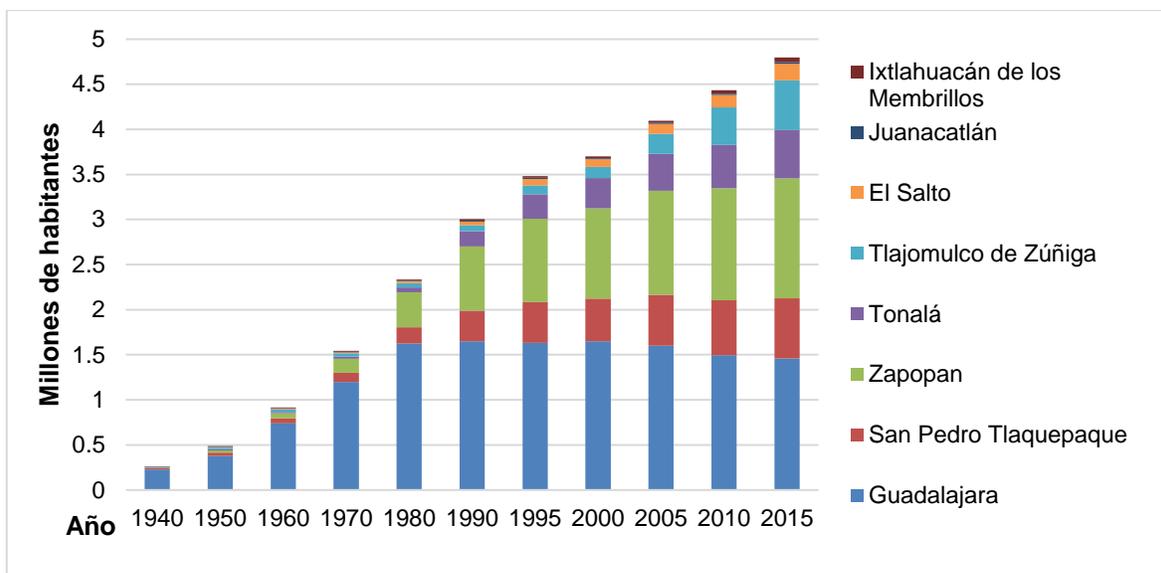


Figura 2 Población de la ZMG por municipio. Elaboración propia con datos del INEGI.

El desarrollo urbano de la metrópoli se presentó de forma irregular y provocó la zonificación de sectores industriales-comerciales y de vivienda (Siqueiros, 2009). Se ha observado, por ejemplo, el cambio gradual en el uso de suelo del municipio de Guadalajara la disminución de la cantidad de viviendas y el aumento de los comercios. Así mismo, se observa la concentración de zonas industriales y comerciales en los municipios de Zapopan y Guadalajara, mientras que los municipios de El Salto y Tlajomulco concentran, en su mayoría, zonas habitacionales.

Debido al crecimiento acelerado de la población y el área de la metrópoli, surgió la necesidad de aumentar el alcance de los servicios públicos en la zona, entre ellos el transporte público. Para responder a las necesidades de los habitantes, el 1 de septiembre de 1989 inició operaciones la línea 1 del tren ligero, conformada por 7 estaciones a lo largo de 5.3 kilómetros, siendo utilizada por trolebuses eléctricos; a la fecha, esta línea abarca una longitud de 15.6 km y cuenta con 19 estaciones que cruzan de norte a sur a través del corredor Federalismo-Colón.

Posteriormente, el 1 de julio de 1994, inició operaciones la línea 2 conformada por 10 estaciones a lo largo de 8.2 km en dirección este-oeste, a partir del centro de la

ciudad. De acuerdo con datos del INEGI (2018), la cantidad de usuarios ha aumentado hasta llegar a más de 98 millones en 2017.

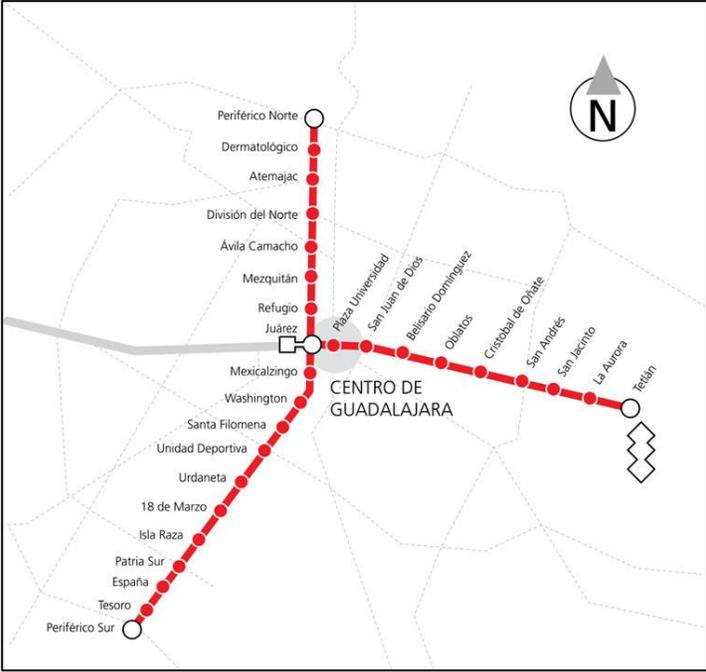


Figura 3 Mapa de líneas 1 y 2 del tren ligero de Guadalajara. Obtenidas de <http://www.siteur.gob.mx/estaciones-tren-ligero.html>

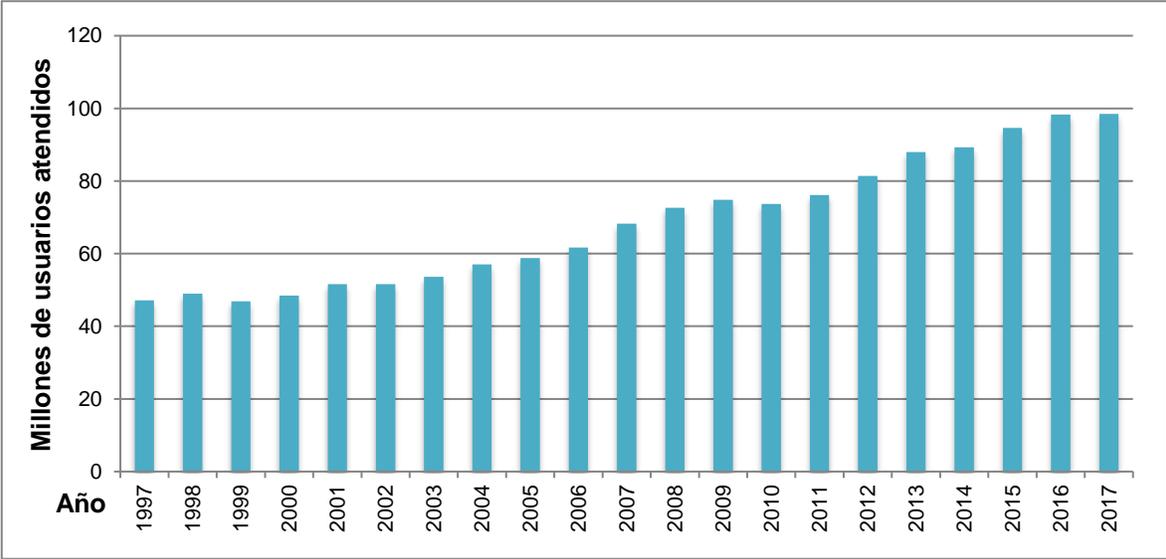


Figura 4 Usuarios atendidos anualmente de 1997-2017. Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2018)

Actualmente, se encuentra en construcción la línea 3 del tren ligero, la cual comunicará los centros históricos de los municipios de Zapopan, Tlaquepaque y Guadalajara, y cruza este último municipio de noroeste a sureste. De igual forma, se tiene proyectado ampliar la cantidad de líneas de tren ligero, enfocándose en el municipio de Tlajomulco, debido a la demanda de transporte de los habitantes de la zona que requieren trasladarse hacia las áreas industriales y comerciales (Romo, 2017).

2.1.2 Línea 3 del tren ligero de Guadalajara.

La construcción de la línea 3 del tren ligero en la capital de Jalisco inició en agosto de 2014 en el municipio de Zapopan. Esta contará con 18 estaciones a lo largo de 21.5 km, conectando los municipios de Guadalajara, Zapopan y Tlaquepaque.



Figura 5 Mapa de Línea 3 del tren ligero de Guadalajara. Obtenida de <https://treneando.com/2014/10/14/caf-compite-con-alstom-para-suministrar-18-trenes-a-la-linea-3-del-tren-electrico-mexicano-de-guadalajara/>

La línea constará de tres partes, dos elevadas y una subterránea. La sección subterránea tiene una longitud aproximada de 5 km, cruza por el centro histórico de la ciudad y cuenta con cinco estaciones: Normal, Santuario/Alcalde, Guadalajara Centro, Independencia y Plaza de la Bandera, siguiendo las trayectorias de las avenidas Fray Antonio Alcalde – 16 de Septiembre y Revolución.



Figura 6 Trazo de sección subterránea y estaciones de la Línea 3 del tren ligero. Elaboración propia.

Para su construcción se utiliza una tuneladora que trabaja a presión balanceada de tierras (EPB, por sus siglas en inglés) de 11.5 metros de diámetro. Además de excavar, la tuneladora conocida como “La Tapatía”, transporta el material excavado a la superficie mediante bandas de transporte, y coloca las dovelas que dan estructura al túnel. La excavación del túnel se realiza a una profundidad promedio de 21 metros.

De acuerdo con EFE (2017), la complejidad principal de esta labor es el tipo de suelo de la zona conurbada de Guadalajara, pues es en su mayoría se compone de arena limos de compacidad media (suelo tipo Jal) en depósitos de composición pumítica, generalmente reolítica. Esto significa que, el suelo de la zona presenta una estructura blanda y lodosa, aunada al nivel freático del lugar.

Aunado a esto, se han implementado limitaciones y medidas preventivas en las especificaciones de la construcción ya que, al cruzar el centro de la ciudad, existen diversos inmuebles históricos a lo largo del trazo del túnel que deben ser protegidas de los posibles daños por su carácter patrimonial.

2.1.3 Conservación de edificios históricos.

En la *Carta Internacional sobre la Conservación y Restauración de Monumentos y Sitios*, firmada en 1964 por el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS), se proponen las bases para la excavación, conservación, restauración y documentación de monumentos históricos, definidos como “la creación arquitectónica aislada, así como el conjunto urbano o rural que da testimonio de una civilización particular, de una evolución significativa, o de un acontecimiento histórico”. En México, el Instituto Nacional de Antropología e Historia, INAH (2009), considera como monumento histórico a aquel bien vinculado con la historia de la Nación, a partir del establecimiento de la cultura hispánica del país.

En 1968, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, UNESCO, aprobó la *Recomendación sobre la Conservación de los Bienes Culturales que la Ejecución de Obras Públicas o Privadas pueda poner en Peligro*. Ahí se propone a los países miembros la promulgación de leyes que protejan los bienes culturales que puedan verse afectados por la ejecución de obras, así como lineamientos para su conservación y restauración.

2.2 Construcción de túneles

2.2.1 Uso de tuneladoras tipo EBP para la construcción de túneles.

Uno de los retos de la ingeniería en las grandes metrópolis alrededor del mundo, ha sido crear líneas de transporte que permitan el desplazamiento de los habitantes a lo largo de la urbe en un espacio reducido, dado su crecimiento. Para esto, se han creado diversas líneas de comunicación subterráneas que permiten el aprovechamiento de “lo subterráneo” como parte del espacio urbano (Cardu y Oreste, 2011).

Dependiendo las características del entorno, se pueden usar diversos procesos para la construcción de túneles. La elección de uno sobre otro dependerá del criterio del diseñador, tomando en cuenta estas características, así como los propios de la obra (tiempo, presupuesto, etcétera).

En los últimos años se han implementado diversos métodos mecánicos para esta tarea, en los que se utilizan máquinas conocidas como tuneladoras (TBM, por sus siglas en inglés). Estas permiten una más rápida instalación de soporte del túnel en comparación con métodos comunes, disminuyendo las deformaciones producidas por la convergencia hacia él, lo cual las hace ideales para el uso en zonas urbanas (Rodríguez, 2014).

Las TBM se clasifican en equipos presurizados y no presurizados. Los primeros permiten trabajar en terrenos inestables y por debajo del nivel freático; estos se dividen en hidroescudos y escudos de presión de tierras (EPB, por sus siglas en inglés). La tuneladora utilizada para la construcción de la línea 3 del tren ligero de Guadalajara, “La Tapatía”, es de tipo EBP.

Al igual que la mayoría de las tuneladoras, las EPB constan de cuatro partes principales: el cabezal de corte, un sistema de empuje compuesto por gatos hidráulicos o zapatas móviles que permiten el avance de la máquina, un equipo encargado del revestimiento del túnel en la parte trasera, y una banda que transporta el material excavado. La característica principal, sin embargo, es que estas permiten el confinamiento del frente de la excavación utilizando el propio material mezclado con agua, espuma u otros aditivos, manteniéndolo bajo presión y sincronizando el avance junto con la extracción de escombros.

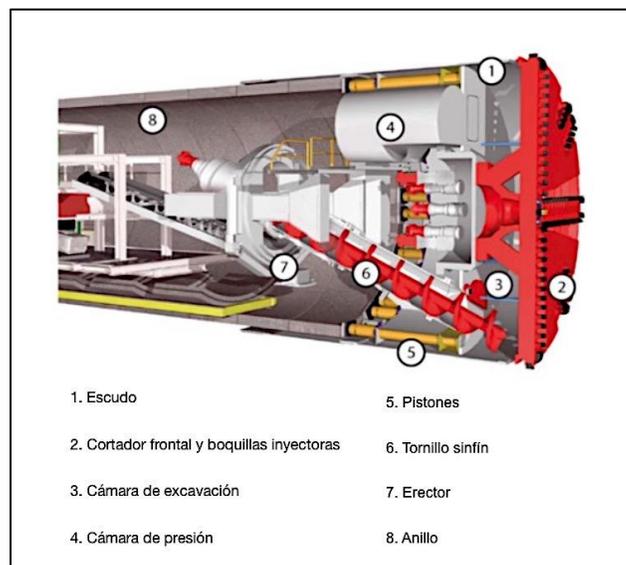


Figura 7 Sección transversal de tuneladora EPB. Obtenido de Lunardi (2008).

2.2.2 Subsistencia superficial sobre túneles a poca profundidad.

Durante la construcción de un túnel, la excavación provoca cambios en los esfuerzos naturales del suelo, provocando desplazamientos radiales en dirección del eje del túnel, que producen asentamientos en la superficie del terreno.

De acuerdo con Tamez, Rangel y Holguín (1997), el desplazamiento vertical de la superficie tiene tres causas principales:

- Desplazamiento del suelo en el frente debido a la disminución de esfuerzos inducida por la excavación.
- Convergencia de las paredes del túnel para llenar el espacio entre el suelo y el revestimiento (holgura).
- Desplazamiento del revestimiento por flexión y por asentamiento de las zapatas de apoyo.

También puede presentarse consolidación en el anillo de suelo que rodea el revestimiento que fue remoldado durante la excavación.

De acuerdo con Rodríguez (2014), el asentamiento ocurre en tres etapas durante el paso de la tuneladora por el área en cuestión. Unos metros por delante del frente de excavación se desarrolla entre el 20% y 30% del asentamiento. Superando el frente de excavación, sin llegar a recubrir la sección del túnel, la subsidencia desarrolla entre el 50% y 60% de su totalidad. Finalmente, una vez que se recubre el túnel en la zona, el asentamiento se termina de desarrollar con el paso del tiempo.

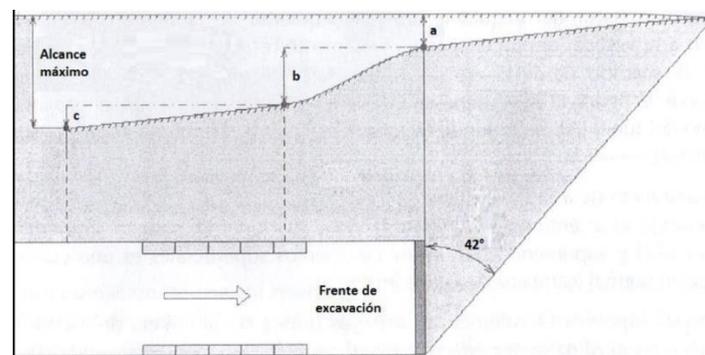


Figura 8 Asentamiento superficial con el avance del frente de excavación. Obtenido de Priego de los Santos (2009) citado por Rodríguez (2014).

La configuración transversal del asentamiento se modela como una curva simétrica con valor máximo en la vertical que pasa sobre el eje del túnel, llegando a variar por la heterogeneidad de las propiedades del suelo.

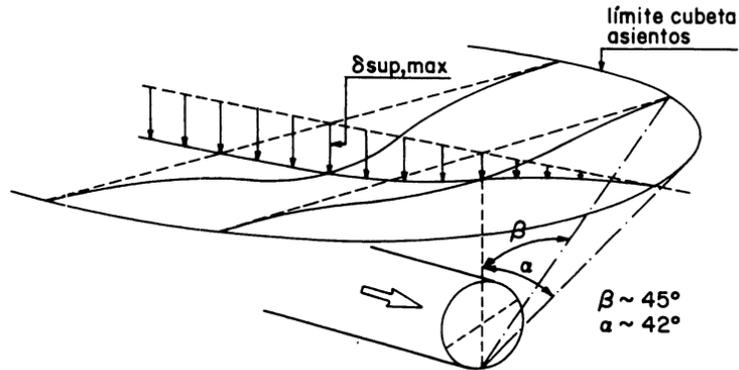


Figura 9. Cubeta de asientos. Obtenida de Oteo y Rodríguez (1997).

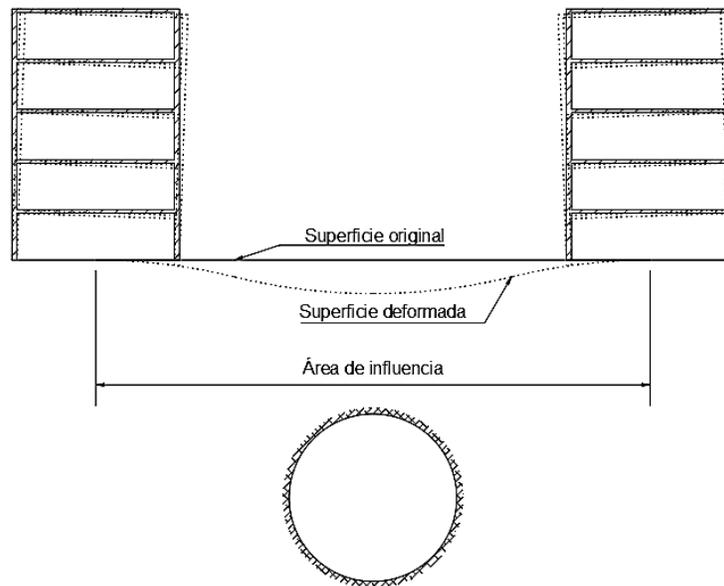


Figura 10 Deformación usual debido a la excavación de túneles. Elaboración propia.

Como consecuencia de esto, para controlar el asentamiento que se presenta en la superficie, es necesario establecer la presión necesaria al frente de la excavación, así como el tipo de revestimiento del túnel, ya que estos afectan directamente el desarrollo de esfuerzos durante y después de la construcción de la obra subterránea.

La deformación debe limitarse durante la fase de diseño, pues puede causar afectaciones en las estructuras que se encuentren en la superficie. Estas pueden asentarse o inclinarse, especialmente en la sección más cercana al eje del túnel. Tamez, Rangel y Holguín (1997) proponen límites admisibles para el asentamiento máximo y la pendiente media que se presenten en la superficie del terreno.

Tabla 2 Deformaciones admisibles en la superficie de acuerdo con su ocupación. Obtenida de Tamez, Rangel y Holguín (1997).

Ocupación de la superficie	Suelos plásticos		Suelos frágiles	
	Asentamiento máximo (cm)	Pendiente media	Asentamiento máximo (cm)	Pendiente media
Construcciones o instalaciones susceptibles al asentamiento diferencial sobre el eje del túnel.	2 a 4	0.0015	1 a 2	0.0015
Construcciones e instalaciones cercanas al eje del túnel, dentro de la zona de asentamientos.	4 a 8	0.003	2 a 4	0.003
Superficie libre de construcciones o instalaciones dentro del área de asentamientos.	20	0.003	<6	0.003

Debido a esto, es importante colocar equipos de medición en los inmuebles que puedan sufrir afectaciones para controlar los desplazamientos presentados, y en caso necesario, tomar acciones correctivas durante la construcción.

Para el cálculo de la subsidencia superficial se tienen varios métodos, en su mayoría empíricos, que relacionan las propiedades del suelo y el método constructivo usado para determinar la deformación máxima a presentarse. También existen algunos métodos numéricos que permiten estimar el comportamiento del terreno en las inmediaciones del túnel.

2.2.3 Monitoreo durante construcción y operación de túneles.

Para tener un registro de las subsidencias en la superficie, así como de las convergencias y asentamientos del mismo túnel es necesario colocar diversos instrumentos de medición en las inmediaciones de la obra. De acuerdo con Lunardi (2008), es importante iniciar las mediciones al mismo tiempo o antes que la construcción para:

- Corroborar si las decisiones de diseño fueron apropiadas y calibrar los instrumentos de forma correcta.
- Adquirir los datos necesarios para verificar apropiadamente la seguridad de la estructura y de su operación cuando se inspeccione la obra.

- Permitir la revisión de la condición del túnel a lo largo del tiempo durante su operación, así como los cambios en las inmediaciones.

Existen diversos aparatos que permiten la medición de desplazamientos y deformaciones del suelo, así como la estructura del túnel y cambios en nivel freático o las estructuras en el entorno. Estos se colocan en la sección del túnel, la superficie sobre este y, si existen, en los edificios cercanos al área de influencia de la excavación.

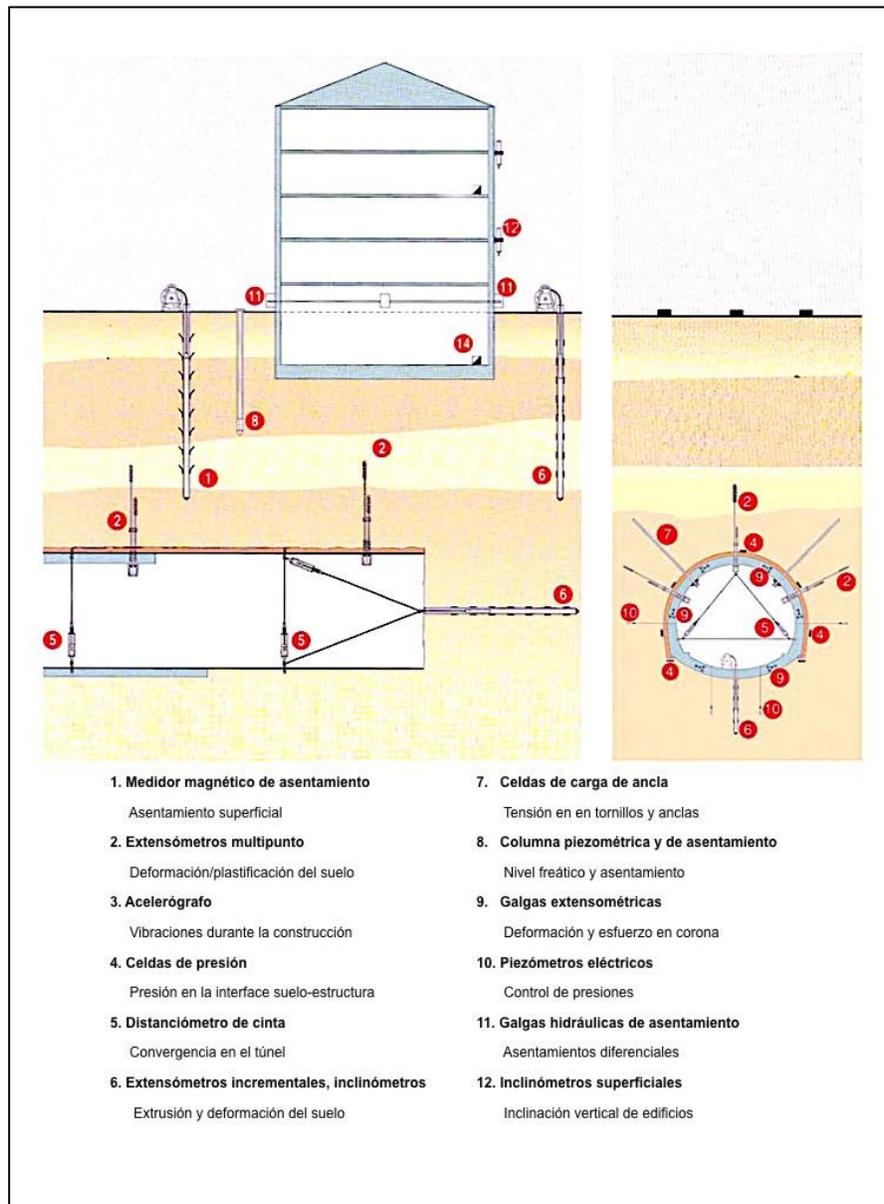


Figura 11 Instrumentación sugerida para el monitoreo durante construcción y operación de túneles. Obtenido de Lunardi (2008).

De acuerdo con Lunardi (2008), la excavación en zonas urbanas, o con un gran número de estructuras en la superficie, debe ser tratada como si se presentara en suelo susceptible a la falla (comportamiento de suelo suelto). En este caso, se recomienda que se implementen estaciones de monitoreo sistemático en distancias de entre 10 y 20 m, tomando lecturas de manera continua cada determinado tiempo.

CAPÍTULO 3.

SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO

3.1 Limitantes para desplazamientos y deformaciones

3.1.1 Umbrales de control.

Debido al efecto que pueden tener los desplazamientos del suelo en la estructura existente (ver sección 2.2.2), es importante establecer umbrales de control para la ejecución y operación de la obra. Ejemplo de estos son los valores admisibles para asentamiento y distorsiones angulares medias propuestas por Tamez et al. (1997) en la Tabla 2.

Actualmente, los valores de los umbrales de control deben ser propuestos por el proyectista, ya que no existe una normatividad específica. A partir de ejemplos de otras obras, análisis de autores especializados y de los resultados obtenidos en la modelación del proyecto, se pueden obtener límites de alerta y de acción, como los propuestos en el proyecto de las líneas 3 y 6 del metro de Santiago, Chile, mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3 Umbrales de control propuestos para la construcción del metro de Santiago, Chile.
Obtenida de Rey (2016).

Umbral de Control	Asentamiento, mm			Distorsión angular		
	Correcto	Alerta	Acción	Correcto	Alerta	Acción
Zonas sin edificaciones	< 50	50 a 100	> 100	< 0.01	0.01 a 0.02	> 0.02
Edificios con cimientos profundos o con losa, en buen estado. Conducciones (excepto de gas)	< 20	20 a 30	> 30	< 0.001	0.001 a 0.002	> 0.002
Estructura subterránea o túneles existentes	< 15	15 a 25	> 25	< 0.0005	0.0005 a 0.001	> 0.001
Edificios cimentados superficialmente sin daños aparentes	< 10	10 a 15	> 15	< 0.0005	0.0005 a 0.001	> 0.001
Edificios cimentados superficialmente con daños. Edificios monumentales. Edificios con más de 10 pisos. Tuberías de gas.	< 5	5 a 10	> 10	< 0.0003	0.0003 a 0.0005	> 0.0005
Túneles existentes	Asentamiento o levantamiento: 10mm/10m					
Subsistencia superficial en estación	< 50	50 a 55	> 55	N/A		
Subsistencia superficial en túnel interestación	< 25	25 a 30	> 30			

Meli y Hernández (1975), proponen los valores presentados en la tabla 4, obtenidos de forma experimental para estructuras de mampostería similares a las analizadas en esta tesis. Los límites propuestos son tales que el costo de la reparación de daños que pueden aparecer es menor que el costo de reducir significativamente la probabilidad de que estos ocurran.

Tabla 4 Valores esperados de la distorsión que provocan distintos niveles de daño.
Elaboración propia a partir de resultados de Meli y Hernández (1975).

Nivel de daños.	Distorsión	
	Muros de piezas macizas confinadas	Muros de piezas huecas no confinadas
Primer agrietamiento	0.002	0.001
Grieta con espesor medio de 0.5 mm	0.005	0.005
Afectación de elementos de refuerzo que implica fortificación en la estructura	0.0125	0.01
Deformación que obliga a la demolición	0.033	0.033
Límite propuesto	0.0025	0.0015

A partir de los límites propuestos para la construcción del metro de Santiago (Rey 2016) o para la aparición de daños en mampostería (Meli y Hernández 1975), y modelando la construcción del túnel junto con sus efectos en la superficie, es posible que se establezcan los umbrales para el caso de la subsidencia superficial.

En el caso de la línea tres del tren ligero, se establecieron diferentes límites para cada instrumento de medición de acuerdo con el diseño, como se estableció previamente. De tal forma que se proponen los umbrales presentados en la Tabla 5:

Tabla 5. Umbrales de control propuestos para el monitoreo de los edificios a analizar.
Elaboración propia.

Inmueble	Instrumento	Unidades	Umbral de control	
			Alerta	Acción
Templo de San José de Gracia	Estación total. Asentamiento.	mm	3.00	6.00
	Tiltmeters	grados	0.02865	0.05729
		radianes	0.00050	0.00100
	Clavos de Nivelación	mm	4.00	6.00
Catedral Metropolitana	Estación total. Asentamiento.	mm	3.00	6.00
	Tiltmeters	grados	0.01710	0.02290
		radianes	0.00030	0.00040
	Clavos de Nivelación	mm	4.00	6.00
Templo de San Francisco de Asís	Estación total. Asentamiento.	mm	4.00	6.00
	Tiltmeters	grados	0.00900	0.01300
		radianes	0.00016	0.00023
	Clavos de Nivelación	mm	4.00	6.00

En el caso de los desplazamientos laterales registrados por las estaciones totales, los límites se establecieron en función de la altura a la que se localizaban las dianas reflectantes, por lo que varían dependiendo de la altura a la que se localizan estas en cada inmueble.

3.2 Inmuebles históricos

Como parte del proyecto de monitoreo llevado a cabo por el IIUNAM, existen estudios y análisis de los inmuebles, previos a la construcción del túnel. En ellos se realiza la descripción de los edificios tanto arquitectónica como estructural, haciendo énfasis en los daños presentes en estos.

3.2.1 Catedral Metropolitana de Guadalajara.

También conocida como la Catedral Basílica de la Asunción de María Santísima, se localiza en la Avenida Fray Antonio Alcalde, entre la Avenida Miguel Hidalgo y Costilla y la calle Morelos, al oriente de la Plaza Guadalajara.

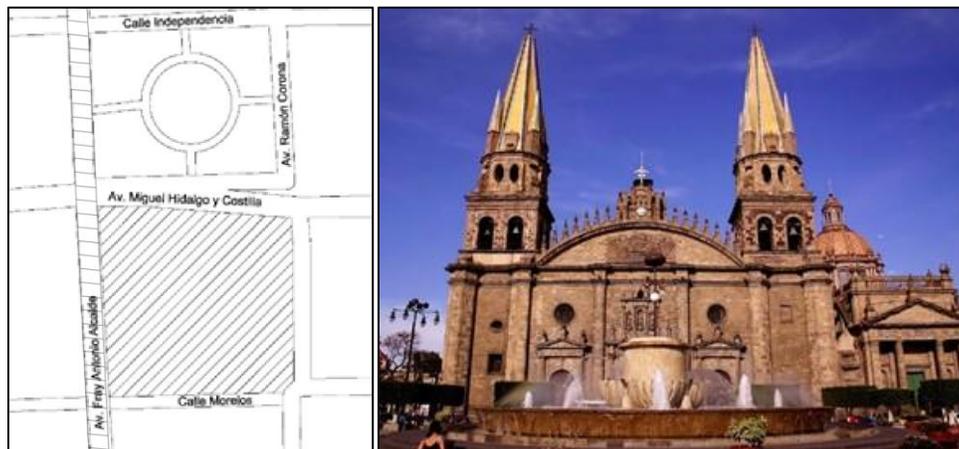


Figura 12. Croquis de localización y frente de la Catedral Basílica de la Asunción de María Santísima. Obtenidas de Sánchez y Meli (2016).

Su construcción inició formalmente el 31 de julio de 1568 y se finalizó hasta febrero de 1618 debido a un incendio que, en 1574, destruyó el templo. Mientras que la construcción del Sagrario inició en 1808 y concluyó en 1843. El inmueble ha sido intervenido en varias ocasiones a lo largo del tiempo debido a diversos sismos que se han presentado en la zona, así como algunas fallas constructivas.

La estructura, resuelta con elementos de mampostería, está formada por tres grandes naves divididas por doce columnas. La característica principal del edificio son las dos torres construidas con piedra pómez. Previo a la construcción del túnel presentaba asentamientos menores a 10 mm y la inclinación de los muros era hacia el exterior.

3.2.2 Templo de San José de Gracia.

Localizado sobre la Avenida Fray Antonio Alcalde, en su intersección con la calle Reforma, este templo fue construido sobre las ruinas del antiguo convento de Santo Domingo entre 1869 y 1890. La estructura del inmueble es de mampostería y, en 1970, el exterior se recubrió con cantera.

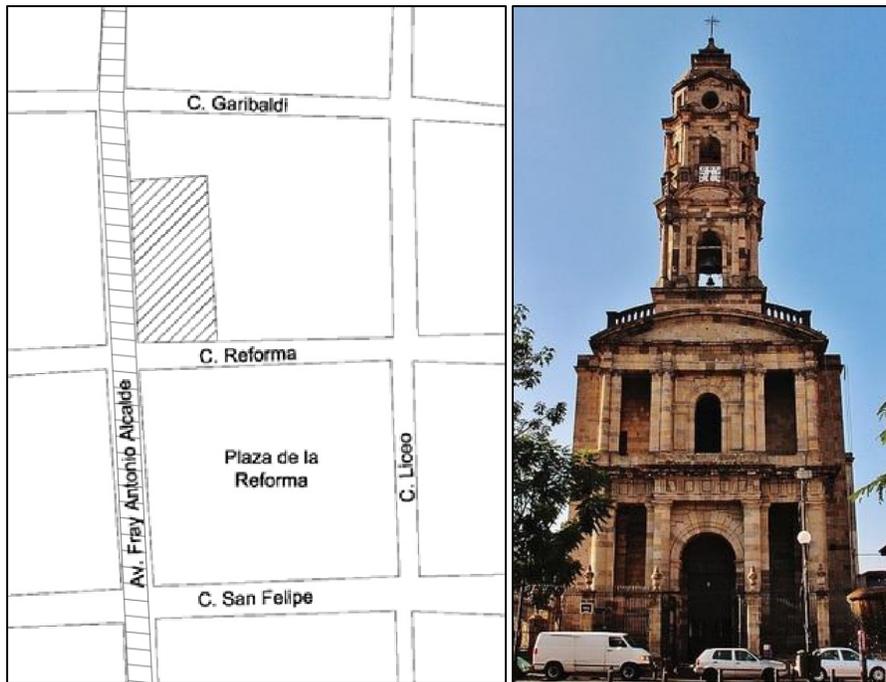


Figura 13. Croquis de localización y frente del Templo de San José de Gracia. Obtenidas de Sánchez y Meli (2016).

La portada del edificio consta de dos partes: la primera tiene seis columnas que terminan en un nártex, y la segunda la constituyen varias columnas rematando en un frontón curvo. Por su parte, la torre central está formada por tres cuerpos los primeros dos tienen columnas compuestas y corintias, respectivamente, y el tercero está formado por vanos ovalados.

3.2.3 Templo de San Francisco de Asís.

El templo se localiza sobre la Avenida 16 de Septiembre, entre la Avenida Revolución y la calle Prisciliano Sánchez. En 1554 el convento se trasladó a esta zona, construyendo un pequeño conjunto eclesiástico con adobe y materiales ligeros que, con el paso del tiempo, se amplió y refinó.

Para mediados del siglo XVIII el conjunto era monumental, pero debido a la Reforma, muchas de las edificaciones de este fueron demolidas y los terrenos vendidos a privados. Finalmente, en 1936 un incendio destruyó el templo por lo que tuvo que reconstruirse, acción que concluyó en 1958.

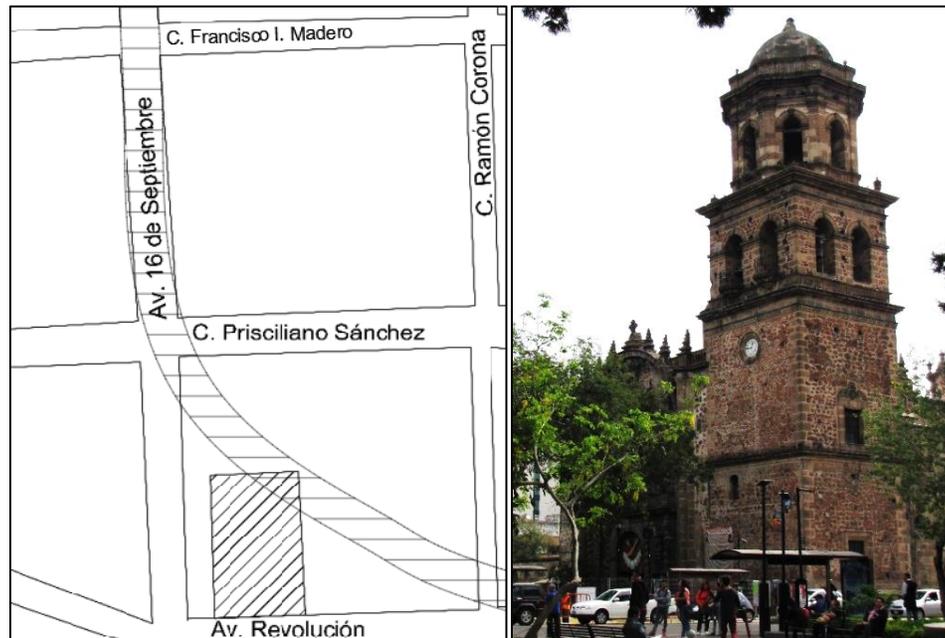


Figura 14. Croquis de localización y vista del Templo de San Francisco de Asís. Obtenidas de Sánchez y Meli (2016).

Actualmente, el templo consta de una sola nave de planta rectangular de 14 m por 60 m, cubierta por cuatro bóvedas de mampostería de piedras naturales, así como una cúpula octogonal con pilastras en sus vértices, hechas de cantera. Al poniente tiene otra nave de menores dimensiones cubierta por cinco bóvedas esféricas.

Adyacente al templo se encuentra un conjunto de edificios, cuya estructura consta de muros de carga de mampostería, con sistemas de entrepiso resueltos de diversas formas. Por su parte, la torre está soportada por un cubo con muros de mampostería y, en su parte superior por columnas de piedra y silla de cantería, rematando en una cúpula.

3.3 Composición del sistema

El sistema de monitoreo continuo está compuesto por varios subsistemas que permiten registrar el comportamiento estructural y geotécnico de los inmuebles. Los subsistemas implementados son en su mayoría electrónicos, sin embargo, también se implementaron subsistemas de medición manual que permiten la extracción y registro directo de la información.

Los datos obtenidos por los sistemas electrónicos son guardados directamente en la base de datos de un servidor, permitiendo el acceso a ellos de manera remota. De esta forma, es posible descargar los datos en diferentes formatos de archivo para ser procesados; para algunos de los subsistemas es posible descargar los promedios diarios de las lecturas, mientras que para otros se deben descargar las lecturas obtenidas en lapsos de diez minutos. Como parte de estos subsistemas se cuenta con:

- Medición de la inclinación de elementos verticales, mediante inclinómetros (tiltmeters).
- Medición de desplazamientos en tres direcciones, a través de puntos fijos en las fachadas de los inmuebles y estaciones totales.
- Medición de la inclinación horizontal, a través de electroniveles colocados en los edificios.
- Medición de vibraciones en la estructura, mediante acelerómetros colocados en los inmuebles.
- Medición del nivel freático, a través de piezómetros colocados en la base de los edificios.
- Medición del desplazamiento lateral del suelo bajo la estructura, mediante inclinómetros geotécnicos colocados en la base.

Las lecturas de los subsistemas manuales son realizadas directamente por la gerencia a cargo de la construcción del túnel, quienes facilitan la información al IIUNAM para su análisis como parte del programa de revisión y para fines del presente trabajo. Estos subsistemas son:

- Nivelación topográfica mediante puntos de referencia fijos en la base de los inmuebles, con el uso de estación total.
- Nivelación topográfica de la superficie mediante hitos de nivel.
- Medición de los asentamientos superficiales sobre el eje del túnel, a través de extensómetros de varilla.

En esta tesis, solo se analizarán los registros de los tres subsistemas mencionados anteriormente, enfocándose en el comportamiento estructural más que en el comportamiento geotécnico.

3.3.1 Nivelación topográfica mediante puntos fijos.

Esta se realiza colocando puntos fijos en la estructura para medir su posición. En los casos tratados en este documento, las mediciones se llevan a cabo mediante estaciones totales para facilitar el manejo de datos electrónicos y con ello poder tener mayor sensibilidad y exactitud.

Los puntos fijos utilizados son clavos de nivelación. Estos pueden tener cabezas con rosca o argolla (ver Figura 15), lo cual permite instalar un objetivo óptico para la medición con teodolito o estación total.

Cuando se utilizan, se comparan las mediciones con una referencia tomada justo después de la instalación de los clavos o, en su caso, tomada con base en un punto de referencia fijo, fuera del área de estudio; tal es el caso de los inmuebles a tratar, pues se utilizó como referencia un banco de nivel a profundidad.

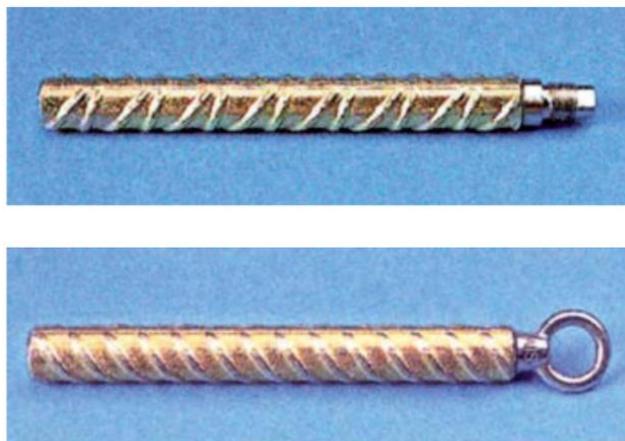


Figura 15. Clavos de nivelación. Obtenido de Lunardi (2008).

3.3.2 Medición de inclinaciones verticales.

Este subsistema está conformado por diversos inclinómetros (*tiltmeters*) biaxiales, colocados dentro de los inmuebles. Estos instrumentos se utilizan para determinar la variación angular en la posición de estructuras en dos direcciones, midiéndola con respecto a la vertical en los diversos puntos de interés seleccionados en dos ejes perpendiculares denominados *A* y *B*, los cuales se alinearon con los ejes cardinales.

Cada instrumento consta de cuatro partes básicas. Una caja metálica exterior; la sonda, que consta de un cuerpo metálico con rieles en el que se encuentran los sensores; el cable de medición; y la unidad de control (ver figura 16).

Es importante realizar correctamente las primeras lecturas pues estas servirán como referencia para las siguientes.

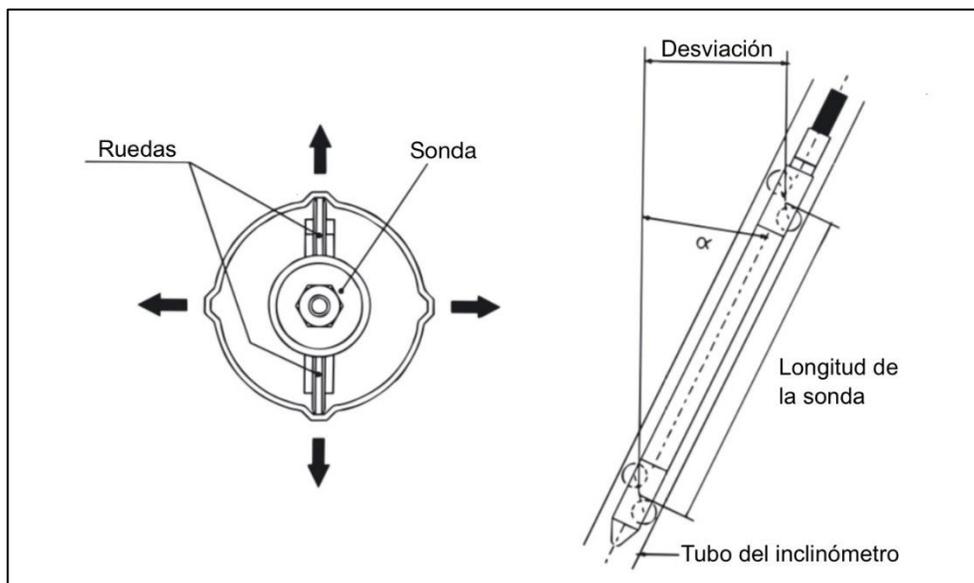


Figura 16. Partes de un inclinómetro. Obtenido de Lunardi (2008).

2.3.3 Medición de desplazamientos en tres direcciones.

Este subsistema realiza la medición en tres direcciones ortogonales a partir de puntos fijos colocados en las fachadas de los inmuebles; la posición de estos es medida por estaciones totales colocadas en edificios cercanos, de tal forma que se puedan registrar todos los puntos de interés.

Una estación total es un instrumento electro-óptico. Consta de un distanciómetro y un microprocesador que se incorporan a un teodolito electrónico (ver figura 17). El instrumento realiza la medición de distancias a partir de marcas en círculos transparentes conocidos como prismas o dianas reflectantes; las distancias se miden mediante una onda electromagnética con distintas frecuencias, que rebotan en el punto y regresan al instrumento, el cual analiza el desfase entre las ondas.

Al estar automatizada, la estación total se fija en un punto cercano al inmueble, y mide cada determinado tiempo la distancia a las dianas reflectantes colocadas en las fachadas. De esta forma, se monitorea el desplazamiento vertical y horizontal del edificio de manera periódica.

Este instrumento es capaz de nivelarse automáticamente, de tal forma que los posibles desplazamientos que ocurran en el lugar donde se fijó no afectan las lecturas tomadas. Esto es importante pues estas máquinas se colocaron en edificios cercanos a los analizados.



Figura 17. Estación total automatizada. Obtenida de <https://www.instop.es/estatotales/estaciones-totales-robotizadas.php>

2.3.5 Subsistemas adicionales.

Existen también registros de otros subsistemas de monitoreo que se enfocan en el comportamiento geotécnico de los inmuebles estudiados. Al interpretar sus lecturas se puede analizar el comportamiento del suelo en las inmediaciones de los edificios, permitiendo ahondar en el estudio de la subsidencia superficial. A pesar de que el alcance de la tesis no incluye el análisis de estos datos, se describen algunos de estos subsistemas:

a) Nivelación topográfica de la superficie.

Este subsistema mide los desplazamientos verticales de la superficie a través de la colocación de hitos de nivel que, de acuerdo con Cabello (2017), constituyen el método más simple para medir asentamientos. Estos se instalan en la superficie y se nivelan con base en referencias fijas. Estas últimas se colocan fuera de la zona de influencia del túnel, ancladas en roca sana; los hitos, a su vez, deben estar anclados al terreno natural, de tal forma que elementos rígidos en el terreno no afecten las lecturas tomadas.

b) Medición de asentamientos superficiales sobre el eje del túnel.

Este subsistema mide el asentamiento del suelo sobre el túnel a diversas profundidades, registrando el comportamiento del suelo en la zona. Estas mediciones se llevan a cabo mediante extensómetros de varilla. En cada punto de control se realizan 3 perforaciones en las que se anclaran varillas diferentes; la primera perforación alcanza 1.5 m por encima del nivel de la clave del túnel, mientras que las otras dos miden $2/3$ y $1/3$ de esta distancia, respectivamente.

El extensómetro se ancla al terreno y se protege de los daños y afectaciones de la actividad local, además, se refiere a las mismas bases que los hitos. Los movimientos relativos entre el instrumento y la varilla anclada se miden mediante un calibre digital o transductores eléctricos para la automatización de las mediciones.

c) Medición de desplazamiento lateral del suelo.

Este subsistema permite monitorear el perfil de desplazamiento lateral del suelo entre el túnel y las estructuras; para ello, se instalaron inclinómetros geotécnicos en la base de los edificios. Estos inclinómetros tienen la misma estructura de los tratados en el punto 2.3.2, sin embargo, la longitud y cantidad de puntos de control son mayores, permitiendo establecer un perfil de inclinaciones.

d) Medición del nivel freático.

Este subsistema monitorea el nivel freático o la presión de poro en las diversas zonas de control a lo largo del túnel, colocando piezómetros abiertos. Estos consisten en una tubería ranurada unida a una tubería lisa, instalada en una perforación; la perforación está rellena de arena o grava limpias, y sellada con bentonita o mortero. El nivel de agua es medido mediante la introducción de una sonda eléctrica, acústica o de otro tipo.

3.4 Localización de instrumentos

Los instrumentos mencionados en el punto 2.3 se localizan dentro y fuera de los inmuebles debido a la complejidad de sus estructuras. A continuación, se muestra la localización en las fachadas, así como en los muros interiores de los templos, para su futuro análisis.

3.4.1 Instrumentos en San José de Gracia.

La instrumentación del templo de San José de Gracia consta de diez *tiltmeters* dispuestos en la parte interna de los muros del inmueble, tres clavos de nivelación colocados en la fachada poniente del edificio, cerca de la base del muro, y cuarenta dianas reflectantes, diez en la fachada sur y treinta en la fachada poniente. En seguida se muestra la localización de dichos equipos.

Tabla 6. Coordenadas UTM. *Tiltmeters* San José de Gracia.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
TI01	672141.526	2287696.162	1558.246	TI06	672132.193	2287657.112	1559.846
TI02	672142.523	2287686.707	1558.246	TI07	672128.684	2287661.069	1558.246
TI03	672136.297	2287679.586	1558.246	TI08	672127.415	2287678.765	1558.246
TI04	672138.241	2287662.264	1558.246	TI09	672119.948	2287684.738	1558.246
TI05	672135.395	2287657.496	1559.846	TI10	672118.889	2287694.449	1558.246



TEMPLO DE SAN JOSÉ DE GRACIA

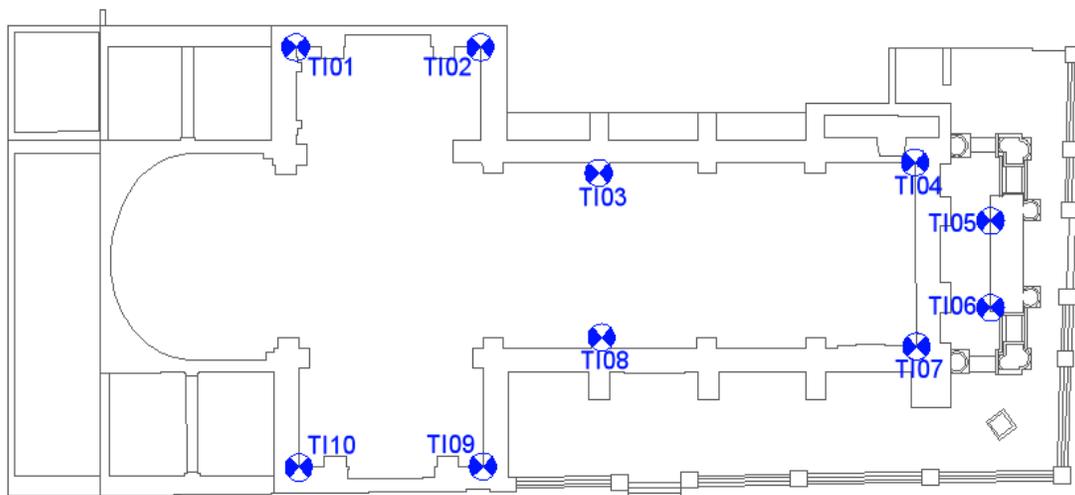


Figura 18. Localización de tiltmeters. Templo de San José de Gracia.

Tabla 7. Coordenadas UTM. Dianas reflectantes San José de Gracia fachada poniente.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
PR01	672114.869	2287727.623	1555.882	PR16	672129.330	2287658.775	1578.818
PR02	672115.755	2287713.439	1555.904	PR17	672129.174	2287658.741	1570.719
PR03	672115.738	2287712.482	1555.347	PR18	672123.521	2287660.917	1549.908
PR04	672116.916	2287695.842	1563.472	PR19	672123.736	2287667.254	1549.897
PR05	672124.312	2287694.352	1571.785	PR20	672123.336	2287673.173	1550.089
PR06	672123.400	2287691.759	1571.782	PR21	672122.976	2287679.070	1549.879
PR07	672123.562	2287689.108	1571.780	PR22	672117.608	2287684.155	1549.322
PR08	672124.685	2287686.773	1571.686	PR23	672115.748	2287712.518	1549.231
PR09	672117.574	2287684.143	1563.442	PR24	672115.770	2287713.192	1548.940
PR10	672122.962	2287679.034	1563.481	PR25	672114.850	2287727.867	1548.895
PR11	672123.308	2287673.095	1563.570	PR26	672119.136	2287683.745	1550.291
PR12	672123.697	2287667.196	1563.390	PR27	672118.930	2287683.702	1563.407
PR13	672123.516	2287660.892	1563.452	PR30	672126.764	2287684.942	1571.725
PR14	672129.089	2287660.172	1570.693	PR35	672134.289	2287685.455	1571.767
PR15	672129.246	2287660.041	1578.893	PR37	672143.123	2287685.270	1564.718

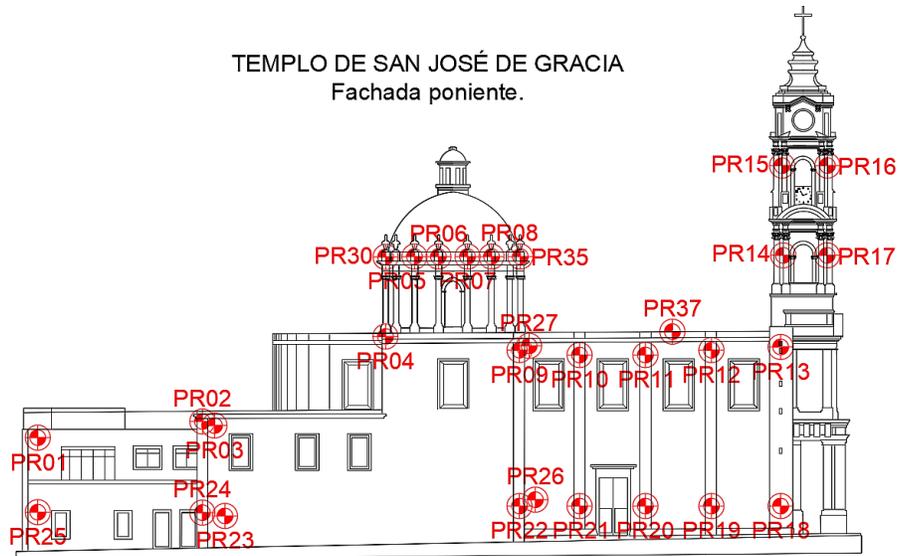


Figura 19. Localización de dianas reflectantes. Templo de San José de Gracia, fachada poniente.

Tabla 8. Coordenadas UTM. Dianas reflectantes San José de Gracia fachada sur.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
PR28	672124.270	2287659.922	1563.203	PR34	672133.147	2287657.322	1570.582
PR29	672126.390	2287655.948	1563.353	PR36	672138.235	2287656.730	1563.338
PR31	672130.106	2287657.187	1570.558	PR38	672137.992	2287656.661	1549.817
PR32	672130.277	2287657.318	1579.033	PR39	672126.528	2287655.908	1549.803
PR33	672133.056	2287657.449	1578.901	PR40	672124.302	2287659.963	1549.851

TEMPLO DE SAN JOSÉ DE GRACIA
Fachada sur.

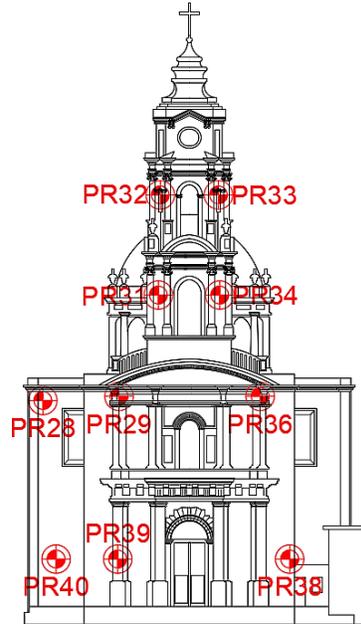


Figura 20. Localización de dianas reflectantes. Templo de San José de Gracia, fachada sur.

TEMPLO DE SAN JOSÉ DE GRACIA
Fachada poniente.



Figura 21. Localización de clavos de nivelación. Templo de San José de Gracia, fachada poniente.

3.4.2 Instrumentos en Catedral Metropolitana.

La Catedral Metropolitana está dividida en dos complejos, el complejo propio de la Catedral y el complejo del Sagrario Metropolitano. El conjunto cuenta con 17 *tiltmeters* colocados en el interior del recinto, 10 en la Catedral y 7 en el Sagrario, 27 clavos de nivelación en las fachadas, y 63 dianas reflectantes en las fachadas norte, poniente y sur, 38 en la Catedral y 25 en el Sagrario. A continuación, se muestra la distribución de los equipos.

Tabla 9. Coordenadas UTM. *Tiltmeters* Catedral Metropolitana.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
TI01	672205.355	2287277.740	1536.274	TI10	672203.372	2287308.889	1558.246
TI02	672176.306	2287275.757	1558.246	TI11	672176.869	2287239.908	1558.246
TI03	672176.306	2287275.757	1558.246	TI12	672165.969	2287245.955	1558.246
TI04	672155.169	2287269.661	1558.166	TI13	672157.158	2287239.161	1558.246
TI05	672149.153	2287269.297	1558.166	TI14	672157.158	2287239.161	1558.246
TI06	672144.778	2287310.493	1558.166	TI15	672146.929	2287256.632	1558.246
TI07	672154.622	2287311.223	1558.166	TI16	672166.118	2287257.678	1558.246
TI08	672174.323	2287307.256	1558.246	TI17	672175.649	2287264.699	1558.246
TI09	672184.239	2287308.306	1558.246				

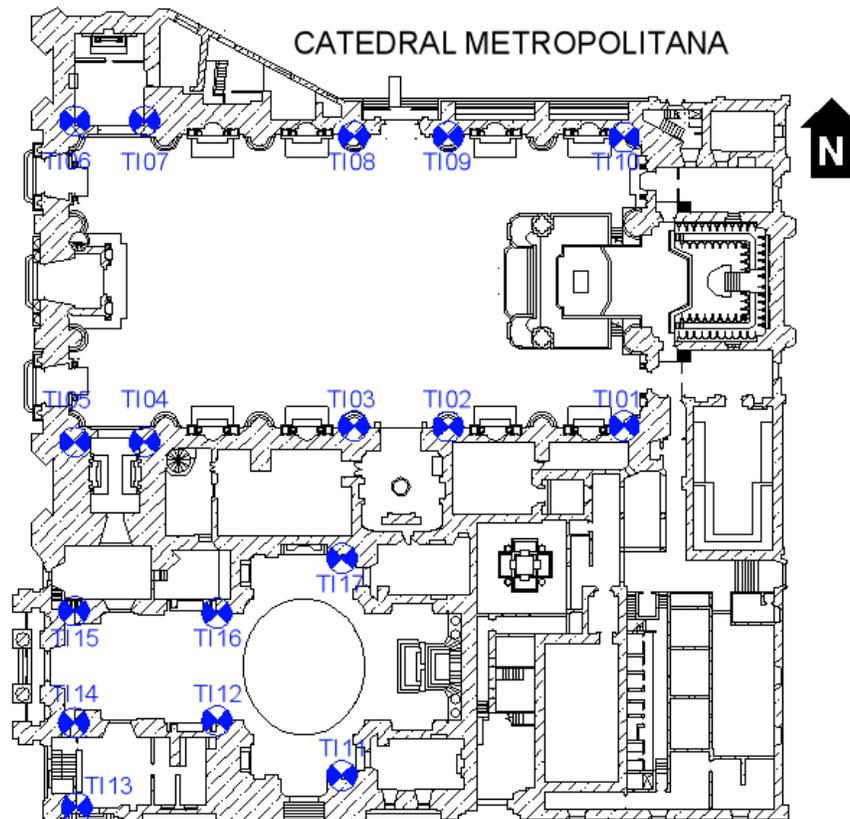


Figura 22. Localización de *tiltmeters*. Catedral Metropolitana.

Tabla 10. Coordenadas UTM. Dianas reflectantes Catedral Metropolitana fachada poniente.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
CT_PR01	672141.690	2287315.445	1562.934	CT_PR17	672146.109	2287272.207	1583.298
CT_PR02	672142.061	2287306.053	1562.851	CT_PR18	672146.249	2287268.159	1583.517
CT_PR03	672142.402	2287295.730	1562.980	CT_PR19	672145.840	2287265.331	1570.507
CT_PR04	672142.888	2287284.559	1562.802	CT_PR20	672145.545	2287273.669	1572.362
CT_PR05	672143.456	2287274.521	1563.024	CT_PR25	672148.526	2287275.061	1583.040
CT_PR06	672143.923	2287265.555	1563.082	CT_PR41	672146.024	2287275.525	1573.584
CT_PR07	672143.948	2287265.517	1549.219	SG_PR01	672142.948	2287259.055	1554.916
CT_PR08	672143.493	2287274.595	1549.284	SG_PR02	672164.477	2287256.285	1570.934
CT_PR09	672143.004	2287284.571	1549.362	SG_PR03	672165.104	2287250.069	1570.650
CT_PR10	672142.510	2287295.763	1549.414	SG_PR04	672171.505	2287246.681	1570.807
CT_PR11	672142.092	2287306.090	1549.510	SG_PR05	672146.360	2287239.041	1556.724
CT_PR12	672141.739	2287315.405	1549.626	SG_PR06	672146.368	2287239.060	1549.367
CT_PR13	672144.168	2287312.912	1582.763	SG_PR07	672143.459	2287246.073	1551.902
CT_PR14	672144.293	2287308.807	1582.981	SG_PR08	672143.459	2287246.115	1554.913
CT_PR15	672144.064	2287306.076	1571.053	SG_PR09	672142.948	2287259.050	1549.306
CT_PR16	672143.712	2287315.542	1571.001				

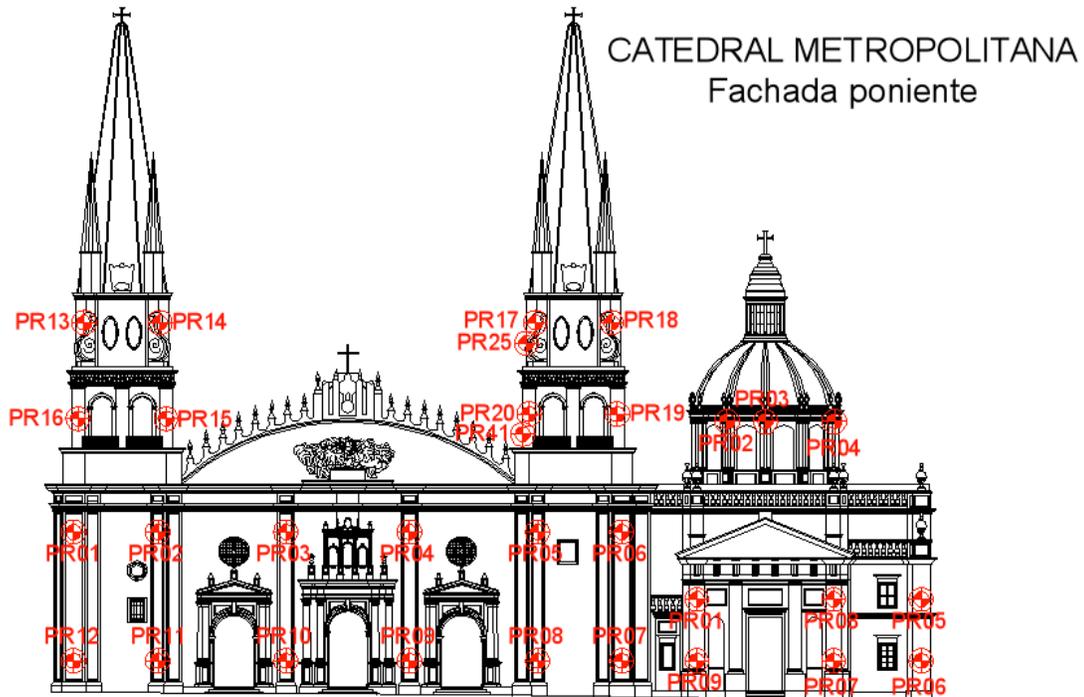


Figura 23. Localización de dianas reflectantes. Catedral Metropolitana, fachada poniente.

Tabla 11. Coordenadas UTM. Dianas reflectantes Catedral Metropolitana fachada norte.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
CT_PR21	672202.340	2287310.890	1563.417	CT_PR32	672183.102	2287310.248	1550.515
CT_PR22	672192.751	2287310.491	1563.472	CT_PR33	672192.543	2287310.707	1550.371
CT_PR23	672183.279	2287310.021	1563.547	CT_PR34	672202.692	2287311.127	1550.294
CT_PR24	672173.355	2287309.662	1563.546	CT_PR35	672146.826	2287315.811	1582.504
CT_PR26	672154.010	2287317.704	1563.956	CT_PR36	672145.397	2287316.282	1570.643
CT_PR27	672143.941	2287317.128	1563.398	CT_PR37	672153.499	2287316.585	1570.743
CT_PR28	672143.939	2287317.060	1549.507	CT_PR38	672206.552	2287298.823	1567.590
CT_PR29	672154.125	2287317.683	1549.563	CT_PR39	672203.961	2287295.978	1567.700
CT_PR30	672162.040	2287314.303	1550.503	CT_PR40	672203.493	2287294.790	1567.741
CT_PR31	672173.665	2287309.917	1550.462				

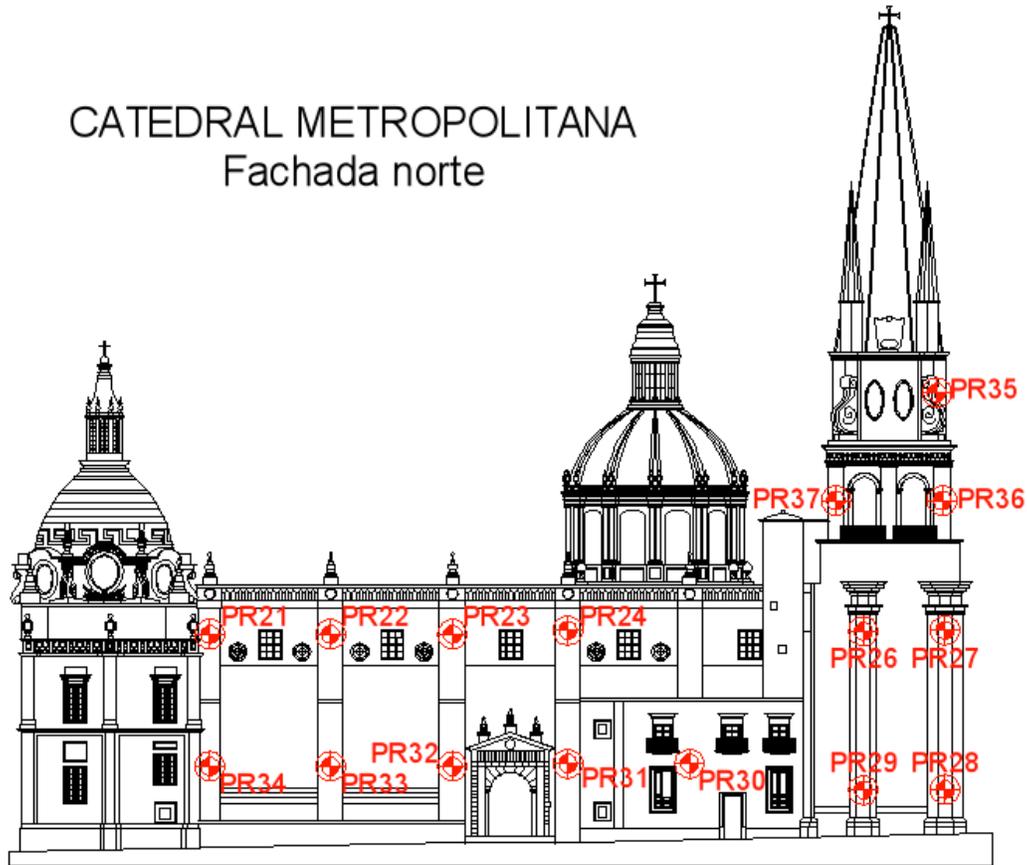


Figura 24. Localización de dianas reflectantes. Catedral Metropolitana, fachada norte.

Tabla 12. Coordenadas UTM. Dianas reflectantes Catedral Metropolitana fachada sur.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
SG_PR12	672146.738	2287238.322	1556.614	SG_PR20	672218.331	2287240.973	1547.801
SG_PR13	672155.489	2287238.675	1556.145	SG_PR21	672205.617	2287240.485	1547.817
SG_PR14	672165.242	2287239.049	1555.905	SG_PR22	672194.015	2287239.648	1548.016
SG_PR15	672177.975	2287239.648	1555.880	SG_PR23	672187.570	2287240.212	1548.112
SG_PR16	672188.079	2287240.226	1556.927	SG_PR24	672177.991	2287239.659	1548.545
SG_PR17	672194.080	2287239.816	1555.945	SG_PR25	672165.332	2287239.061	1548.640
SG_PR18	672205.523	2287240.596	1555.900	SG_PR26	672155.497	2287238.703	1548.740
SG_PR19	672218.449	2287241.076	1555.887	SG_PR27	672147.702	2287238.383	1548.852



Figura 25. Localización de dianas reflectantes. Catedral Metropolitana (Sagrario), fachada sur.



Figura 26. Localización de clavos de nivelación. Catedral Metropolitana (Sagrario), fachada sur.



Figura 27. Localización de clavos de nivelación. Catedral Metropolitana, fachada poniente.



Figura 28. Localización de clavos de nivelación. Catedral Metropolitana, fachada norte.

CATEDRAL METROPOLITANA
Fachada oriente



Figura 29. Localización de clavos de nivelación. Catedral Metropolitana, fachada oriente.

3.4.3 Instrumentos en San Francisco de Asís.

El templo de San Francisco de Asís se encuentra equipado con ocho tiltmeters dispuestos en el interior del recinto, siete clavos de nivelación, cuatro en la fachada norte y tres en la fachada oriente, y treinta y cuatro dianas reflectantes, dieciocho en la fachada oriente y dieciséis en la fachada norte. Estos instrumentos están dispuestos como se señala a continuación.

Tabla 13. Coordenadas UTM. Tiltmeters San Francisco de Asís.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
TI01	672189.119	2286732.682	1554.580	TI06	672200.353	2286761.749	1554.580
TI03	672177.897	2286732.945	1554.580	TI07	672199.648	2286733.767	1554.580
TI04	672178.983	2286761.554	1554.580	TI08	672200.186	2286706.496	1554.580
TI05	672189.139	2286761.752	1554.580				

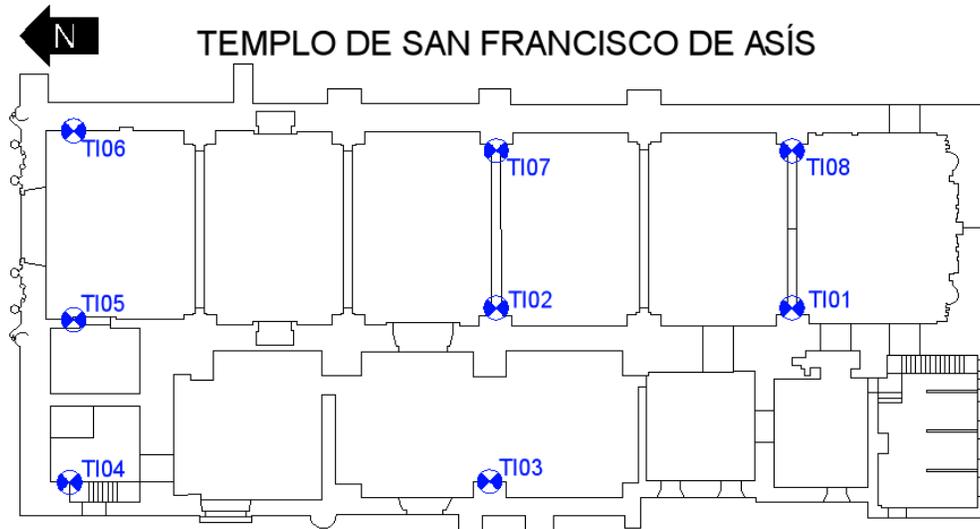


Figura 30. Localización de tiltmeters. Templo de San Francisco de Asís.

Tabla 14. Coordenadas UTM. Dianas reflectantes San Francisco de Asís fachada oriente.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
PR01	672203.94	2286704.44	1558.00	PR11	672202.72	2286735.23	1558.04
PR02	672202.00	2286718.47	1563.79	PR12	672201.96	2286751.66	1548.26
PR04	672203.50	2286712.71	1557.88	PR13	672203.39	2286743.66	1546.29
PR05	672203.59	2286713.25	1547.11	PR16	672204.11	2286704.11	1546.00
PR06	672203.49	2286725.40	1559.02	PR17	672184.44	2286759.85	1577.68
PR07	672202.67	2286743.48	1557.74	PR18	672182.12	2286762.21	1577.63
PR08	672202.71	2286750.08	1557.70	PR19	672184.34	2286762.64	1567.94
PR09	672202.15	2286763.16	1557.44	PR20	672184.85	2286754.52	1567.95
PR10	672203.87	2286763.20	1546.24				

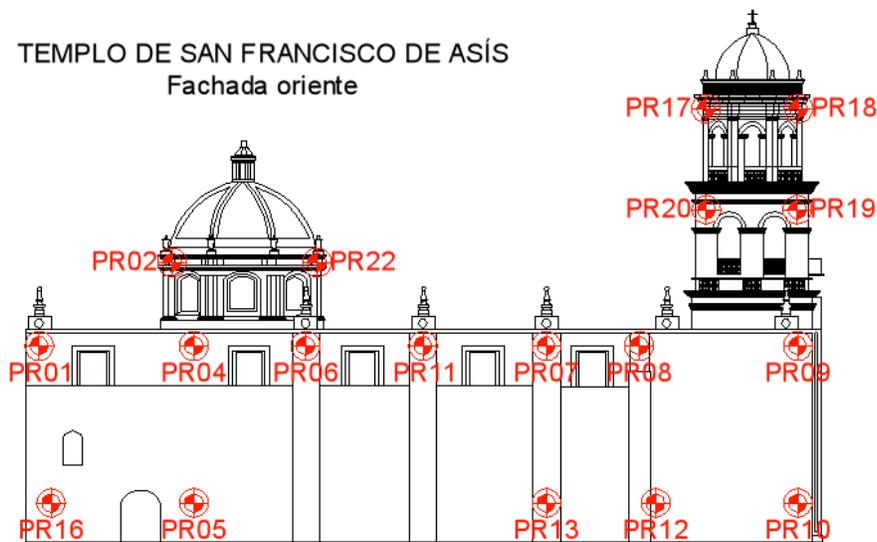


Figura 31. Localización de dianas reflectantes. Templo de San Francisco de Asís, fachada oriente.

Tabla 15. Coordenadas UTM. Dianas reflectantes San Francisco de Asís fachada norte.

Instrumento	X	Y	Z	Instrumento	X	Y	Z
PR21	672200.46	2286764.44	1557.03	PR29	672175.87	2286762.20	1567.92
PR22	672201.39	2286723.27	1563.71	PR30	672176.15	2286762.45	1557.37
PR23	672197.38	2286725.80	1563.76	PR31	672176.30	2286762.45	1546.28
PR24	672193.40	2286725.43	1563.73	PR32	672183.72	2286762.94	1546.40
PR25	672189.58	2286722.68	1563.80	PR33	672183.66	2286762.96	1557.52
PR26	672184.16	2286762.78	1567.96	PR34	672186.65	2286763.81	1555.25
PR27	672184.44	2286759.85	1577.68	PR35	672186.66	2286763.79	1547.30
PR28	672178.69	2286762.33	1577.81	PR36	672200.62	2286764.27	1547.87

TEMPLO DE SAN FRANCISCO DE ASÍS
Fachada norte

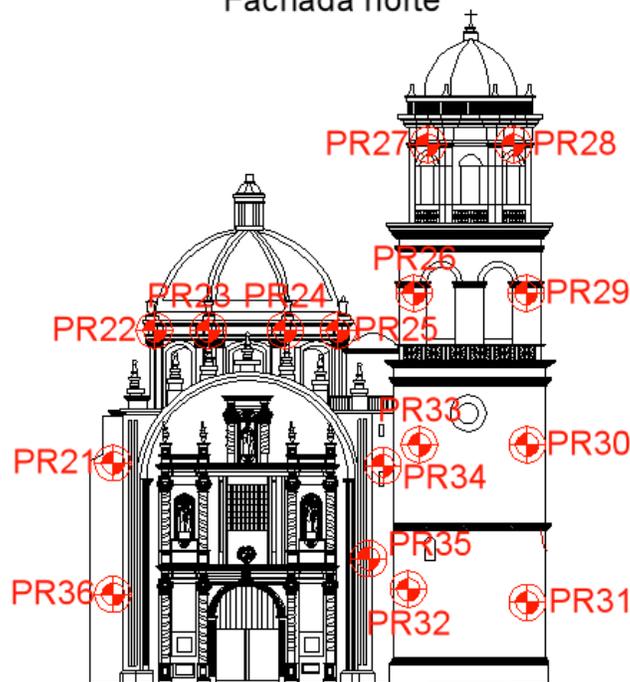


Figura 32. Localización de dianas reflectantes. Templo de San Francisco de Asís, fachada norte.

TEMPLO DE SAN FRANCISCO DE ASÍS
Fachada oriente



Figura 33. Localización de clavos de nivelación. Templo de San Francisco de Asís, fachada oriente.

TEMPLO DE SAN FRANCISCO DE ASÍS
Fachada norte

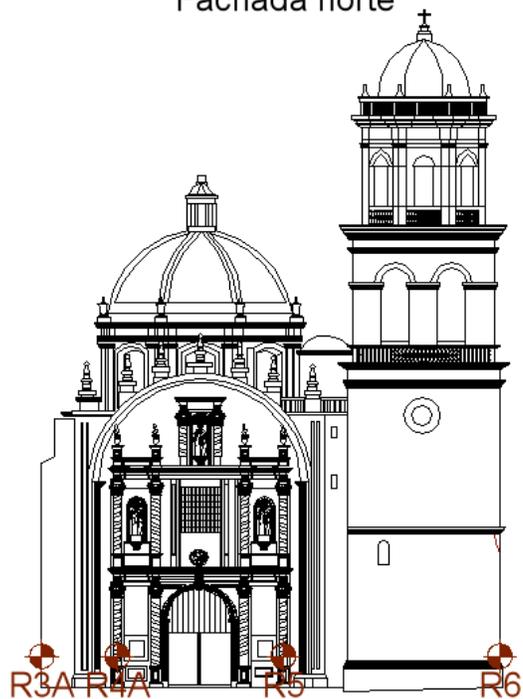


Figura 34. Localización de clavos de nivelación. Templo de San Francisco de Asís, fachada norte.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE DATOS

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE DATOS

4.1 Metodología

El análisis de desplazamientos en la estructura se basó en los registros obtenidos por los *tiltmeters*, las estaciones totales y los datos de las elevaciones medidas en los clavos de referencia.

Debido a la cantidad de datos obtenidos por los *tiltmeters*, y a que el análisis presentado en este trabajo comprende un periodo amplio de tiempo (dos años aproximadamente), fue necesario programar una hoja de cálculo de tal forma que se obtuviera el promedio diario de las lecturas y se organizaran estos resultados en una matriz nueva.

Las lecturas manuales de los clavos de nivelación fueron tomadas en lapsos más amplios, por lo que no fue necesario implementar el programa, y se usaron estas fechas específicas para la comparación con las lecturas de los otros instrumentos.

Para interpretar y validar los datos procesados, se requirió comparar los desplazamientos obtenidos con los equipos topográficos con los desplazamientos estimados a partir de las inclinaciones que se registraron con los *tiltmeters*.

Para validar los asentamientos, se comparan las lecturas de la nivelación topográfica con los desplazamientos verticales observados por las estaciones totales, procurando que las dianas reflectantes analizadas se encuentren en un plano vertical lo más cercano posible a los clavos de referencia. Además, se calcula la distorsión horizontal a partir de los datos de las dianas reflectantes para un análisis más detallado.

De igual forma, los desplazamientos laterales registrados con las estaciones totales se compararon con los desplazamientos estimados a partir de los registros obtenidos con los *tiltmeters* y, a su vez, las rotaciones laterales de los *tiltmeters* se compararon con la distorsión vertical calculada a partir de los desplazamientos laterales de dianas localizadas en el mismo plano vertical. Esta estimación se realizó a partir del ángulo de rotación y utilizando la Ley de cosenos, considerando que la estructura del edificio se comporta como un cuerpo rígido.

A continuación, se presenta esta información para cada uno de los edificios, haciendo énfasis en aquellos casos en los que existe discrepancia en los resultados. Así mismo, se verifica si la estructura se comportó como un cuerpo rígido o si esta se deformó, pues este tipo de comportamiento generalmente está asociado con daños estructurales.

En la base de datos, las lecturas de los tiltmeters tienen una convención de signos particular para cada edificio. Para poder realizar la comparación de manera adecuada en este trabajo, se utilizó la convención de signos de las estaciones totales. De esta forma, un desplazamiento positivo representa movimiento hacia arriba, al oriente y hacia el sur, según sea el caso tratado.

4.2 Análisis en Templo de San José de Gracia

4.2.1 Análisis de asentamientos registrados.

Para la medición de asentamientos, como se mencionó anteriormente, se cuenta con dos técnicas diferentes. Por un lado, se utilizaron los datos del desplazamiento vertical, obtenidos por la estación total robotizada, de las diferentes dianas colocadas en el inmueble. Por el otro, se obtuvieron lecturas de asentamientos manualmente mediante la nivelación topográfica con los puntos de referencia colocados en la fachada poniente.

Para efectuar la comparación, se eligen los datos de los prismas colocados en los ejes más cercanos a aquellos en los que se colocaron los clavos de referencia, de tal forma que se presente el asentamiento de un mismo plano vertical de la estructura. Los puntos comparados para el análisis se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Puntos de referencia a comparar. Asentamientos. Templo de San José de Gracia.

Clave de punto de referencia topográfico	Clave de diana reflectante a comparar
R1	PR02 y PR24
R2	PR09 y PR22
R3	PR13 y PR18

En este caso, los datos corresponden a las fechas en las que se realizaron las lecturas manuales con los clavos de nivelación. Estos se tabularon y graficaron para facilitar la comparación entre ellos, obteniendo las gráficas siguientes:

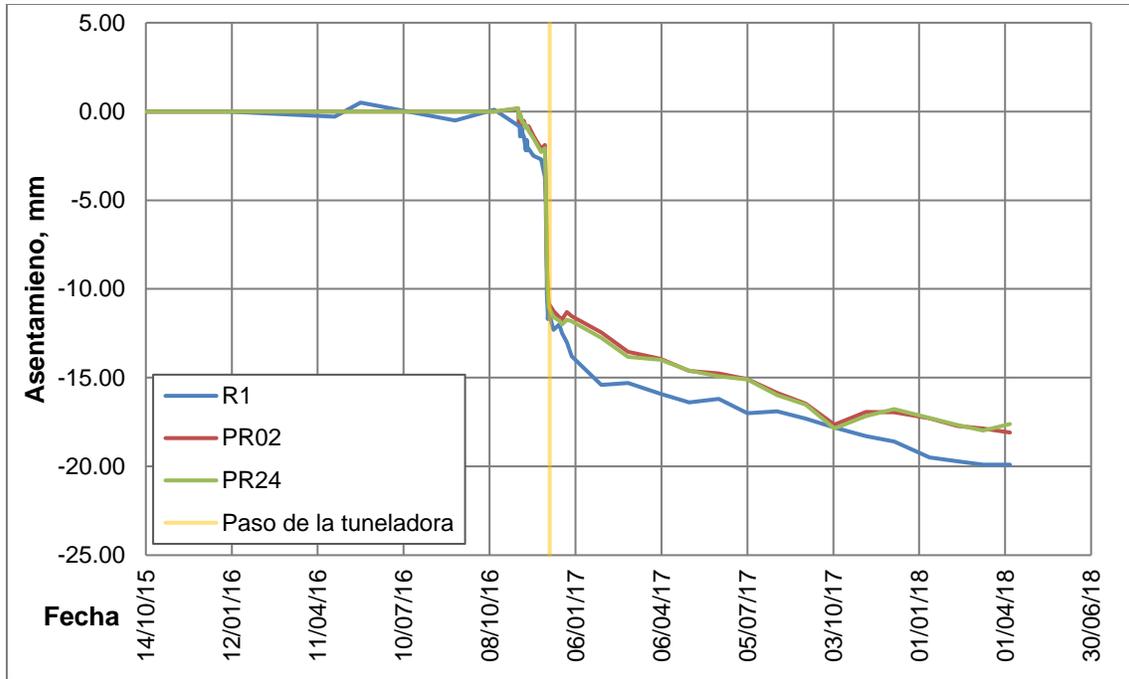


Figura 35. Asentamiento en clavo de nivelación R1 y dianas PR02 y PR24. Templo de San José de Gracia.

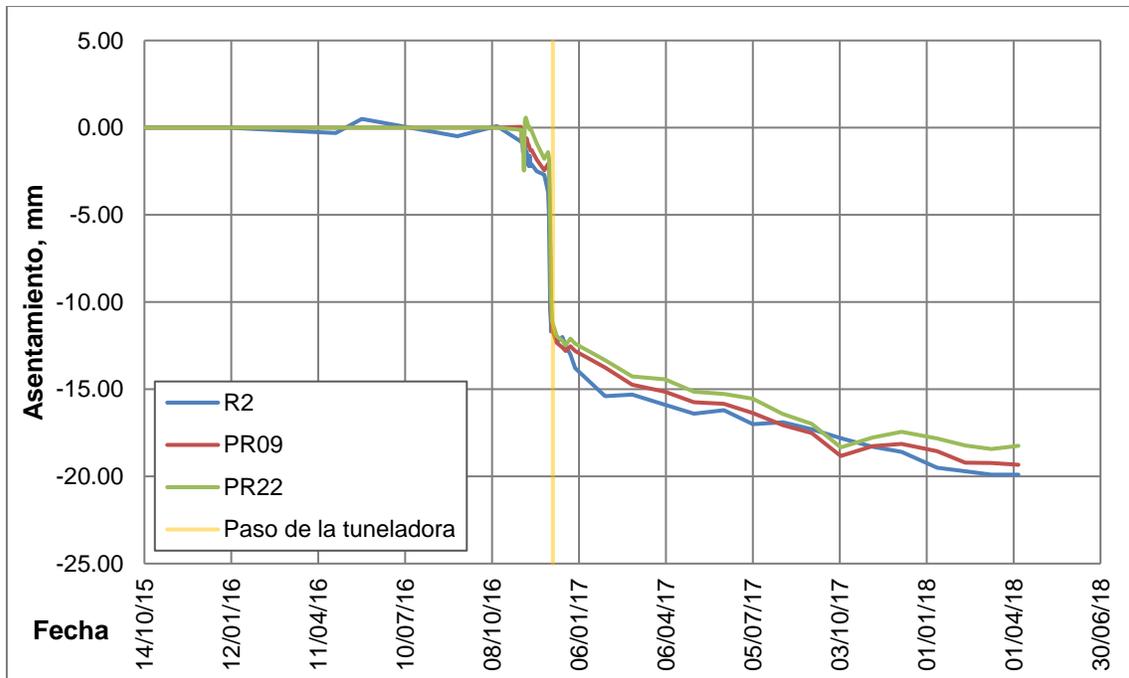


Figura 36. Asentamiento en clavo de nivelación R2 y dianas PR09 y PR22. Templo de San José de Gracia.

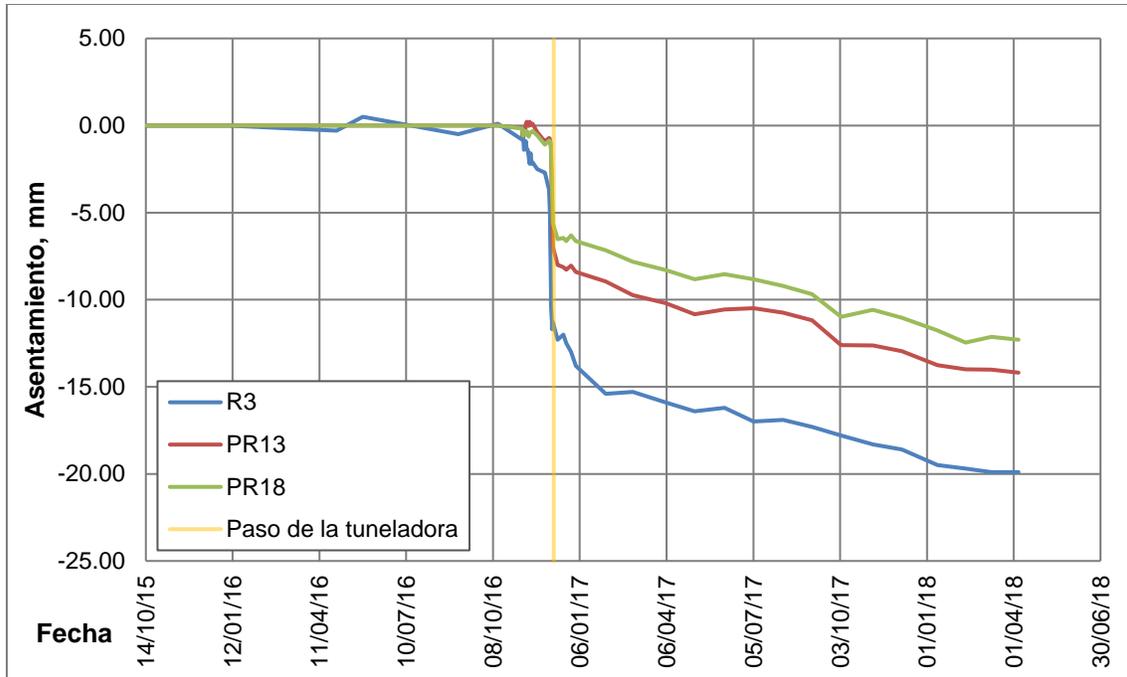


Figura 37. Asentamiento en clavo de nivelación R3 y dianas PR13 y PR18. Templo de San José de Gracia.

Se observa que, para todos los casos, el mayor asentamiento se produce durante el mes de diciembre de 2016, coincidiendo con el paso de la tuneladora en esa sección del túnel.

Considerando únicamente las lecturas de los clavos de nivelación se observa que el asentamiento del edificio fue similar en los tres ejes y alcanzó los 20 mm. Al comparar con las lecturas de la estación total, estas difieren de las obtenidas manualmente por menos de 3 mm, excepto en el caso del clavo R3 (figura 37), donde se alcanza una diferencia mayor a 5 mm.

TEMPLO DE SAN JOSÉ DE GRACIA
Fachada sur.

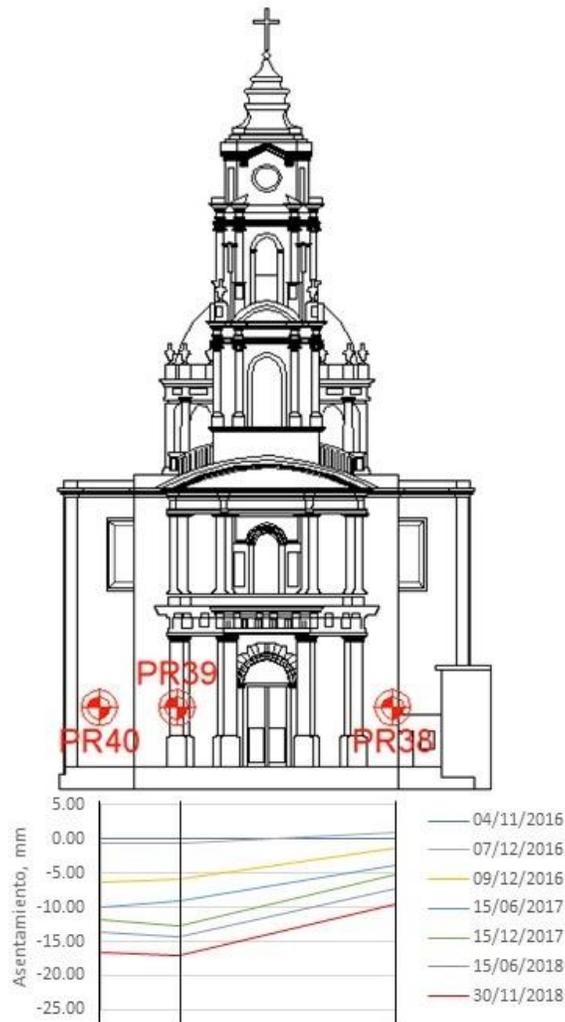


Figura 38. Perfil de asentamientos en fachada sur. Templo de San José de Gracia.

En el caso de la fachada sur (figura 38), se analizan las dianas cercanas a la base del inmueble, observando que el asentamiento presentado es mayor en el extremo poniente debido a la cercanía con el túnel; en esta zona el mayor desplazamiento registrado fue de 16.68 mm, mientras que en la diana oriental se registró un asentamiento máximo de 9.78 mm. El asentamiento diferencial provoca que, entre las dianas PR38 y PR39 se presente una distorsión de 0.00065, la máxima en esta fachada.

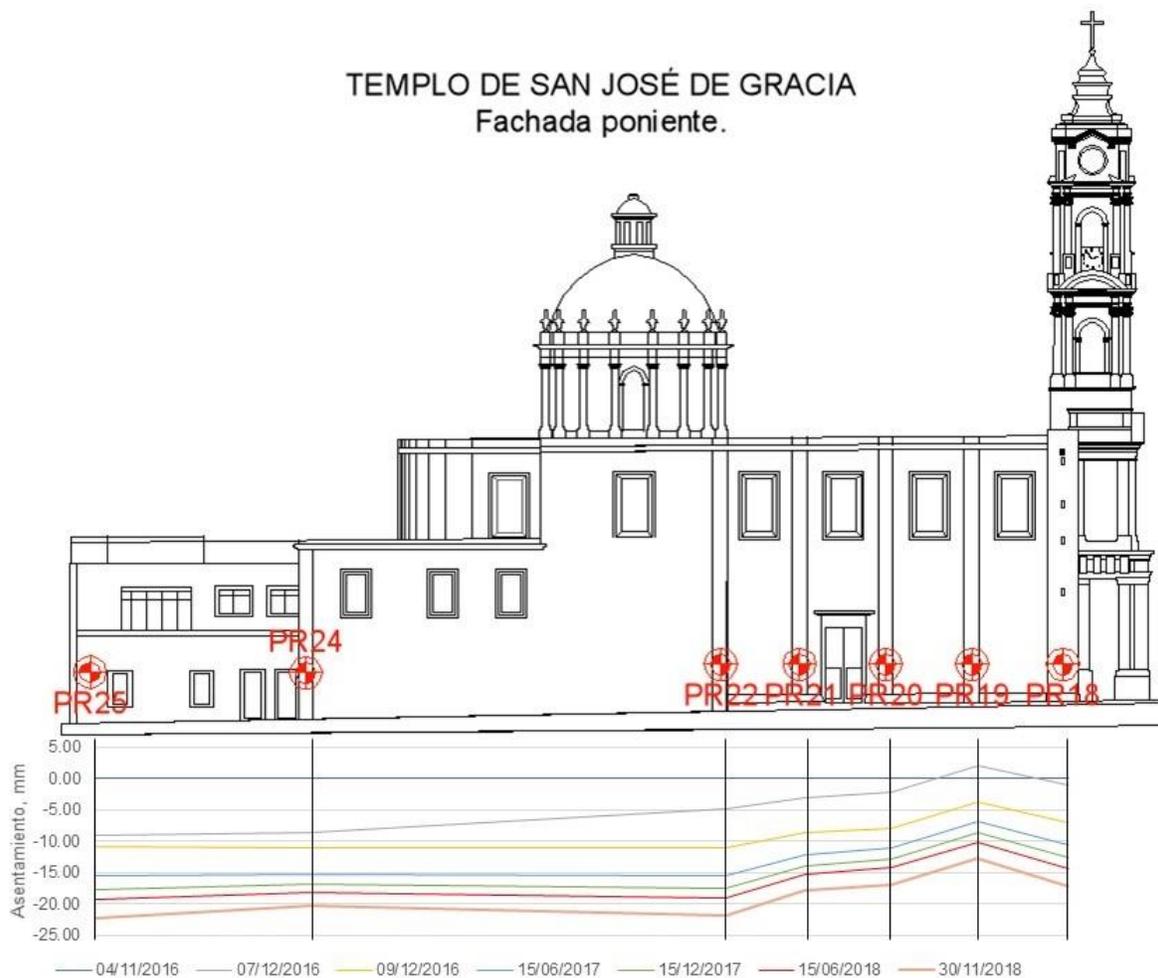


Figura 39. Perfil de asentamientos en fachada poniente. Templo de San José de Gracia.

De igual forma, utilizando el registro de asentamientos de la estación total robotizada en los puntos cercanos a la base de la fachada poniente, se observa que el máximo asentamiento es de 22.20 mm en el extremo norte, y que la mayor distorsión es de 0.00080 entre las dianas PR21 y PR22.

Así mismo, se presenta asentamiento diferencial importante en la sección sur del inmueble, pues la diferencia entre los puntos con mayor y menor asentamiento es de 8.98 mm (PR22 y PR19, figura 39).

4.2.2 Análisis de desplazamientos laterales de muros.

Para el caso de los desplazamientos en el plano horizontal, se cuenta con los registros de las estaciones robotizadas, así como las lecturas de los *tiltmeters*; estos últimos registran el cambio en la verticalidad de los muros datos que, tras ser procesados considerando el muro un cuerpo rígido, permiten determinar el movimiento del punto analizado con respecto a la base.

Al igual que en los asentamientos, es necesario comparar los registros de instrumentos que se encuentren en planos lo más cercanos posible, de tal forma que coincidan con la hipótesis de comportamiento de cuerpo rígido propuesta para el análisis. El eje A de los *tiltmeters* corresponde a la dirección Oriente-Poniente, mientras que la dirección Norte-Sur se asocia al eje B. De tal forma, que la comparación se realiza como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Puntos de referencia a comparar. Desplazamientos laterales. Templo de San José de Gracia.

Clave de <i>tiltmeters</i>	Clave de diana reflectante a comparar
T110	PR04
1109	PR09 y PR22
1108	PR10 y PR21
1107	PR13 y PR18
1106	PR17 y PR16
1105	PR34 y PR33

En este caso, se cuenta con los registros diarios de ambos instrumentos para los desplazamientos laterales, por lo que el análisis se realiza desde la fecha inicial hasta el 30 de noviembre de 2018. Así mismo, se analiza la rotación registrada por los *tiltmeters* con la rotación calculada utilizando las lecturas de las estaciones totales.

Los primeros desplazamientos analizados son los presentados en la dirección Oriente-Poniente, en los cuales se observa una clara tendencia hacia el oeste, donde se localiza el eje del túnel.

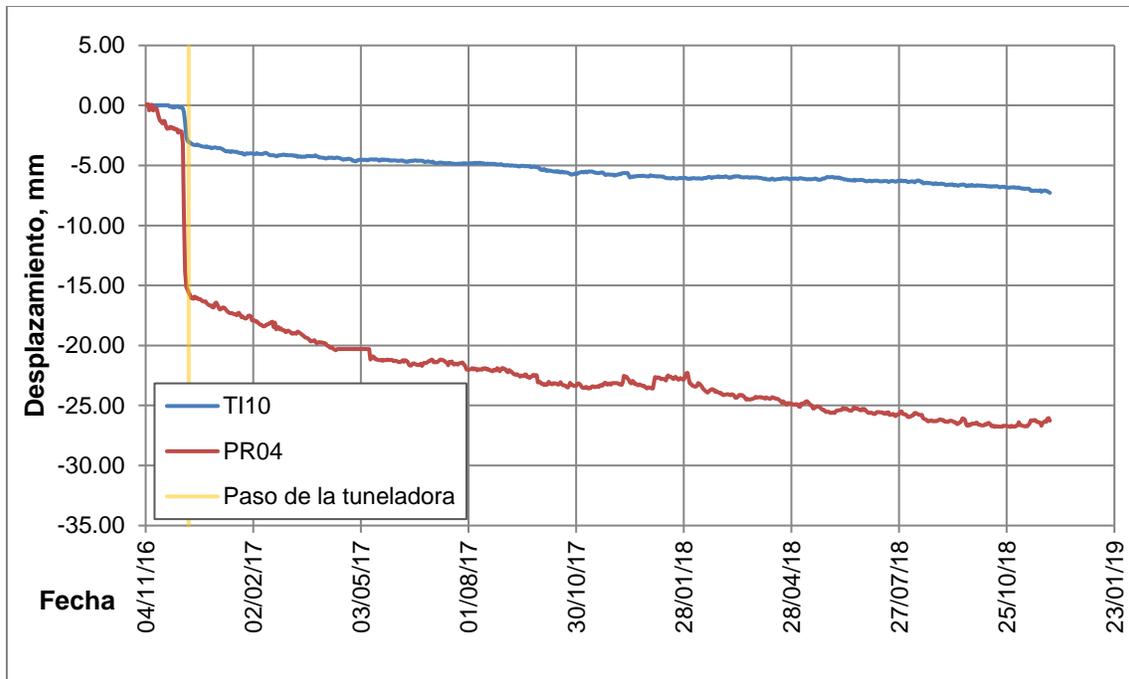


Figura 40. Desplazamiento Ote-Pte TI10 y PR04. Templo de San José de Gracia.

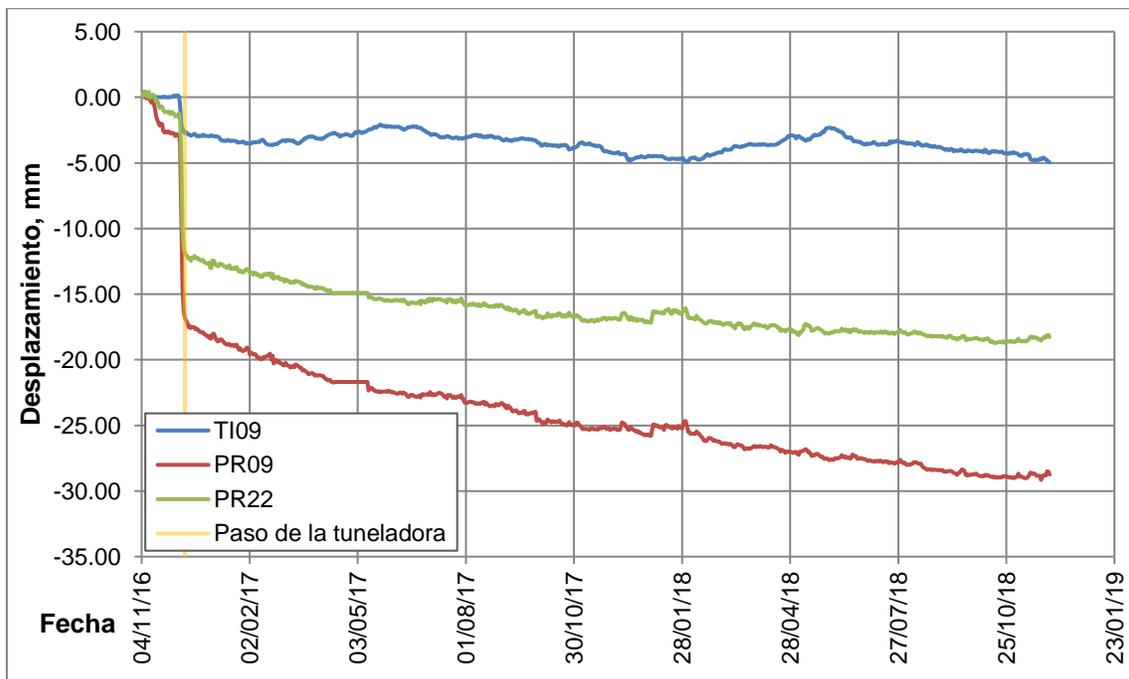


Figura 41. Desplazamiento Ote-Pte TI09, PR09 y PR22. Templo de San José de Gracia.

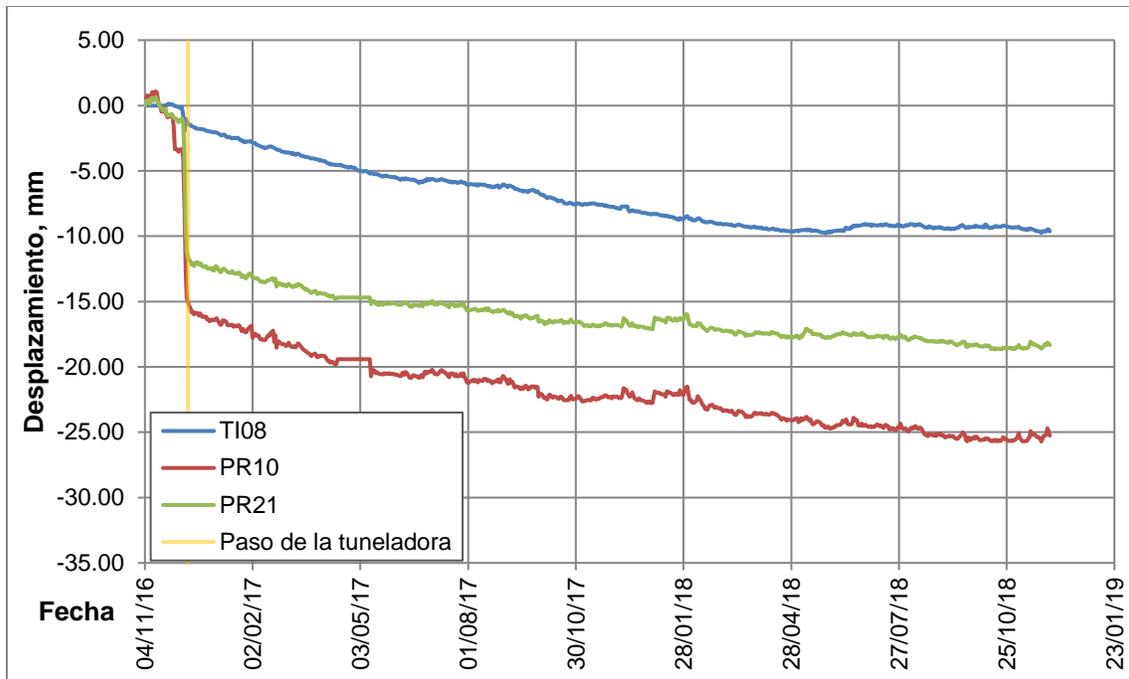


Figura 42. Desplazamiento Ote-Pte TI08, PR10 y PR21. Templo de San José de Gracia.

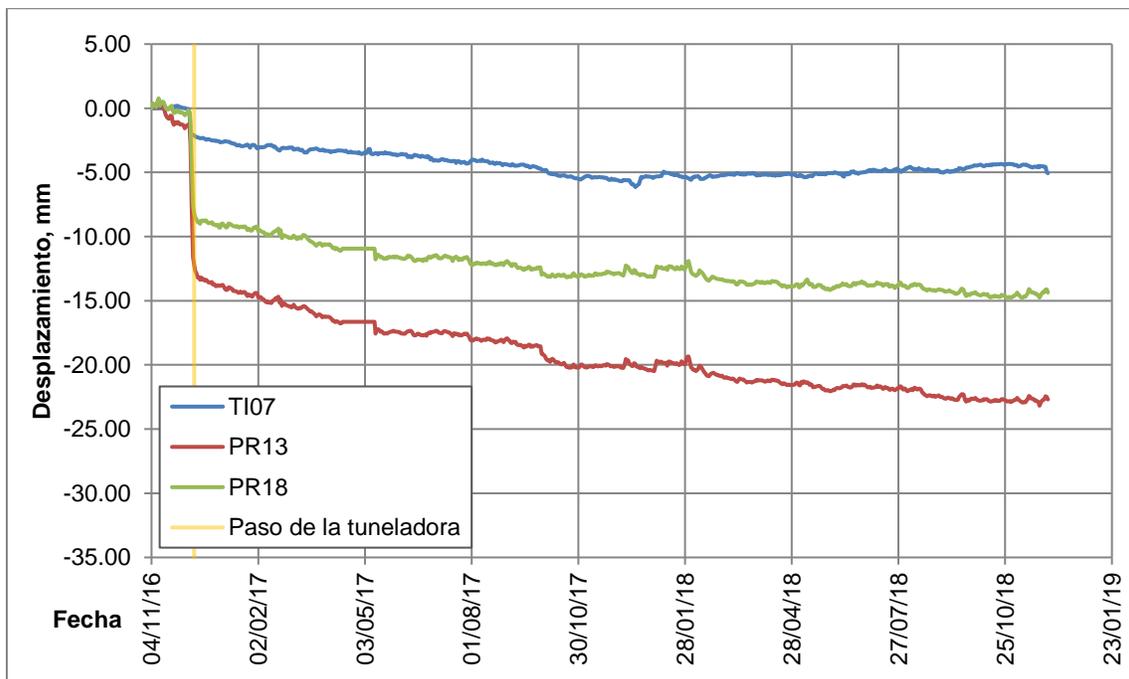


Figura 43. Desplazamiento Ote-Pte TI07, PR13 y PR18. Templo de San José de Gracia.

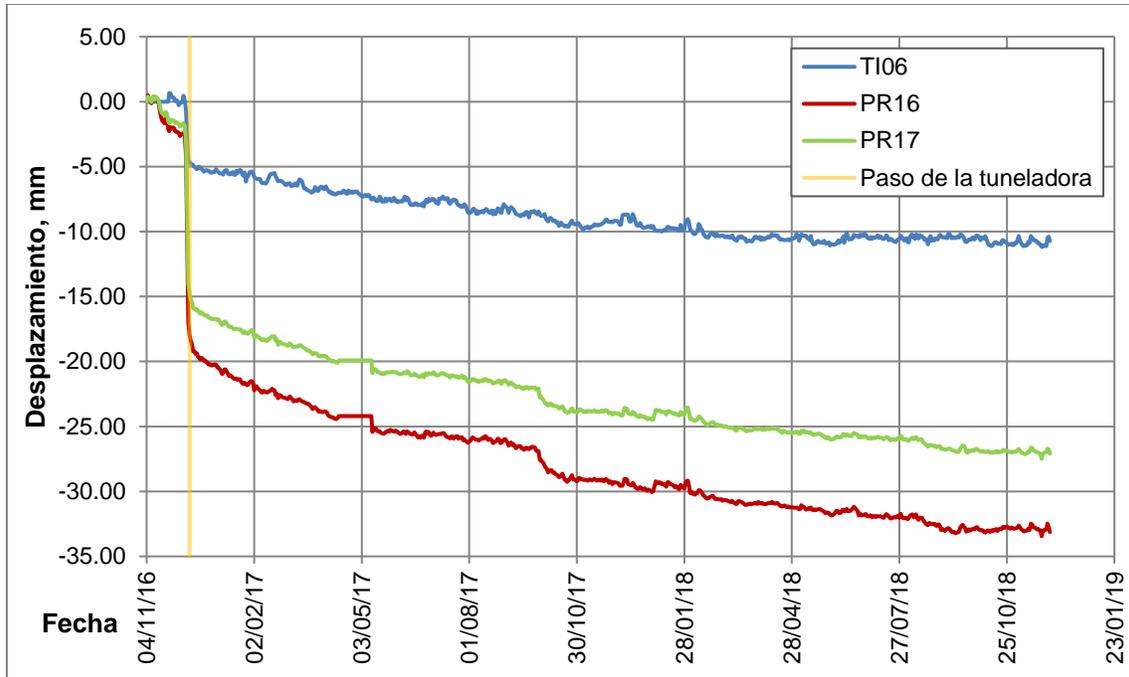


Figura 44. Desplazamiento Ote-Pte TI06, PR17 y PR16. Templo de San José de Gracia.

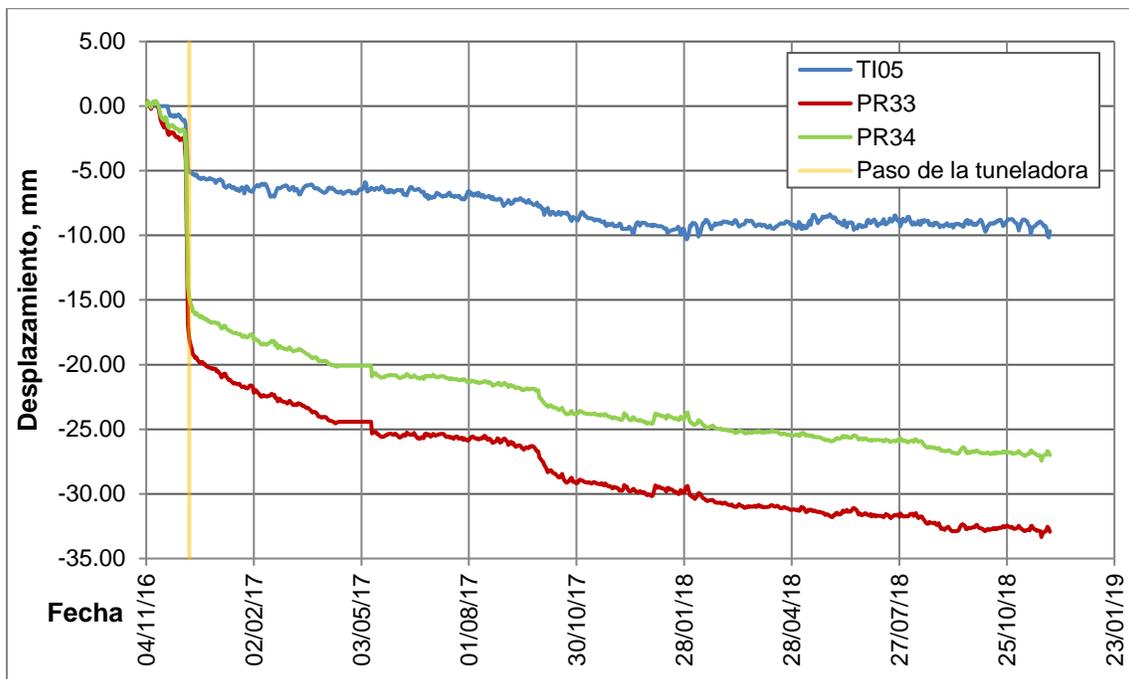


Figura 45. Desplazamiento Ote-Pte TI05, PR34 y PR33. Templo de San José de Gracia.

Los desplazamientos son menores a los 35 mm, y se observa que los registrados por las estaciones totales son mayores que los registrados por los *tiltmeters*. Hay

que considerar que los primeros registran el desplazamiento lateral total, mientras que los segundos se obtienen a partir de la rotación, por lo que la diferencia en las lecturas puede deberse al desplazamiento lateral del edificio en la superficie de interacción con el suelo o bien, a que el centro de rotación se encuentra por debajo de esta superficie.

Al considerar las lecturas de los *tiltmeters* como correctas, y determinando el desplazamiento de las dianas correspondiente únicamente a la rotación, es posible calcular el desplazamiento horizontal del inmueble. Llevando a cabo esta tarea para cada uno de los planos analizados, se observa que la diferencia entre los desplazamientos horizontales teóricos de las dianas difiere por menos de 5 mm.

Para corroborar la veracidad de este comportamiento, se comparan también los registros de los *tiltmeters* con el giro calculado a partir de los desplazamientos de las dianas de reflexión, obteniendo las siguientes gráficas.

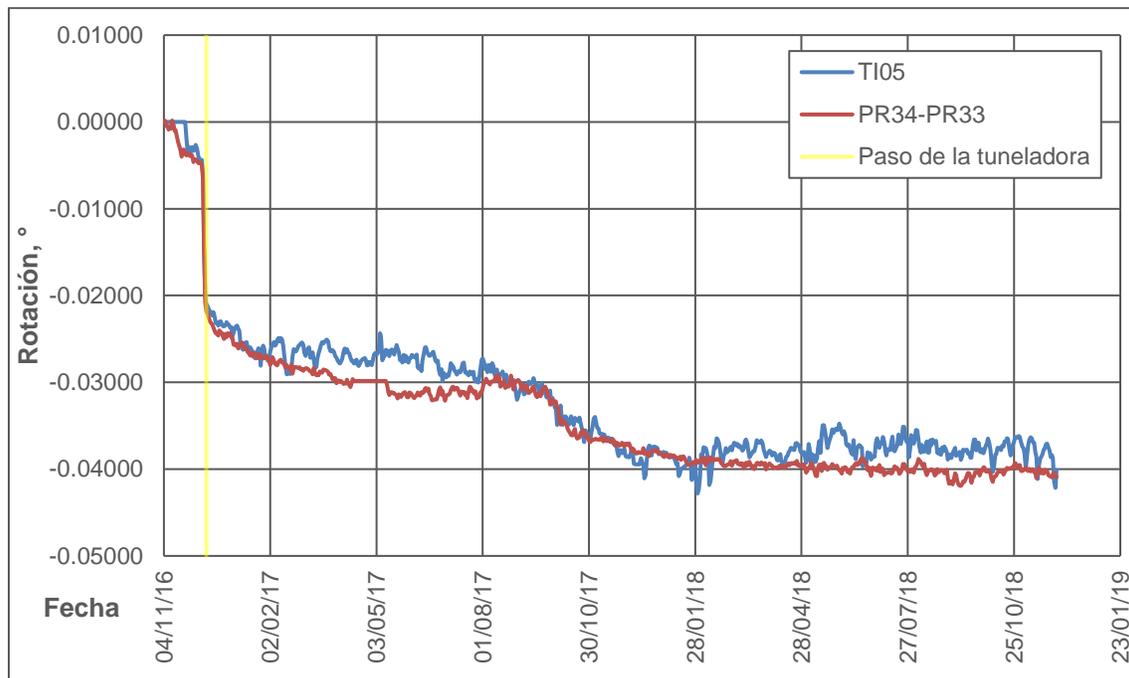


Figura 46. Rotación Ote-Pte TI05 y PR34-PR33. Templo de San José de Gracia

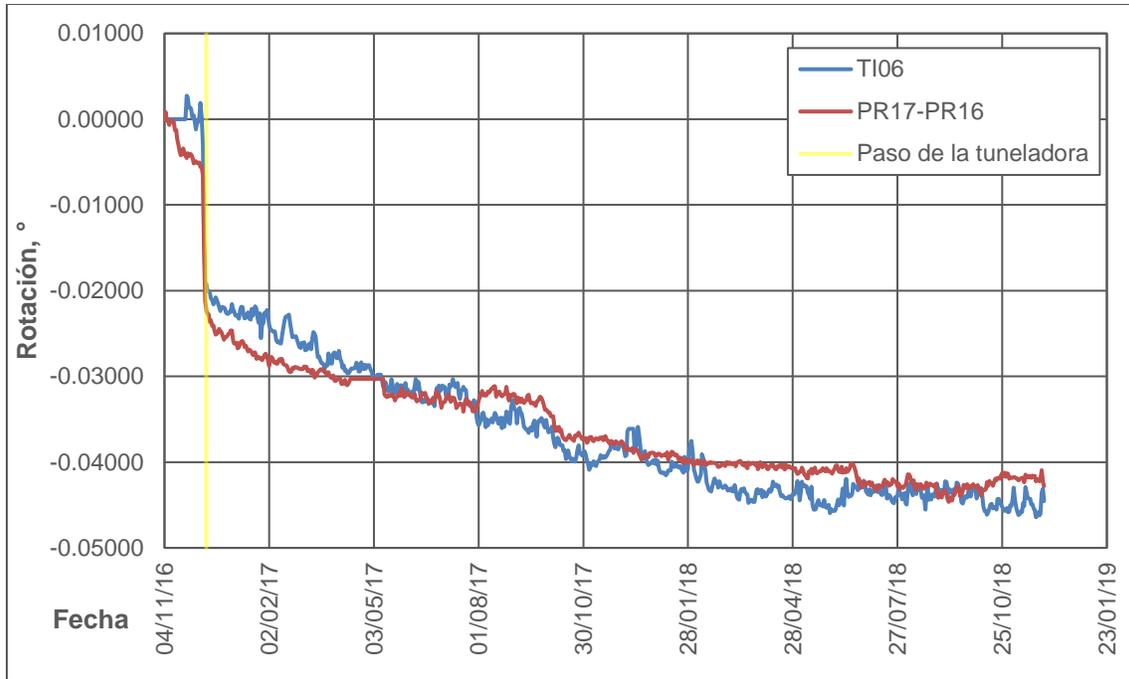


Figura 47. Rotación Ote-Pte TI06 y PR17-PR16. Templo de San José de Gracia.

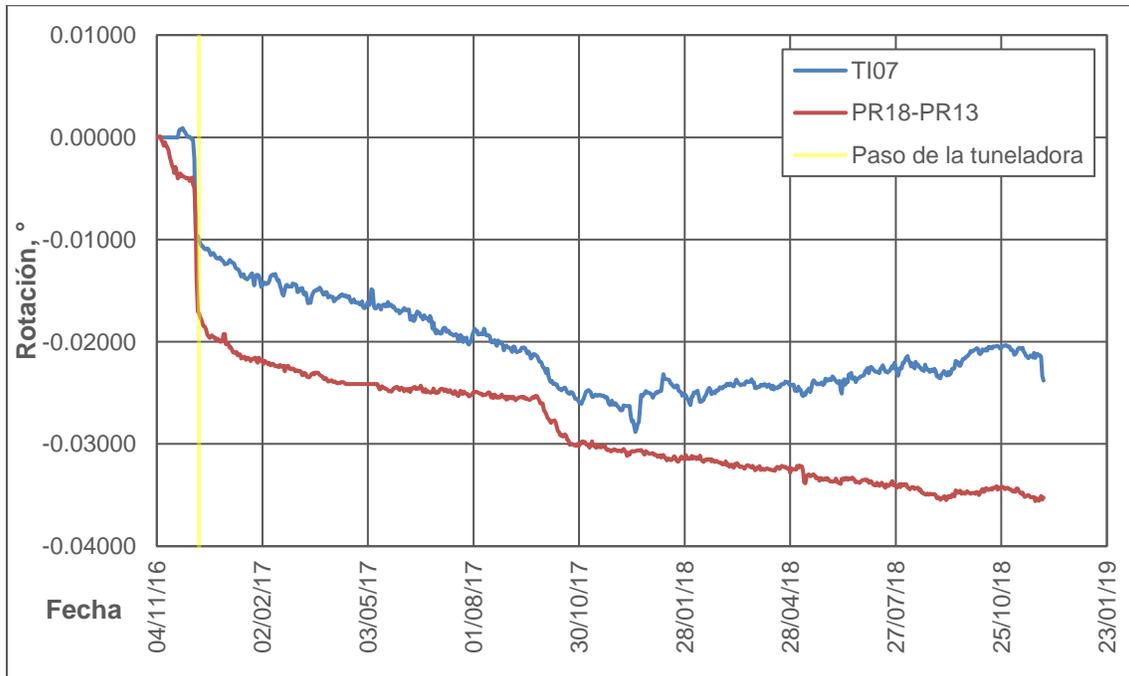


Figura 48. Rotación Ote-Pte Ti07 y PR18-PR13. Templo de San José de Gracia.

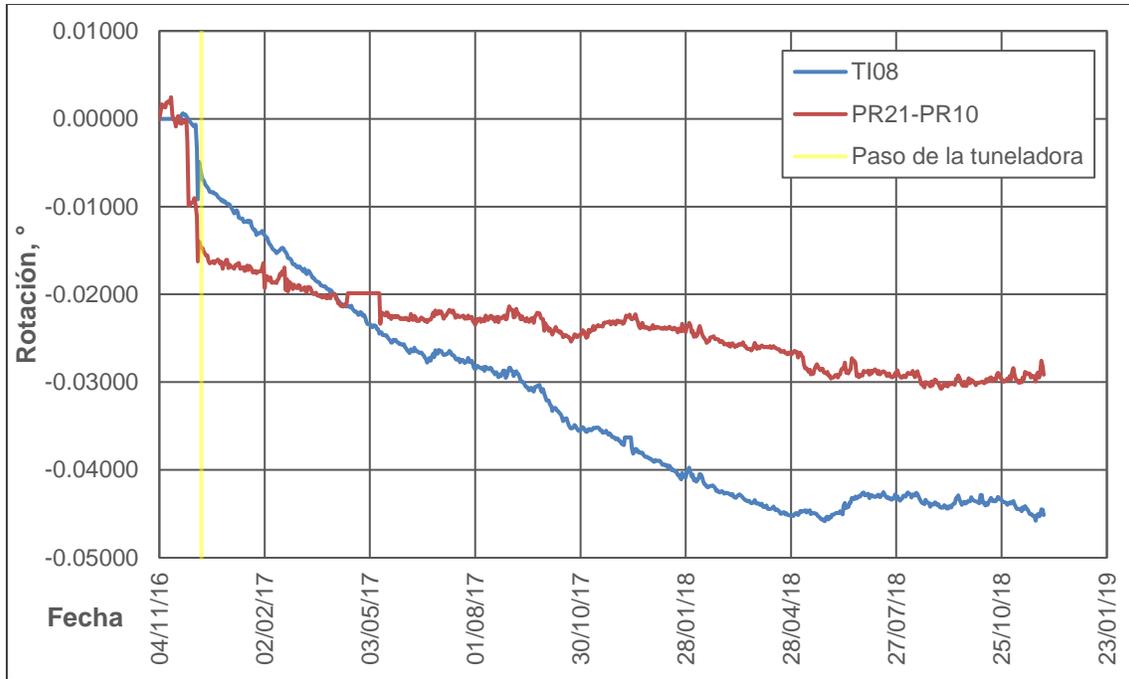


Figura 49. Rotación Ote-Pte TI08 y PR21-PR10. Templo de San José de Gracia.

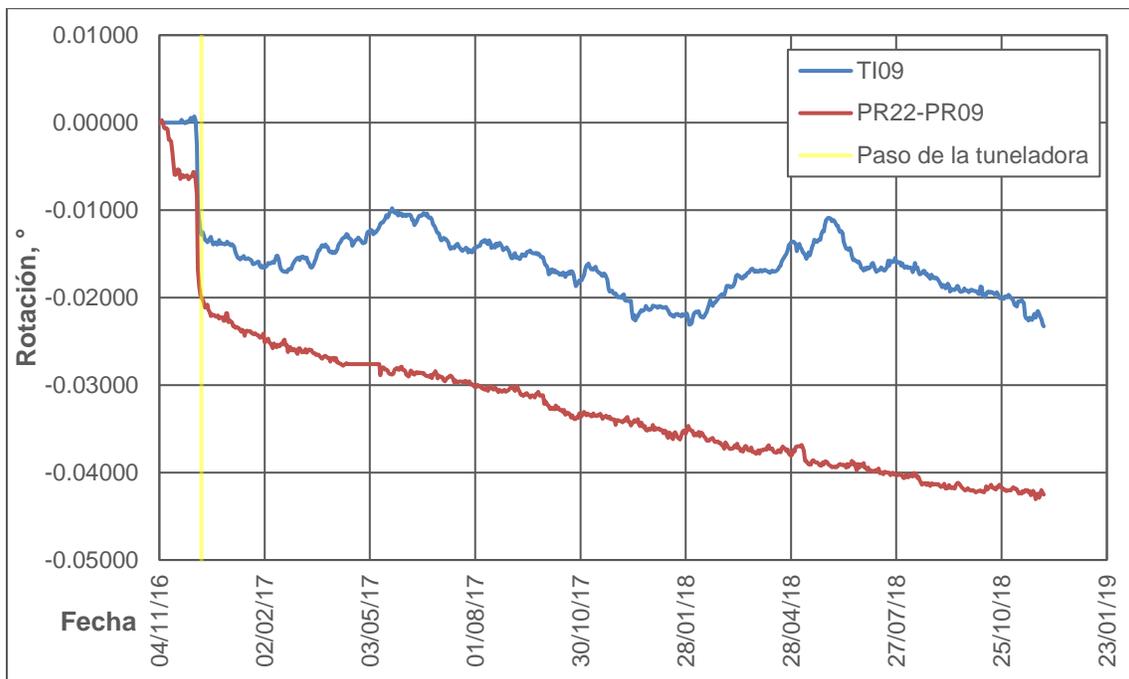


Figura 50. Rotación Ote-Pte TI09 y PR22-PR09. Templo de San José de Gracia.

Se observa que la mayor rotación coincide con el paso de la tuneladora por las inmediaciones del edificio. Así mismo, se aprecia que el comportamiento registrado

por los tiltmeters es similar al registrado por las estaciones totales, especialmente para los instrumentos TI05 y TI06 (figuras 46 y 47). Además en los tiltmeters TI07 y TI09 (figuras 48 y 50) se muestra un fenómeno de recuperación, que puede deberse al reacomodo del suelo bajo la estructura o a las obras de rehabilitación de la misma.

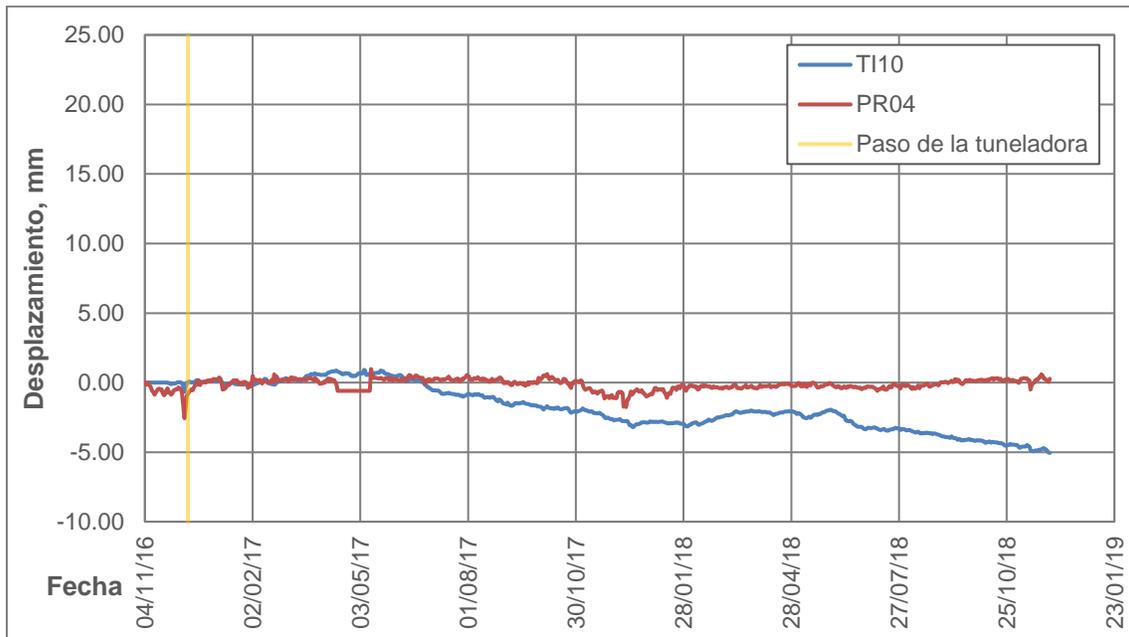


Figura 51. Desplazamiento Nte-Sur TI10 y PR04. Templo de San José de Gracia.

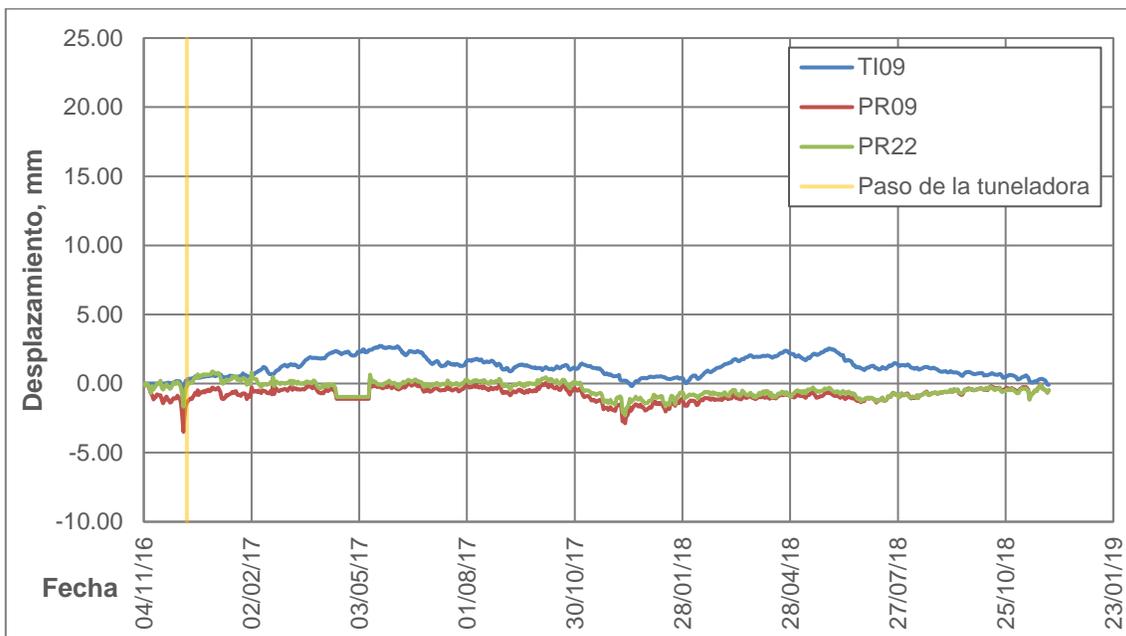


Figura 52. Desplazamiento Nte-Sur TI09, PR09 y PR22. Templo de San José de Gracia.

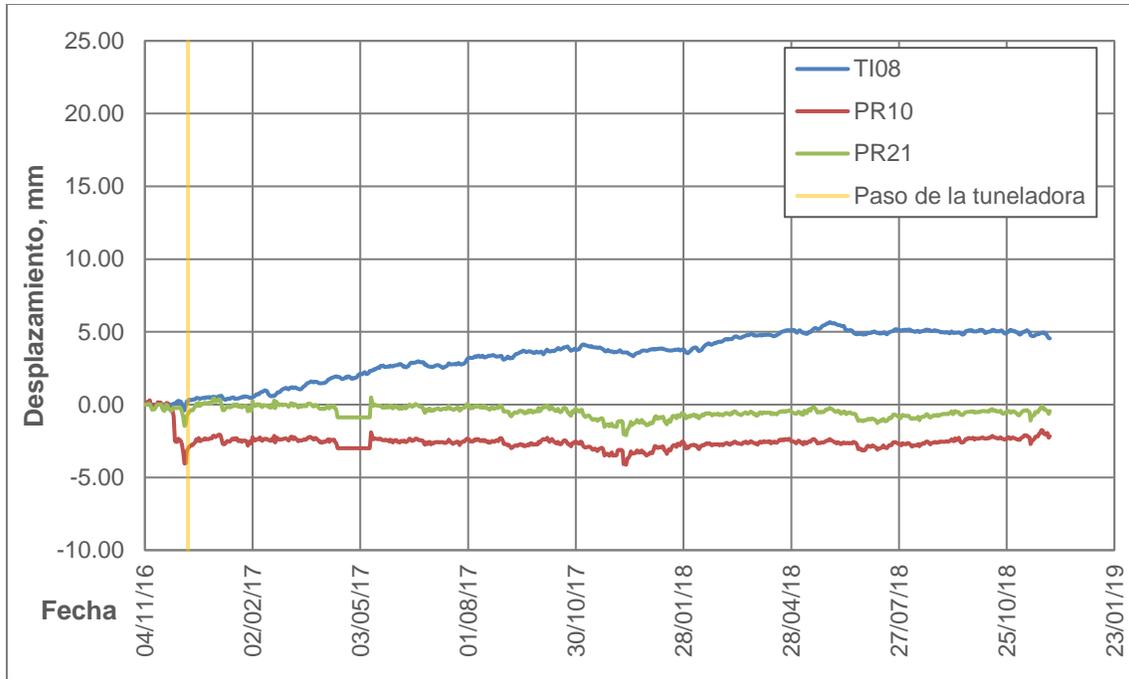


Figura 53. Desplazamiento Nte-Sur TI08, PR10 y PR21. Templo de San José de Gracia.

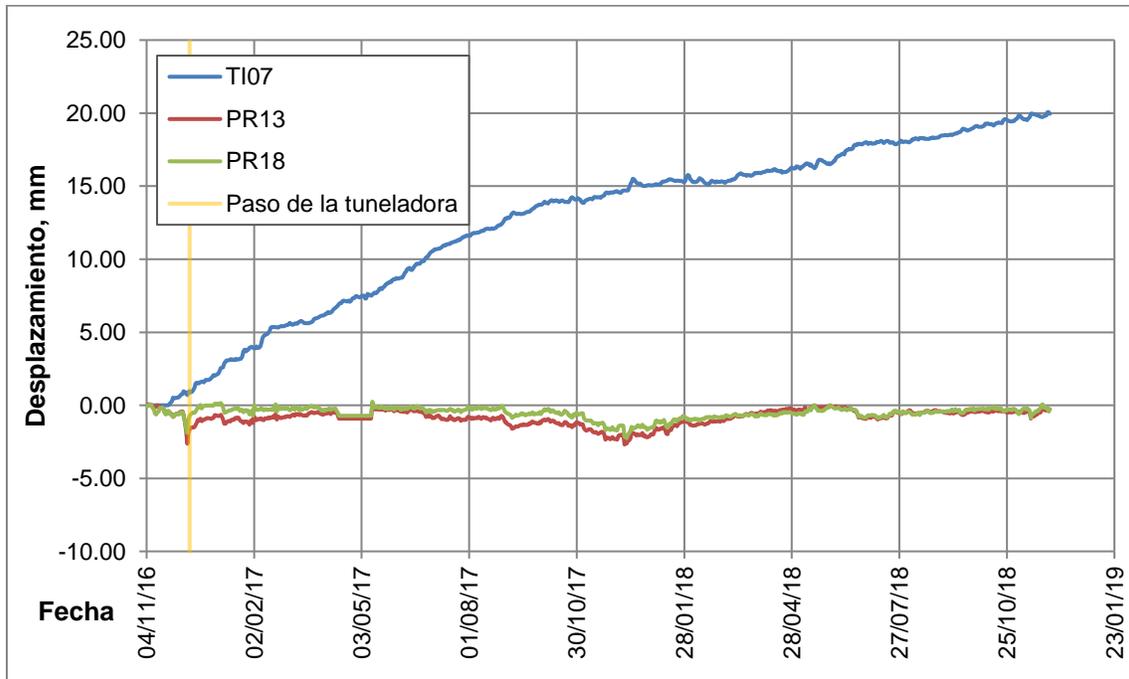


Figura 54. Desplazamiento Nte-Sur TI07, PR13 y PR18. Templo de San José de Gracia.

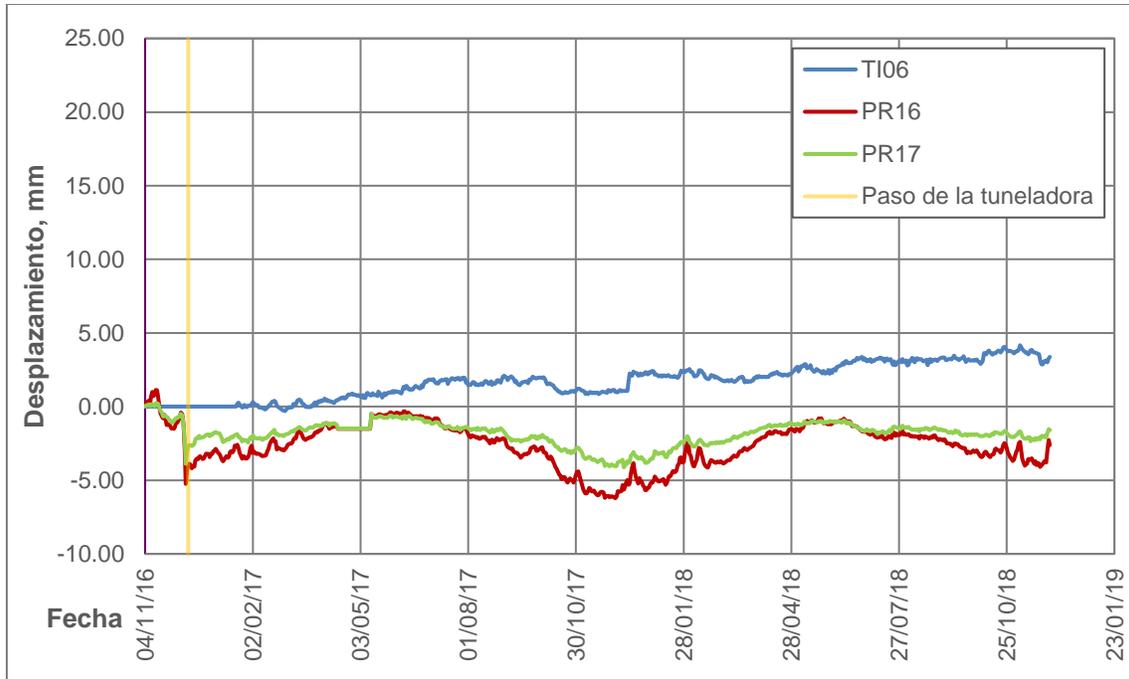


Figura 55. Desplazamiento Nte-Sur TI06, PR17 y PR16. Templo de San José de Gracia.

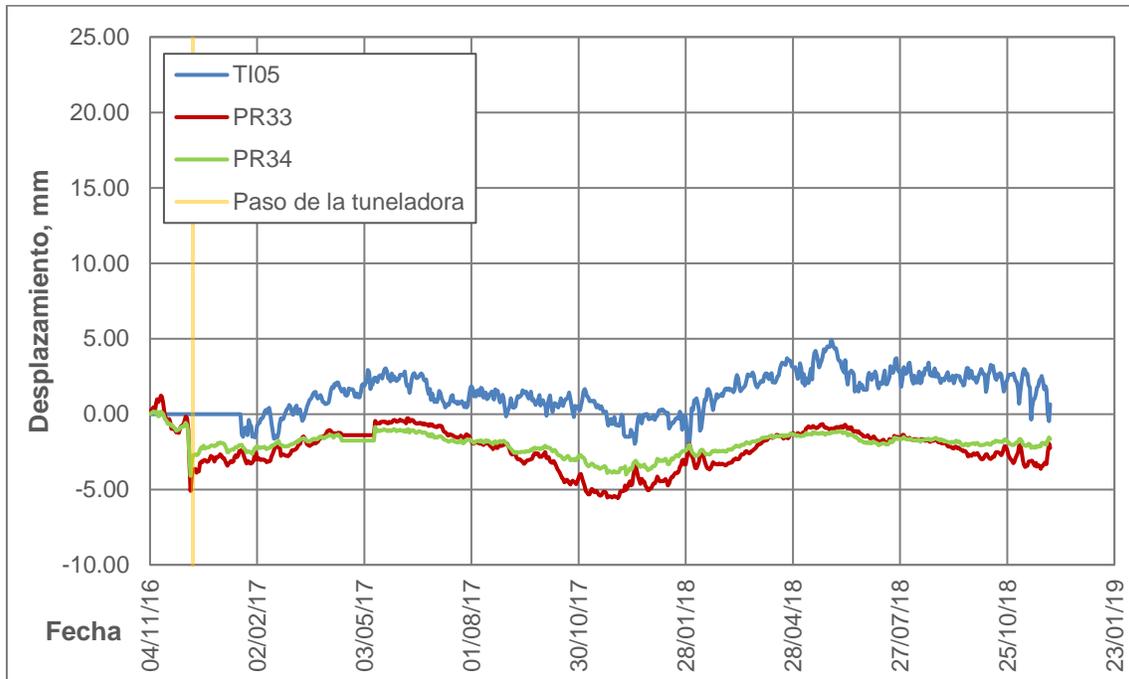


Figura 56. Desplazamiento Nte-Sur TI05, PR34 y PR33. Templo de San José de Gracia.

En el caso de los desplazamientos norte-sur, la tendencia de los movimientos es hacia el norte en las dianas reflectantes mientras que los tiltmeters indican desplazamiento hacia el sur. Se observa que los desplazamientos presentados en esta dirección son menores que los presentados en la dirección Oriente-Poniente.

Se aprecia que los desplazamientos son menores a los 7 mm en todos los casos, excepto para el *tiltmeter* TI07 (figura 54); no obstante, debido al comportamiento registrado por este, se sugiere que se realice una revisión. En la mayoría de los casos, el comportamiento registrado por los *tiltmeters* y las estaciones totales son similares, sin embargo, para corroborar esto se presentan las gráficas de comparación en esta dirección.

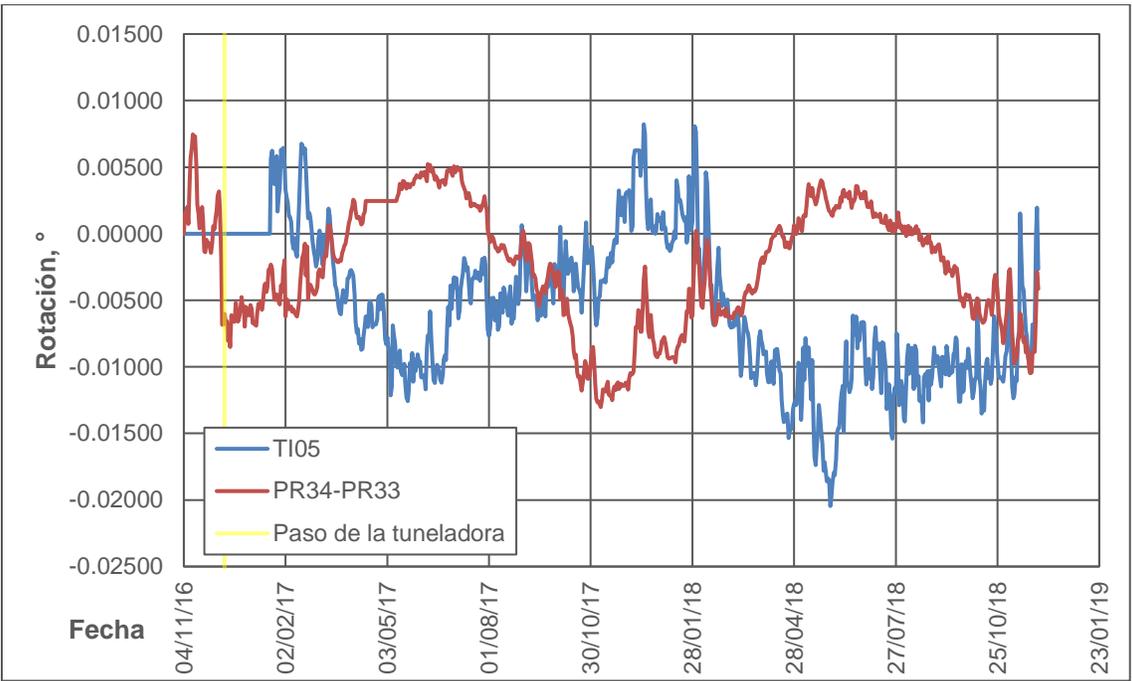


Figura 57. Rotación Nte-Sur TI05 y PR34-PR33. Templo de San José de Gracia.

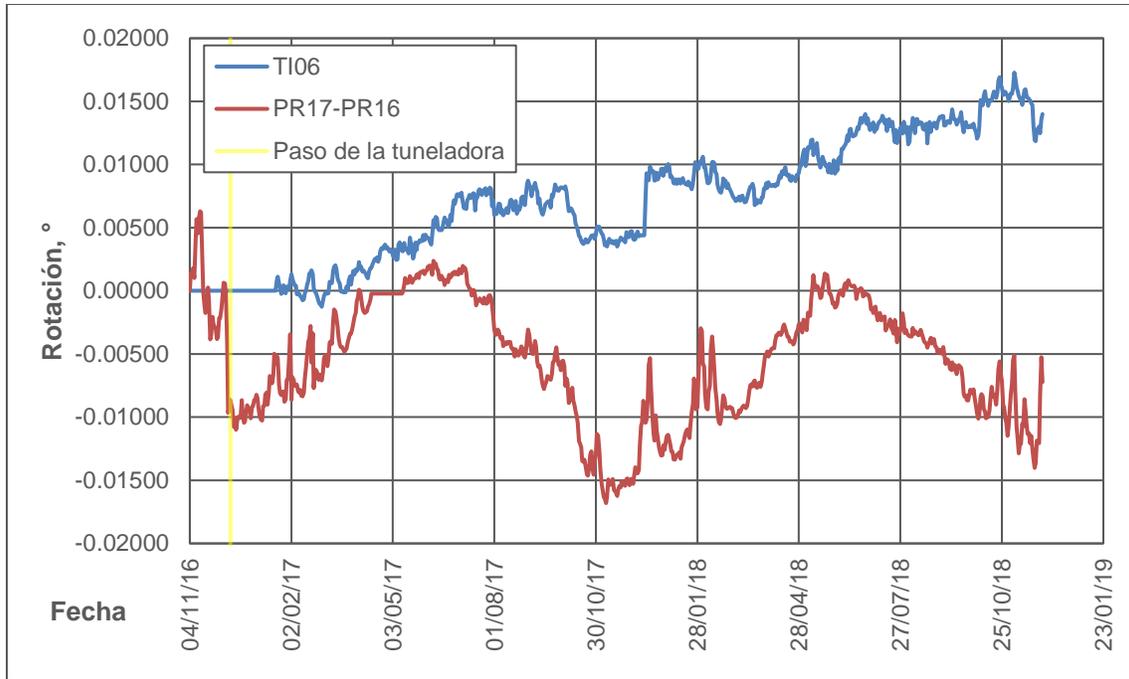


Figura 58. Rotación Nte-Sur TI06 y PR17-PR16. Templo de San José de Gracia.

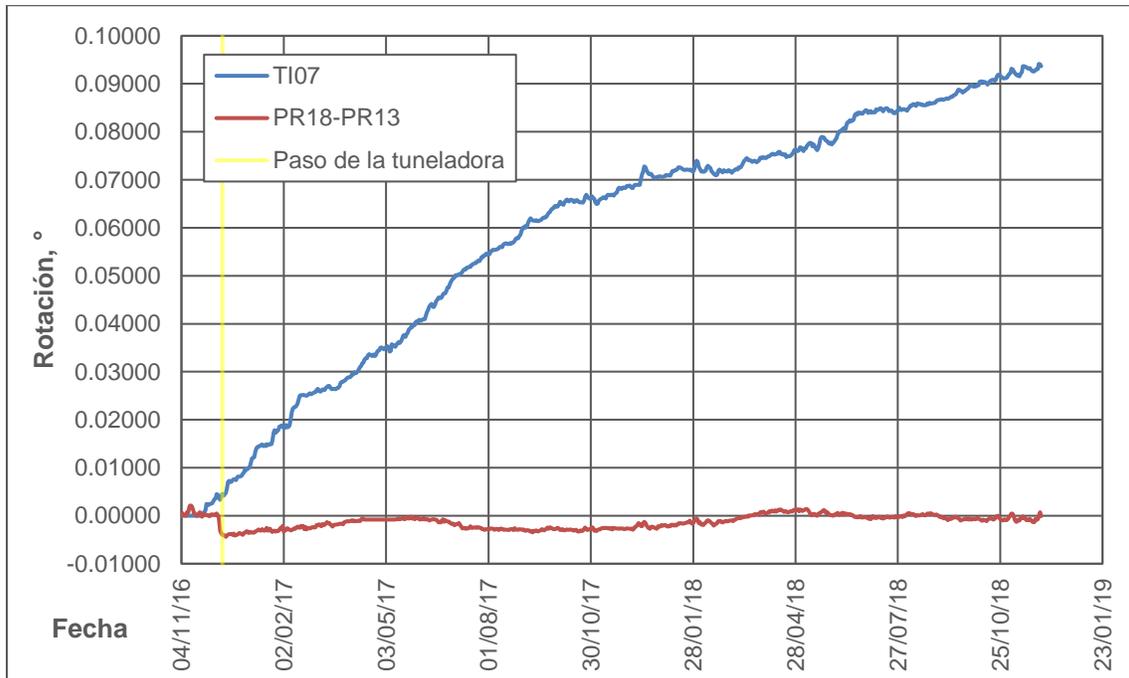


Figura 59. Rotación Nte-Sur TI07 y PR18-PR13. Templo de San José de Gracia.

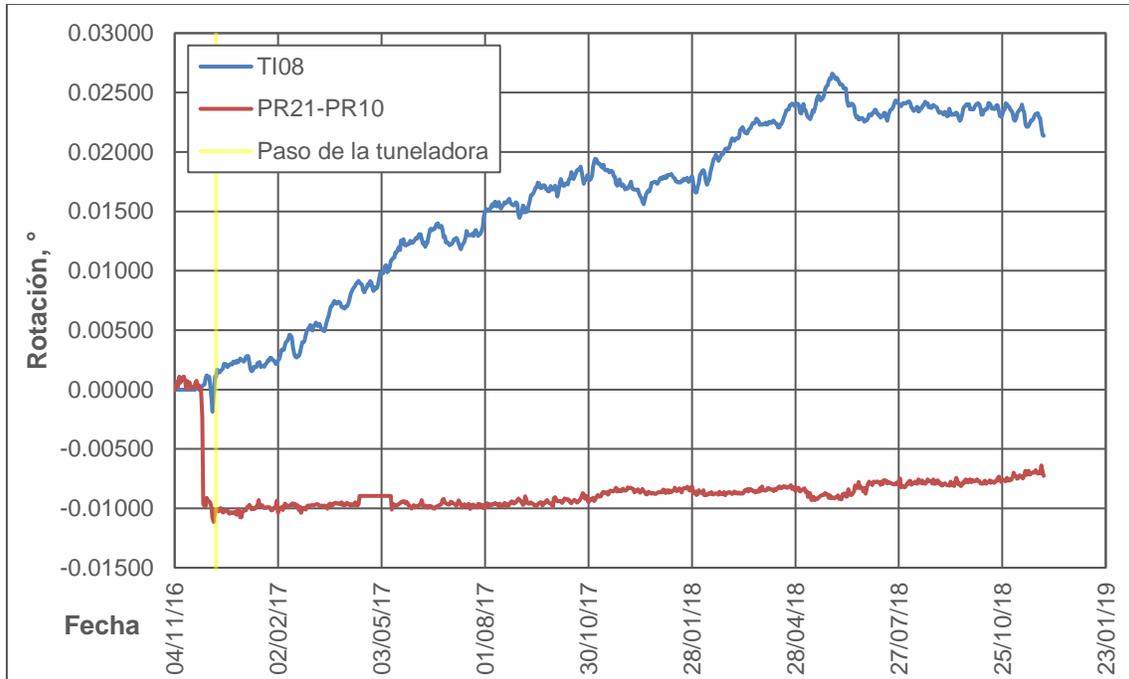


Figura 60. Rotación Nte-Sur TI08 y PR21-PR10. Templo de San José de Gracia.

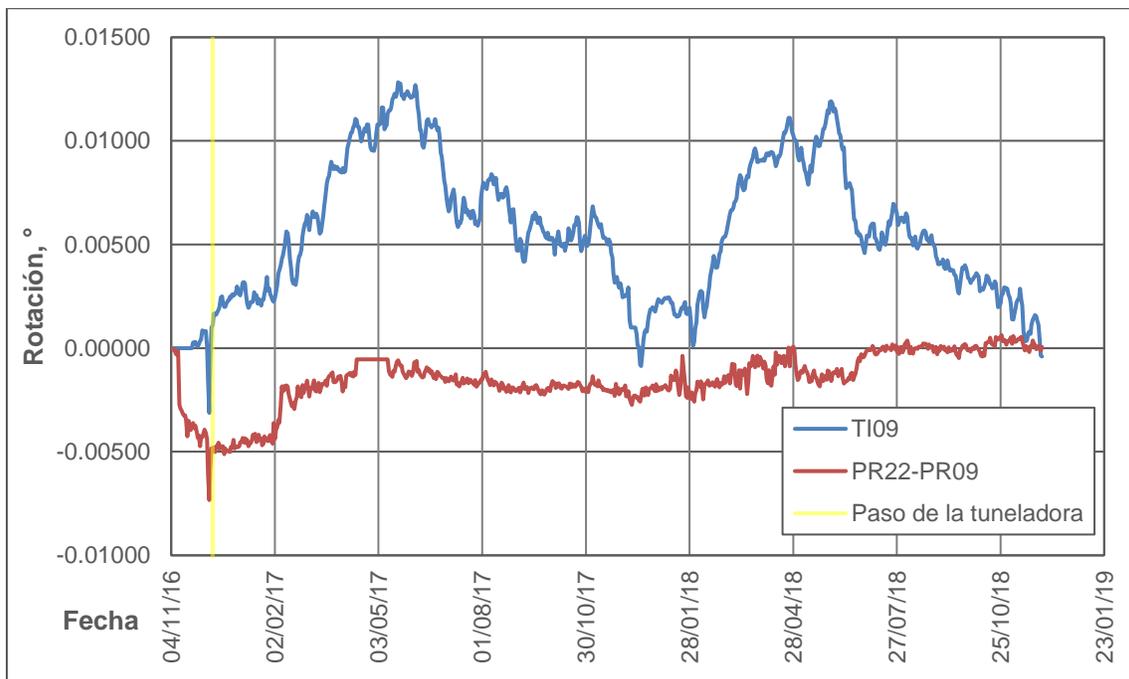


Figura 61. Rotación Nte-Sur TI09 y PR22-PR09. Templo de San José de Gracia.

Al observar la rotación registrada por ambos subsistemas, se presentan más diferencias de comportamiento que en el caso de los desplazamientos, resaltando el fenómeno de recuperación registrado por los *tiltmeters* (figuras 57, 58 y 61). Esto se asocia a que los valores registrados son muy pequeños y, por lo tanto, muy susceptibles a variaciones causadas por reacomodo del suelo u obras de rehabilitación; sin embargo, hay casos en los que la diferencia del comportamiento es muy evidente, como para el instrumento TI07 (figura 59).

4.2.3 Daños presentados en el inmueble.

De acuerdo con las observaciones realizadas por el personal del IIUNAM, los daños presentados en el inmueble son principalmente arquitectónicos.

En el caso de las fachadas, los daños observados son en su mayoría apertura de juntas, pérdida de sección y la aparición de grietas en columnas y muros. En el interior de la planta baja, se presentan grietas horizontales en muros, arcos y dinteles, a lo largo del eje central del inmueble y en los muros cercanos a la zona de la cúpula. En la cúpula se presentan algunas grietas horizontales y verticales, así como la apertura de juntas.

4.2.4 Análisis causa-consecuencia entre desplazamientos y daños.

Los asentamientos registrados en el inmueble son a causa del movimiento del suelo debido a las obras de construcción del túnel. Estos, a su vez, tuvieron como consecuencia los desplazamientos laterales de los muros, ya que se presentó asentamiento diferencial a lo largo de la estructura.

A lo largo de ambas fachadas se presentan asentamientos mayores al umbral de acción propuesto (6.00 mm, tabla 5), sin embargo, las distorsiones se encuentran por debajo del umbral de acción propuesto para los *tiltmeters* (0.00050) y por debajo del límite en el que la mampostería presenta su primer agrietamiento (0.001, tabla 4).

Para correlacionar los asentamientos mostrados en los perfiles (figura 38 y figura 39) con los desplazamientos laterales, se utilizan los registros de las dianas reflectantes localizadas en el mismo plano vertical. Posteriormente se calcula la

distorsión para comparar con los umbrales de control propuestos para esa rotación; destacando que, para los valores estudiados, la rotación y distorsión pueden ser considerados iguales.

Se observa que, en la fachada sur, el extremo oriente es el que presenta mayor rotación en la dirección oriente-poniente, alcanzando un valor de 0.00077, comportamiento asociado al asentamiento pues en esta zona ocurre la distorsión horizontal máxima. Los otros dos ejes presentan distorsiones verticales de 0.00060 y 0.00057, es decir, la rotación de los tres ejes supera el umbral de alerta propuesto para los tiltmeters (0.00050, tabla 5); sin embargo, no se presentan daños importantes debido a estos desplazamientos.

En la dirección Norte-Sur los desplazamientos y distorsiones calculadas son menores, alcanzando la mayor distorsión un valor de 0.00011 en el extremo oriente. El desplazamiento en esta dirección está asociado a la excavación realizada en la calle Reforma, paralela a la fachada.

En la fachada poniente la rotación calculada en dirección norte concuerda con la configuración del perfil de asentamientos mostrado (figura 39), presentando los mayores valores en los planos verticales de los prismas PR19, PR21 y PR20, llegando a 0.00013 los primeros y 0.00014 el último, que además rota en sentido opuesto a los primeros. Esta diferencia en los desplazamientos de las dianas PR20 y PR19 sugiere una separación en la parte baja del muro; de acuerdo con el IIUNAM, en esta zona se presenta apertura de juntas, así como agrietamiento en bóveda y dintel interior.

En dirección oriente-poniente, los máximos desplazamientos corresponden a las dianas con el mayor asentamiento en el perfil; además, la mayoría de las rotaciones presentadas superan el umbral de alerta propuesto (0.00050, tabla 5). La mayor distorsión vertical se alcanza en el plano de la diana PR24 con un valor de 0.00089, mientras que la menor se presenta en el plano de la diana PR20 con un valor de 0.00024. La diferencia entre esta última distorsión y del plano de PR19 es de 0.00027, razón que también está asociada con el agrietamiento presentado en la zona.

4.3 Análisis en Catedral Metropolitana

4.3.1 Análisis de asentamientos registrados.

En el caso de la Catedral Metropolitana, la comparación y análisis de asentamientos se realiza con los registros de los clavos de las fachadas norte, poniente y sur, así como los de las dianas reflectantes correspondientes. En este inmueble, las dianas se encuentran clasificadas dependiendo si se encuentran en el Sagrario Metropolitano (SG) o en la estructura propia de la Catedral (CT), de tal forma que los instrumentos se agrupan como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Puntos de referencia a comparar. Asentamientos. Catedral Metropolitana.

Clave de punto de referencia topográfico	Clave de diana reflectante a comparar
R16	CT_PR34 y CT_PR21
R11	CT_PR28, CT_PR27, CT_PR12 y CT_PR01
R7	CT_PR08 y CT_PR05
R3	SG_PR06, SG_PR05, SG_PR27 y SG_PR12
R25	SG_PR20 y SG_PR19

De igual manera, los datos corresponden a las fechas en las que se tomaron lecturas manualmente a los clavos de nivelación, y fueron tabulados y graficados para una mejor comparación.

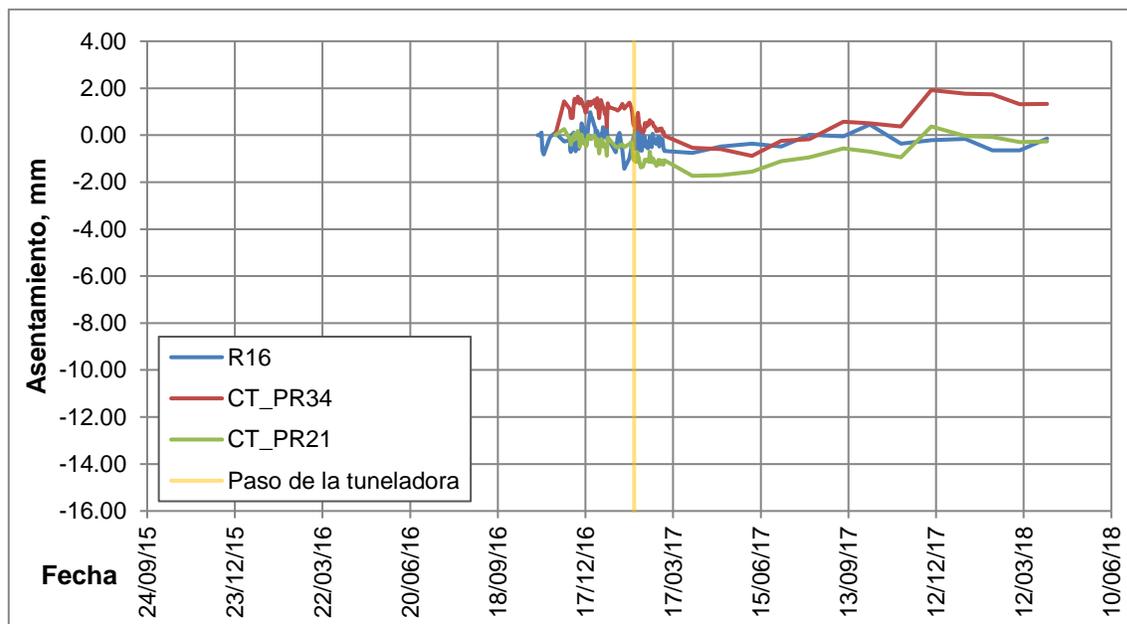


Figura 62. Asentamiento en clavo de nivelación R16 y dianas reflectantes PR34 y PR21. Catedral Metropolitana.

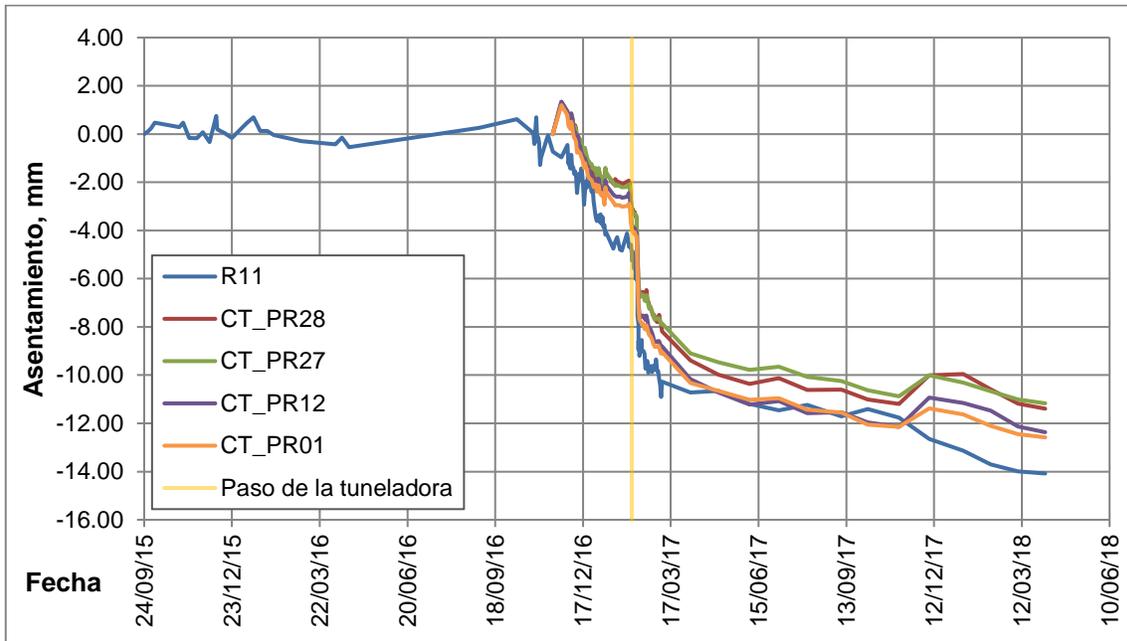


Figura 63. Asentamiento en clavo de nivelación R11 y dianas reflectantes PR28, PR27, PR12 y PR01. Catedral Metropolitana.

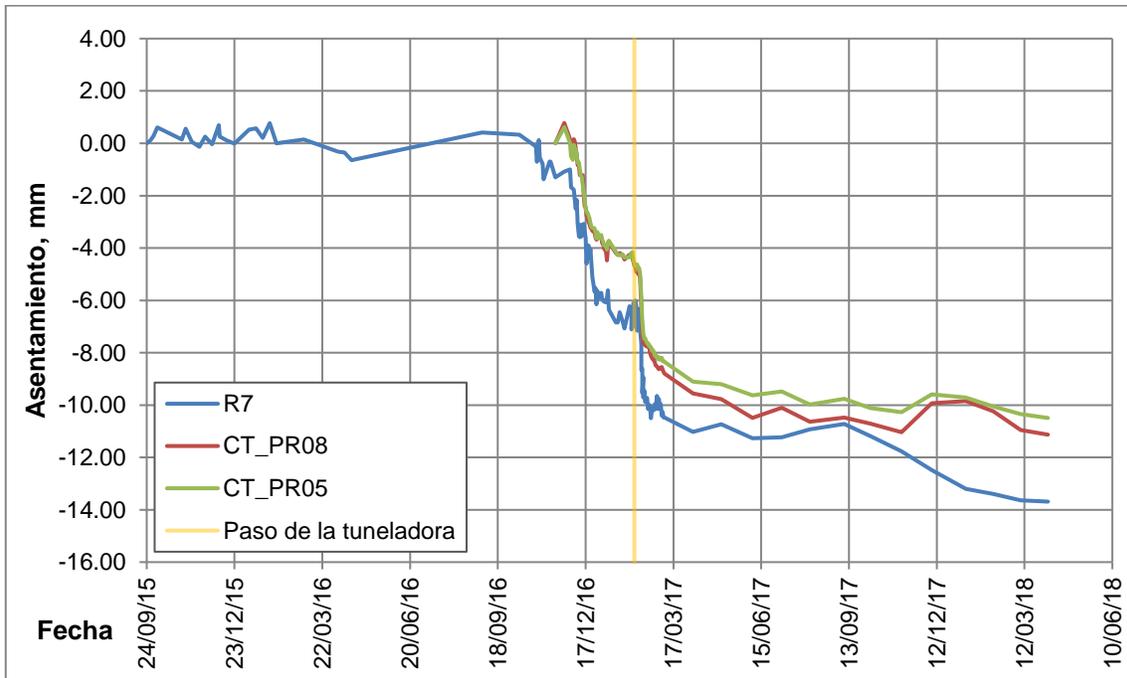


Figura 64. Asentamiento en clavo de nivelación R7 y dianas reflectantes PR08 y PR05. Catedral Metropolitana.

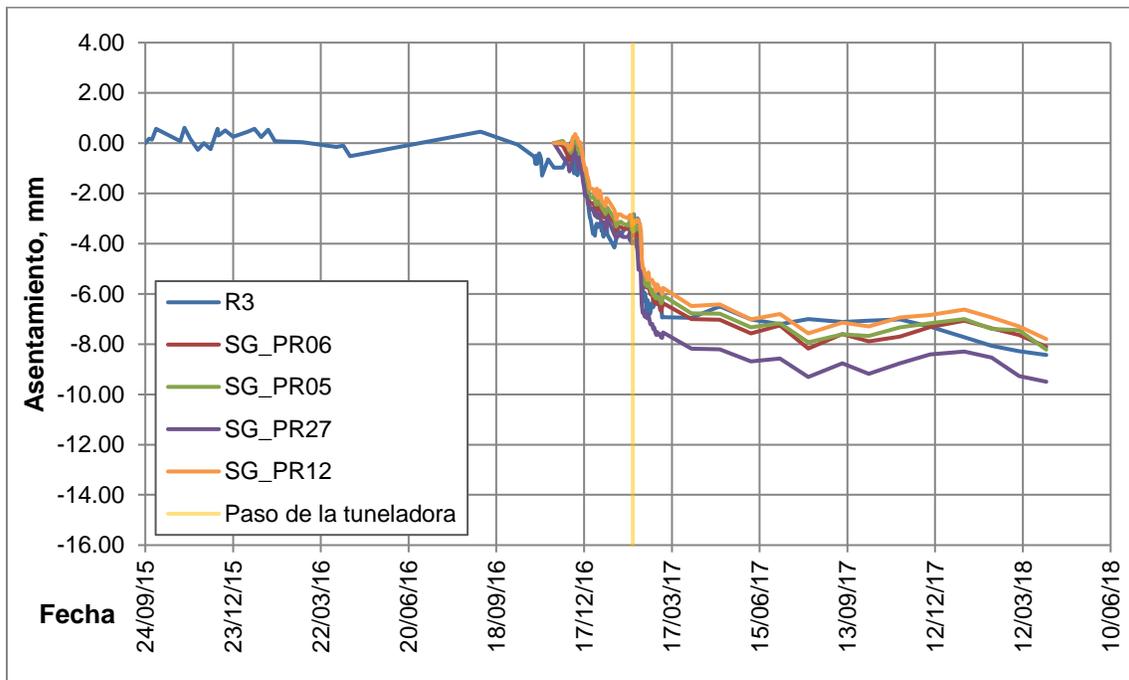


Figura 65. Asentamiento en clavo de nivelación R3 y dianas reflectantes PR06, PR05, PR27 y PR12. Sagrario Metropolitano.

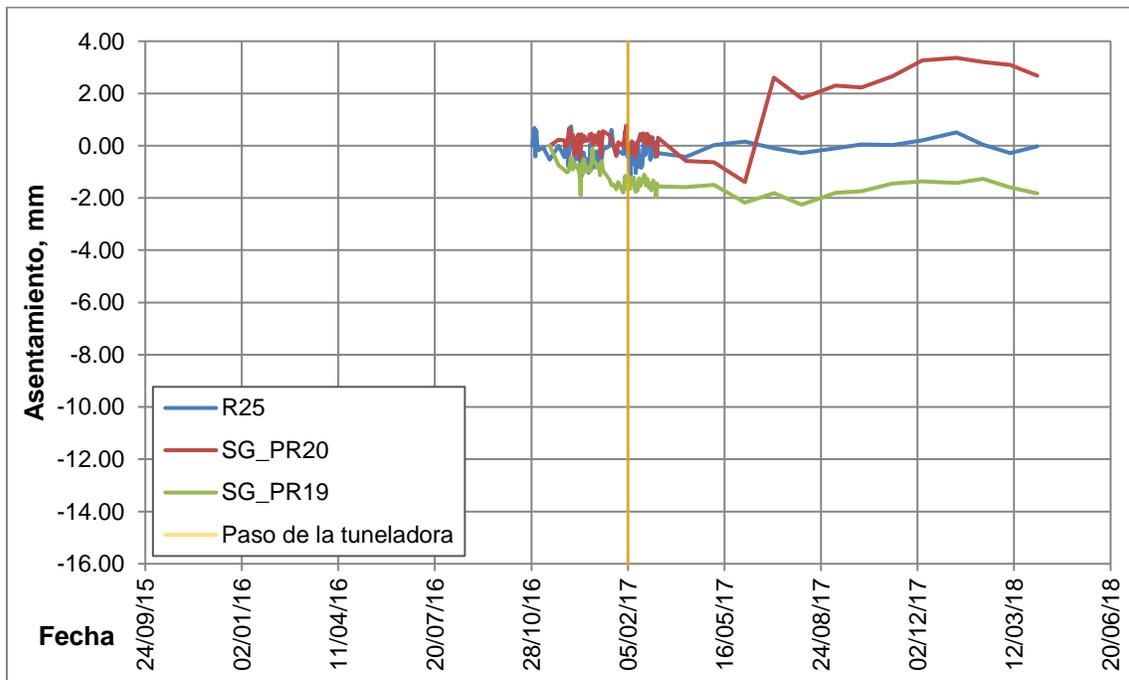


Figura 66. Asentamiento en clavo de nivelación R25 y dianas reflectantes PR20 y PR19. Sagrario Metropolitano.

Sagrario Metropolitano.

Se observa en las figuras anteriores que el mayor asentamiento registrado tiene lugar desde mediados de diciembre de 2016 hasta inicios de marzo de 2017, presentando dos rampas de descenso. La primera corresponde a la construcción de muros Milán en la zona, como parte de los trabajos de prevención llevados a cabo en el túnel interestación así como en la estación Catedral. La segunda corresponde al paso de la tuneladora por las inmediaciones del inmueble.

Los mayores asentamientos se presentaron en la fachada poniente (figura 68), alcanzando los 14 mm de acuerdo con las lecturas de los clavos; mientras que en los extremos orientales de las fachadas norte y sur el asentamiento es significativamente menor, apenas superando 1 mm (figuras 67 y 69).

Es notable que los asentamientos registrados mediante las estaciones totales y los clavos de nivelación muestran un comportamiento de la estructura prácticamente igual, teniendo diferencias en las lecturas que apenas rebasan los 2 mm.

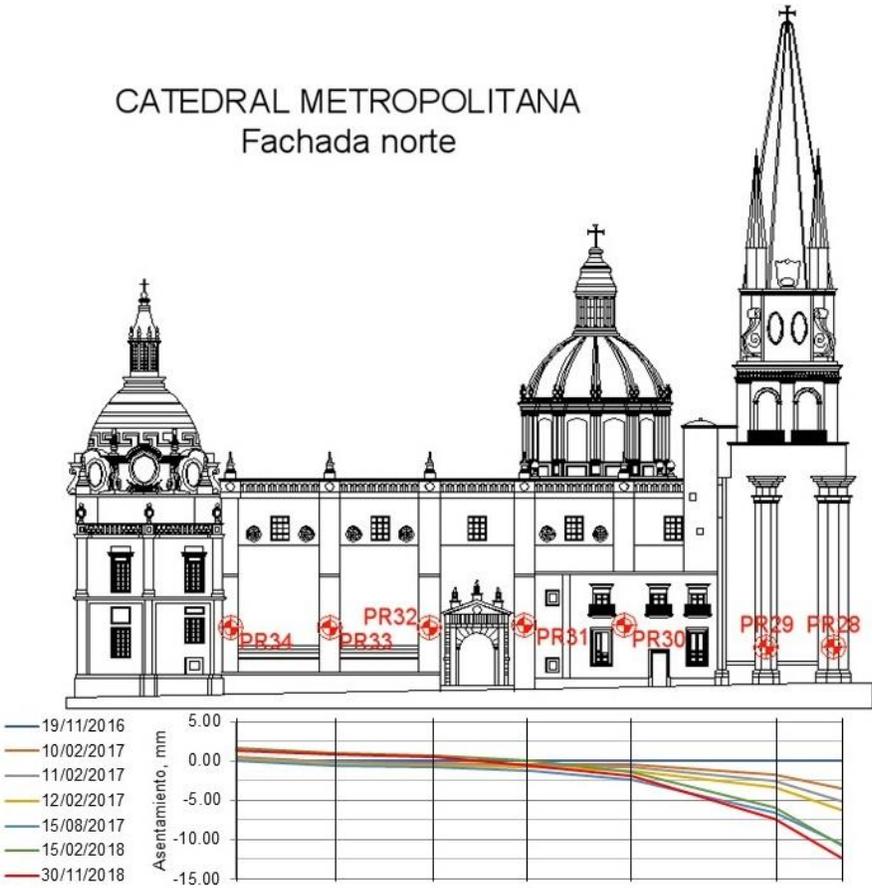


Figura 67. Perfil de asentamientos en la fachada norte. Catedral Metropolitana.

En la figura anterior se observa que la fachada norte se asienta en el extremo poniente, alcanzando los 12.29 mm, mientras que el extremo oriental emerge 1.32 mm. En el perfil se aprecia que el asentamiento produce una ligera flexión en la estructura, alcanzando una distorsión de 0.00068 entre las dianas PR30 y PR29.

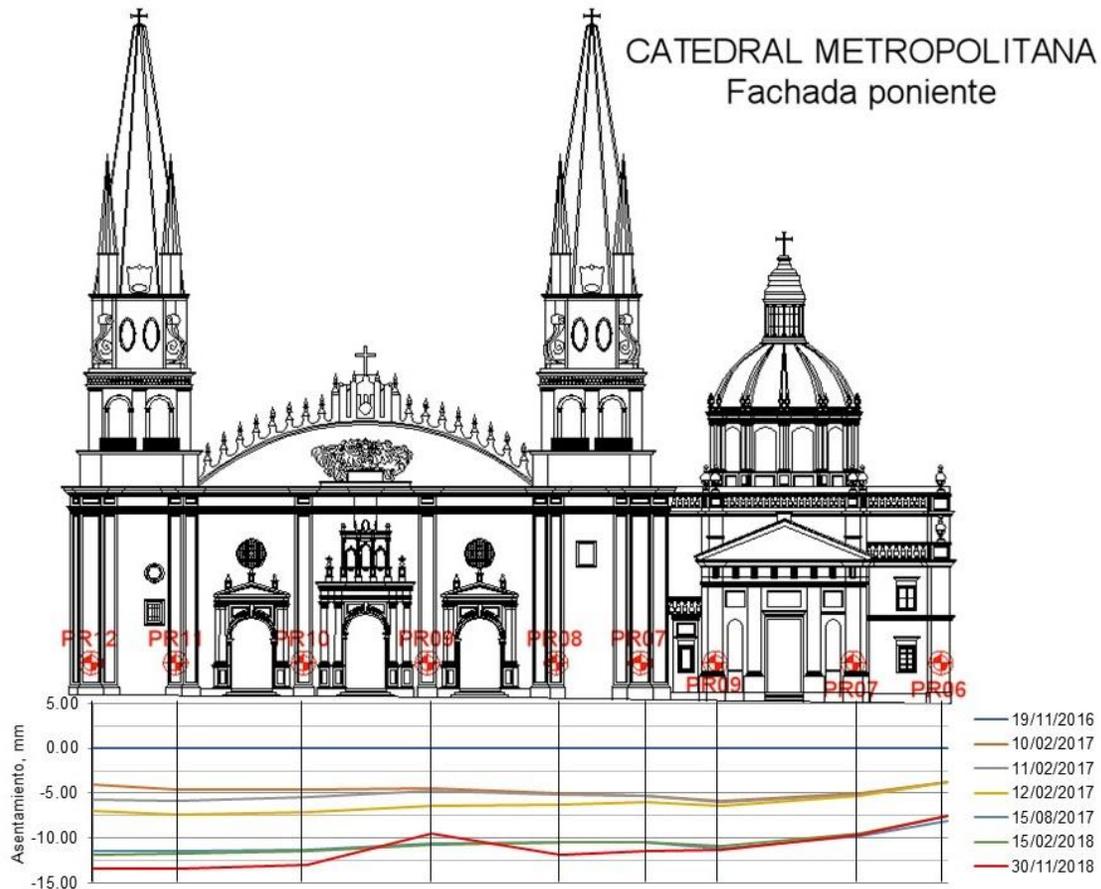


Figura 68. Perfil de asentamientos en la fachada poniente. Catedral y Sagrario Metropolitano.

En la fachada poniente se observa que el asentamiento mayor se produjo en el extremo norte, alcanzando los 13.42 mm, y, en el extremo sur, únicamente descendió 7.53 mm.

La Figura 68 muestra que en la sección central se presenta un punto de inflexión, que alcanza una distorsión de 0.00032 entre las dianas PR10 y PR09.

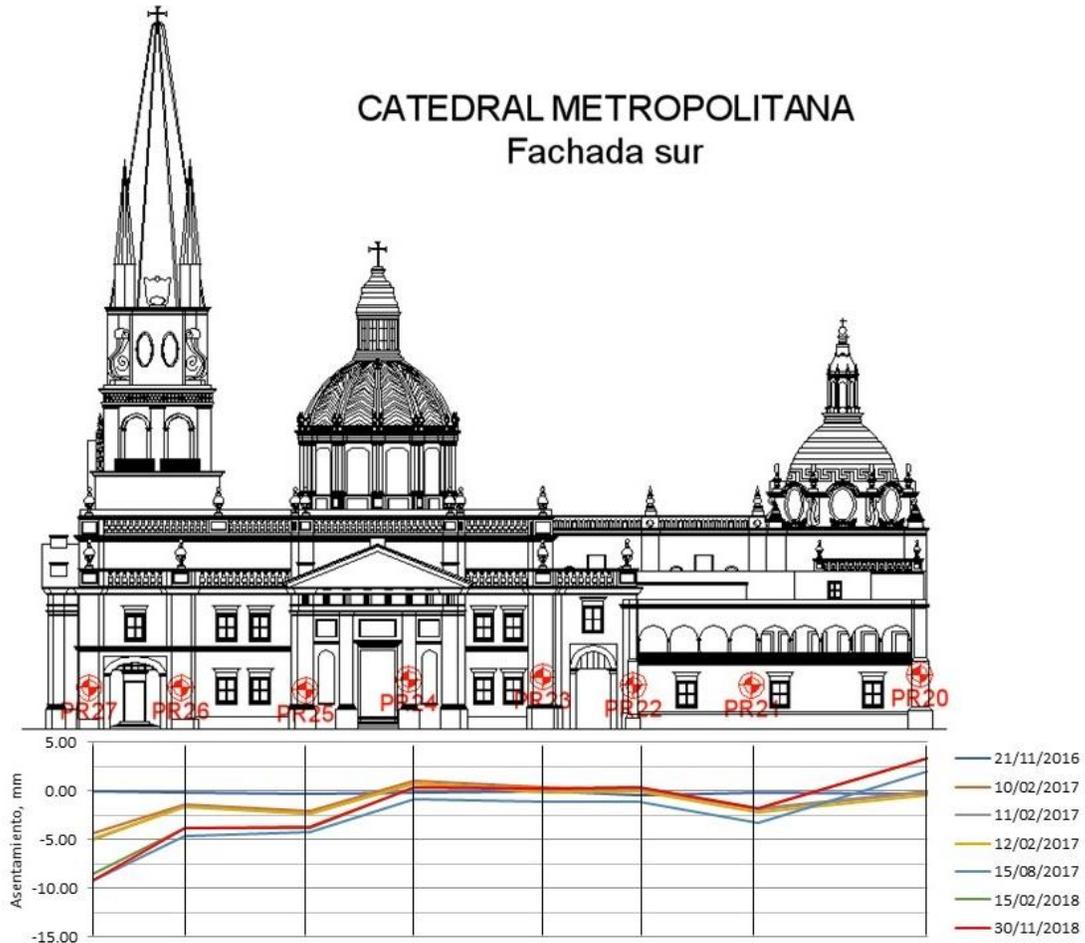


Figura 69. Perfil de asentamientos en la fachada sur. Sagrario Metropolitano.

En la fachada sur (figura 69), el perfil tiene varias rampas de descenso, sin embargo, el comportamiento es similar al de la fachada norte, presentando un asentamiento de 9.22 mm en el extremo poniente y emergiendo 3.42 mm en el extremo oriente.

La mayor distorsión se presentó entre las dianas PR27 y PR26, alcanzando un valor de 0.00069. Entre las dianas PR24 y PR23 la distorsión alcanzada es de 0.00033 mientras que entre las dianas PR21 y PR20 alcanza un valor de 0.00041,

4.3.2 Análisis de desplazamientos laterales de muros.

Para analizar los desplazamientos laterales se cuenta con los registros de los *tiltmeters* localizados en el interior del inmueble, así como con las dianas reflectantes ubicadas en las fachadas norte, poniente y sur de la Catedral Metropolitana (CT) y el Sagrario Metropolitano (SG).

Para corroborar la veracidad de las lecturas, es necesario comparar los registros de ambos instrumentos y los daños presentados por el comportamiento de la estructura; en este edificio el eje A de los *tiltmeters* corresponde a la dirección Norte-Sur, mientras que el eje B corresponde a la Oriente-Poniente. De tal forma que la comparación entre instrumentos resulta de la siguiente manera:

Tabla 19. Puntos de referencia a comparar. Desplazamientos laterales. Catedral Metropolitana.

Clave de tiltmeters	Clave de diana reflectante a comparar
Ti08	CT_PR24 y CT_PR31
Ti09	CT_PR23 y CT_PR32
Ti10	CT_PR21 y CT_PR34
Ti06	CT_PR02 y CT_PR11
Ti15	SG_PR01 y SG_PR09
Ti13	SG_PR05 y SG_PR06

El análisis se realiza desde el primer registro hasta el día 30 de noviembre de 2018, iniciando con las lecturas en dirección oriente-poniente.

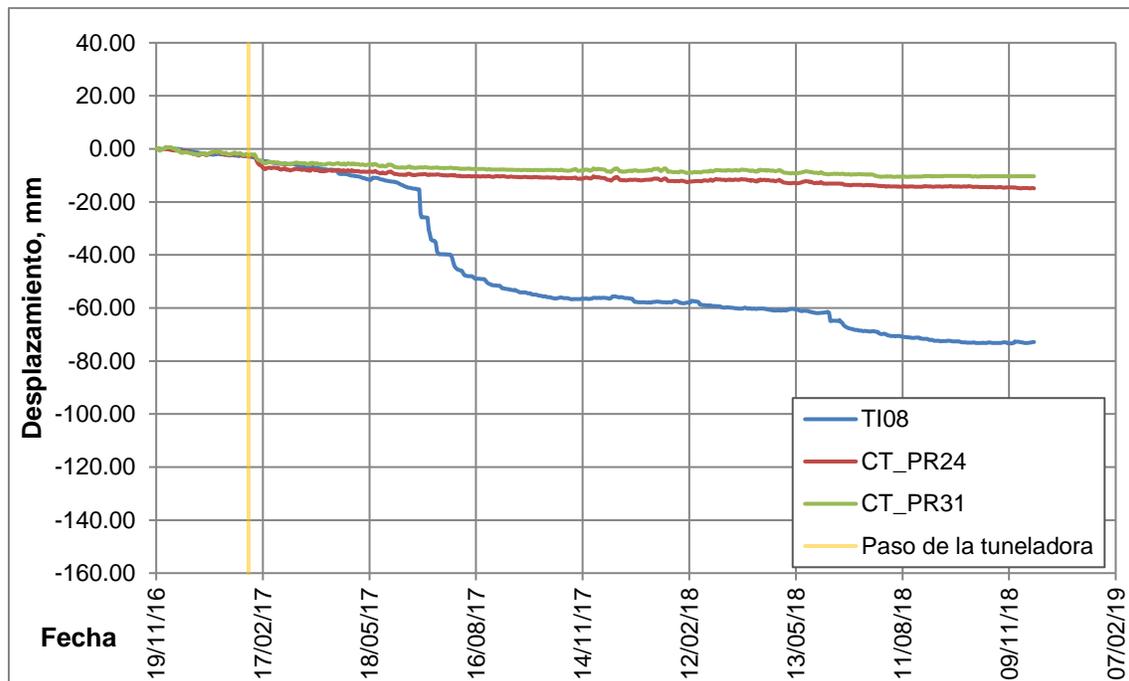


Figura 70. Desplazamiento Ote-Pte TI08, PR24 y PR31. Catedral Metropolitana.

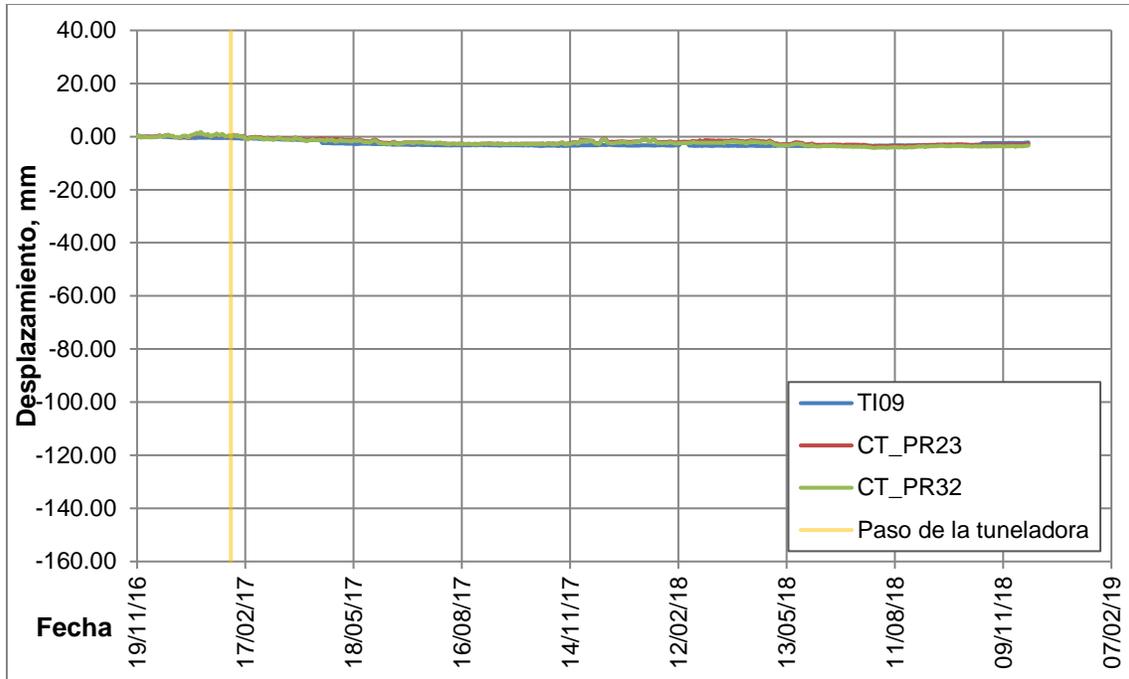


Figura 71. Desplazamiento Ote-Pte TI09, PR23 y PR32. Catedral Metropolitana.

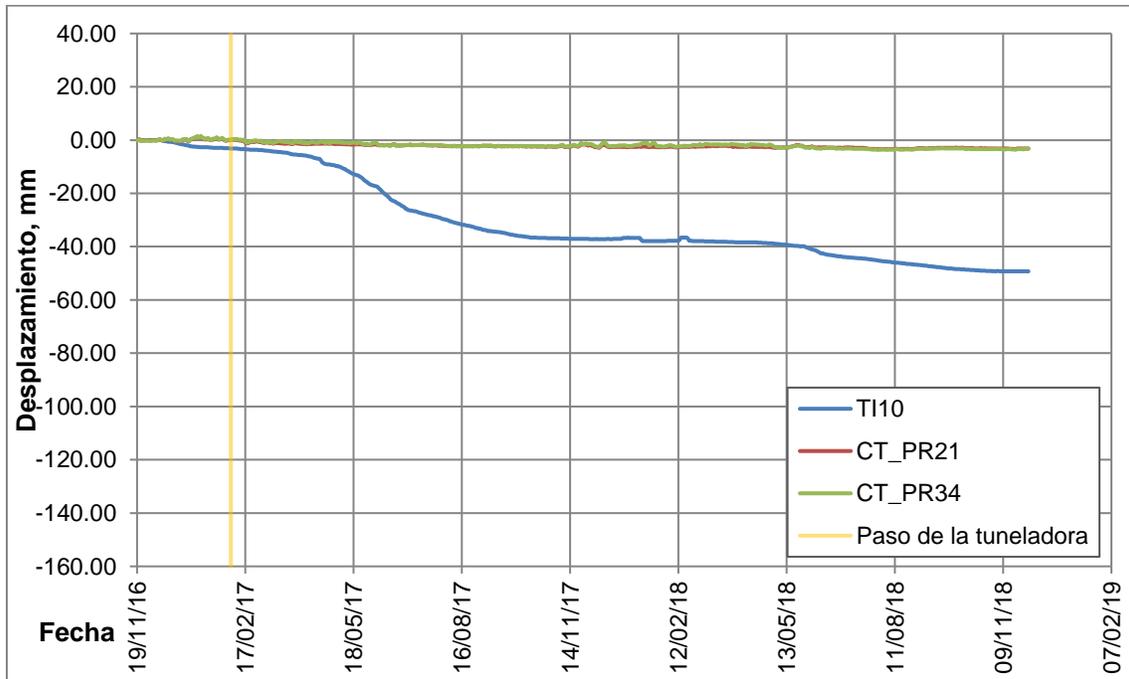


Figura 72. Desplazamiento Ote-Pte TI10, PR21 y PR34. Catedral Metropolitana.

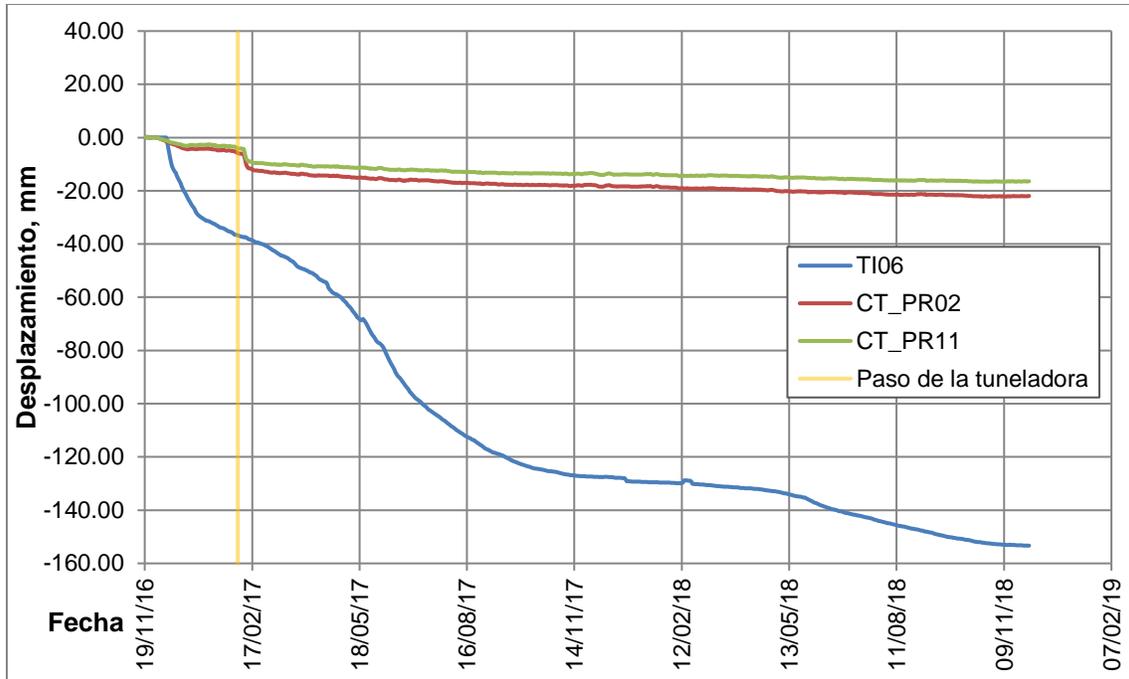


Figura 73. Desplazamiento, TI06, PR02 y PR11. Catedral Metropolitana.

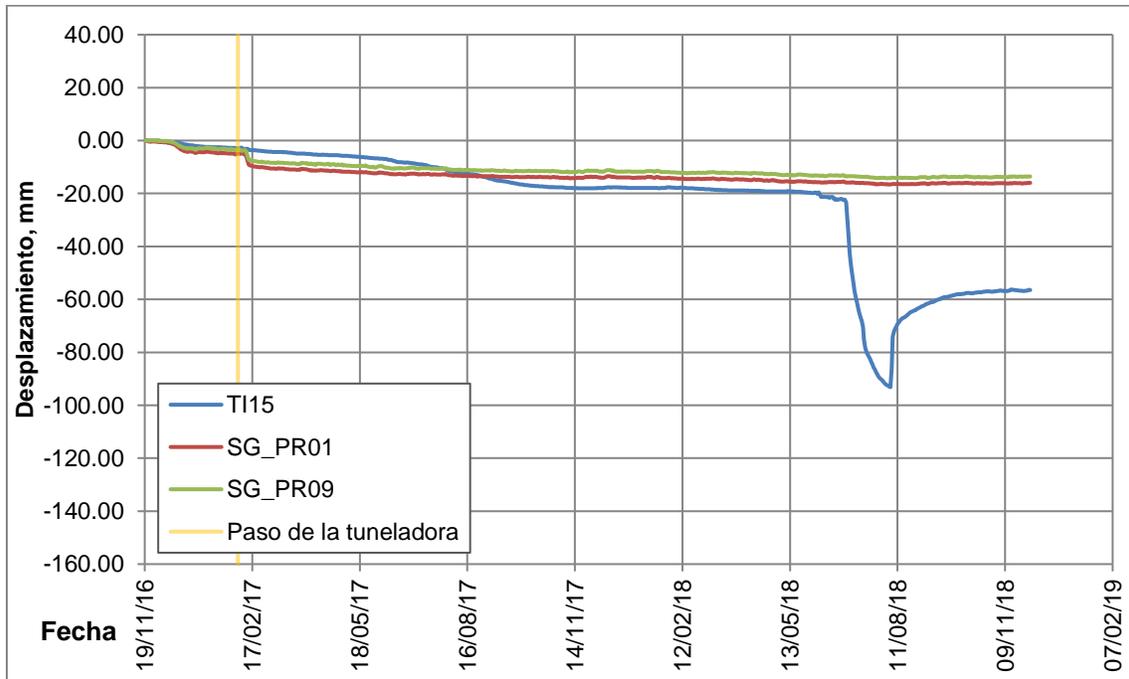


Figura 74. Desplazamiento Ote-Pte TI15, PR01 y PR09. Sagrario Metropolitano.

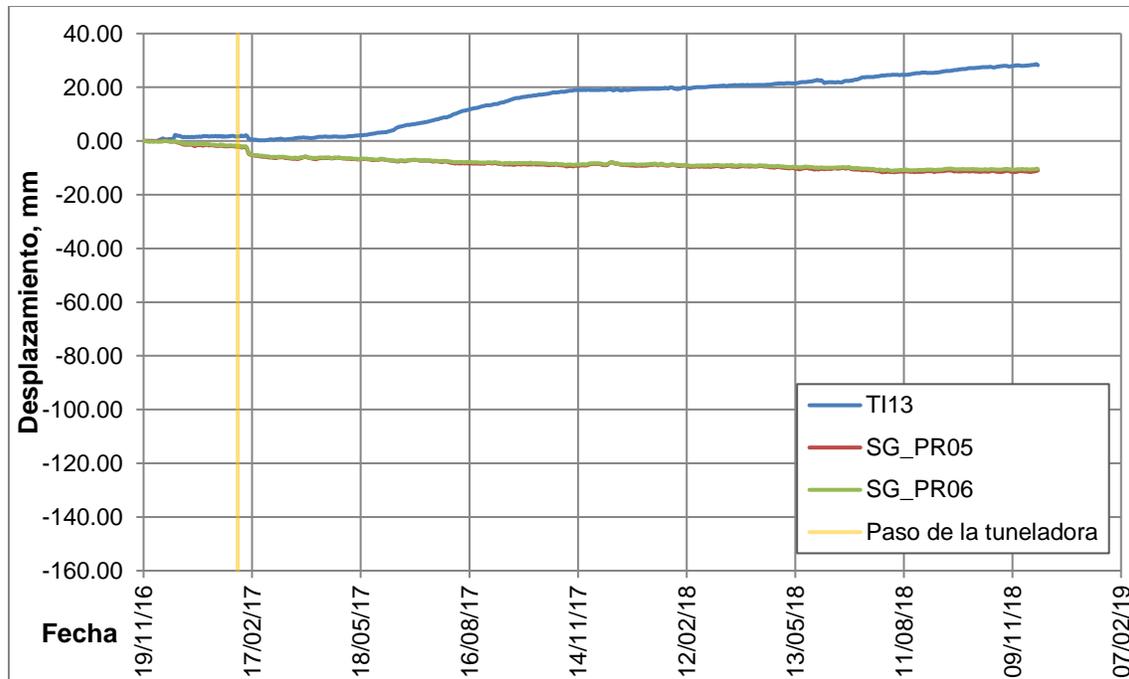


Figura 75. Desplazamiento Ote-Pte TI13, PR05 y PR06. Sagrario Metropolitano.

En primera instancia salta a la vista que los subsistemas comparados en estas gráficas registraron comportamientos diferentes para la estructura. Esto implica que estas no pueden ser consideradas fiables, sin embargo, los registros de las estaciones totales fueron validados con los registros de la nivelación topográfica, por lo que se sugiere revisión en las lecturas de inclinaciones. Estas discrepancias en el comportamiento del edificio registrado por los instrumentos se pueden observar también en la dirección Norte-Sur en algunos puntos. Para una mejor comparación, se presentan gráficas con las rotaciones registradas por los subsistemas.

Se observa que, en la mayoría de los casos, el desplazamiento lateral presentado en los muros en la dirección Oriente-Poniente no rebasa los 25 mm. Considerando las lecturas de todas las dianas reflectantes, se observa que las torres presentan el mayor desplazamiento, especialmente la torre norte, alcanzando un desplazamiento de 34.30 mm en el punto CT_PR13 como se observa en la Figura 166 del Anexo B, localizado a casi 38 m de altura.

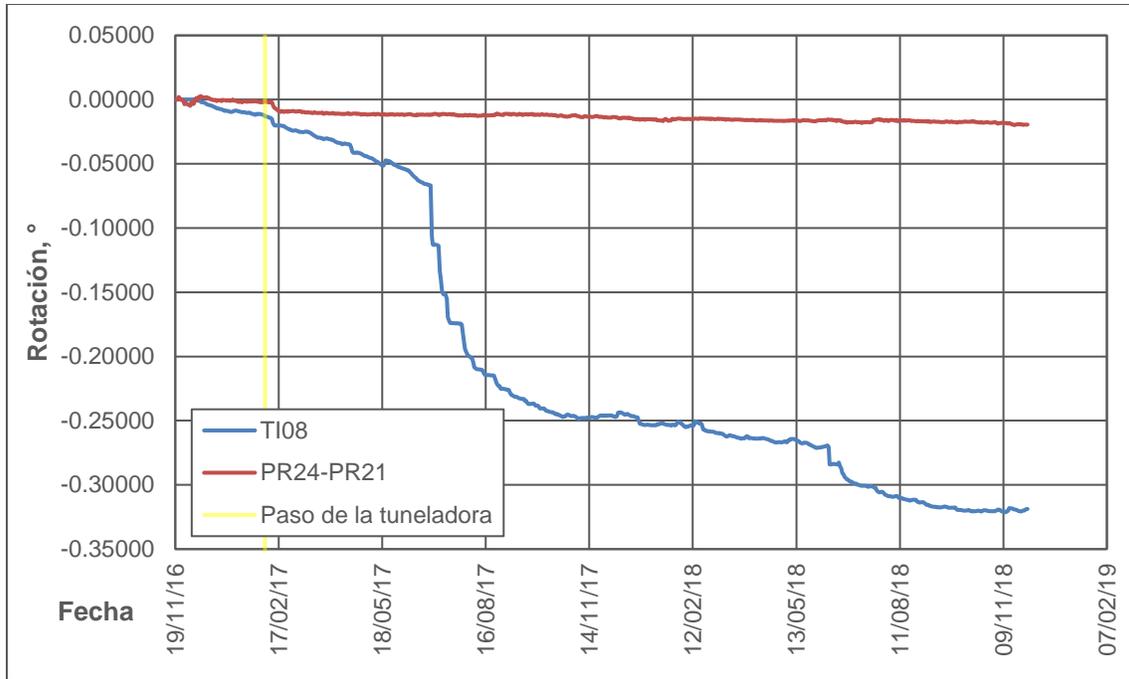


Figura 76. Rotación Ote-Pte TI08 y PR24-PR21. Catedral Metropolitana.

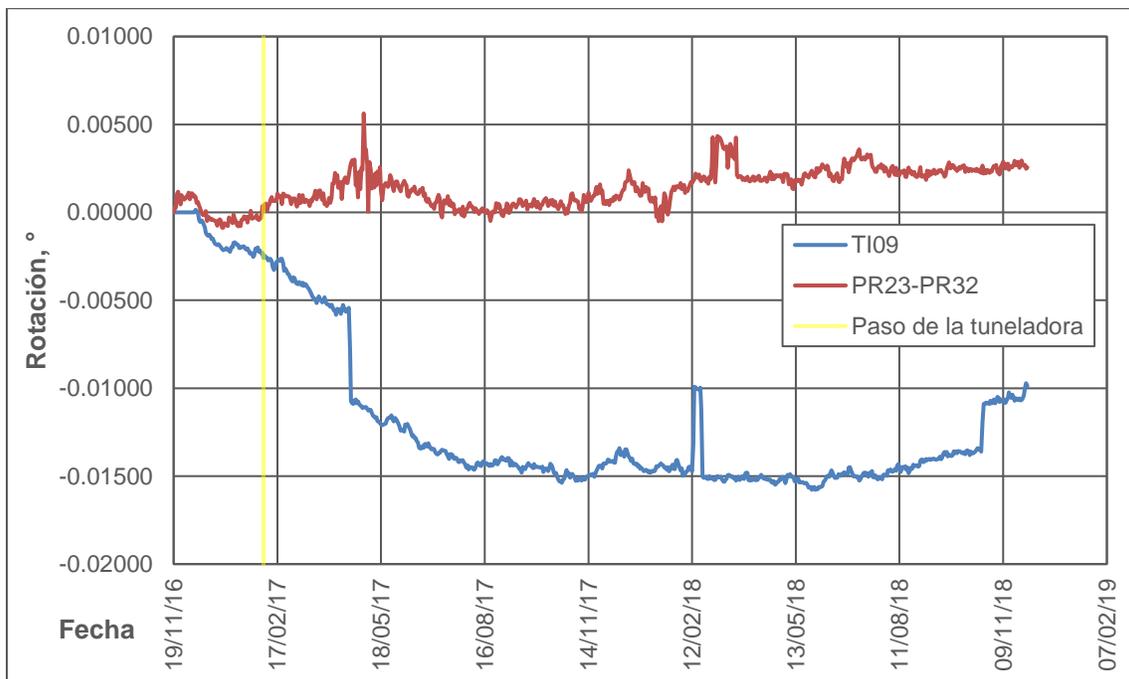


Figura 77. Rotación Ote-Pte TI09 y PR23-PR32. Catedral Metropolitana.

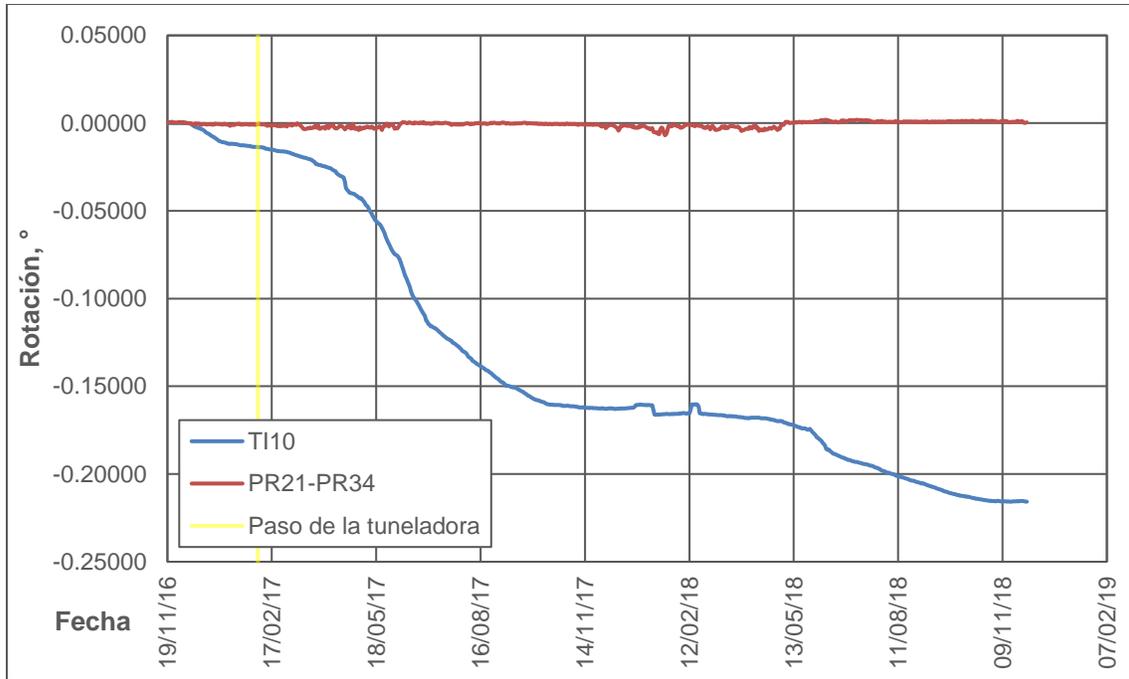


Figura 78. Rotación Ote-Pte TI10 y PR21-PR34. Catedral Metropolitana.

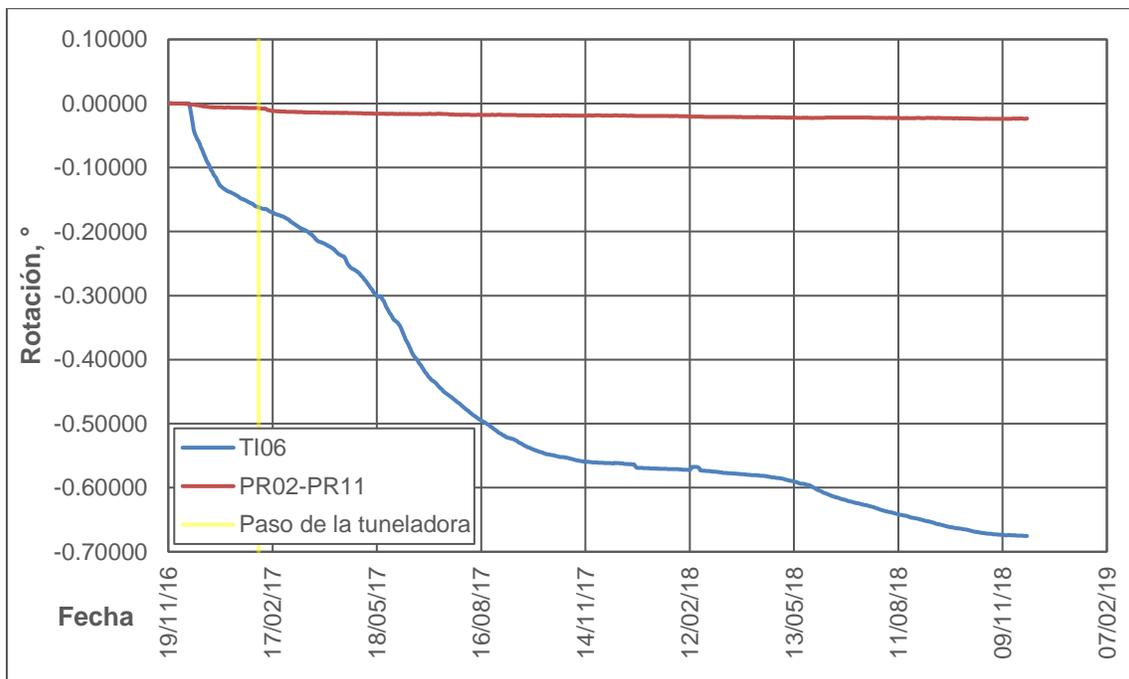


Figura 79. Rotación Ote-Pte TI06 y PR02-PR11. Catedral Metropolitana

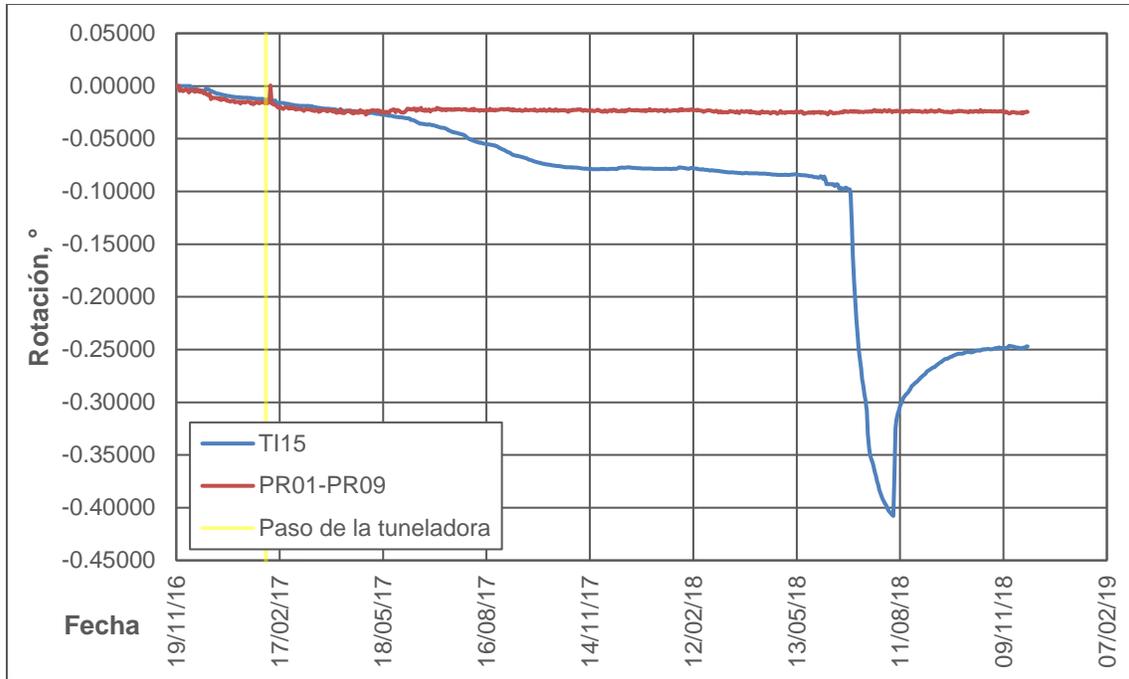


Figura 80. Rotación Ote-Pte Ti15 y PR01-PR09. Sagrario Metropolitano.

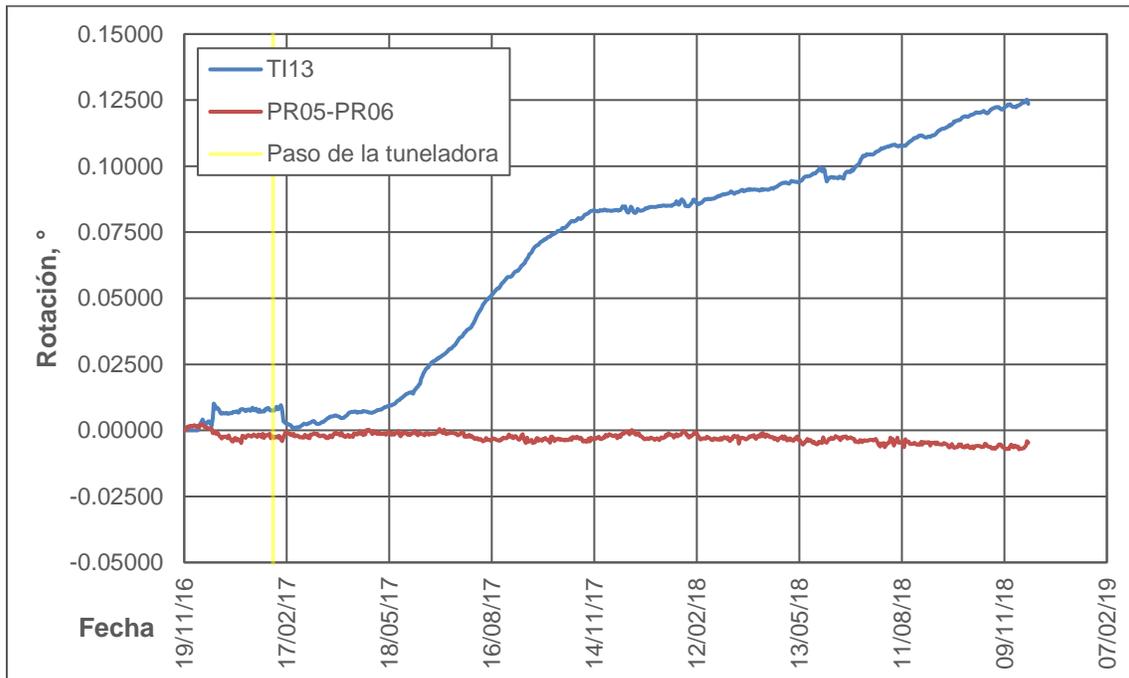


Figura 81. Rotación Ote-Pte Ti13 y PR05-PR06. Sagrario Metropolitano.

Es notable que, al igual que en el caso de los desplazamientos, las rotaciones registradas por ambos subsistemas presentan comportamientos diferentes con los

tiltmeters presentando valores más de 20 veces mayores a los calculados con las lecturas de las estaciones totales.

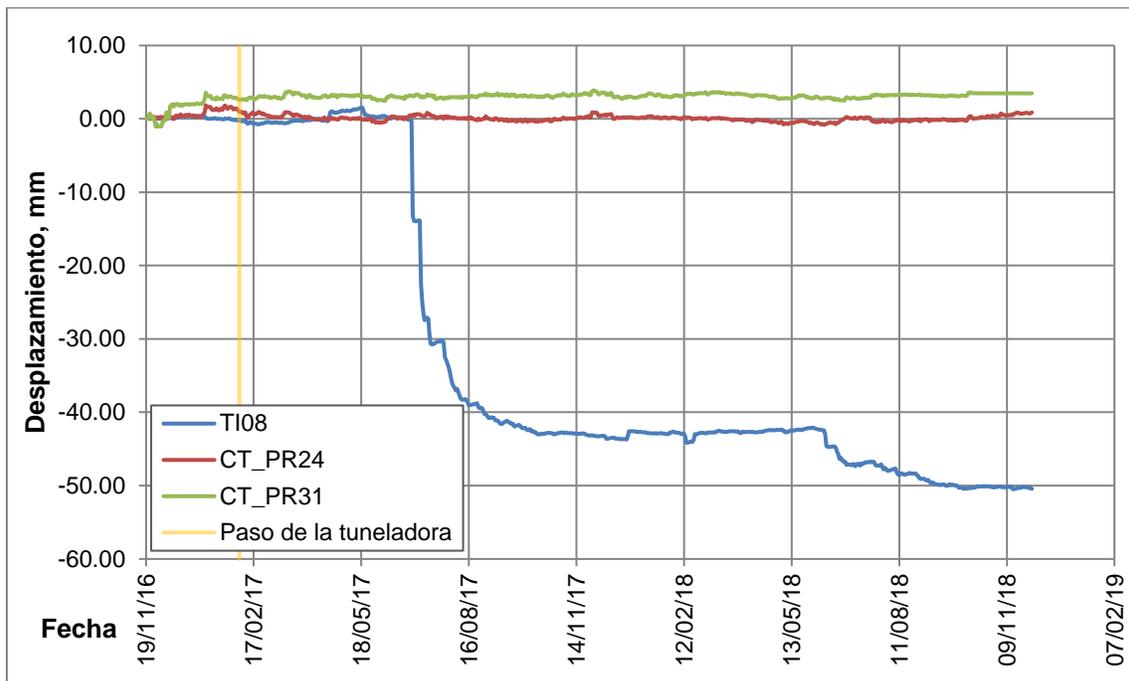


Figura 82. Desplazamiento Nte-Sur TI08, PR24 y PR31. Catedral Metropolitana.

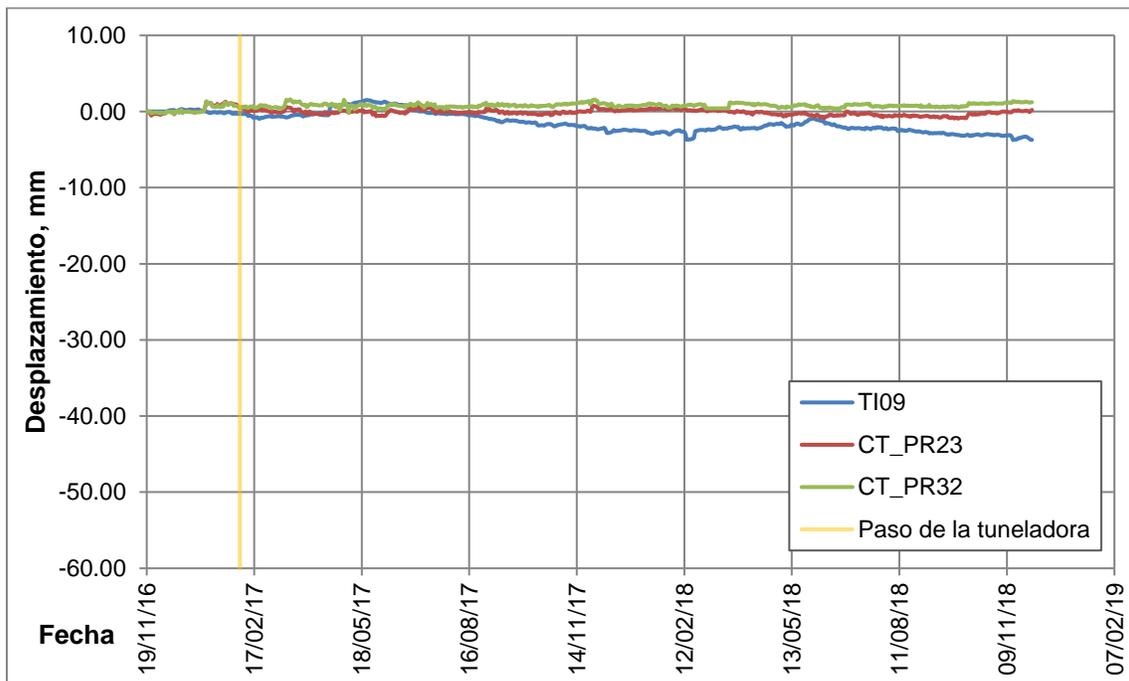


Figura 83. Desplazamiento Nte-Sur TI09, PR23 y PR32. Catedral Metropolitana.

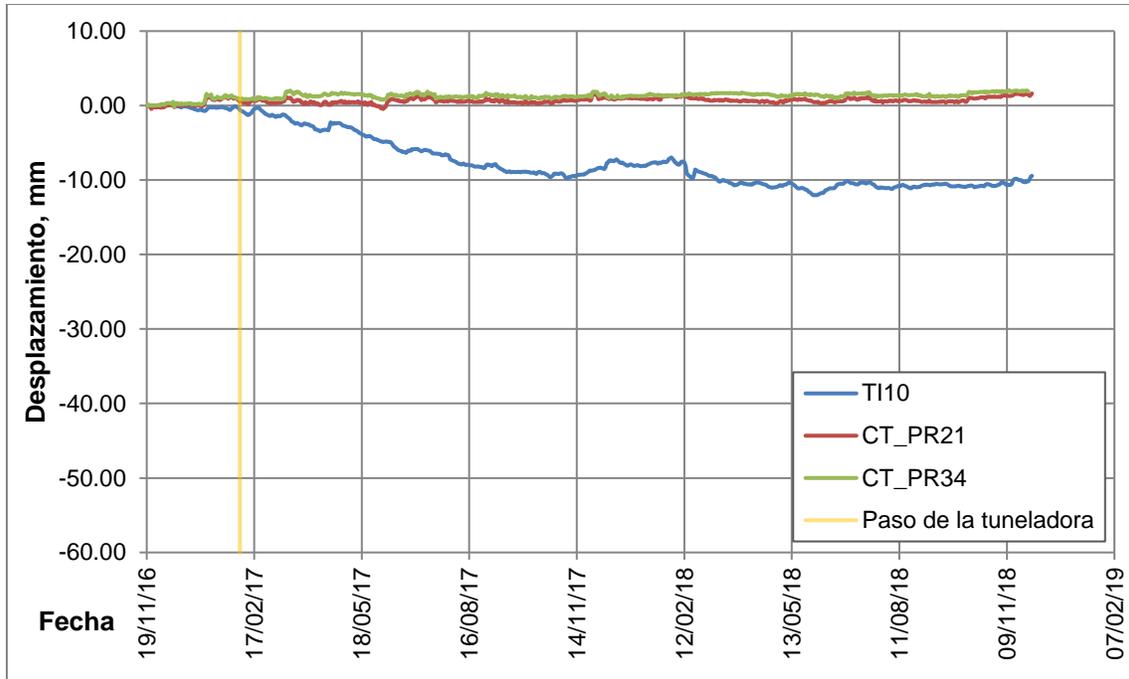


Figura 84. Desplazamiento Nte-Sur TI10, PR21 y PR34. Catedral Metropolitana.

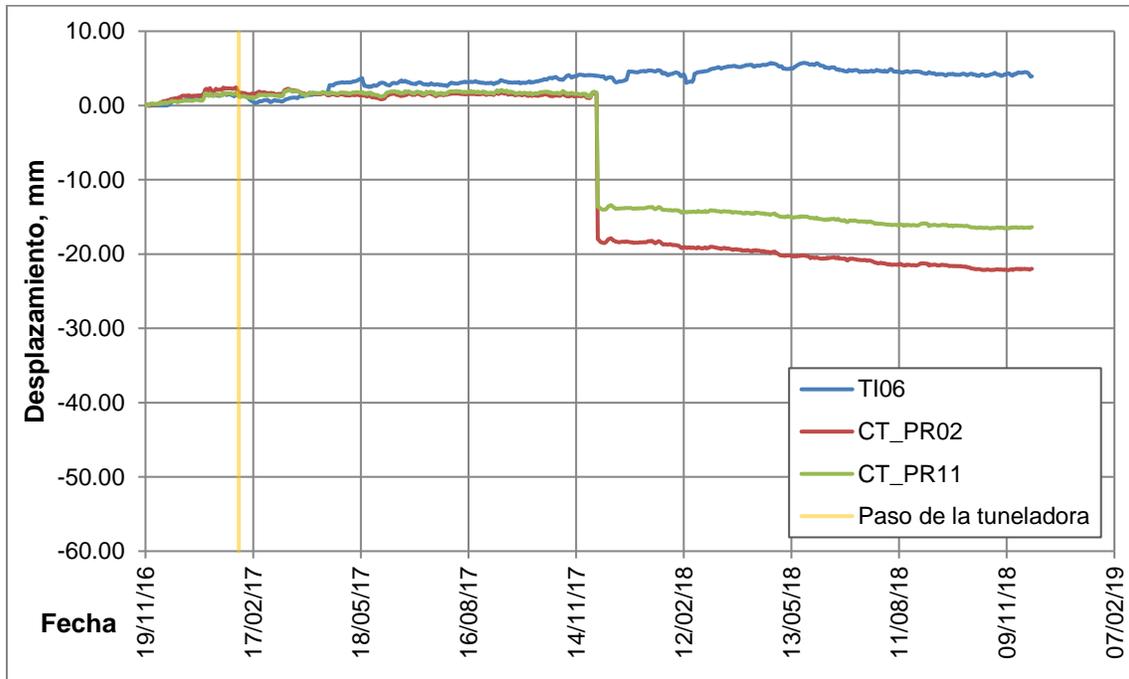


Figura 85. Desplazamiento Nte-Sur TI06, PR02 y PR11. Catedral Metropolitana.

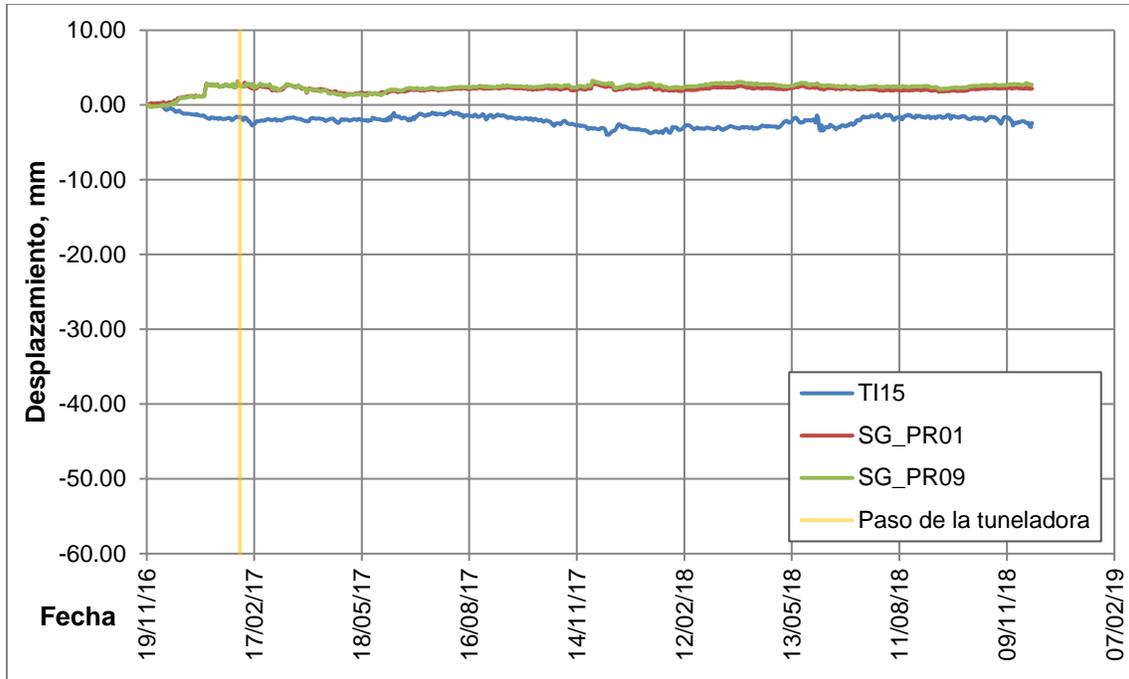


Figura 86. Desplazamiento Nte-Sur TI15, PR01 y PR09. Sagrario Metropolitano.

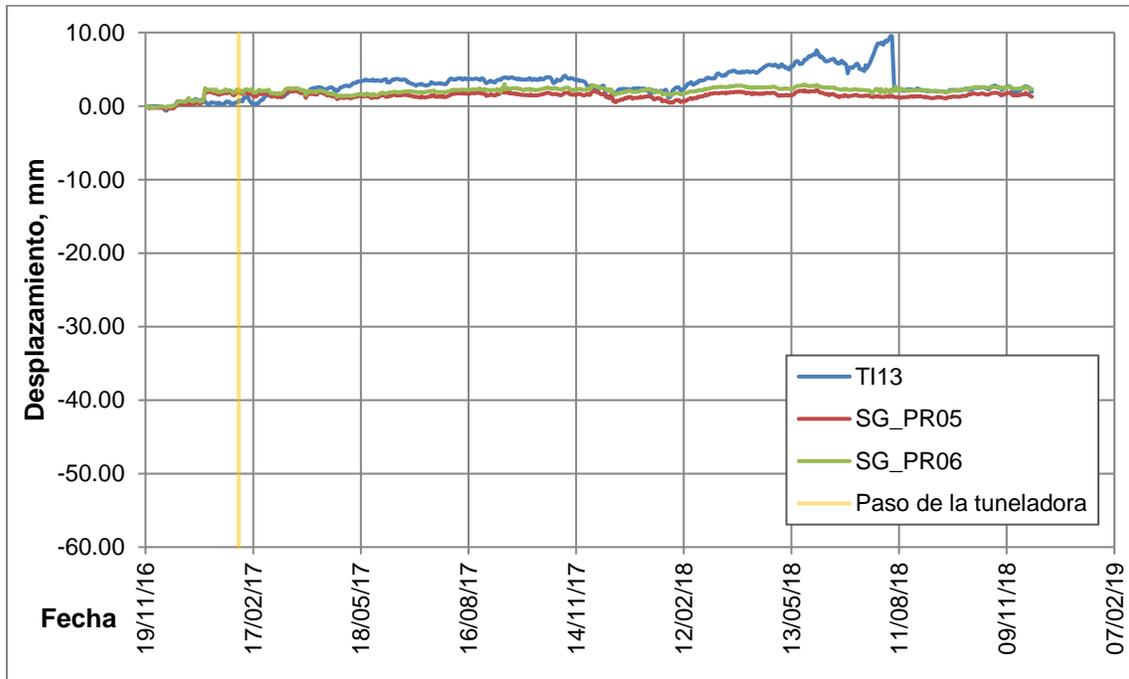


Figura 87. Desplazamiento Nte-Sur TI13, PR05 y PR06. Sagrario Metropolitano.

Se observa que el comportamiento registrado por la mayoría de los tiltmeters difiere levemente del registrado por las estaciones totales, excepto en el TI08 y TI06. En el primero (figura 82), se observa que el *tiltmeter* registra un comportamiento totalmente diferente, mientras que en el segundo (figura 85). son las dianas las que presentan un desplazamiento anómalo; no obstante, para este caso se muestra en las figuras 151 - 155 del Anexo B que dicho comportamiento se presenta en toda la zona.

Para una mejor comparación, al igual que en el desplazamiento Oriente-Poniente, se presentan gráficas con las rotaciones Norte-Sur registradas por los tiltmeters y las calculadas mediante las lecturas de las estaciones totales.

En general los registros muestran desplazamientos menores a 10 mm en la dirección analizada, excepto por los casos antes mencionados. Al igual que en el Templo de San José de Gracia, el desplazamiento en la dirección Norte-Sur es menor que el desplazamiento Oriente-Poniente.

Al igual que en la dirección Oriente-Poniente, el máximo desplazamiento en la estructura ocurre en las torres, alcanzando los 34.17 mm igualmente en la diana CT_PR13 de la torre norte, como se observa en la figura 151 del Anexo B.

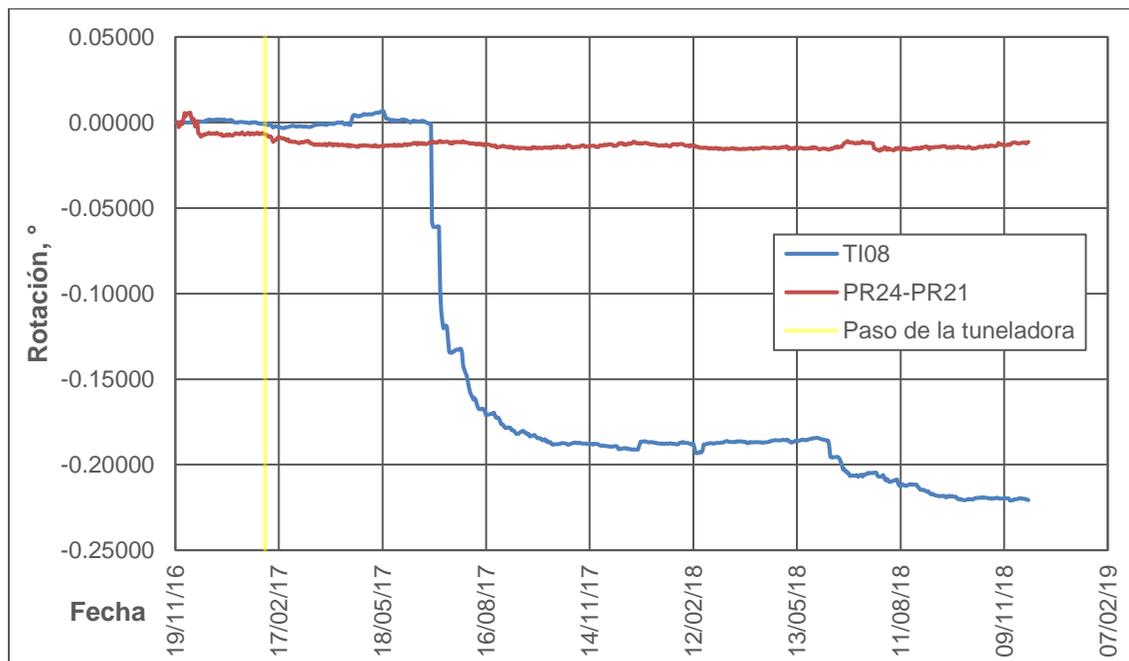


Figura 88. Rotación Nte-Sur TI08 y PR24-PR21. Catedral Metropolitana.

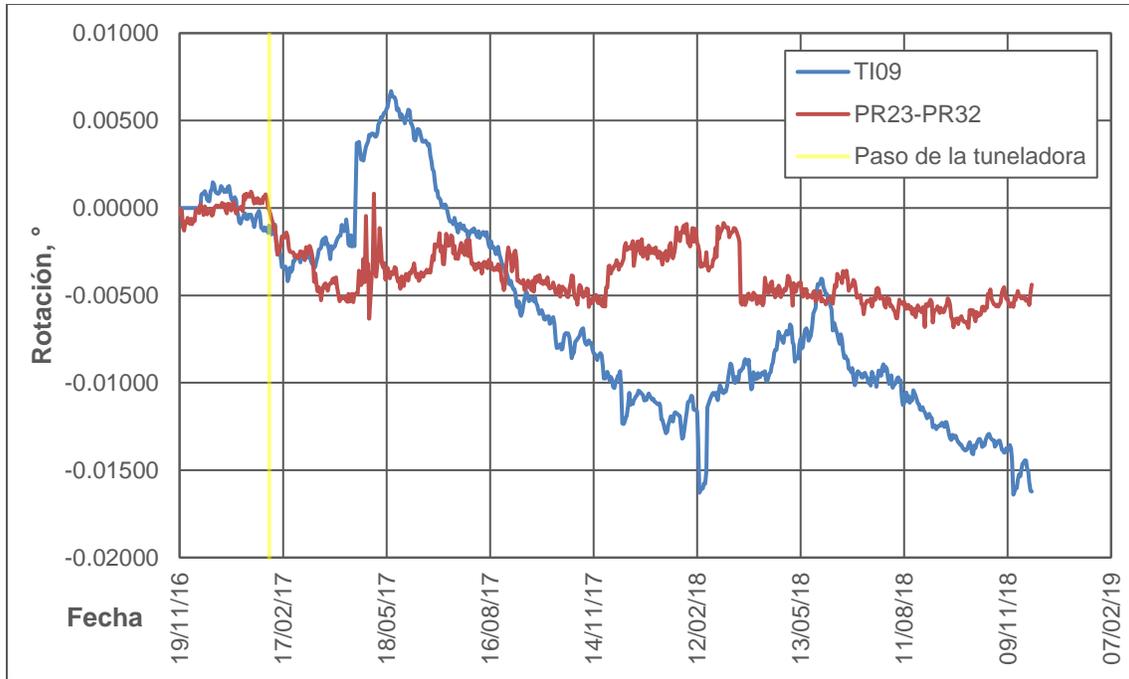


Figura 89. Rotación Nte-Sur TI09 y PR23-PR32. Catedral Metropolitana.

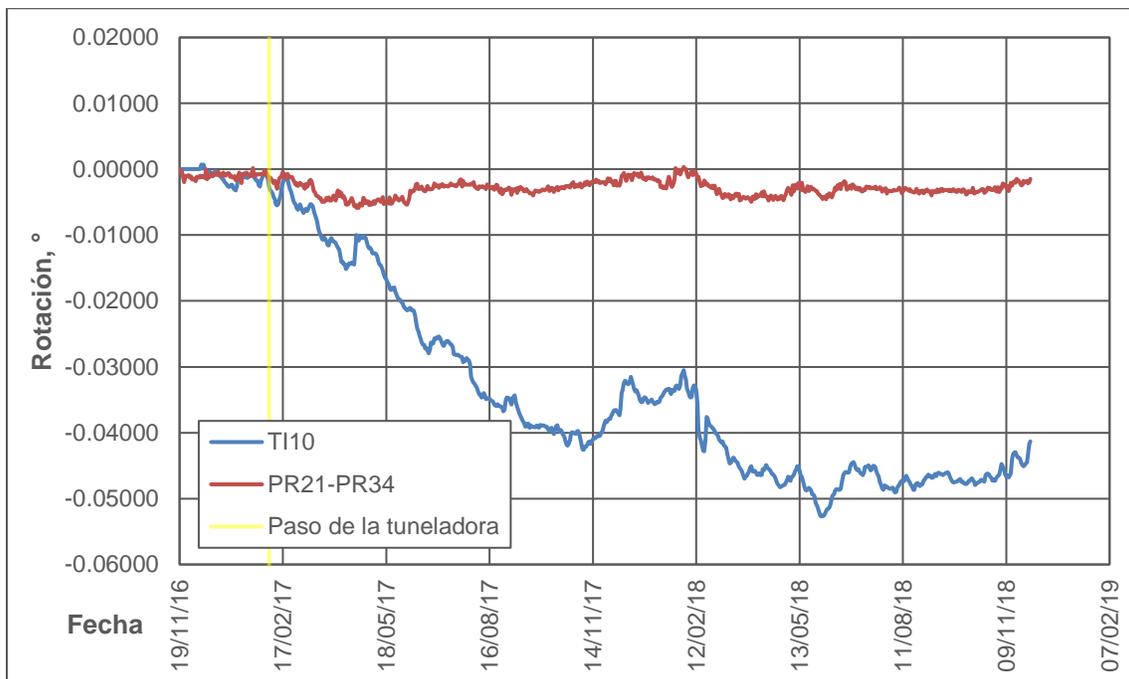


Figura 90. Rotación Nte-Sur TI10 y PR21-PR34. Catedral Metropolitana.

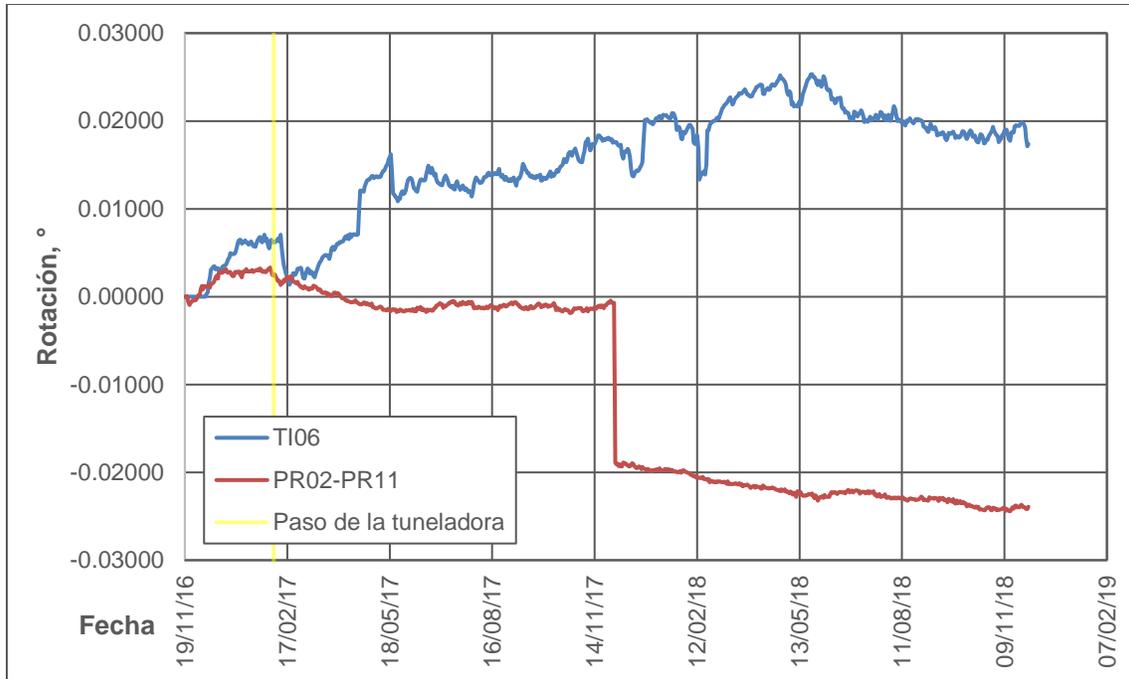


Figura 91. Rotación Nte-Sur TI06 y PR02-PR11. Catedral Metropolitana.

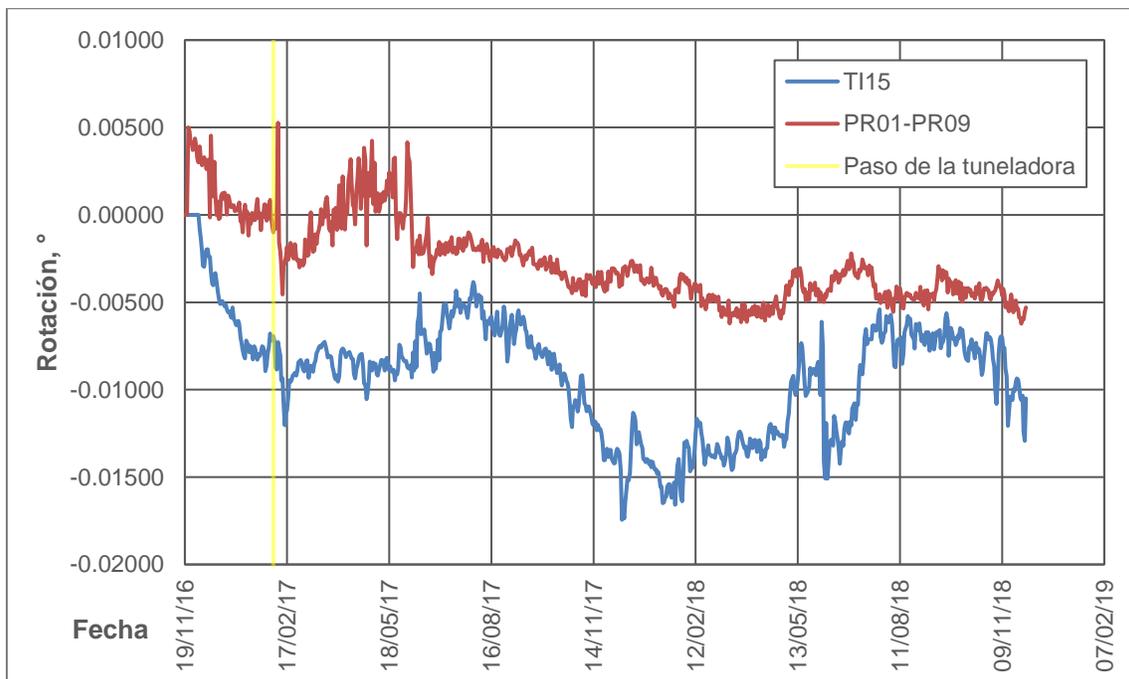


Figura 92. Rotación Nte-Sur TI15 y PR01-PR09. Sagrario Metropolitano.

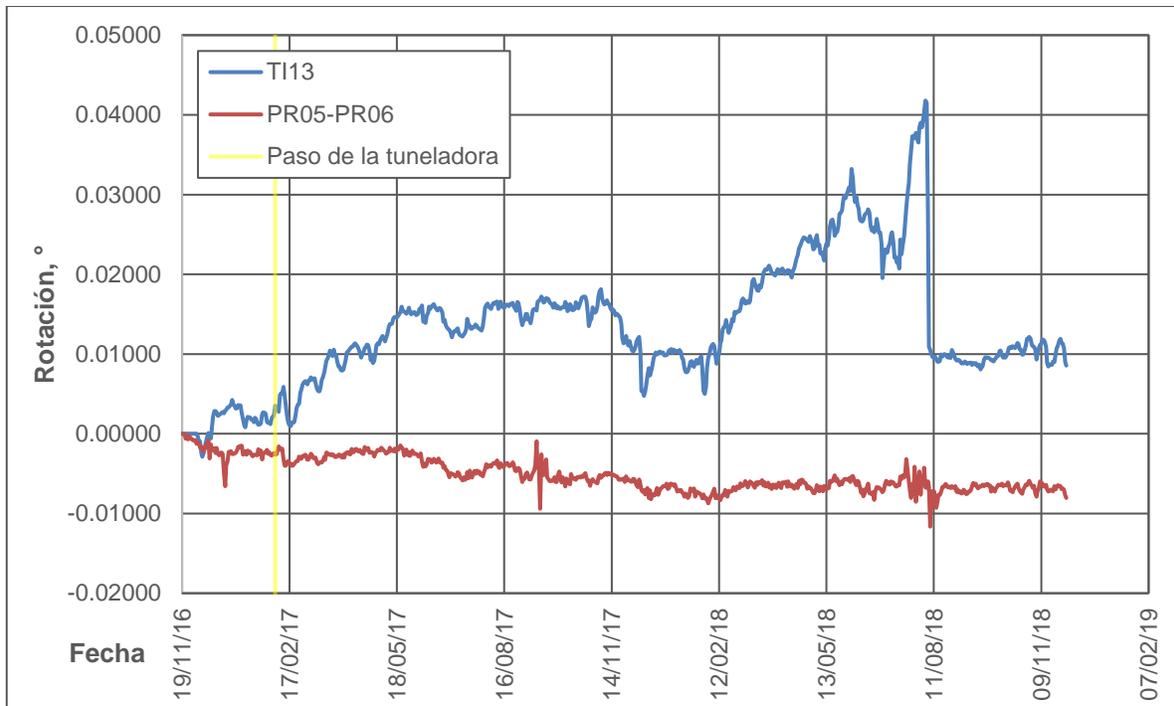


Figura 93. Rotación Nte-Sur TI13 y PR05-PR06. Sagrario Metropolitano.

Analizando estas gráficas, se observa que existen diferencias en el comportamiento registrado. Sin embargo, esto se asocia a que los valores son muy pequeños, y susceptibles a variaciones. Los instrumentos que presentan las variaciones más grandes son el TI08, TI10 y TI06 (figuras 88, 90 y 91).

4.3.3 Daños presentados en el inmueble.

De acuerdo con los daños registrados por el IIUNAM, los daños apreciables en la fachada norte del inmueble son, principalmente grietas verticales en muros y columnas, así como pérdidas de sección y apertura de juntas. Las grietas verticales se encuentran en diferentes partes de la fachada, especialmente en la parte central de la misma.

En la fachada poniente se observan más grietas y separación de juntas distribuidas a lo largo de la misma, tanto en los muros como en las columnas. En ambos casos se presentan siguiendo una orientación diagonal que varía dependiendo la sección observada.

En el caso de la fachada sur, las grietas verticales y horizontales a lo largo de la planta baja se presentan principalmente en los muros. En la azotea se presentan

grandes grietas en dirección norte-sur y oriente-poniente, así como en las bóvedas de la catedral.

4.3.4 Relaciones causa-consecuencia entre desplazamientos y daños.

Al igual que en el templo de San José, los asentamientos debidos a la construcción del tren ligero causaron desplazamientos laterales en los muros de la Catedral Metropolitana; sin embargo, gran parte del asentamiento del edificio se debió a las obras de prevención. En este caso, se correlacionan los perfiles mostrados anteriormente (figuras 57, 58 y 59) con las distorsiones verticales calculadas con los registros de las dianas colocadas en los mismos planos verticales. En el caso de la diana CT_PR30 de la fachada norte, no se tiene otro instrumento en el mismo plano vertical, por lo que no es considerada en este análisis.

De acuerdo con los límites propuestos (tabla 5), a lo largo de la fachada poniente los asentamientos presentados superan el umbral de acción (6.00 mm); sin embargo, la mayoría de las distorsiones horizontales alcanzadas son menores al umbral de alerta de los *tiltmeters* (0.00030). En las fachadas norte y sur (figuras 67 y 70) se observan asentamientos mayores a los umbrales en sus extremos occidentales por lo que, en estas fachadas, la distorsión horizontal supera los umbrales de acción (0.00040) en estos extremos.

La fachada norte presenta distorsiones verticales y desplazamientos pequeños en la dirección norte-sur, alcanzando una rotación máxima de 0.00029 en el plano vertical de la diana CT_PR29. En la dirección Oriente-Poniente se tienen distorsiones que superan el umbral de alerta (0.00030) en el eje de la diana CT_PR31 y que superan el umbral de acción (0.00040) en los ejes de las dianas CT_PR29 y CT_PR28, siendo este último el que alcanza la mayor distorsión, con un valor de 0.00065. Este comportamiento está ligado al perfil de asentamientos presentado en la figura 67 que, a su vez, se liga con el perfil de subsidencias desarrollado durante la excavación de túneles.

Las grietas de mayor tamaño medidas en esta fachada se localizan entre las dianas CT_PR31 y CT_PR29, zona en la que se aprecia la mayor distorsión angular y comienza la flexión en el perfil de asentamientos (figura 67); además, la diferencia

entre las distorsiones verticales entre los ejes de las dianas CT_PR32 y CT_PR31 es de 0.00038, la cual se asocia a la aparición de la grieta presentada en la azotea en esta zona.

En la fachada poniente se observa rotación en dirección norte, con distorsiones menores en la sección sur. Este comportamiento coincide con los asentamientos que muestran mayor hundimiento en la sección norte del inmueble (figura 68). A partir de la diana SG_PR07 la distorsión vertical supera el umbral de alerta (0.00030) y, a partir de la diana CT_PR09 hacia el norte, la distorsión vertical supera el umbral de acción (0.00040); este comportamiento está ligado al peso propio de la estructura, pues en esta zona se encuentran ambas torres, alcanzando en el extremo la distorsión máxima de 0.00059. De acuerdo con el levantamiento de daños del IIUNAM, a pesar de que se presentan grietas y apertura de juntas a lo largo de toda la fachada, las más grandes se generaron en la sección correspondiente a la catedral, especialmente en la torre norte. La aparición de dos grietas con dirección oriente-poniente entre los ejes de las dianas CT_PR08 y CT_PR09 se asocia a la presencia de un punto de inflexión en el hundimiento de la estructura pues, como se muestra en el perfil (figura 68), existe un ligero ascenso en la zona. En la dirección Oriente-Poniente el extremo sur presenta la menor distorsión vertical mientras que las dianas hacia el norte las distorsiones superan los umbrales propuestos, alcanzando el valor de 0.00059 en el extremo.

El asentamiento de la fachada sur presenta un comportamiento similar al de la fachada norte, sin embargo, las distorsiones verticales solo superan al umbral de alerta en el extremo oriental, en la dirección oriente-poniente. Las grietas y apertura de juntas de la fachada coinciden con las secciones del perfil de asentamiento (figura 69) en los que se observan cambios bruscos en su pendiente, es decir, diferencias de distorsión que alcanzan valores de hasta 0.00068.

4.4 Análisis en Templo de San Francisco de Asís

4.4.1 Análisis de asentamientos registrados.

Para el análisis de asentamientos registrados en el Templo de San Francisco de Asís se comparan las lecturas entre clavos de nivelación y dianas reflectantes, sin embargo, debido a la diferencia de fechas de inicio para las lecturas es necesario realizar un ajuste en los registros de las estaciones totales. Así mismo, se toma en cuenta que los clavos colocados en las fachadas del inmueble únicamente se encuentran en la sección norte del mismo.

De tal forma que la comparación para los desplazamientos verticales se realiza como en la Tabla 20.

Tabla 20. Puntos de referencia a comparar. Asentamientos. Templo de San Francisco de Asís.

Clave de punto de referencia topográfico	Clave de diana reflectante a comparar
R1	PR13 y PR07
R2	PR12 y PR08
R3A	PR10 y PR09
R6	PR31 y PR30

Al igual que en los casos anteriores, el análisis gráfico de los registros se realizará para las fechas de las lecturas tomadas manualmente mediante los clavos de nivelación.

Debido a la diferencia en la fecha de inicio de captura de datos, existen asentamientos que no fueron registrados por todos los instrumentos. Por esta razón, se graficaron también los registros de los clavos de nivelación tomando como fecha de inicio la primera fecha en la que se tiene una lectura de las estaciones totales, distinguiendo a este nuevo grupo de lecturas con una comilla de superíndice (‘).

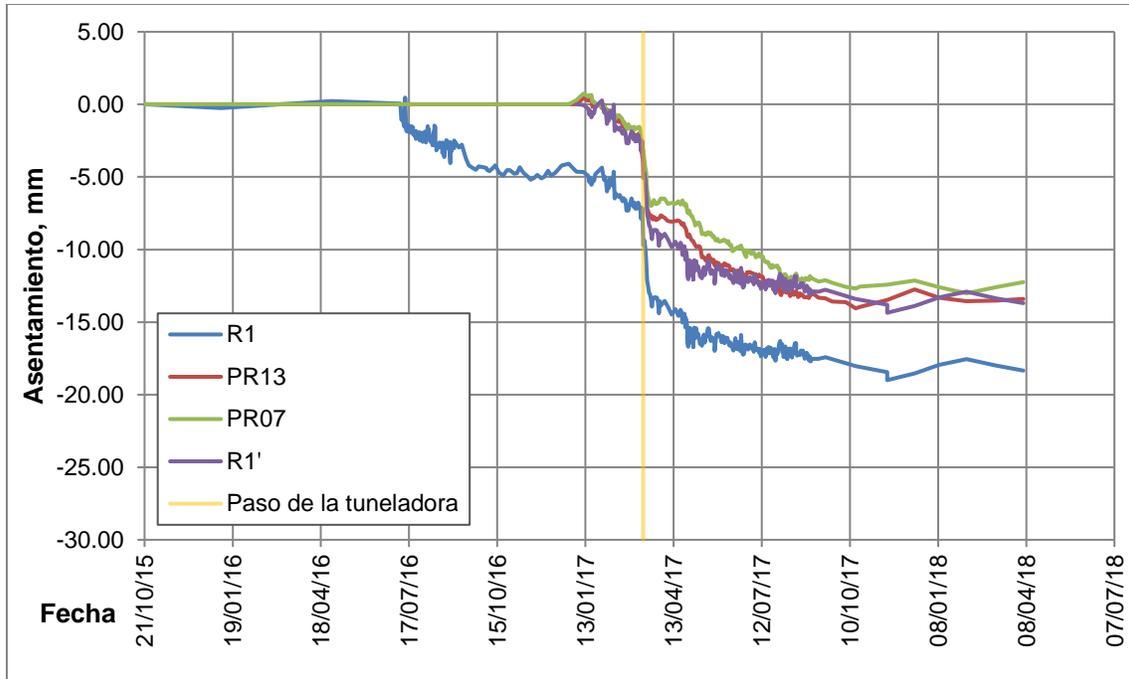


Figura 94. Asentamiento en clavo de nivelación R1, dianas reflectantes PR1 y PR07, y asentamiento corregido R1'. Templo de San Francisco de Asís.

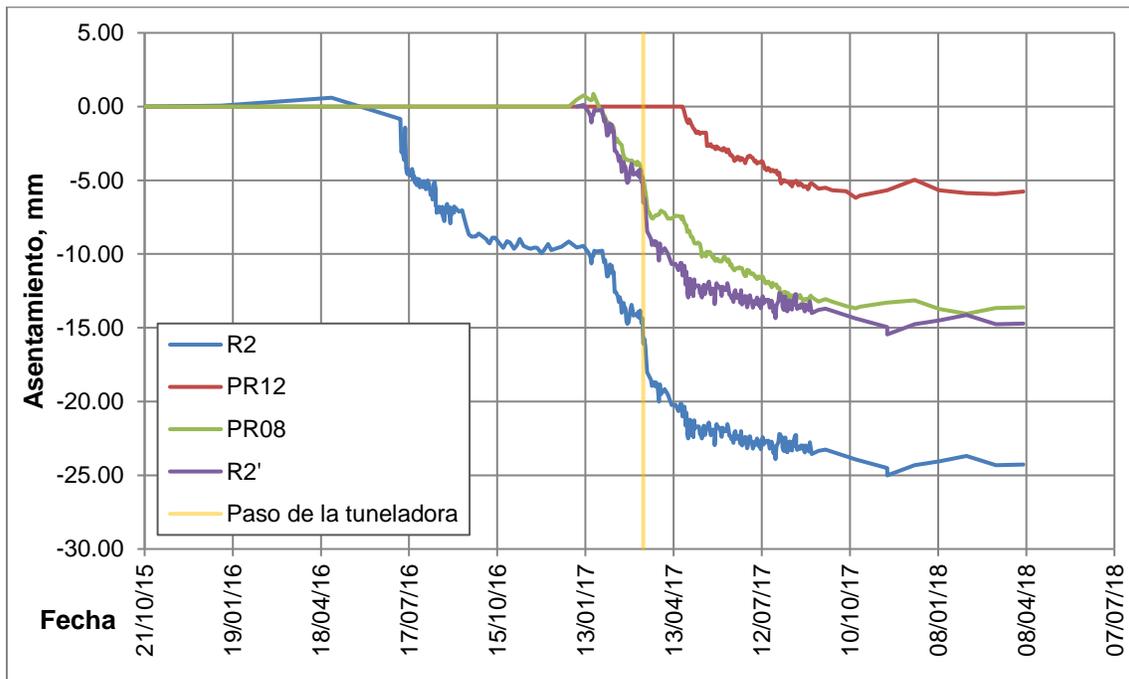


Figura 95. Asentamiento en clavo de nivelación R2, dianas reflectantes PR12 y PR08, y asentamiento corregido R2'. Templo de San Francisco de Asís.

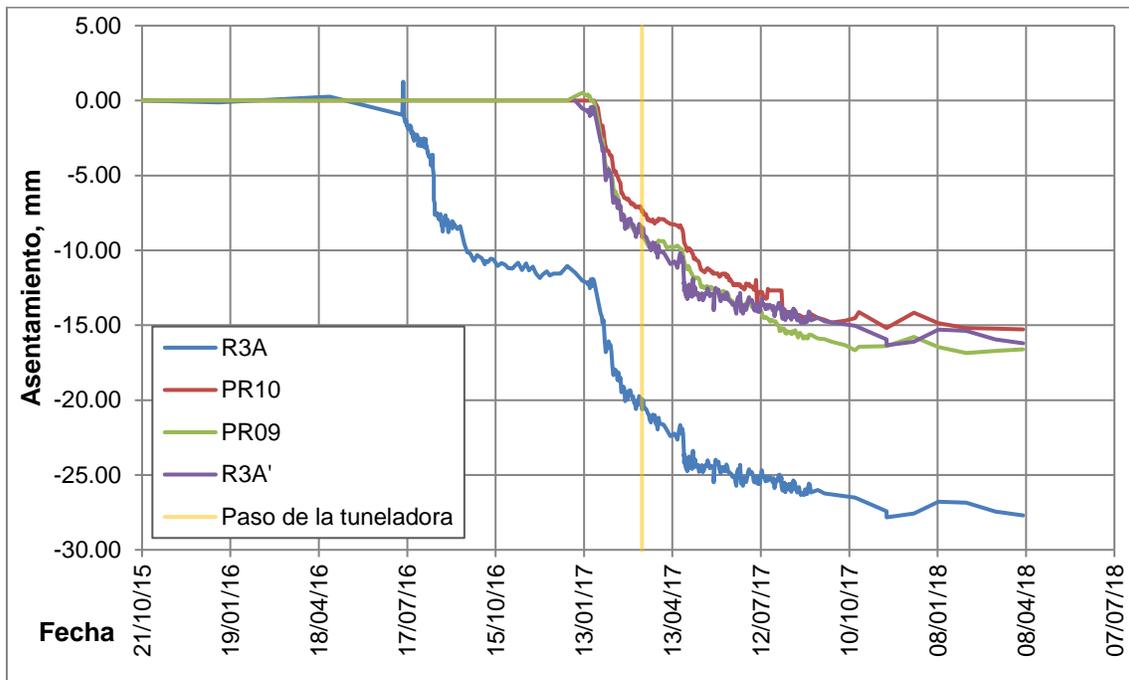


Figura 96. Asentamiento en clavo de nivelación R3A, dianas reflectantes PR10 y PR09, y asentamiento corregido R3A'. templo de San Francisco de Asís.

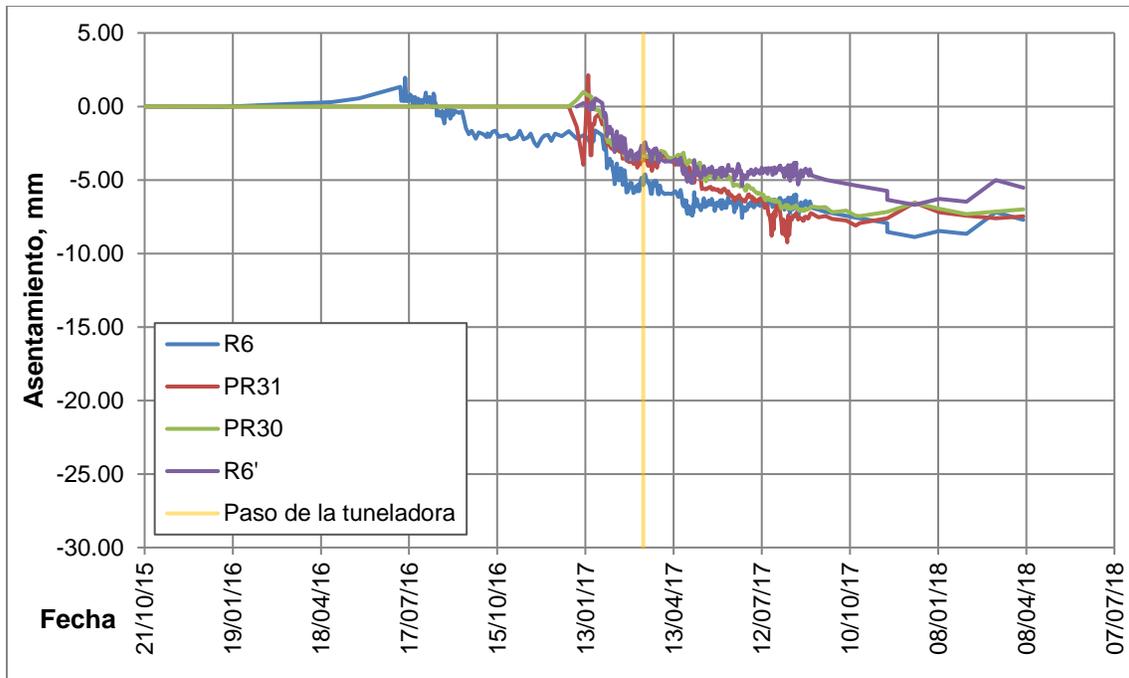


Figura 97. Asentamiento en clavo de nivelación R6, dianas reflectantes PR31 y PR30, y asentamiento corregido R6'. Templo de San Francisco de Asís.

Se observa que, en los registros de los clavos de nivelación (figuras 94-97), la estructura presenta dos periodos de asentamiento importantes, el primero de julio a diciembre de 2016, y el segundo de marzo a noviembre de 2017. El paso de la tuneladora el 13 de marzo de 2017 tiene efecto en el asentamiento de los puntos en la sección norte de la fachada oriente, aunque la mayor parte del asentamiento se desarrolla en fechas previas debido a los trabajos de prevención.

Con las lecturas de los clavos se aprecia también que el mayor asentamiento para ambas rampas se registra en la esquina noreste del inmueble (clavo R3A, figura 93). Esto se debe a que esta zona es la más cercana al eje de construcción del túnel, por lo que presentó un mayor movimiento en el suelo durante los trabajos previos y la excavación.

Comparando los registros de las estaciones totales con los registros modificados de los clavos de nivelación, se observa que ambas lecturas muestran un comportamiento muy parecido para la estructura, presentando diferencias de menos de 2 mm.

Para graficar perfiles de asentamiento utilizando los datos de las estaciones totales, fue necesario modificar las lecturas de algunos instrumentos para que todas tuvieran la misma fecha de inicio, restando los desplazamientos registrados anteriores al 22 de abril de 2017 para todos los instrumentos, tomando dicha fecha como el inicio de las mediciones.

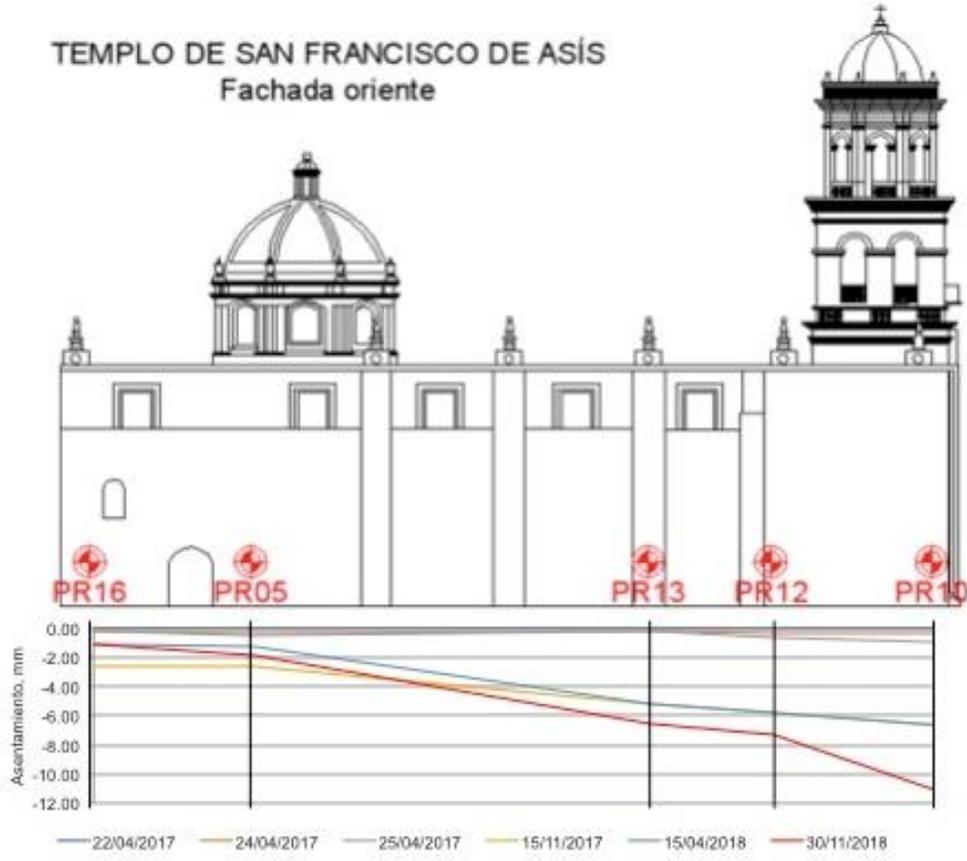


Figura 98. Perfil de asentamientos en la fachada oriente. Templo de San Francisco de Asís.

De acuerdo con el análisis, el extremo norte de la fachada alcanza un asentamiento de 11.13 mm, mientras que el extremo sur únicamente desciende 1.10 mm (figura 98), mostrando de manera más clara la tendencia del asentamiento diferencial mencionada previamente.

Debido a este comportamiento de la estructura, la máxima distorsión calculada utilizando los datos de los perfiles resulta de 0.00033 en el extremo norte de la fachada, lo que implica una ligera flexión de esta.

TEMPLO DE SAN FRANCISCO DE ASÍS
Fachada norte

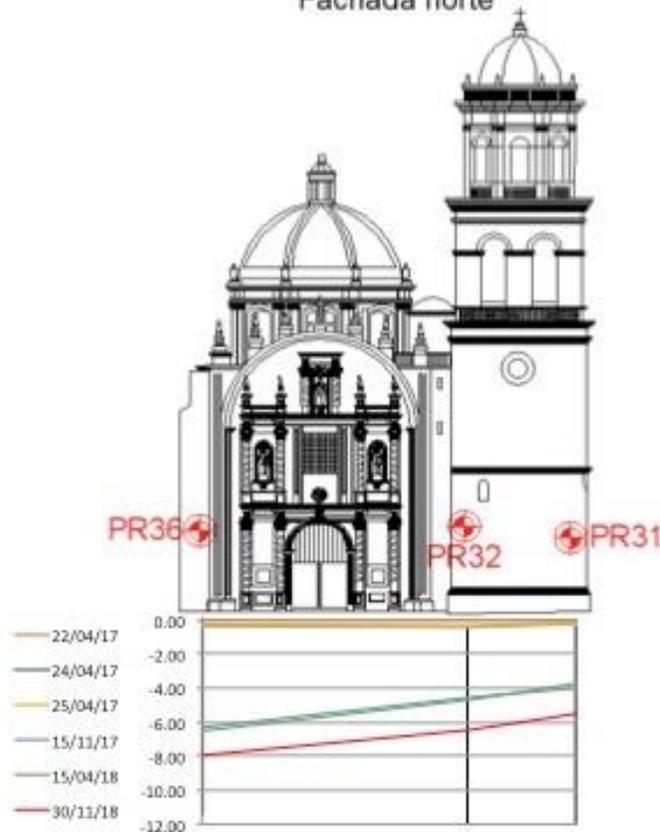


Figura 99. Perfil de asentamientos en la fachada norte. Templo de San Francisco de Asís.

En la fachada norte, el asentamiento en el extremo oriente alcanza los 7.99 mm, mientras que en el extremo poniente llega a un valor de 5.50 mm. Este asentamiento diferencial genera una distorsión máxima de 0.00022 en el extremo oriente, provocando también una ligera flexión en esta fachada (figura 99).

Al sumar el mayor asentamiento registrado por los clavos de nivelación hasta el 22 de abril de 2017 para la esquina noreste, con valor de 22.25 mm (figura 93), con las lecturas en la zona de las estaciones totales, se obtiene que el asentamiento real de dicha zona es cercano a los 33.38 mm para la fachada oriente y a los 30.24 mm para la fachada norte.

4.4.2 Análisis de desplazamientos laterales de muros

Al igual que en los casos anteriores, el análisis y comparación de los desplazamientos laterales se realiza con los registros obtenidos mediante los

tiltmeters colocados en el interior del inmueble y las dianas reflectantes colocadas en las fachadas de este. En este edificio el eje A de los tiltmeters corresponde a la dirección Oriente-Poniente mientras que el eje B corresponde a la dirección Norte-Sur.

Para la comparación se agruparon de la siguiente forma los instrumentos (Tabla 21):

Tabla 21. Puntos de referencia a comparar. Desplazamientos laterales. Templo de San Francisco de Asís.

Clave de tiltmeters	Clave de diana reflectante a comparar
Ti06	PR21, PR36, PR09 y PR10
Ti05	PR32 y PR34
Ti04	PR30 y PR31
T08	PR04 y PR05
Ti07	PR11

Al igual que para los inmuebles anteriores, el análisis se inicia con los desplazamientos en dirección Oriente-Poniente y, posteriormente, se continúa con los desplazamientos en dirección Norte-Sur.

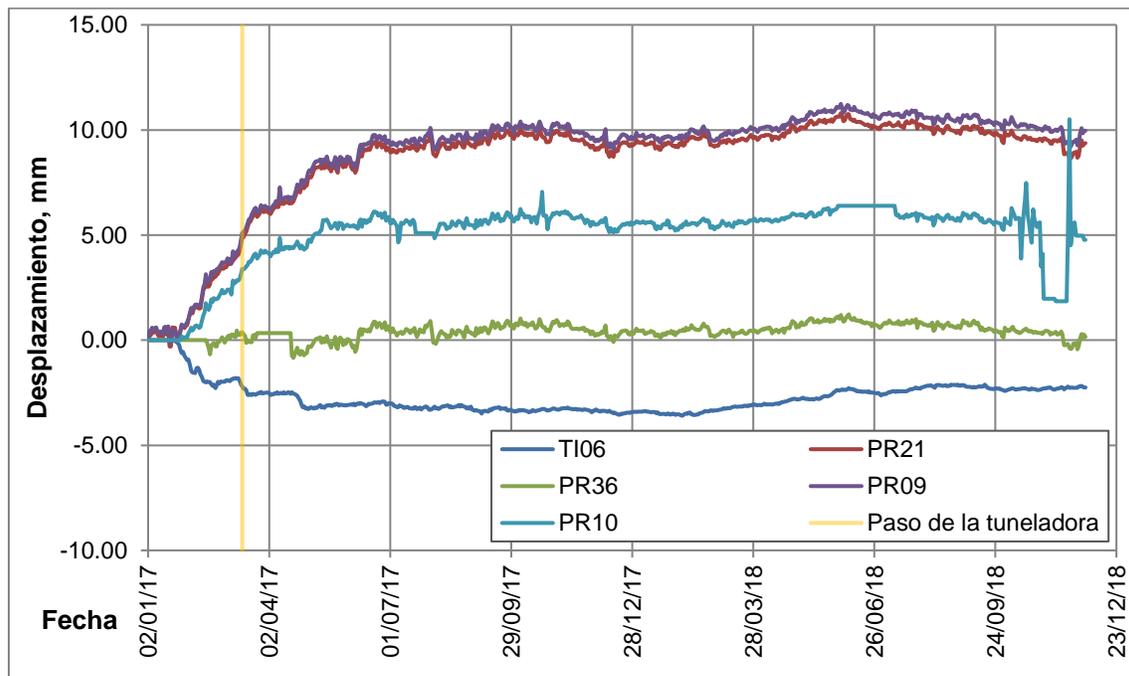


Figura 100. Desplazamiento Ote-Pte TI06, PR36, PR10, PR21 y PR09. Templo de San Francisco de Asís.

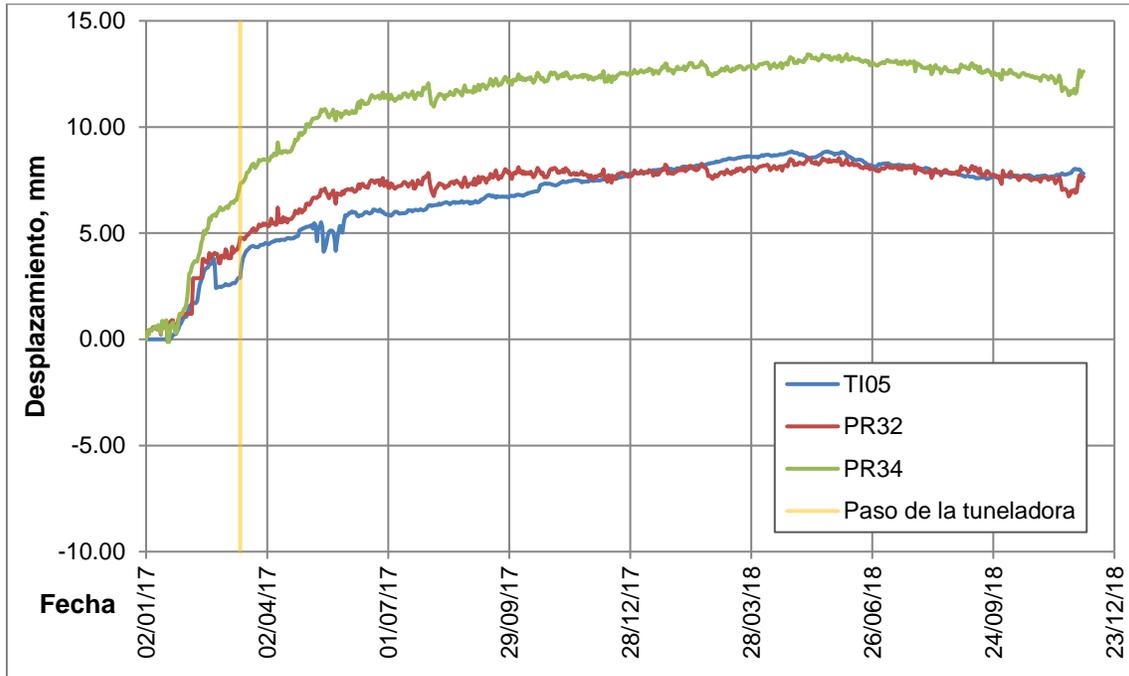


Figura 101. Desplazamiento Ote-Pte TI05, PR32 y PR34. Templo de San Francisco de Asís.

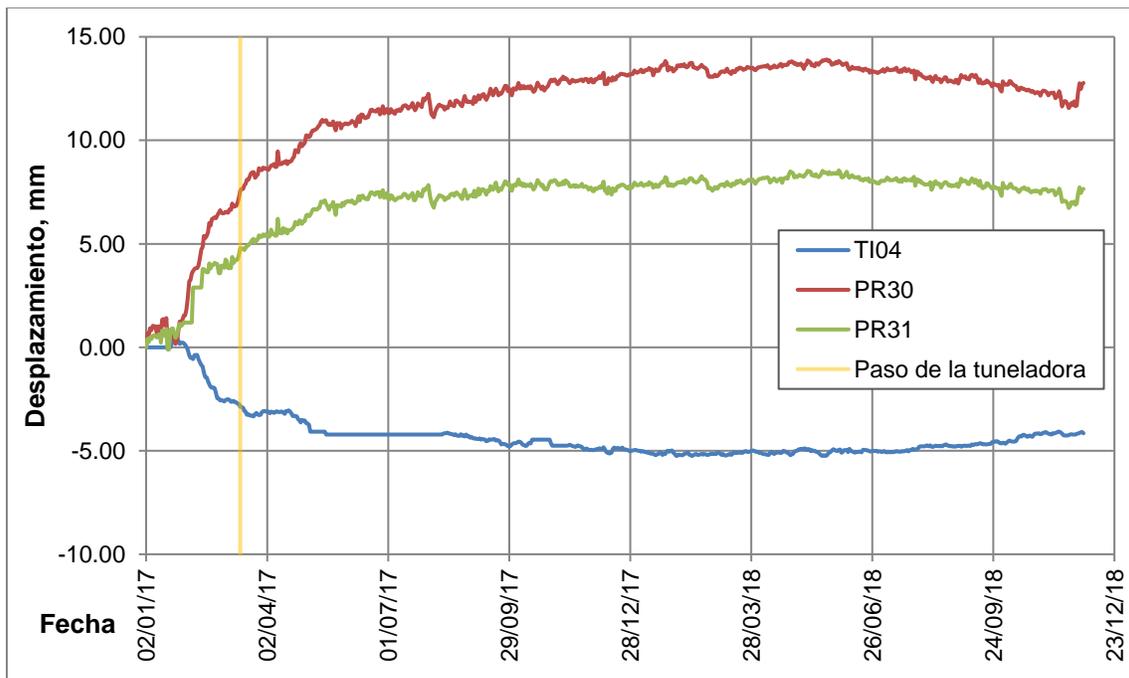


Figura 102. Desplazamiento Ote-Pte TI04, PR30 y PR31. Templo de San Francisco de Asís.

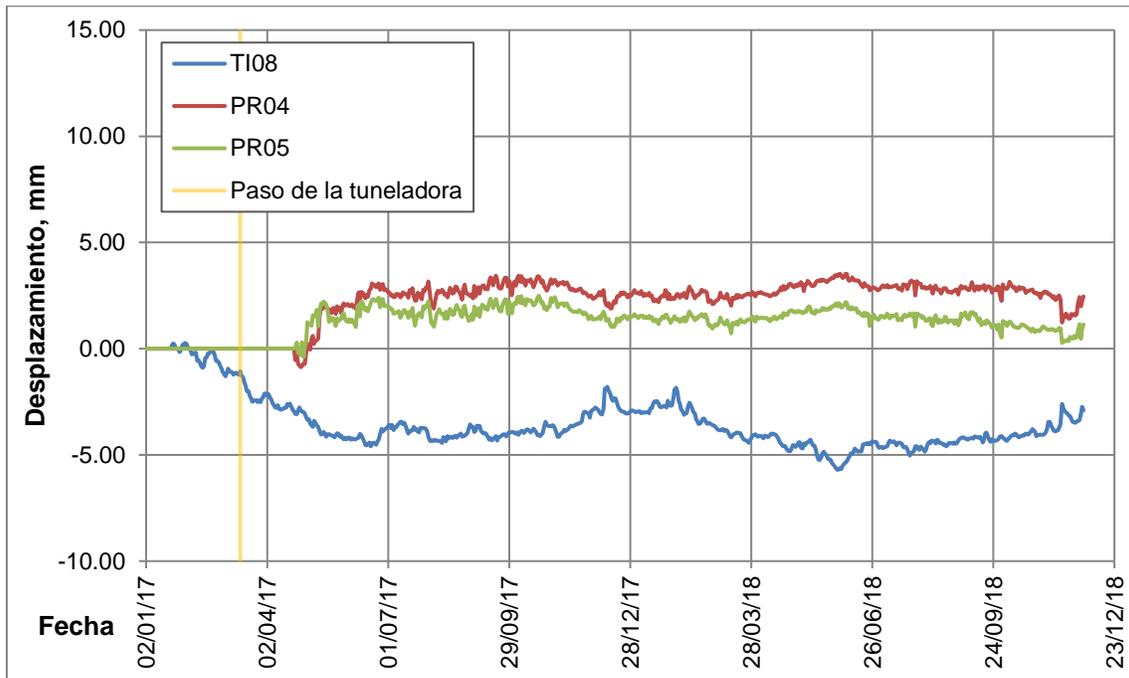


Figura 103. Desplazamiento Ote-Pte TI08, PR04 y PR05. Templo de San Francisco de Asís.

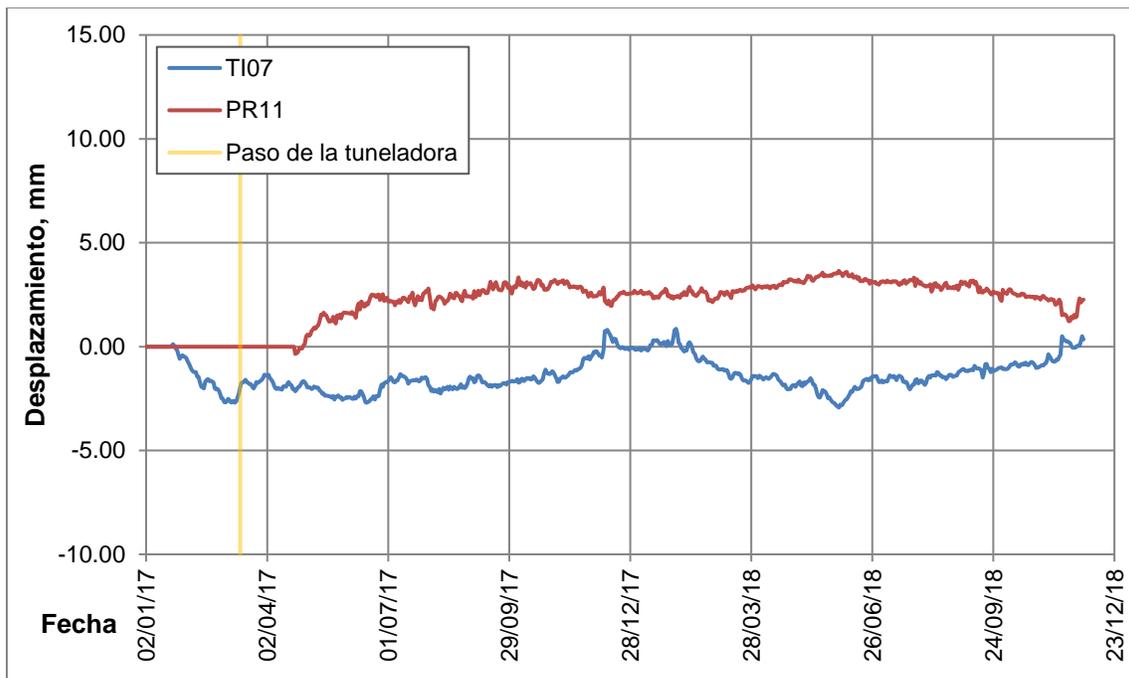


Figura 104. Desplazamiento Ote-Pte TI07 y PR11. Templo de San Francisco de Asís.

Mediante las gráficas se observa que el único *tiltmeter* con un comportamiento similar al registrado por las estaciones totales es el TI05 (figura 101), mientras que los otros presentan lecturas diferentes. Esto se asocia a errores en la calibración o en la colocación de los equipos o a incidentes que alteraron la toma de lecturas de los equipos, por lo que se sugirió revisión de estos. Así mismo, se presentan a continuación gráficas con las rotaciones Oriente-Poniente registradas con los *tiltmeters* y calculadas con las lecturas de las estaciones totales para una comparación más detallada.

Los desplazamientos comparados registrados por las estaciones totales no superan los 15 mm, y el máximo de estos, localizado en la esquina noroeste del inmueble, alcanzó los 12.77 mm (PR30, figura 102). Se advierte que el paso de la tuneladora prácticamente no afecta al desplazamiento en esta dirección.

Considerando todas las dianas reflectantes, se obtiene que el mayor desplazamiento ocurre en la torre del templo, con valores de hasta 23.08 mm debido a la altura de esta, como se observa en la figura 231 del anexo C.

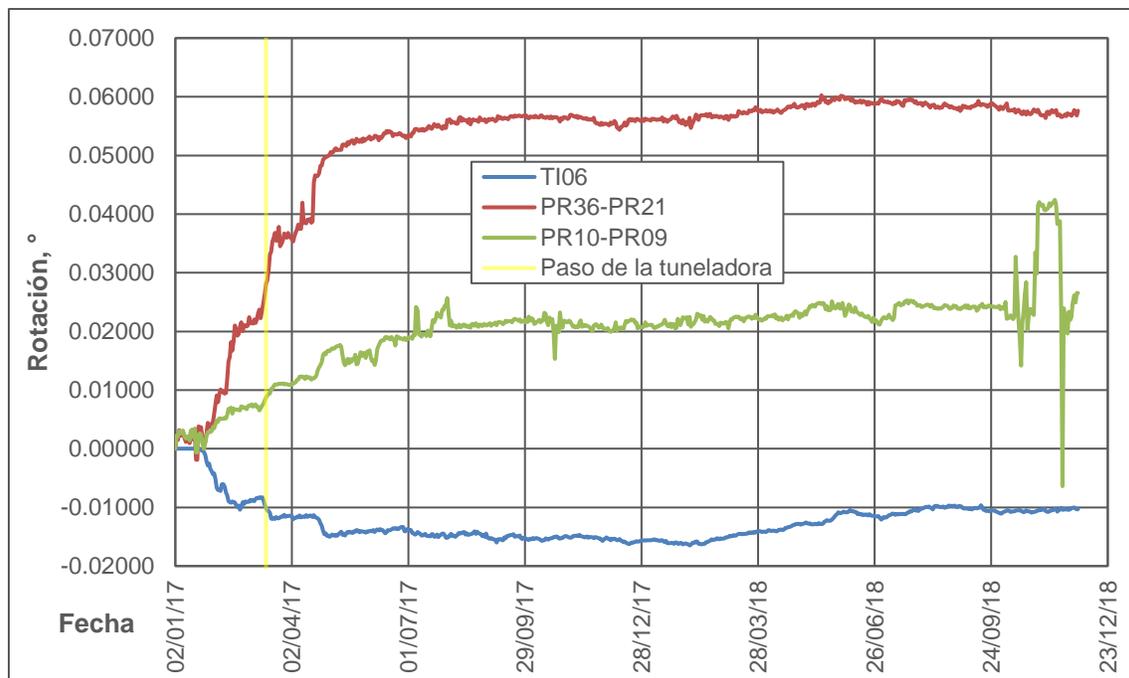


Figura 105. Rotación Ote-Pte TI06, PR36-PR21 y PR10-PR09. Templo de San Francisco de Asís.

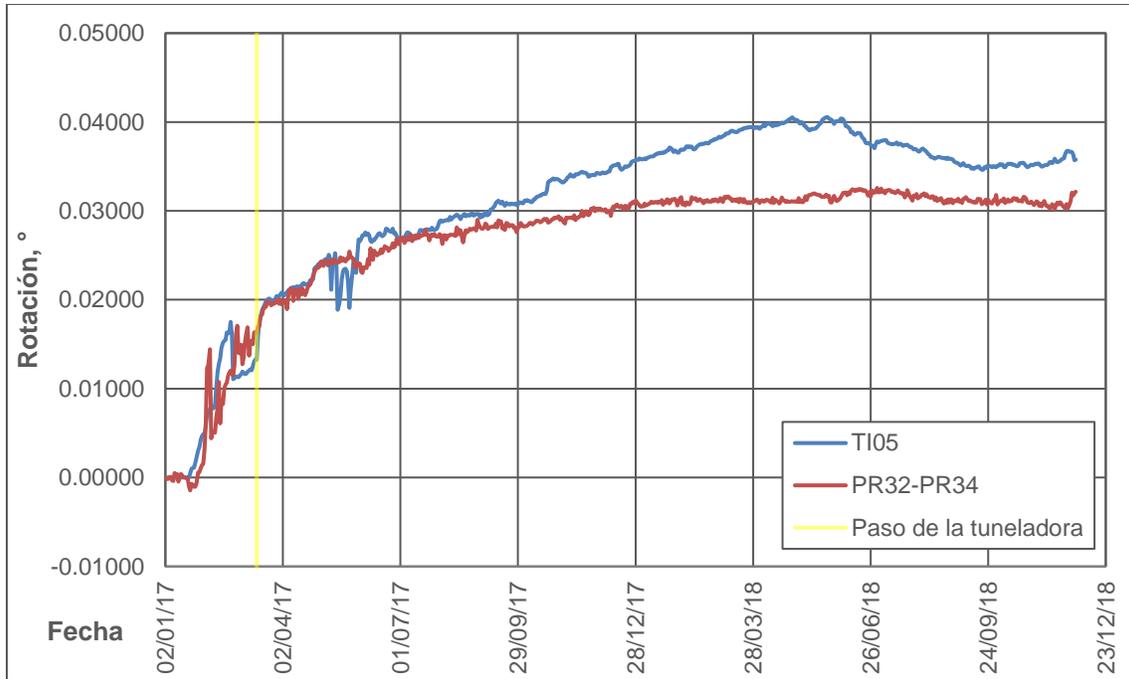


Figura 106. Rotación Ote-Pte TI05 y PR32-PR34. Templo de San Francisco de Asís.

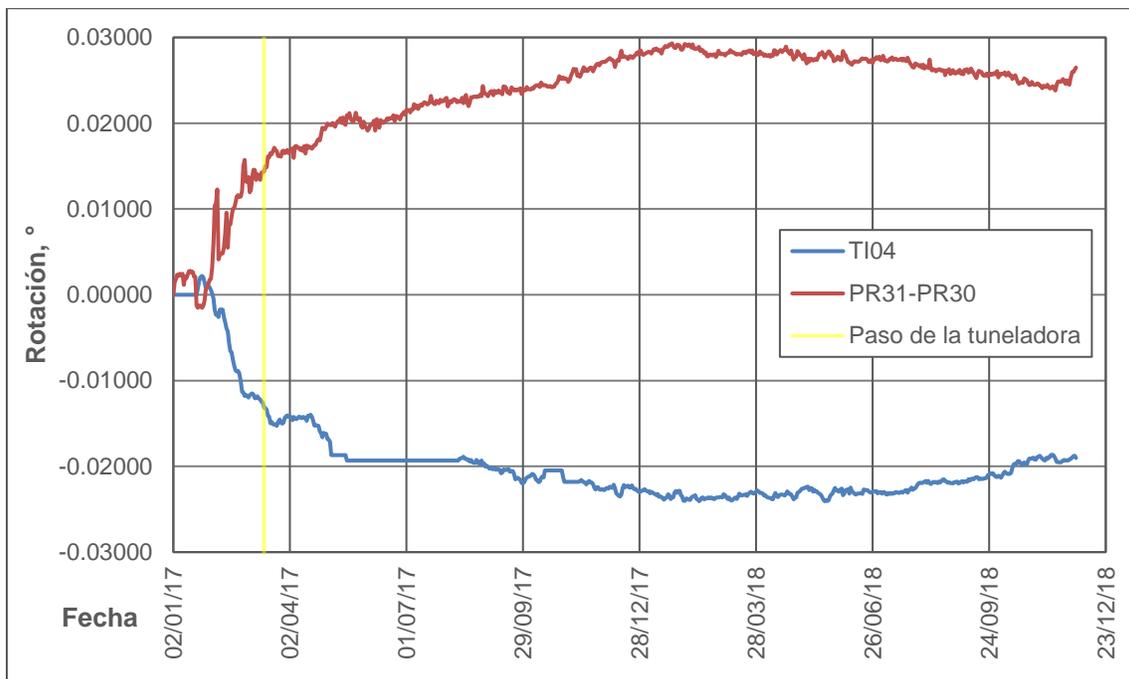


Figura 107. Rotación Ote-Pte TI04 y PR31-PR30. Templo de San Francisco de Asís.

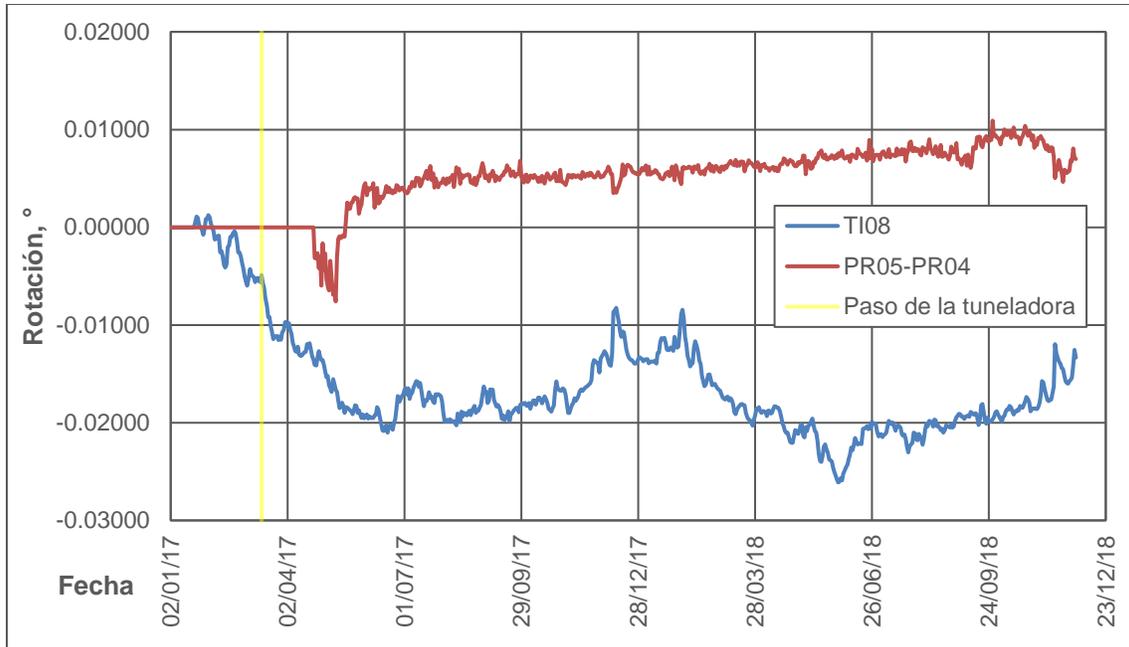


Figura 108. Rotación Ote-Pte TI08 y PR05-PR04. Templo de San Francisco de Asís.

Al igual que con los desplazamientos, se aprecia que el único *tiltmeter* cuyo comportamiento registrado es similar al registrado por las estaciones totales es el TI05 (figura 106). Por su parte, el *tiltmeter* TI08 (figura 108) muestra el fenómeno de recuperación, que puede deberse a las obras de rehabilitación en el inmueble.

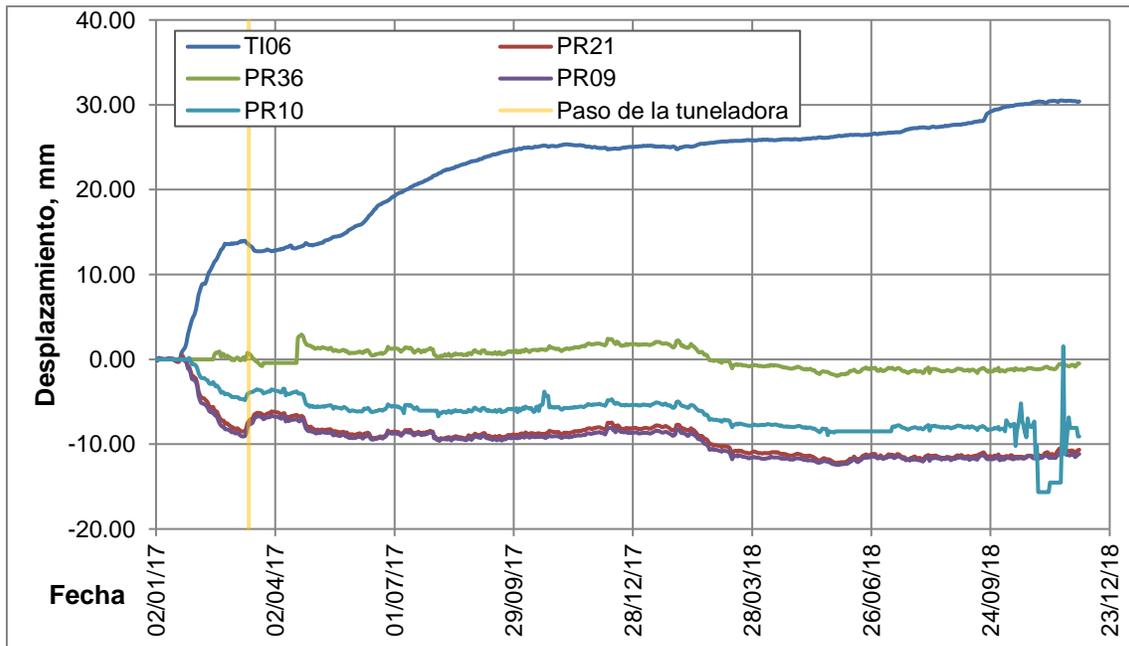


Figura 109. Desplazamiento Nte-Sur TI06, PR36, PR10, PR21 y PR09. Templo de San Francisco de Asís.

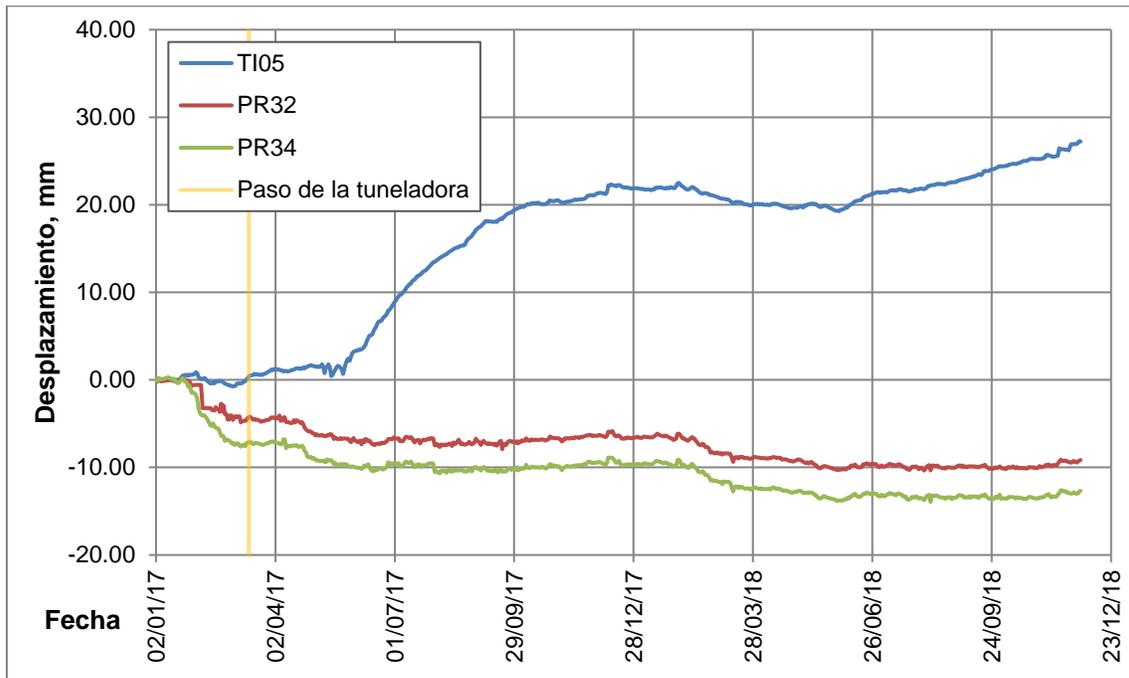


Figura 110. Desplazamiento Nte-Sur Ti05, PR32 y PR34. Templo de San Francisco de Asís.

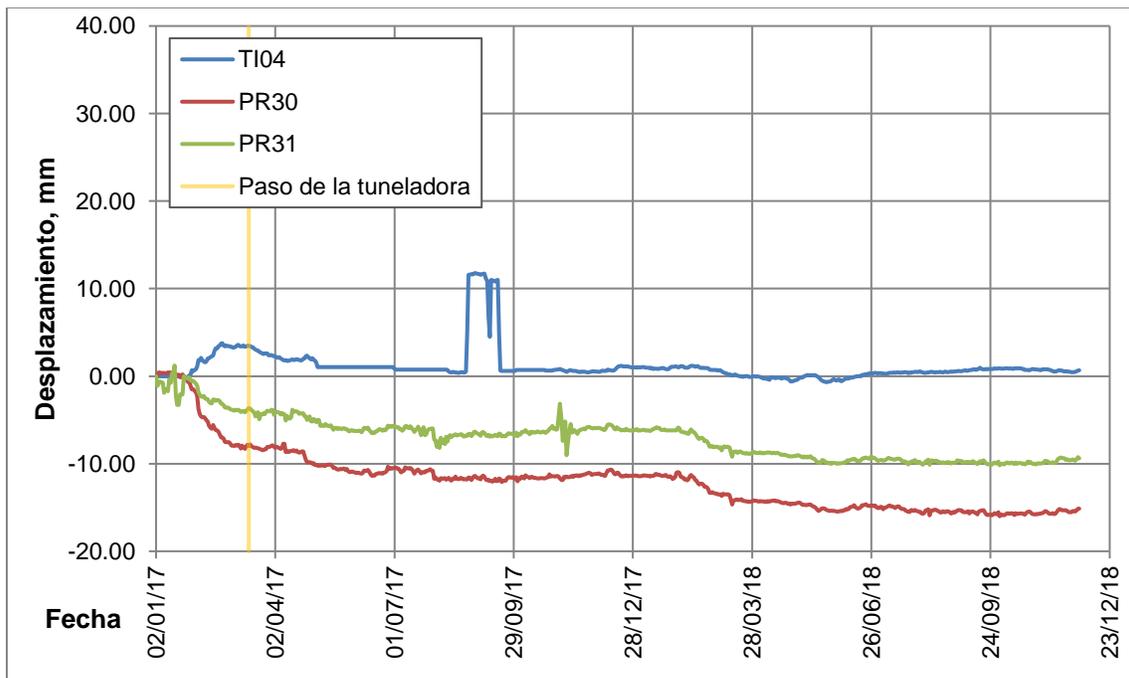


Figura 111. Desplazamiento Nte-Sur Ti04, PR30 & Pr31. Templo de San Francisco de Asís.

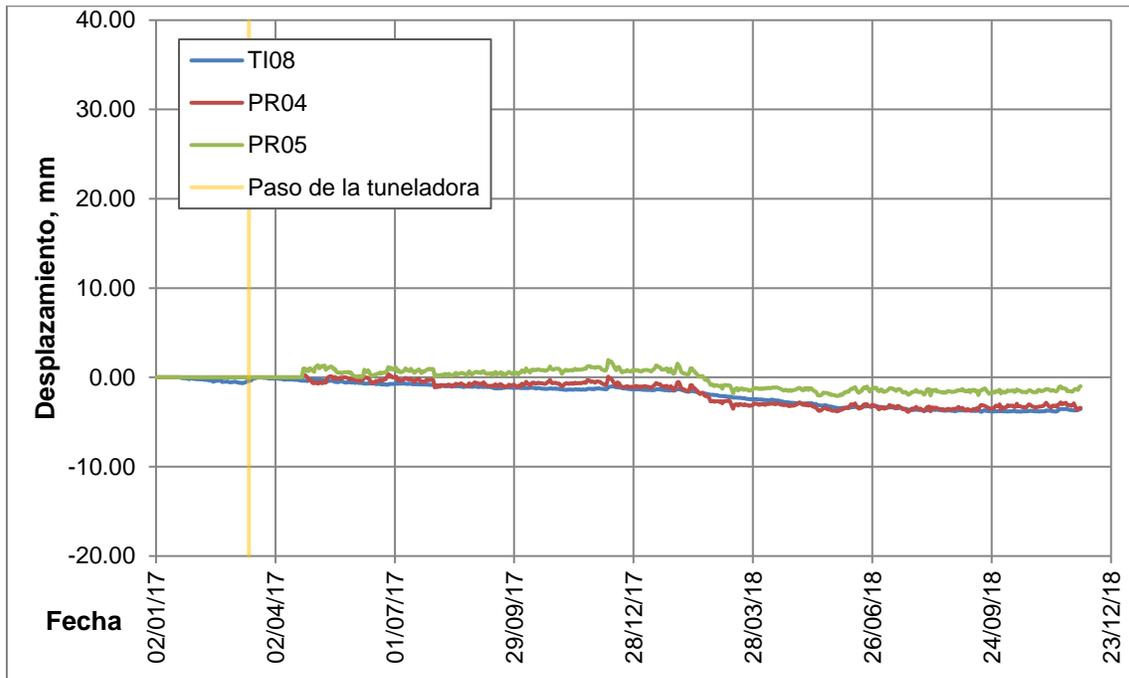


Figura 112. Desplazamiento Nte-Sur TI08, PR04 y PR05. Templo de San Francisco de Asís.

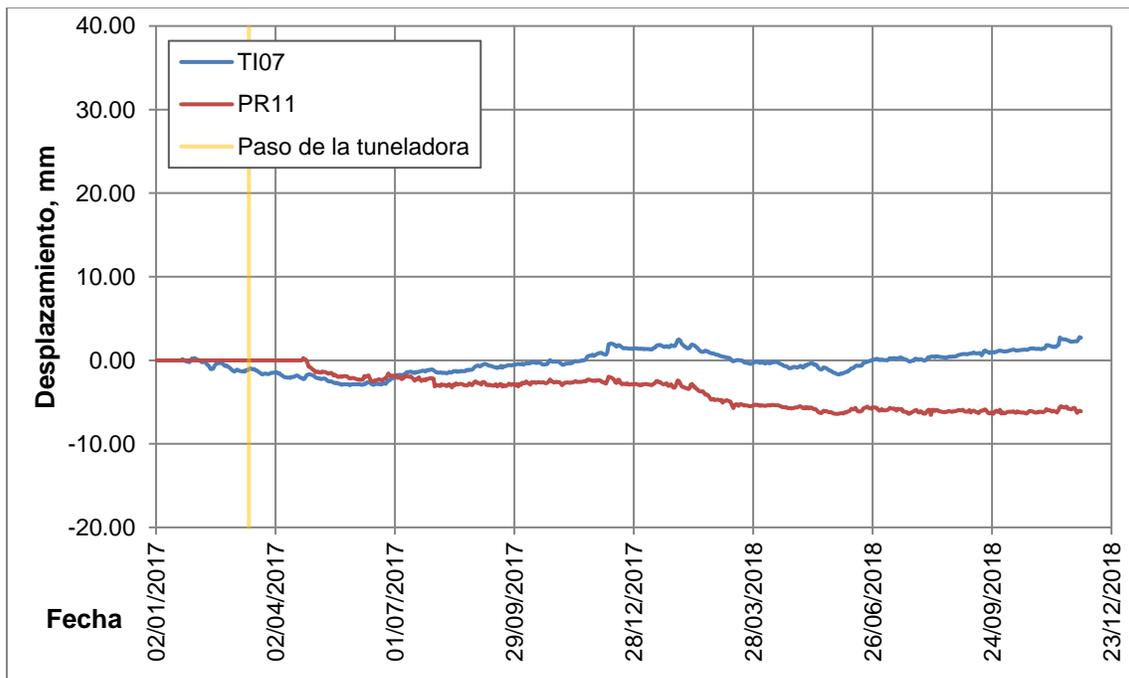


Figura 113. Desplazamiento Nte-Sur TI07 y PR11. Templo de San Francisco de Asís.

En el caso de los desplazamientos Norte-Sur, la diferencia de las lecturas entre los *tiltmeters* y las estaciones totales es observable especialmente en los *tiltmeters* TI06 y TI05 (figuras 109 y 110). Debido a esto, y a la comparación previa realizada con los clavos de nivelación, se utilizan para el análisis las medidas de las estaciones totales. En este caso, también se presenta la comparación con las rotaciones.

Se observa que la estructura alcanza a desplazarse 15.14 mm en la esquina noreste (figura 109), mientras que la torre alcanza un desplazamiento de 26.01 mm como se observa en la figura 219 del Anexo C. De igual forma se aprecia que el paso de la tuneladora no causó grandes desplazamientos en la estructura.

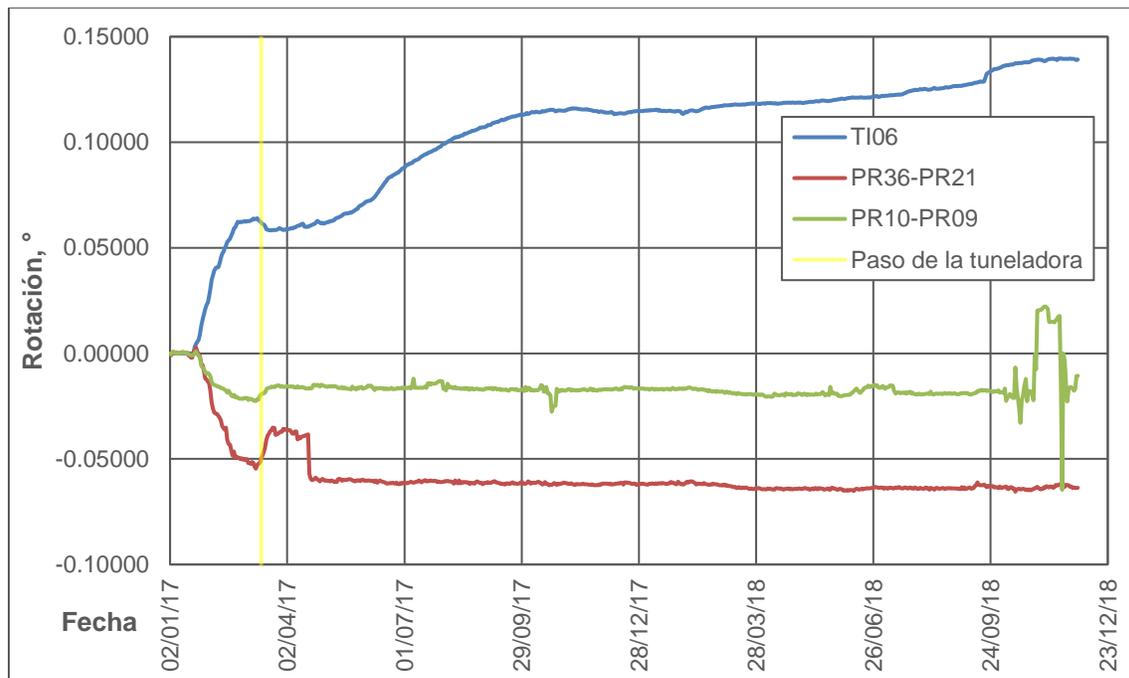


Figura 114. Rotación Nte-Sur TI06, PR36-PR21 y PR10-PR09. Templo de San Francisco de Asís.

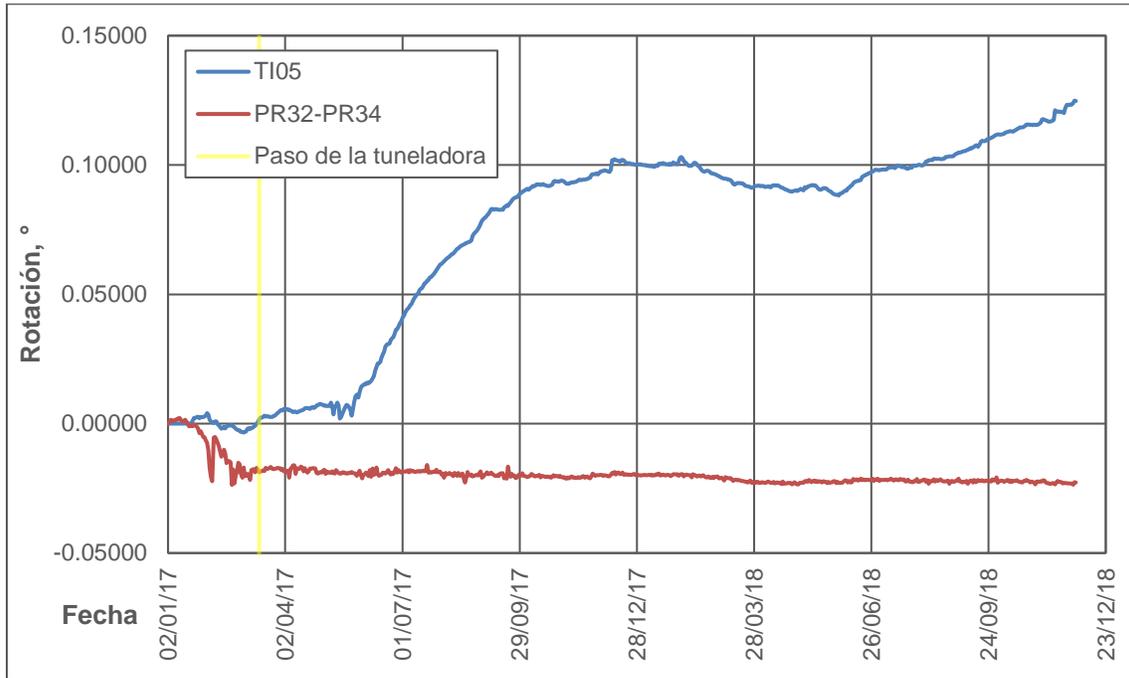


Figura 115. Rotación Nte-Sur TI05 y PR32-PR34. Templo de San Francisco de Asís.

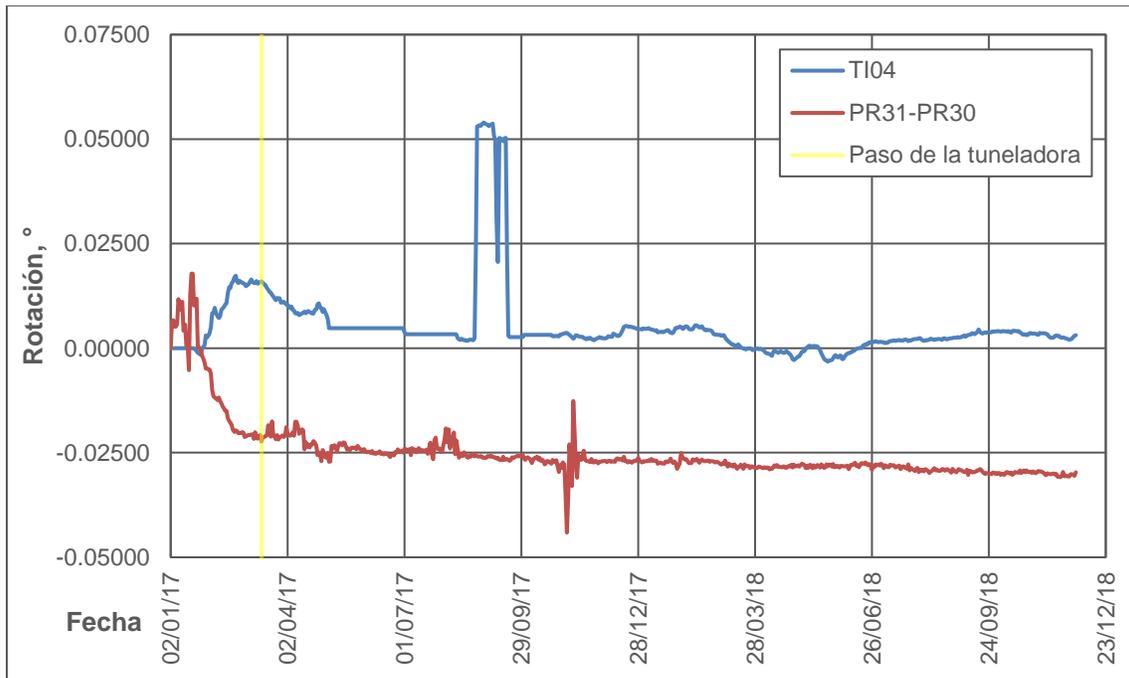


Figura 116. Rotación Nte-Sur TI04 y PR31-PR30. Templo de San Francisco de Asís.

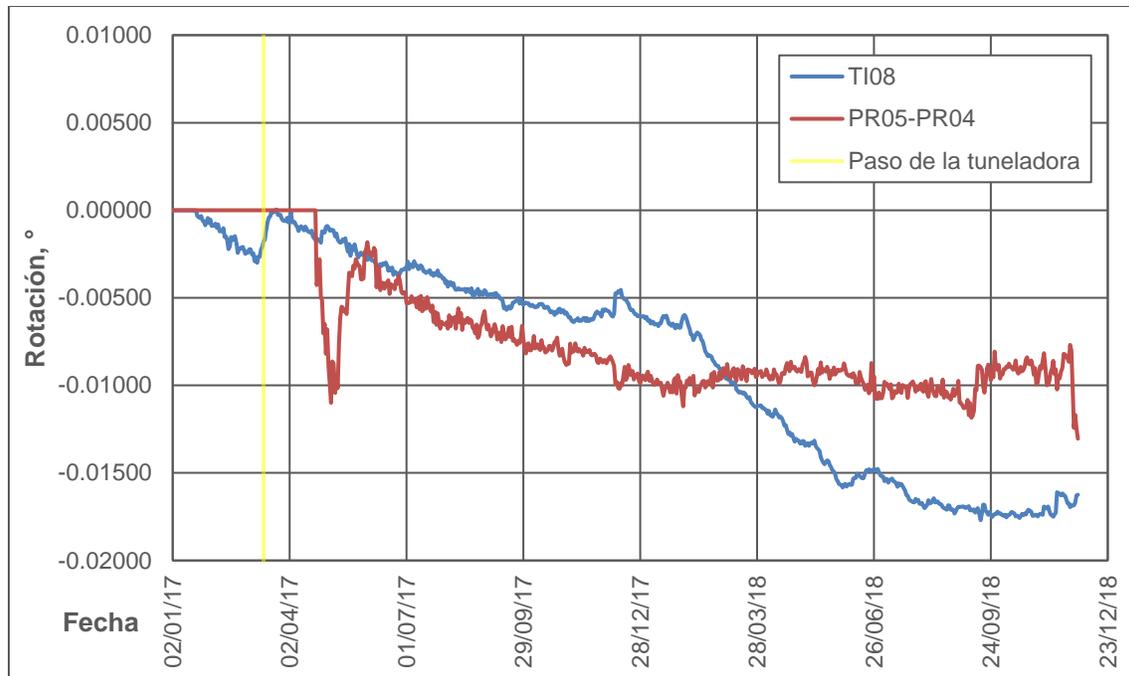


Figura 117. Rotación Nte-Sur TI08 y PR05-PR05. Templo de San Francisco de Asís.

Se observa que, en esta dirección, el único *tiltmeter* cuyo comportamiento se parece más al calculado mediante las lecturas de las estaciones totales es el TI08. En los otros casos, existen diferencias de hasta 0.1 grados.

4.4.3 Daños presentados en el inmueble.

De acuerdo con la revisión realizada por el IIUNAM, se presenta agrietamiento y apertura de juntas en arcos y muros, principalmente en la sección norte del inmueble.

En la fachada norte, hay algunas grietas verticales en la torre, así como en la parte superior de la entrada del templo. En la fachada oriente existen algunas grietas verticales en contrafuertes y en la sección sur de la misma. Además, en la azotea se observa una grieta en dirección oriente-poniente en la parte norte del inmueble.

4.4.4 Relaciones causa-consecuencia entre desplazamientos y daños.

Realizando el mismo proceso de análisis que en los inmuebles anteriores, se hace la correlación entre asentamientos, desplazamientos laterales y daños para el templo de San Francisco de Asís. Las lecturas utilizadas no consideran el

asentamiento desarrollado antes del 22 de abril de 2017 debido a la diferencia en las fechas de inicio.

Tanto la fachada norte como la sección norte de la fachada oriental (figuras 98 y 99) presentan asentamientos mayores a los 4 mm considerados para el umbral de alerta y, la esquina noreste, supera los 6 mm propuestos como umbral de acción. Así mismo, las distorsiones horizontales presentadas en la esquina superan los umbrales de alerta propuestos para los *tiltmeters* (0.00016, tabla 5) alcanzando valores de 0.00022, en la fachada norte, y de 0.00033 en la fachada oriental.

Considerando los desplazamientos horizontales, las distorsiones verticales presentadas en dirección norte-sur están por debajo del umbral de alerta (0.00016), alcanzando el valor máximo de 0.00015. Por su parte, la rotación oriente-poniente supera únicamente el umbral antes mencionado, llegando a un valor máximo de 0.00019 en el extremo oriental. Comparando con el levantamiento de daños, se observa que la mayoría de las grietas y apertura de juntas se presentan sobre la entrada norte del templo, comportamiento asociado con la flexión que de la zona, sin embargo, no se cuenta con suficiente información en esta área.

En la fachada oriente, la distorsión vertical en dirección norte-sur supera los umbrales únicamente en el plano vertical de la diana PR05, coincidiendo con las grietas verticales observadas por el personal del IIUNAM en dicha zona, así como un cambio brusco en la pendiente del perfil hundimiento del inmueble. En dirección oriente-poniente, la sección norte es la que presenta lecturas que superan los umbrales, alcanzando un valor de 0.00023 en el extremo; este desplazamiento, aunado al cambio brusco de pendiente en el hundimiento diferencial en la zona se asocia con la aparición de la grieta en dirección oriente-poniente en la azotea del edificio.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Mediante el registro, procesamiento y análisis de datos obtenidos de manera remota con un sistema de monitoreo continuo, es posible detectar síntomas de comportamiento estructural inadecuado en los inmuebles de manera oportuna.

En el caso de los inmuebles históricos es recomendable implementar este tipo de sistema, especialmente en aquellos que presentan anomalías en su comportamiento o serán sometidos a fuerzas externas, como en el caso del presente trabajo, ya que permite elaborar una base de desplazamientos y deformaciones detallada. Esta información puede ser utilizada para comprender su relación con los daños generados en el edificio, alertar en caso de un comportamiento inusual de la estructura, implementar limitaciones en los desplazamientos como parte del monitoreo de construcciones en las inmediaciones de otros edificios, o como punto de partida para desarrollar investigaciones acerca del comportamiento presentado en otras estructuras similares.

La interpretación del comportamiento y los daños observados en los inmuebles históricos estudiados muestra la relación causa-consecuencia entre los desplazamientos laterales y el asentamiento diferencial provocado por las excavaciones del tren ligero en las estructuras. Se observa que son especialmente dañinos aquellos asentamientos diferenciales en los que las distorsiones horizontales de segmentos contiguos de la estructura presentan una diferencia mayor a 0.0005, comportamiento relacionado con la presencia de flexión.

Al llevar a cabo la comparación de los umbrales de control propuestos para asentamientos y distorsiones verticales de los inmuebles históricos analizados en este trabajo (tabla 5) con los propuestos por Meli y Hernández (tabla 4), se observa que son conservadores; esto considerando que el límite de mayor valor propuesto es 33% menor al planteado en la tabla para piezas no confinadas.

En cuanto a la comparación con los umbrales para la construcción del metro de Santiago (tabla 3), se observa que existe cierta similitud; debido a que a pesar de que los límites de asentamientos propuestos para los inmuebles de Guadalajara son menores, los planteados para distorsiones en el caso particular del Templo de San

José de Gracia son superiores a los establecidos para las obras de la ciudad de Santiago.

En los tres inmuebles existen puntos en los que se superaron los límites propuestos sin que se presentaran daños grandes o visibles en la estructura. Sin embargo, se aprecia la importancia proponer umbrales de control adicionales, especialmente para el asentamiento diferencial, pues el desarrollo de flexión en la base de la estructura es de las causas principales del agrietamiento y separación de juntas. Para monitoreos posteriores, se recomienda realizar estudios complementarios que permitan definir umbrales para los asentamientos diferenciales que se pueden presentar en un edificio patrimonial.

El monitoreo continuo mediante equipos automatizados y manuales permite realizar lecturas en intervalos de tiempo más cortos y registrar el comportamiento estructural por largos periodos, facilitando el manejo de los datos al guardarlos en bases digitales. Esto es especialmente útil para la conservación de edificios históricos u otras estructuras de relevancia que sean susceptibles o presenten problemas estructurales.

No obstante, el uso de subsistemas de monitoreo automatizado presenta ciertas limitaciones para su implementación. Como se pudo observar en el desarrollo del presente trabajo, existe la posibilidad de que algunos de los instrumentos colocados en los inmuebles proporcionen lecturas erróneas que no coinciden con el comportamiento de la estructura ya sea por mala calibración, mala colocación o accidentes que afectan su funcionamiento; para ello es necesario contar con diferentes instrumentos, cuya información redundante permita validar las lecturas registradas.

Ejemplo de esto son los *tiltmeters* colocados en el Templo de San Francisco de Asís y en la Catedral Metropolitana, con registros que no coinciden con el comportamiento real de la estructura, los *tiltmeters* TI12 y TI16 del Sagrario Metropolitano; y las dianas de las fachadas poniente y sur de la Catedral y el Sagrario Metropolitano, que presentan desplazamientos anómalos posteriores al

paso de la tuneladora. En el caso de San Francisco, los *tiltmeters* se revisaron tras el análisis.

Se sugiere que se coloquen por lo menos dos *tiltmeters* en el mismo eje vertical, de tal manera que se puedan comparar los comportamientos entre ellos e identificar si se presenta flexión perpendicular al plano de los muros. Esto es especialmente importante en las estructuras con elementos altos, pues son las más susceptibles a daños por flexión vertical y son las que presentarían mayores desplazamientos.

Otro requerimiento del sistema para el correcto funcionamiento es dar mantenimiento, corroborar y calibrar los equipos de manera constante. Finalmente, se recomienda que el registro de las lecturas inicie en la misma fecha para todos los instrumentos del sistema pues de lo contrario, el análisis y la comparación de estas lecturas podría excluir desplazamientos importantes, como lo sucedido con los asentamientos en el Templo de San Francisco de Asís.

Así pues, la implementación de un sistema de monitoreo continuo que utilice subsistemas manuales y electrónicos se debe llevar a cabo de manera meticulosa, estableciendo los umbrales de alerta apropiados, para que la toma e interpretación de las lecturas sea correcta y permita establecer de forma certera el comportamiento estructural de los edificios históricos, protegiendo así el patrimonio cultural que estos representan.

REFERENCIAS

Cabello Gómez, Benito (2017) *Análisis de la subsidencia de la Línea 3 del Metro Urbano de Guadalajara (México)*. Trabajo de obtención de título. Maestría en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Sevilla, España. Universidad de Sevilla.

Cardu, M. y Oreste, P. (2011) *Tunnelling in urban areas by EPB machines: technical evaluation of the system*. [versión electrónica] Earth Sciences Research Journal. Universidad Nacional de Colombia. Vol. 15(1). 5-11.

Dirección General de Estadística (1943) *Estados Unidos Mexicanos 6° Censo de Población 1940. Jalisco*. [versión electrónica] Secretaría de la Economía Nacional. México.

Dirección General de Estadística (1952) *Séptimo Censo General de Población. Estado de Jalisco*. [versión electrónica] Secretaría de la Economía Nacional. México.

Dirección General de Estadística (1963) *VIII Censo General de Población. 1960. Estado de Jalisco*. [versión electrónica] Secretaría de Industria y Comercio. México.

Dirección General de Estadística (1971) *IX Censo General de Población. 1970. Estado de Jalisco*. [versión electrónica] Secretaría de Industria y Comercio. México.

EFE (2017, 19 de octubre) *Tuneladora del AVE Barcelona-París moderniza el transporte en Guadalajara*. [en línea] Agencia EFE. Recuperado el 11 de octubre de 2018 de <https://www.efe.com/efe/america/mexico/tuneladora-del-ave-barcelona-paris-moderniza-el-transporte-en-guadalajara/50000545-3413182>

González Pérez, M. G. y López Lara, L. F. (2018) Entropía del crecimiento habitacional en el Río Blanco de la metrópoli de Guadalajara, México. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Vol. 39(2) Recuperado el 19 de octubre de 2018 de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000200008

Herrera Canto, M. (2008) Las Zonas Metropolitanas de México [Presentación de PowerPoint]. INEGI. Recuperada de: <http://mapserver.inegi.org.mx/eventos/cng2008/RNG2008/zonas-metropolitanas.pptx>

ICOMOS (1964) *Carta internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios*. Venecia, Italia.

Instituto Nacional de Antropología e Historia (2009) *Conocimientos básicos del INAH*. [Presentación de PowerPoint]. INAH Recuperada de: https://gobiernodigital.inah.gob.mx/Proyectos/servicio_profesional_carrera/temp/conocimientos_basicos_INAH.pdf

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1984) X Censo General de Población y Vivienda, 1980. [versión electrónica] INEGI. México. Vol. I (14).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018) *México en Cifras. Jalisco*. Recuperado el 12 de octubre de 2018 de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=14>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018) *Banco de Información Económica. Principales características de los sistemas de transporte eléctrico en la ciudad de Guadalajara. Tren eléctrico Urbano*. Recuperado el 15 de octubre de 2018 de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/?idserpadre=10900530&d10900530#D10900530>

Lunardi, P. (2008) *Design and Construction of Tunnels. Analysis of controlled deformations in rocks and soils (ADECO-RS)*. Berlin. Springer.

Meli Piralla, R. y Hernandez, O. (1975) *Efectos de hundimientos diferenciales en construcción a base de muros de mampostería*. UNAM. México.

Orozco-Martín, S. O. (2015) *Caracterización de arena pumíticas del área metropolitana de Guadalajara para su uso en muros de tierra compactada*. Trabajo de obtención de grado, Maestría en Proyectos y Edificación Sustentable. Tlaquepaque, Jalisco: ITESO

Oteo Mazo, C. y Rodríguez Ortiz, J. M. (1997) *Subsidencia y auscultación de los túneles del metro de Madrid*. [versión electrónica] Revista de Obras Públicas. Octubre. No. 3369.

Rey González, M. A. (2016) *Análisis de la instrumentación y del monitoreo geotécnico en túneles estación e interestación del metro de Santiago*. Trabajo de obtención de título. Ingeniero civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile.

Rodríguez Rodríguez, K. J. (2014) *Subsidencia por la construcción de túneles en suelos blandos saturados*. Trabajo de obtención de grado, Maestría en Ingeniería – Geotécnica. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

Romo, P. (2017, 19 de octubre) *Industriales urgen a construir Línea 4 del tren ligero*. [en línea] El Economista. Recuperado el 11 de octubre de 2018 de <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Industriales-urgen-a-construir-Linea-4-de-tren-ligero-20171019-0182.html>

Siqueiros, L. F. (2009) *El territorio, el medio ambiente y las condiciones urbanas*. En *Diagnóstico sobre la realidad social, económica y cultural de los entornos locales para el diseño de intervenciones en materia de prevención y erradicación de la violencia en la región centro: el caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco* (pp. 24-61) [versión electrónica]. México. Comisión Nacional para Prevenir y Erradicar la Violencia contra las Mujeres.

Sánchez Ramírez, A. R. y Meli Piralla, R. (2016) *Estudios para evaluar la incidencia en los edificios históricos de las obras de la nueva Línea 3 del metro de la ciudad de Guadalajara*. Instituto de Ingeniería. UNAM. México.

Tamez González, E., Rangel Núñez, J. L. y Holguín, E. (1997) *Diseño geotécnico de túneles*. México. TGC Geotecnia.

UNESCO (1968) *Recomendación sobre la Conservación de los Bienes Culturales que la Ejecución de Obras Públicas o Privadas puedan poner en Peligro*. París, Francia. Recuperado de http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13085&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

Vázquez Ortiz, C. A. y Pastrán Beltrán, C. G. (2013) *Camas drenantes bajo las líneas de drenaje de la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG)*. *Tecnura*. Vol. 17(38). Recuperado el 09 de octubre de 2018 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2013000400007#f8

Venegas, A. y Castañeda, P. (2005) *El crecimiento urbano y las características socioeconómicas de la Zona Metropolitana de Guadalajara: la generación de áreas pauperizadas*. [versión electrónica] *Carta económica regional*. Año 7(94). 3-15.

ANEXOS

ANEXO A. Gráficas del Templo de San José de Gracia

ANEXO B. Gráficas de la Catedral Metropolitana

ANEXO C. Gráficas del Templo de San Francisco de Asís

ANEXO D. Macro de actualización

ANEXO A. Gráficas del Templo de San José de Gracia.

Desplazamiento Norte-Sur de dianas reflectantes en fachada poniente.

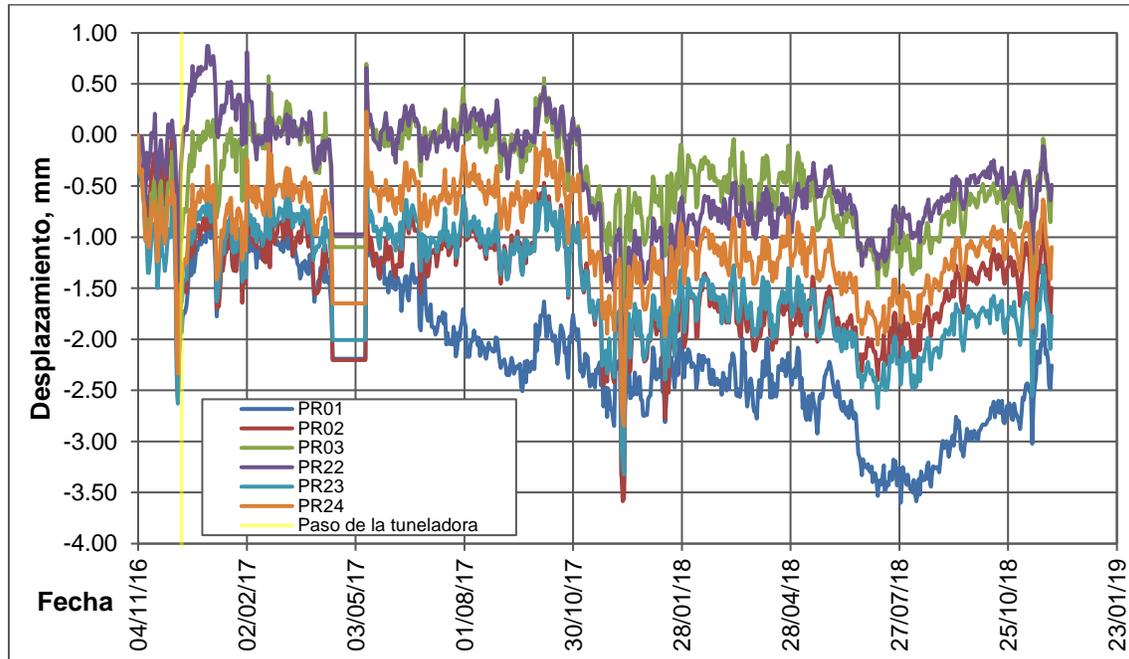


Figura 118. Desplazamiento Nte-Sur PR01, PR02, PR03, PR22, PR23 y PR24. Templo de San José de Gracia.

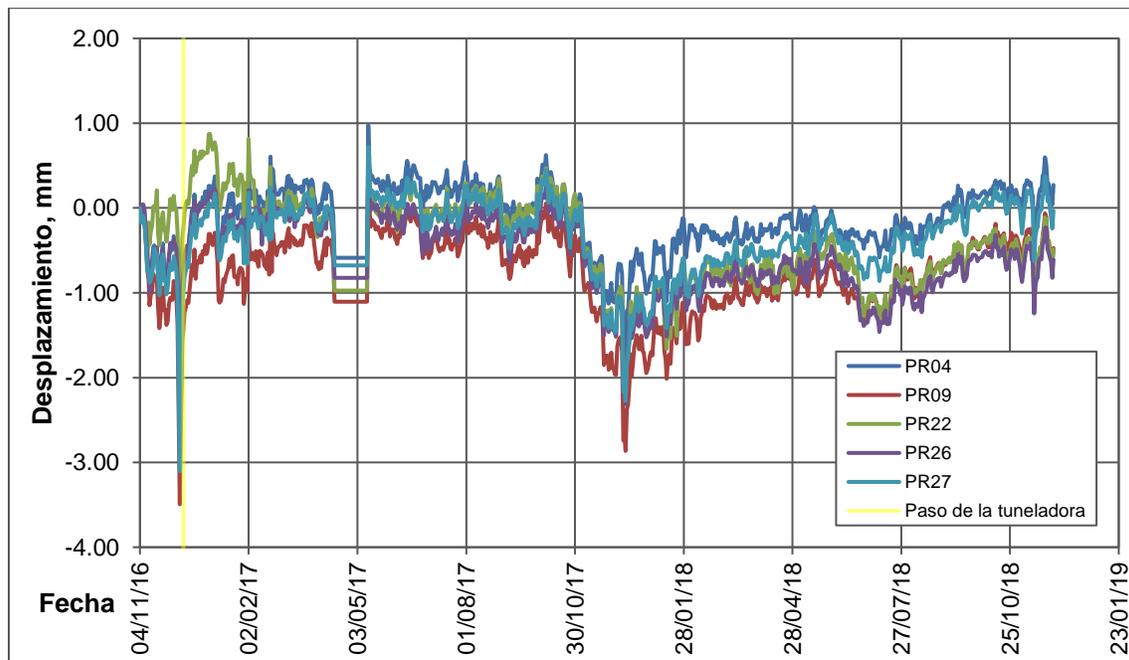


Figura 119. Desplazamiento Nte-Sur PR04, PR09, PR22, PR26 y PR27. Templo de San José de Gracia.

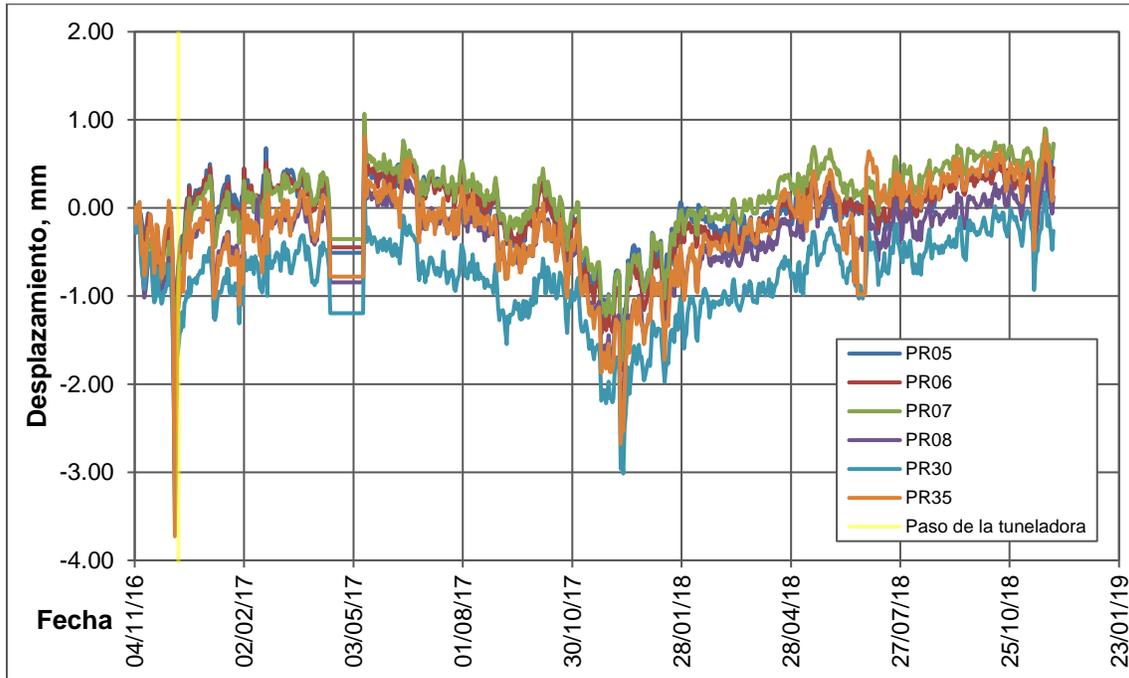


Figura 120. Desplazamiento Nte-Sur PR05, PR06 PR07, PR08, PR30 y PR35. Templo de San José de Gracia.

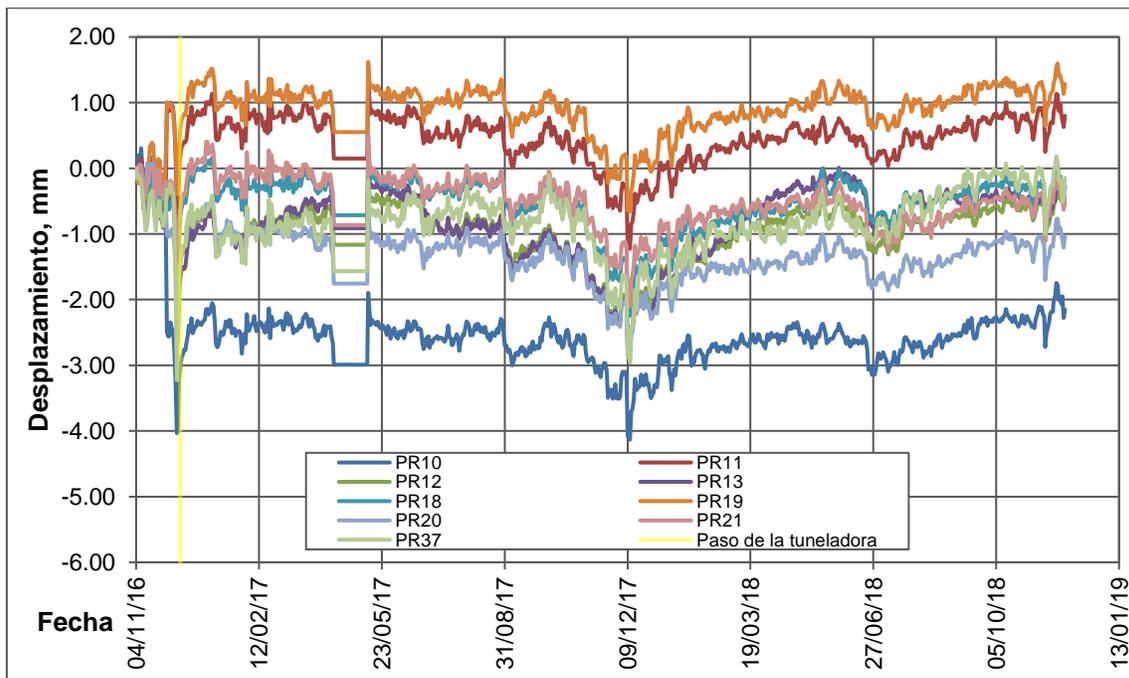


Figura 121. Desplazamiento Nte-Sur PR10, PR11, PR12, PR13, PR18, PR19, PR20, PR21 y PR37. Templo de San José de Gracia.

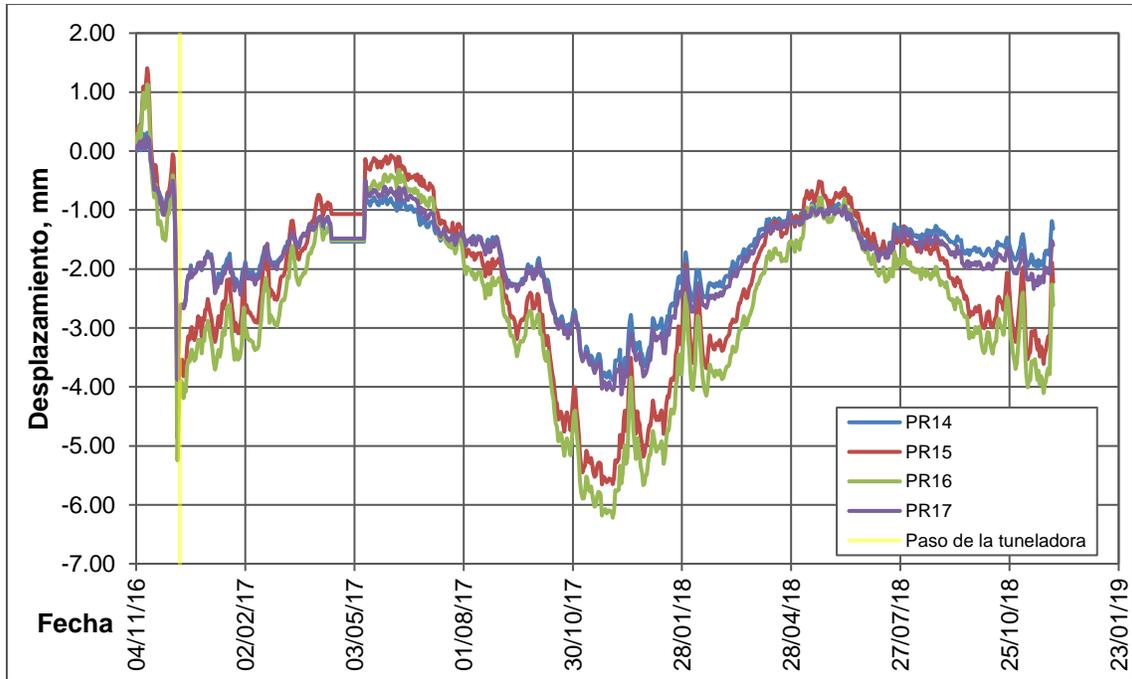


Figura 122. Desplazamiento Nte-Sur PR14, PR15, PR16 y PR17. Templo de San José de Gracia.

Desplazamiento Norte-Sur de dianas reflectantes en fachada sur.

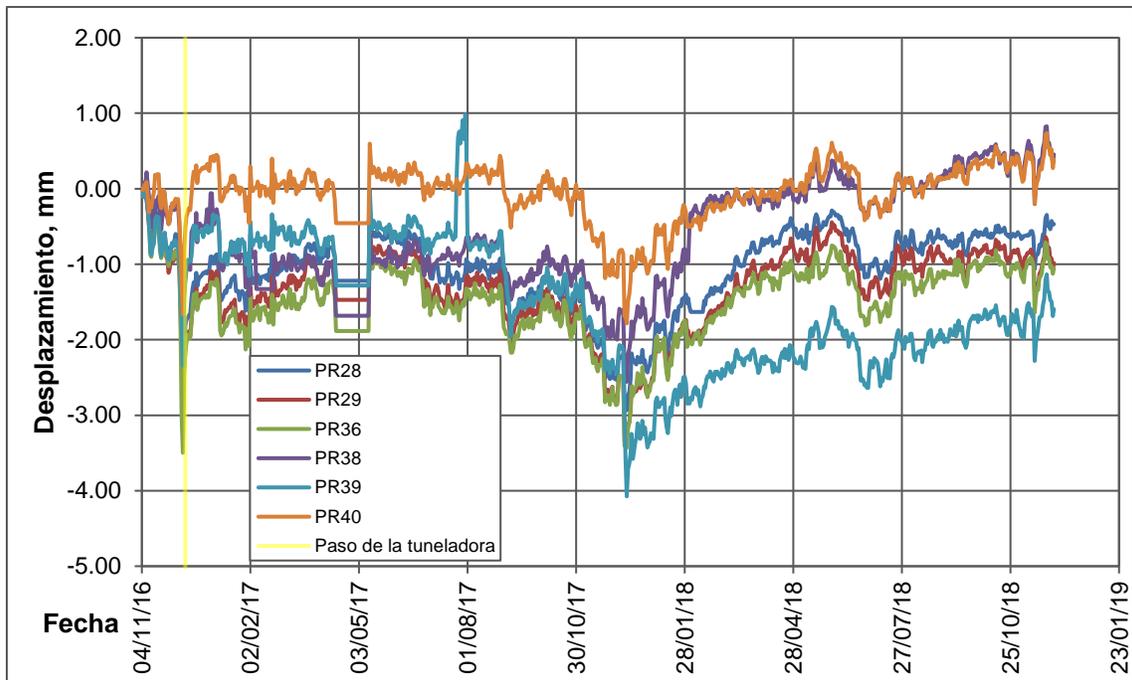


Figura 123. Desplazamiento Nte-Sur PR28, PR29, PR38, PR39 y PR40. Templo de San José de Gracia.

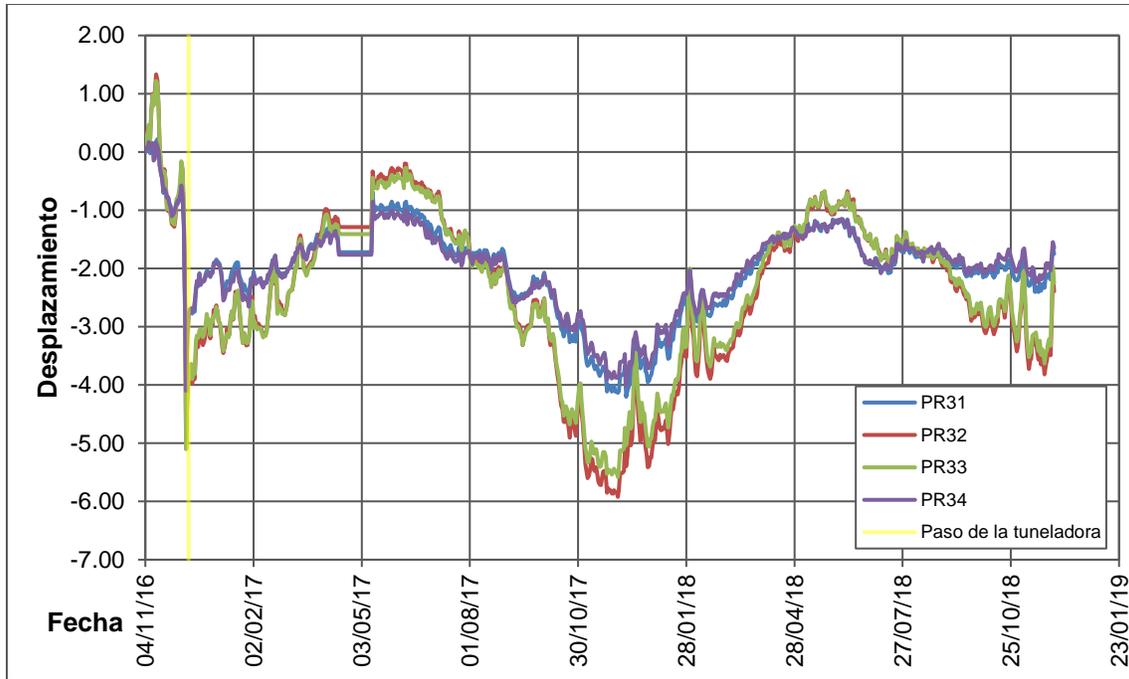


Figura 124. Desplazamiento Nte-Sur PR31, PR32, PR33 y PR34. Templo de San José de Gracia.

Desplazamiento Oriente-Poniente de dianas reflectantes en fachada poniente.

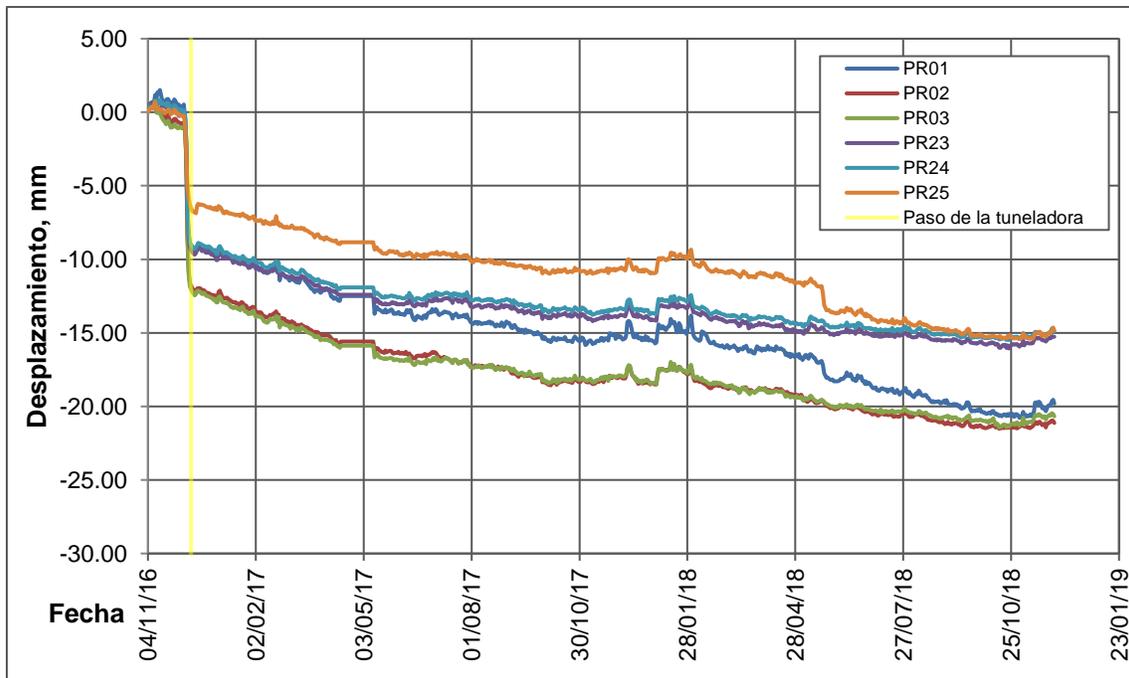


Figura 125. Desplazamiento Ote-Pte PR01, PR02, PR03, PR23, Pr24 y PR25. Templo de San José de Gracia.

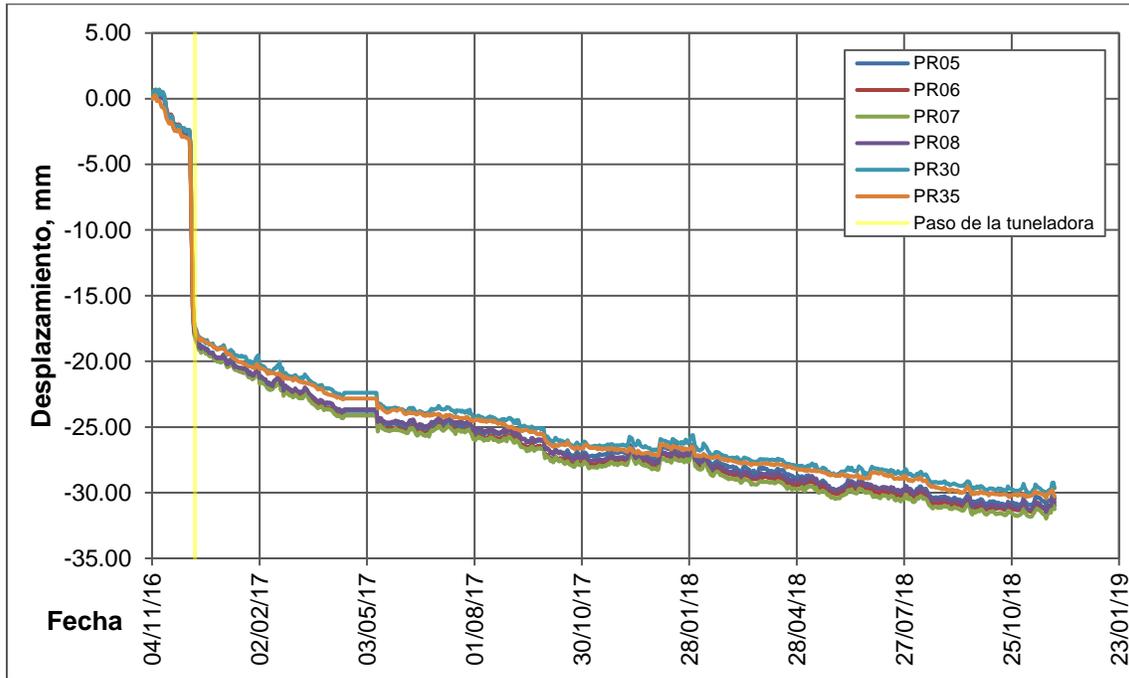


Figura 126. Desplazamiento Ote-Pte PR05, PR06, PR07, PR08, PR30 y PR35. Templo de San José de Gracia.

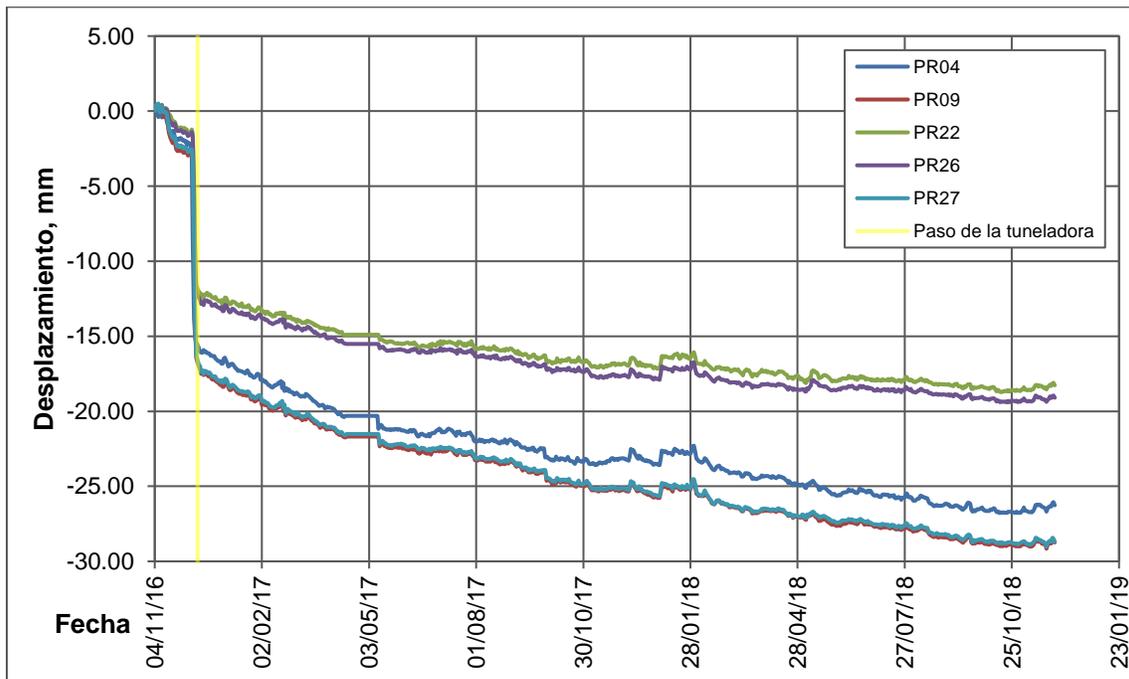


Figura 127. Desplazamiento Ote-Pte PR04, PR09, PR22, PR26 y PR27. Templo de San José de Gracia.

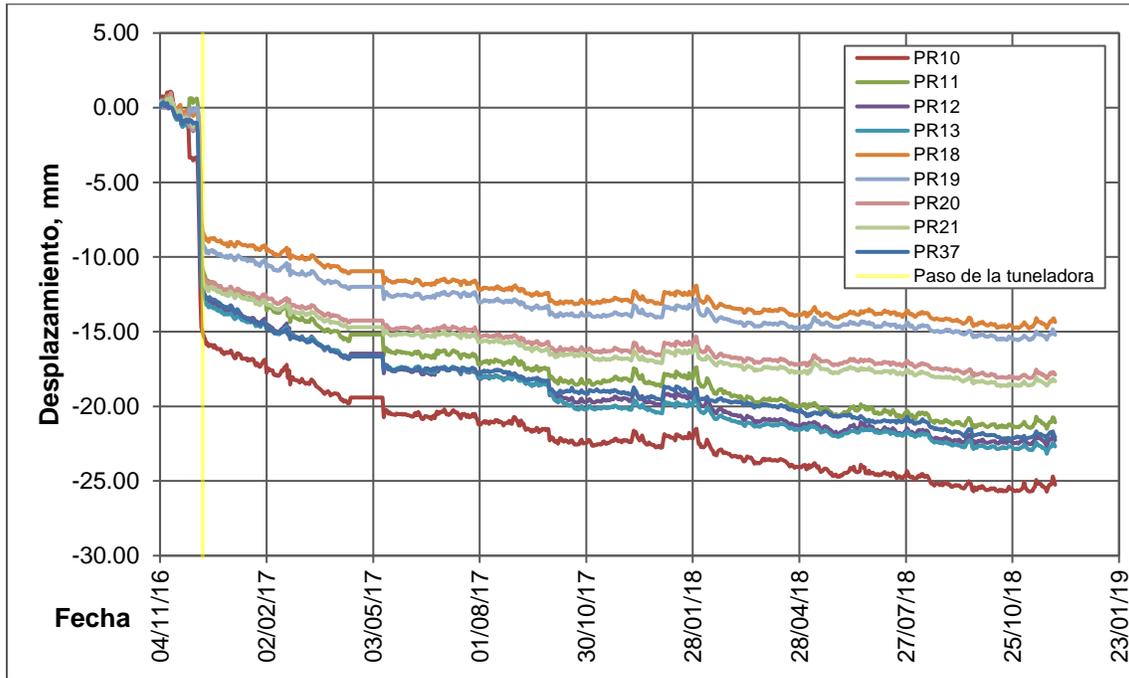


Figura 128. Desplazamiento Ote-Pte PR10, PR11, PR12, PR13, PR18, PR19, PR20, PR21 y PR37. Templo de San José de Gracia.

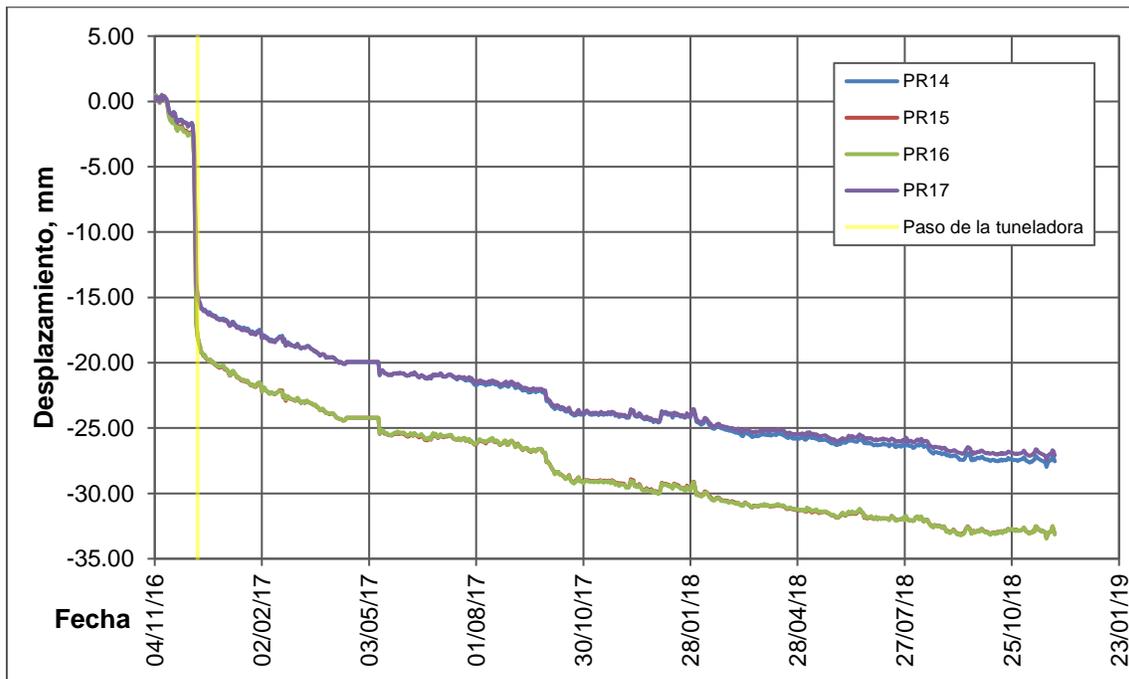


Figura 129. Desplazamiento Ote-Pte PR14, PR15, PR16 y PR17. Templo de San José de Gracia.

Desplazamiento Oriente-Poniente de dianas reflectantes en fachada sur.

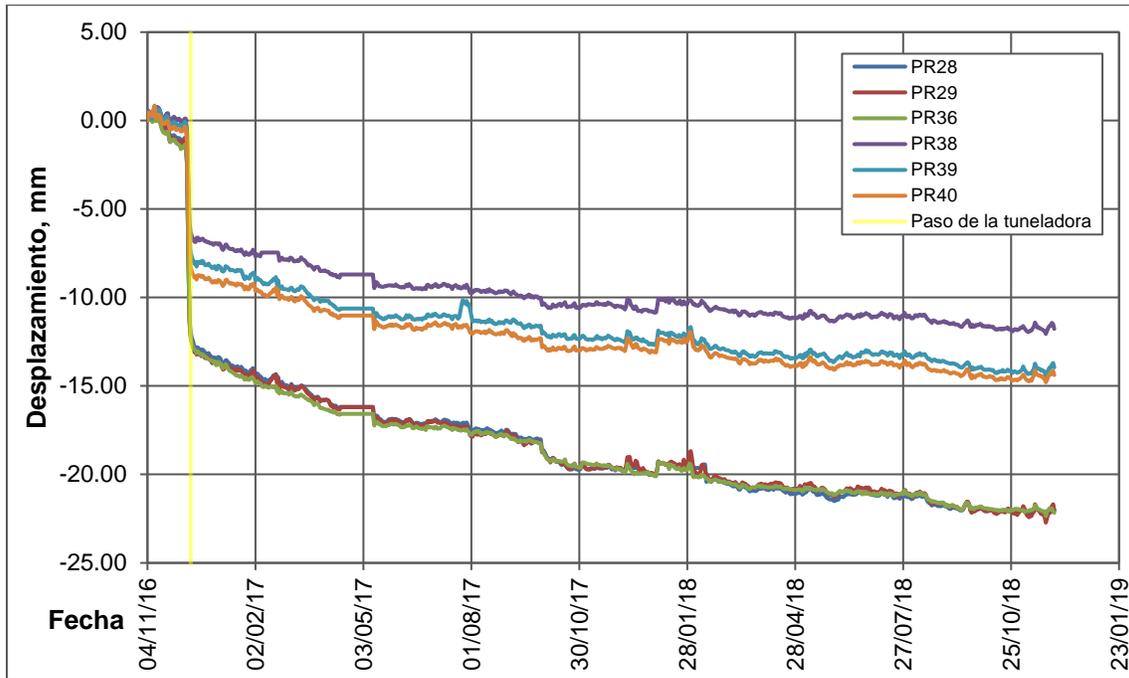


Figura 130. Desplazamiento Ote-Pte PR28, PR29, PR36, PR38, PR39 y PR40. Templo de San José de Gracia.

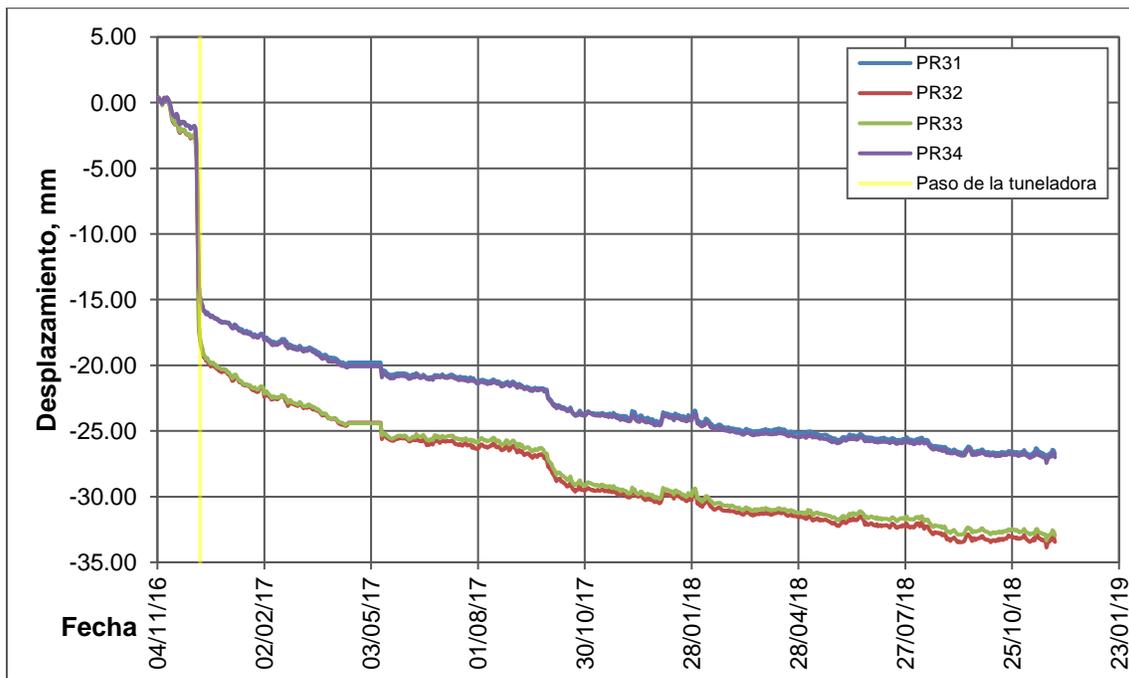


Figura 131. Desplazamiento Ote-Pte PR31, PR32, PR33 y PR34. Templo de San José de Gracia.

Asentamiento de dianas reflectantes en fachada poniente.

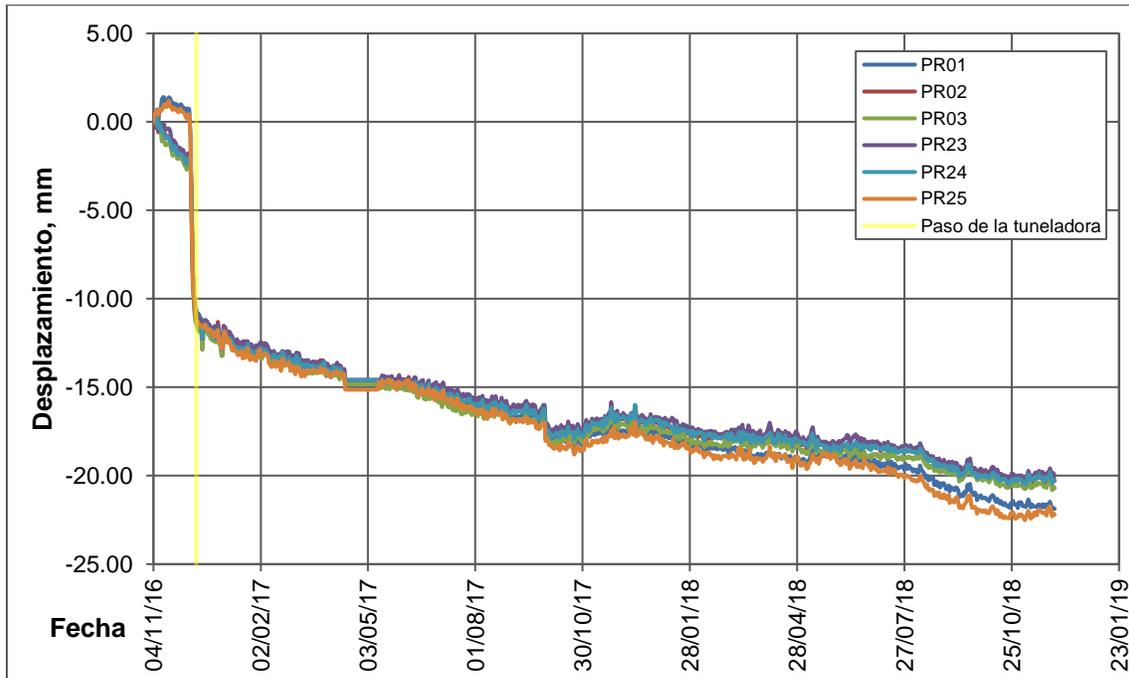


Figura 132. Asentamiento PR01, PR02, PR03 , PR23, PR24 y PR25. Templo de San José de Gracia.

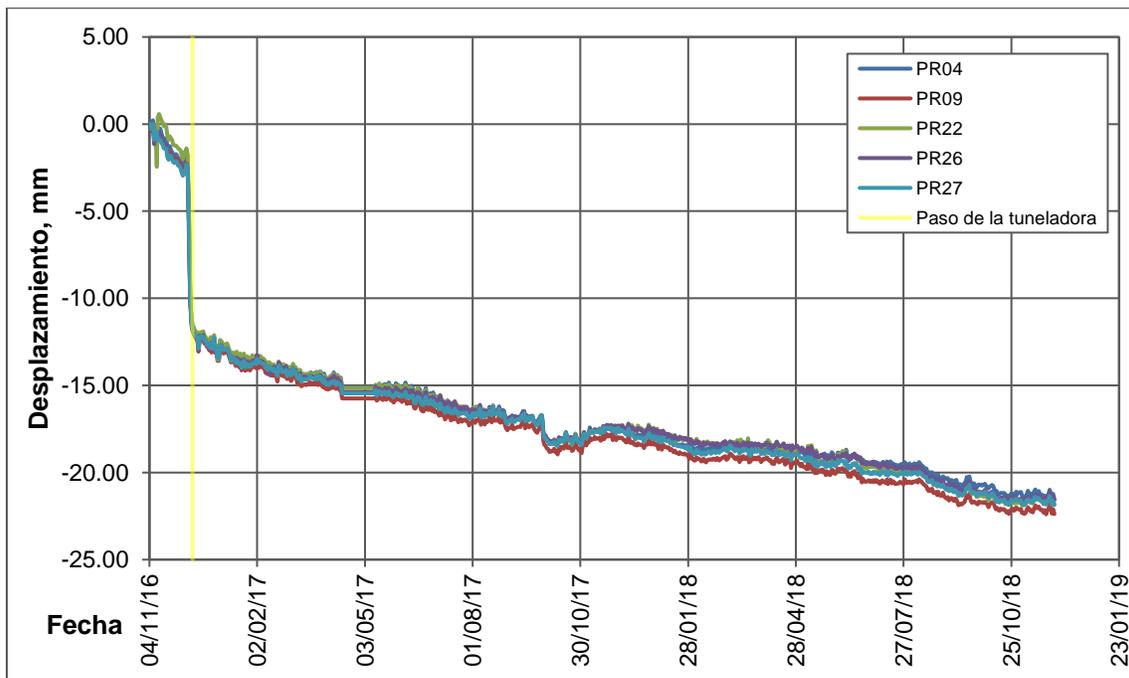


Figura 133. Asentamiento PR04, PR09, PR22, PR26 y PR27. Templo de San José de Gracia.

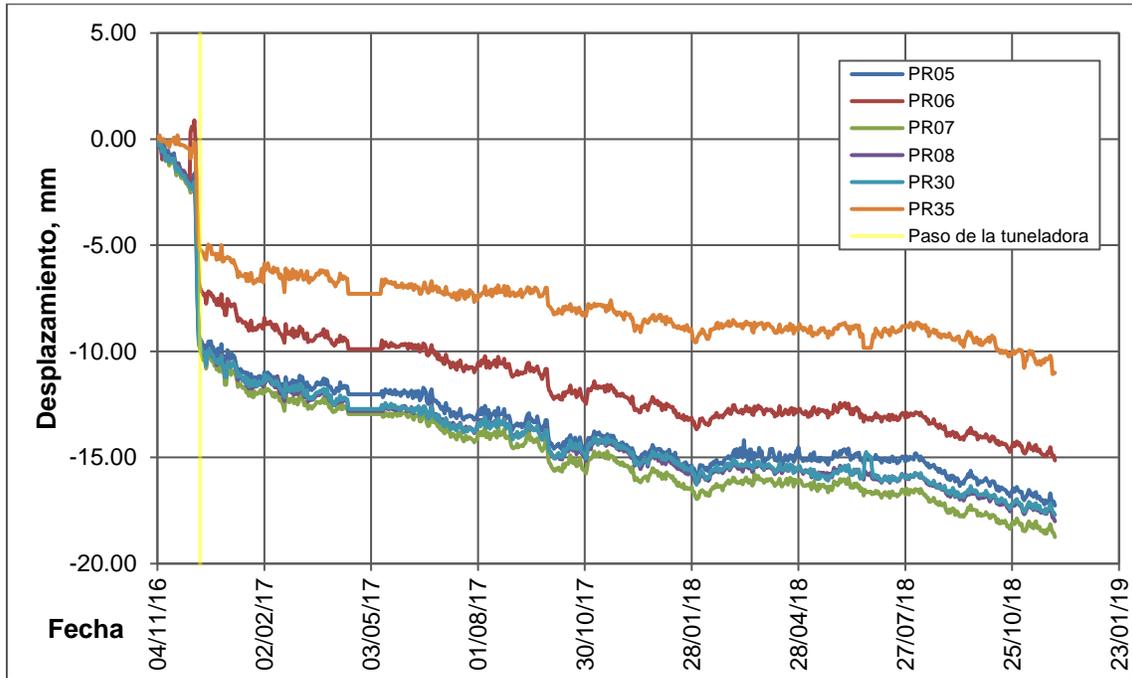


Figura 134. Asentamiento PR05, PR06, PR07, PR08, PR30 y PR35. Templo de San José de Gracia.

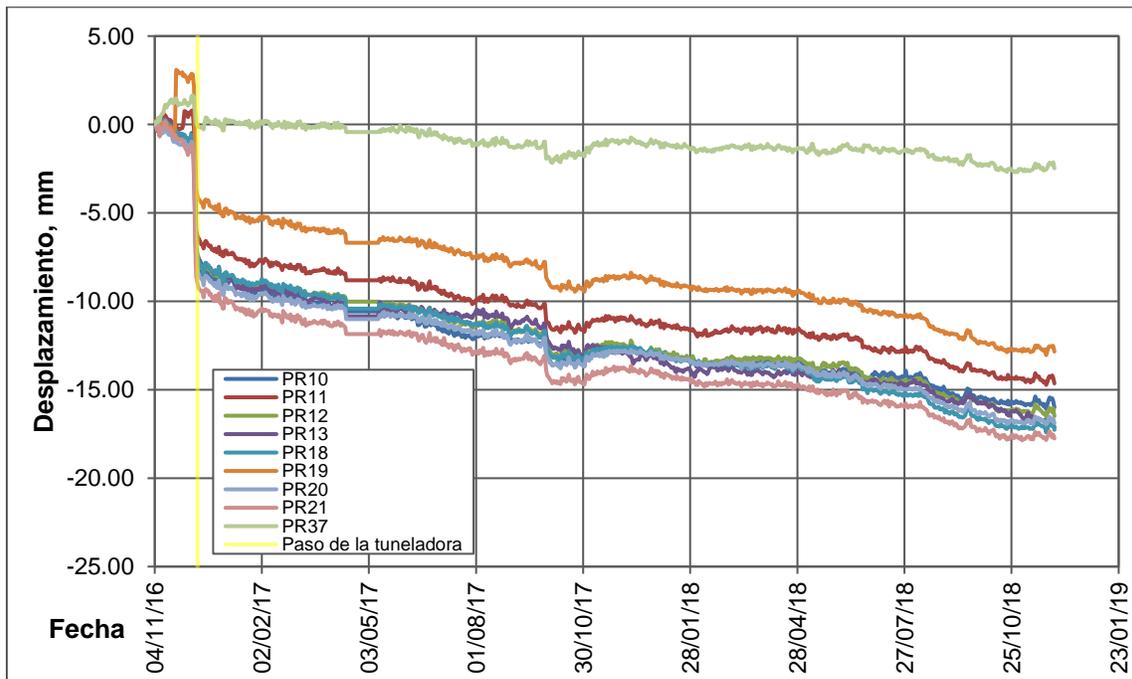


Figura 135. Asentamiento PR10, PR11, PR12, PR13, PR18, PR19, PR20, PR21 y PR37. Templo de San José de Gracia.

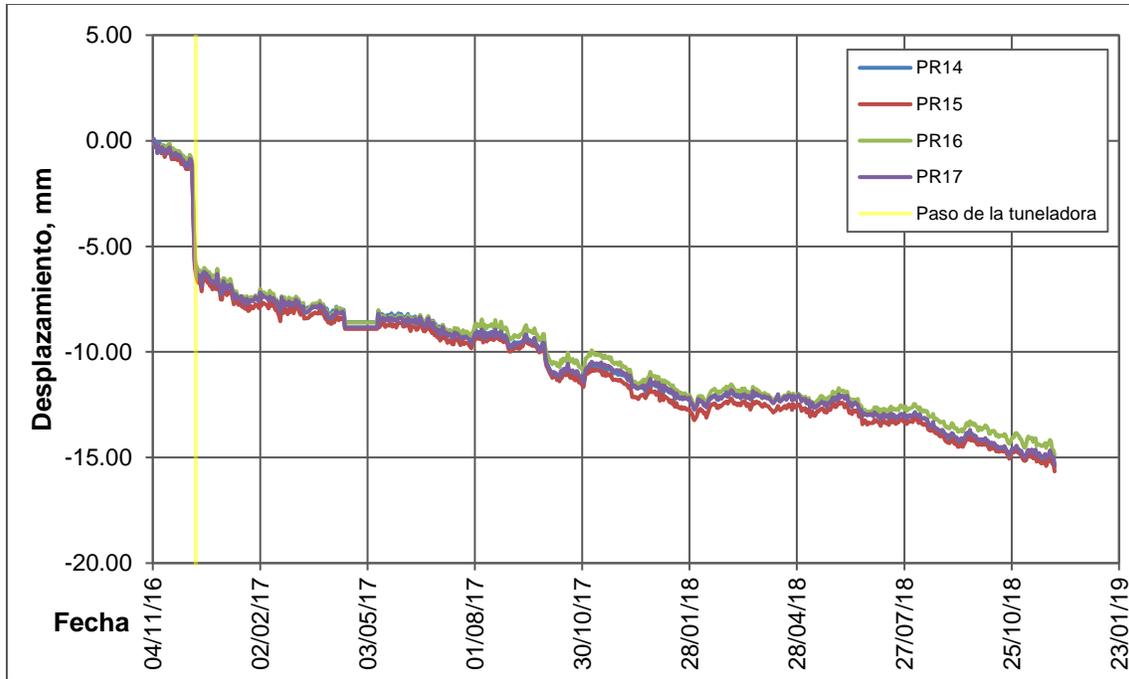


Figura 136. Asentamiento PR14, PR15, PR16 y PR17. Templo de San José de Gracia.

Asentamiento de dianas reflectantes en fachada sur.

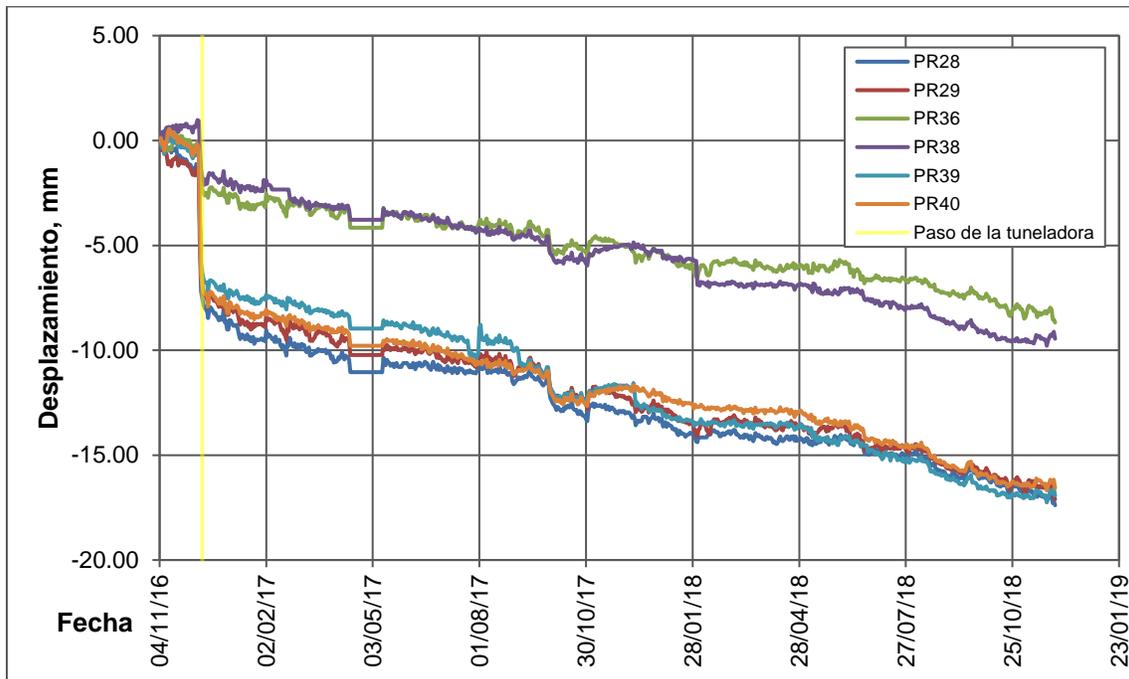


Figura 137. Asentamiento PR28, PR29, PR36, PR38, PR39 y PR40. Templo de San José de Gracia.

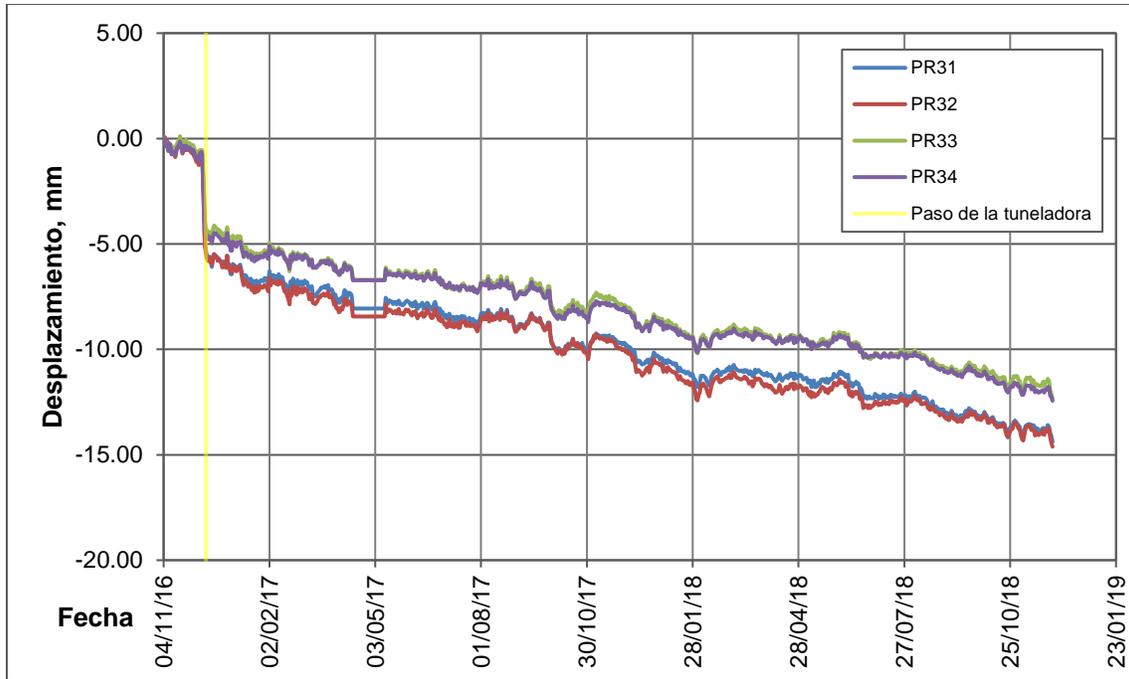


Figura 138. Asentamiento PR31, PR32, PR33 y PR34. Templo de San José de Gracia.

Rotación Oriente-Poniente de tiltmeters.

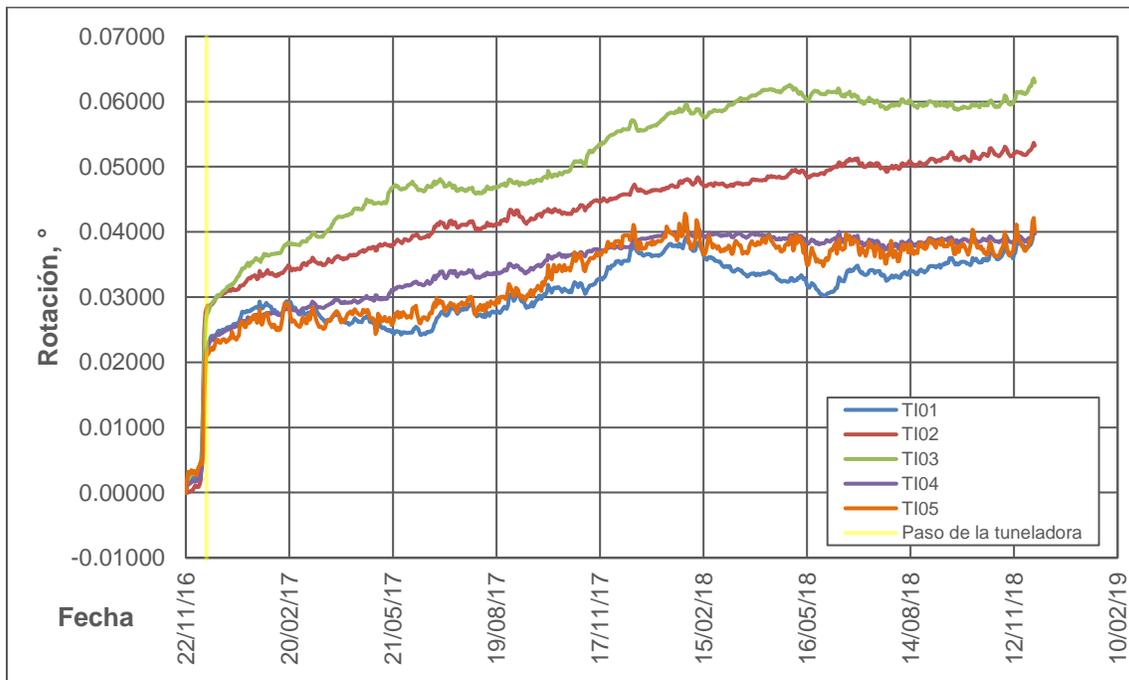


Figura 139. Rotación Ote-Pte TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Templo de San José de Gracia.

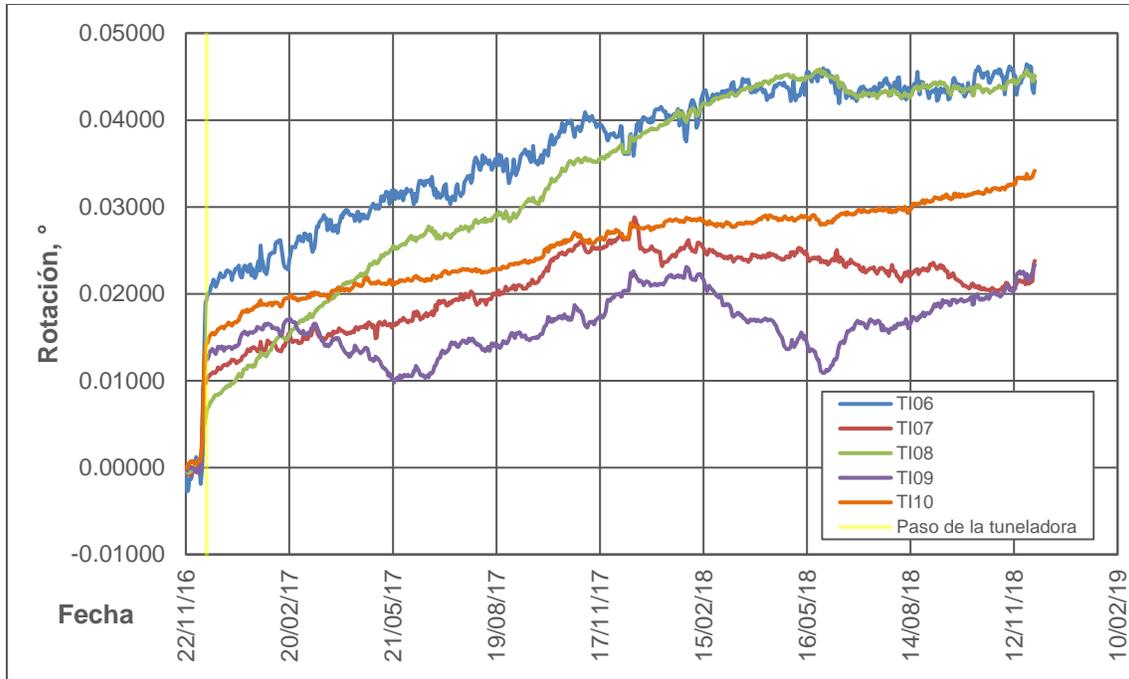


Figura 140. Rotación Ote-Pte TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Templo de San José de Gracia.

Rotación Norte-Sur de tiltmeters.

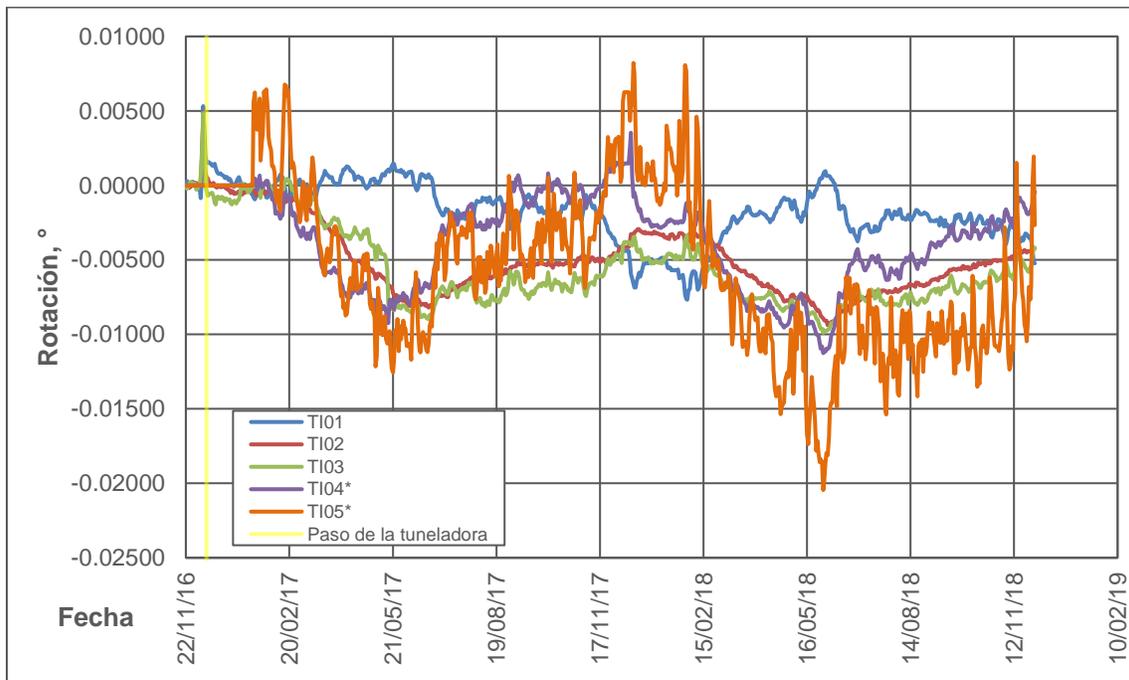


Figura 141. Rotación Nte-Sur TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Templo de San José de Gracia.

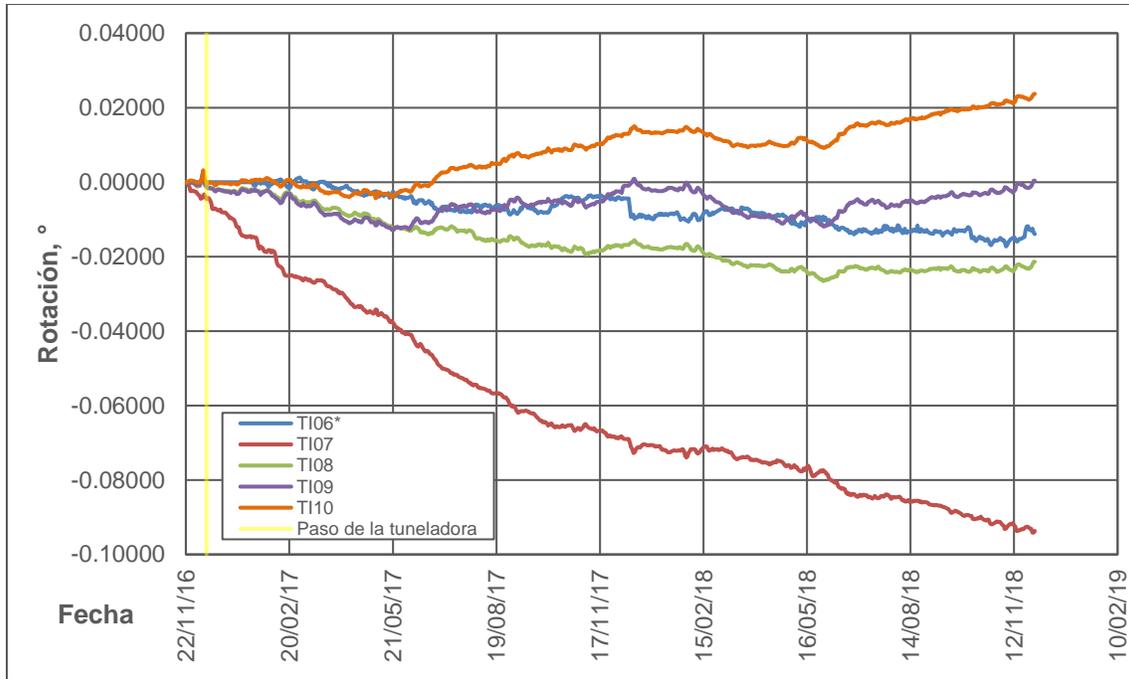


Figura 142. Rotación Nte-Sur TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Templo de San José de Gracia.

Desplazamiento Oriente-Poniente de tiltmeters.

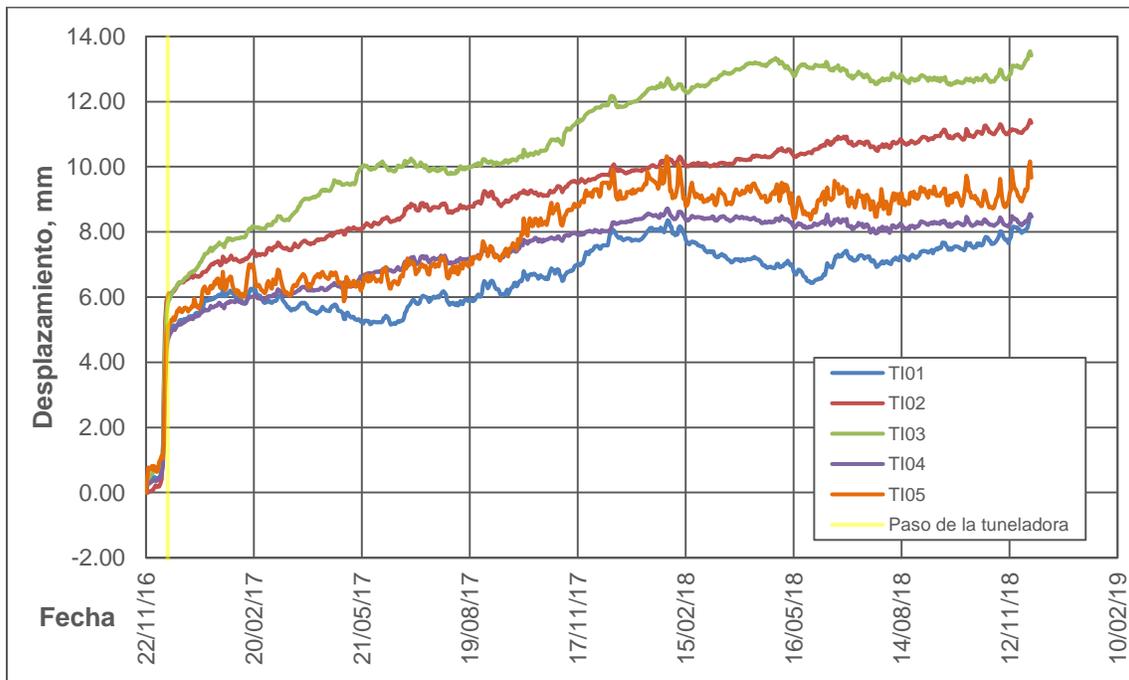


Figura 143. Desplazamiento Ote-Pte TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Templo de San José de Gracia.

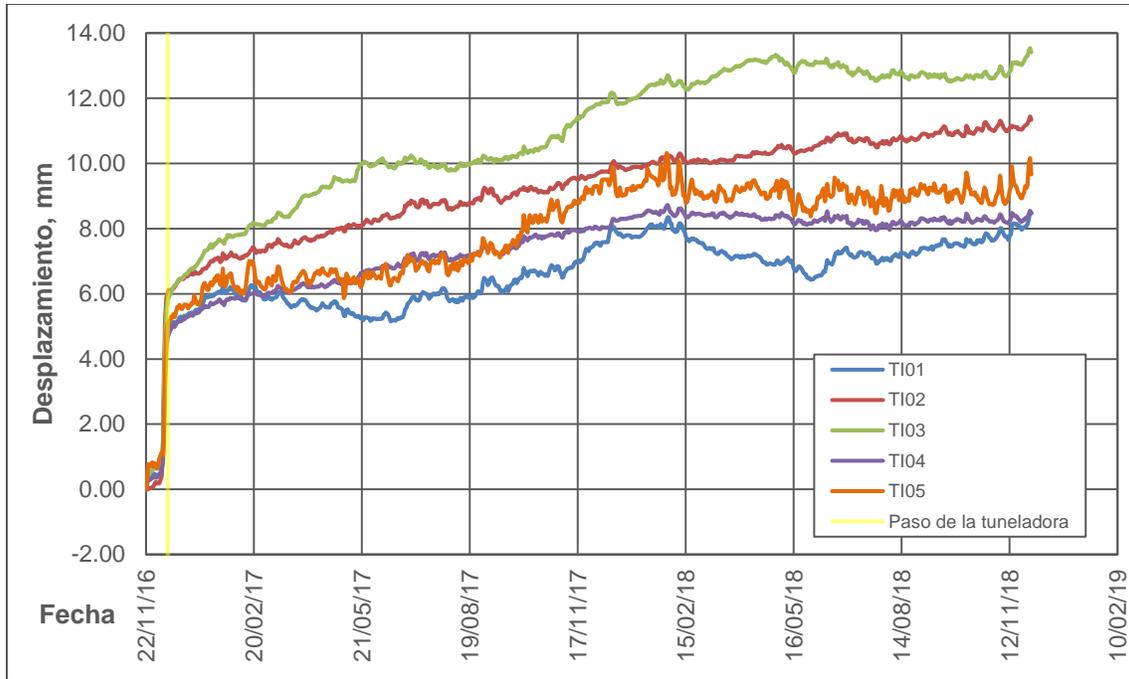


Figura 144. Desplazamiento Ote-Pte TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Templo de San José de Gracia.

Desplazamiento Norte-Sur de tiltmeters.

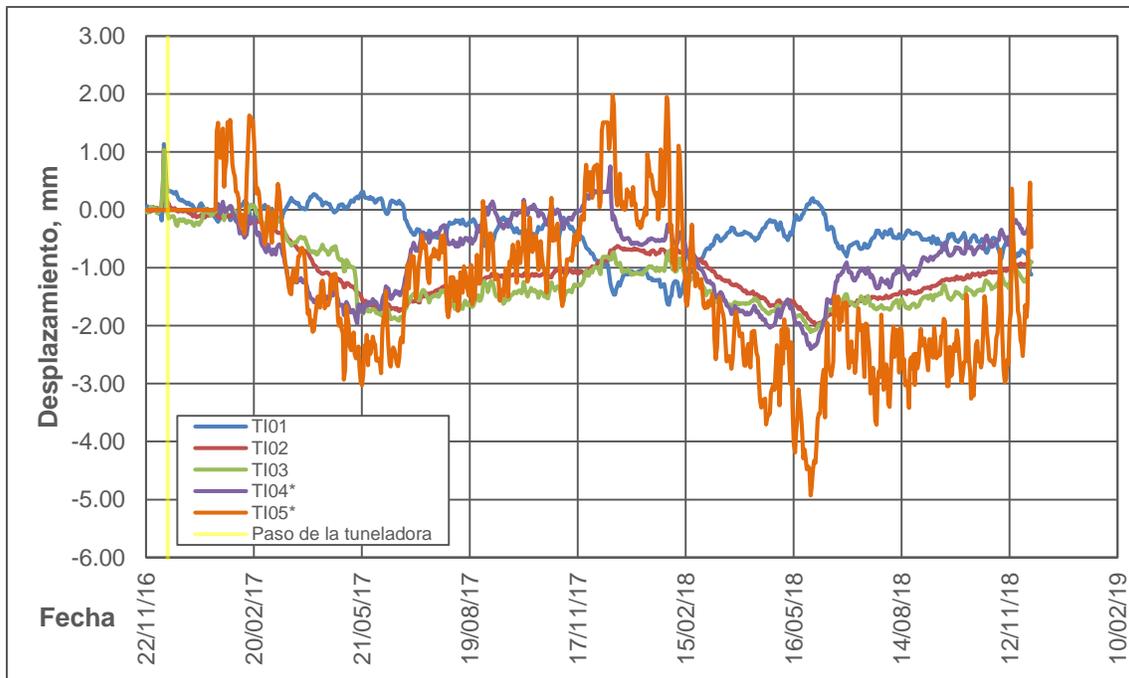


Figura 145. Desplazamiento Nte-Sur TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Templo de San José de Gracia

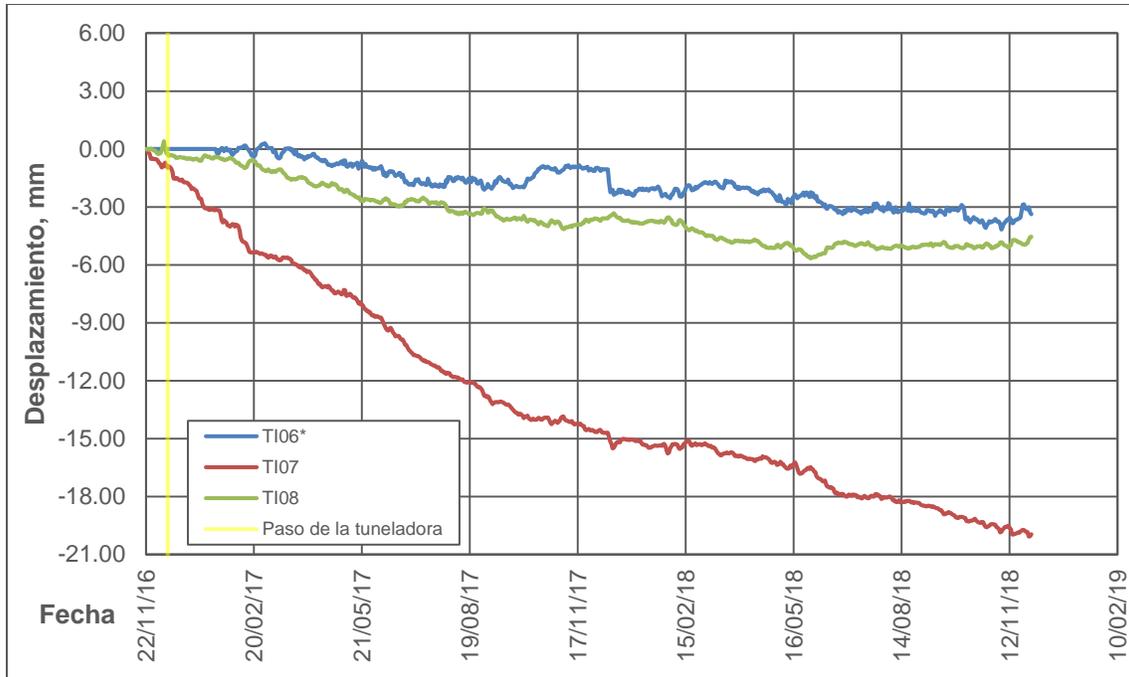


Figura 146. Desplazamiento Nte-Sur TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Templo de San José de Gracia.

ANEXO B. Gráficas de la Catedral Metropolitana.

Desplazamiento Norte-Sur de dianas reflectantes en fachada norte.

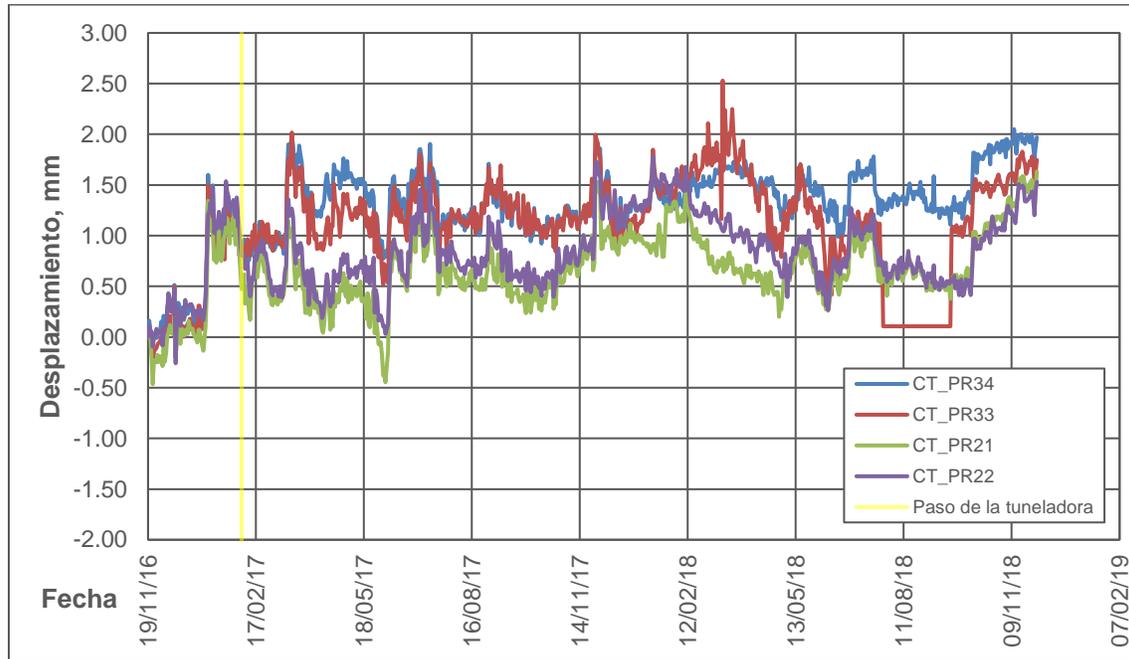


Figura 147. Desplazamiento Nte-Sur PR34, PR33, PR21 y PR22. Catedral Metropolitana.

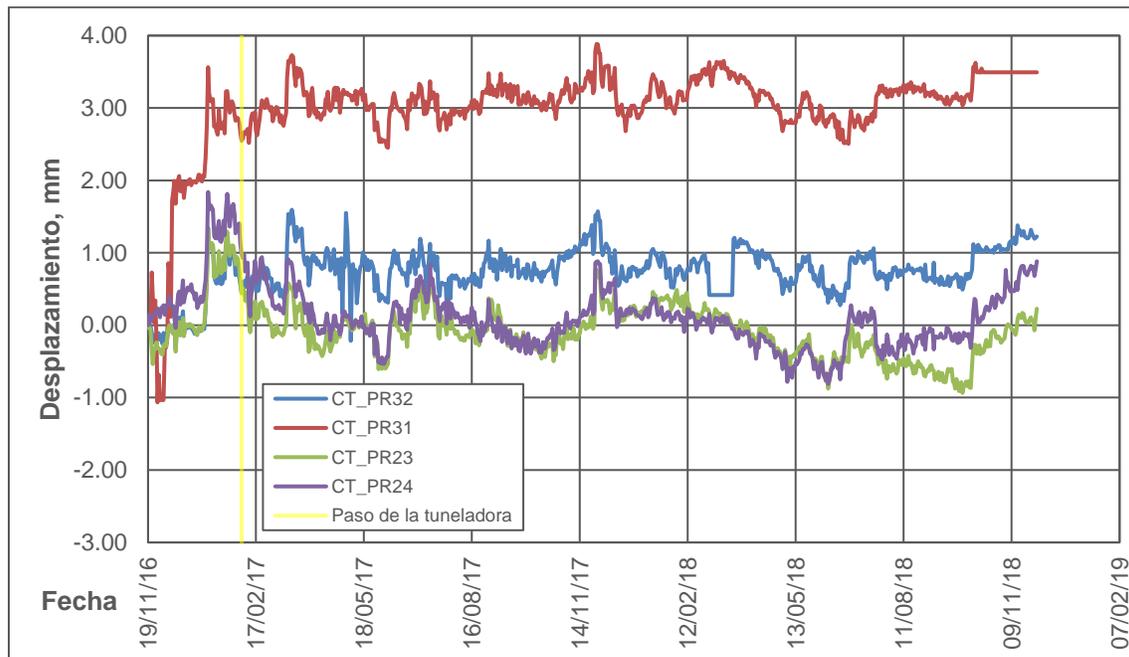


Figura 148. Desplazamiento Nte-Sur PR32, PR31, PR23 y PR24. Catedral Metropolitana.

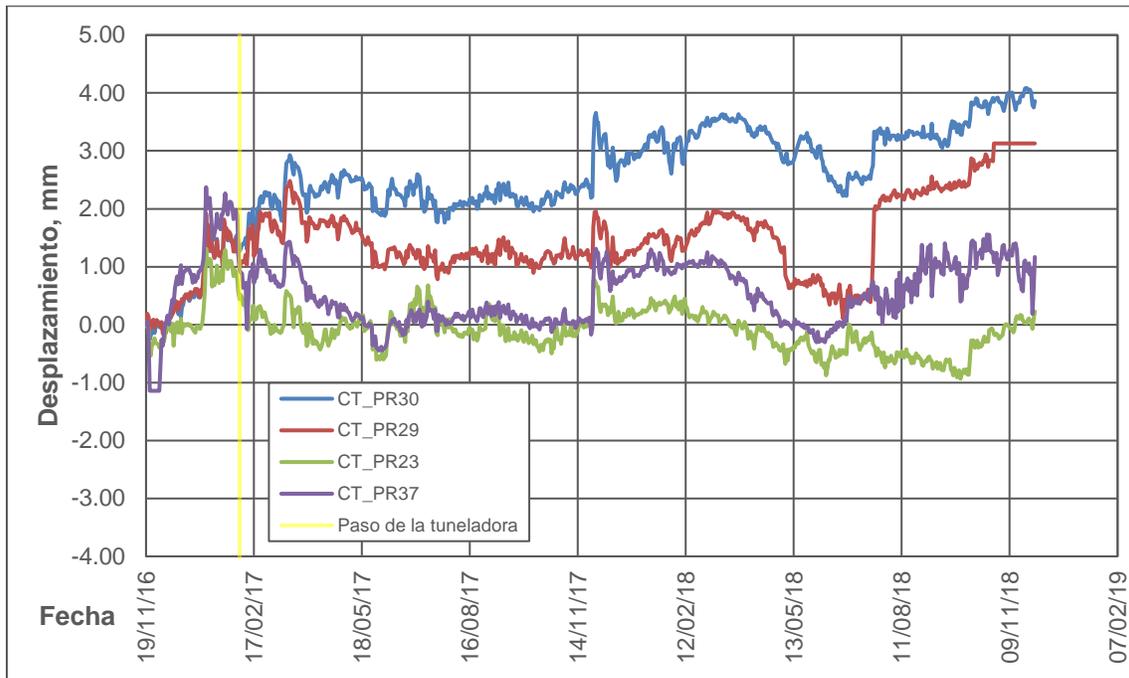


Figura 149. Desplazamiento Nte-Sur PR30, PR29, PR23 y PR37. Catedral Metropolitana.

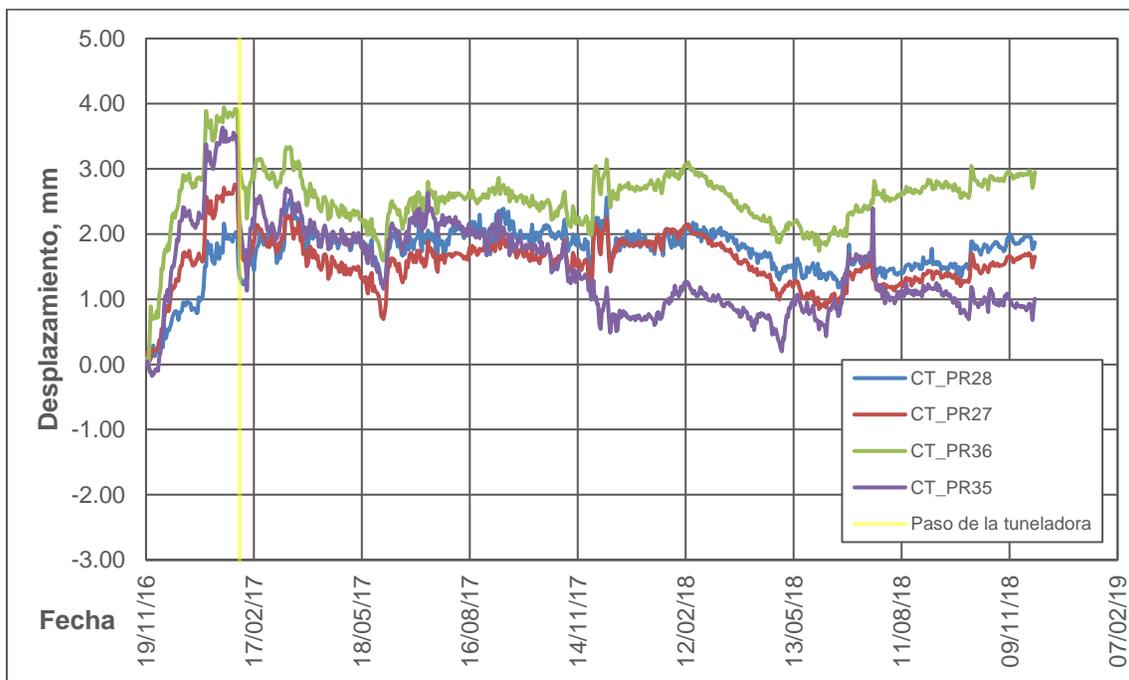


Figura 150. Desplazamiento Nte-Sur PR28, PR27, PR36 y PR35. Catedral Metropolitana.

Desplazamiento Norte-Sur de dianas reflectantes en fachada poniente.

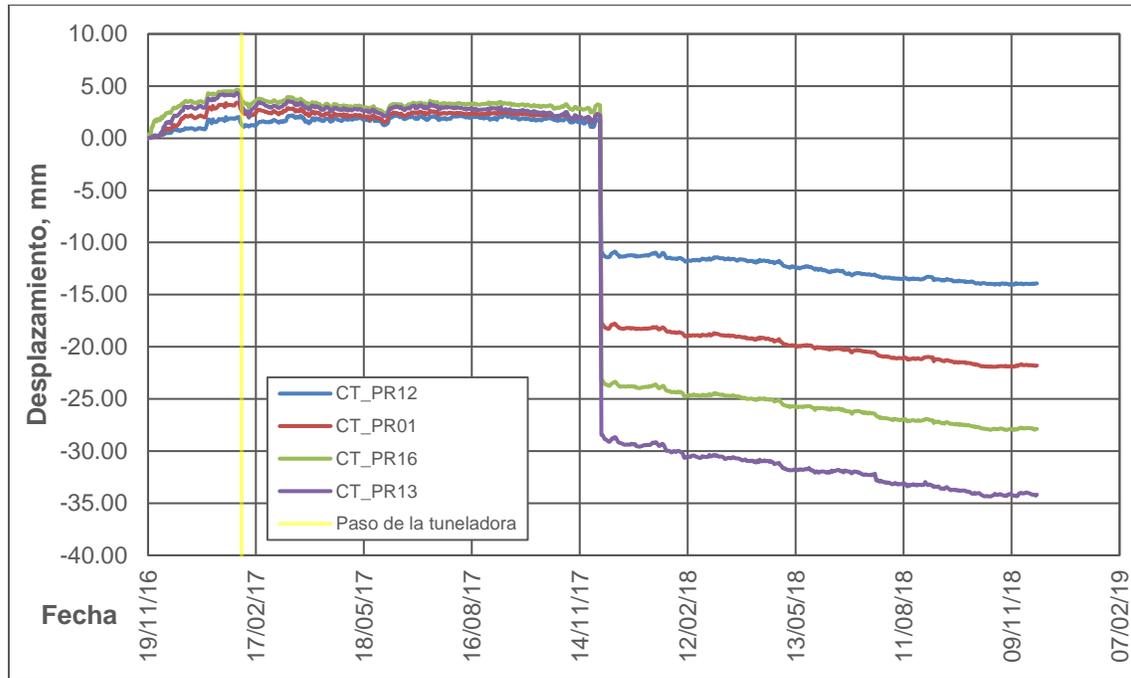


Figura 151. Desplazamiento Nte-Sur PR12, PR01, PR16 y PR13. Catedral Metropolitana.

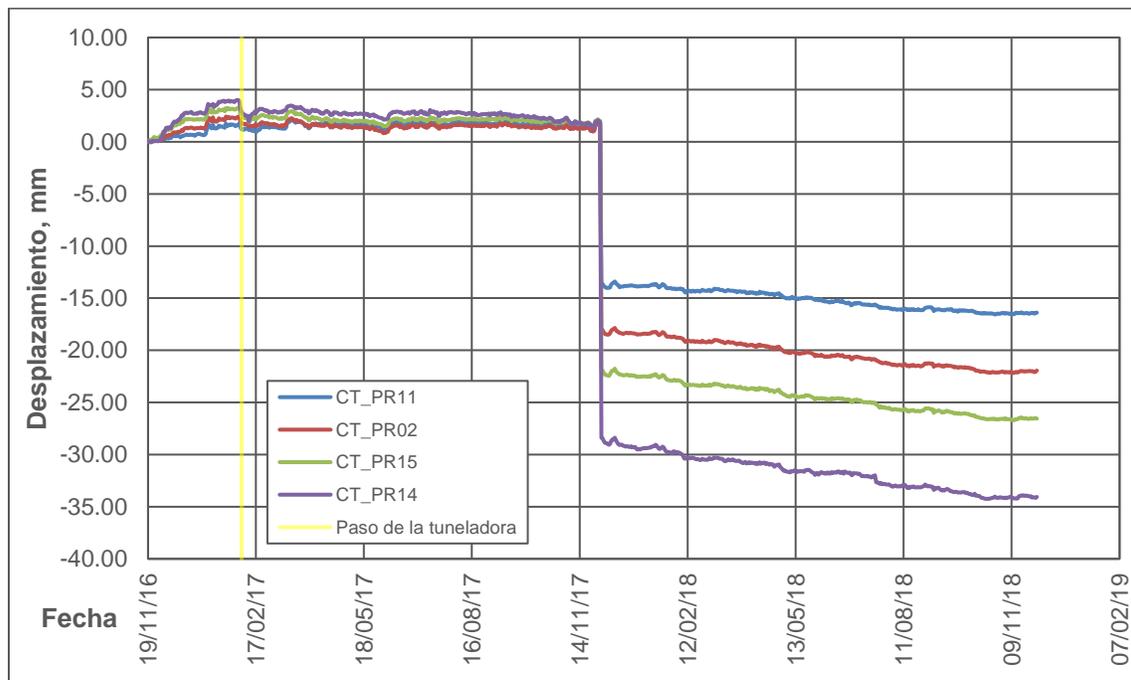


Figura 152. Desplazamiento Nte-Sur PR11, PR02, PR15 y PR14. Catedral Metropolitana.

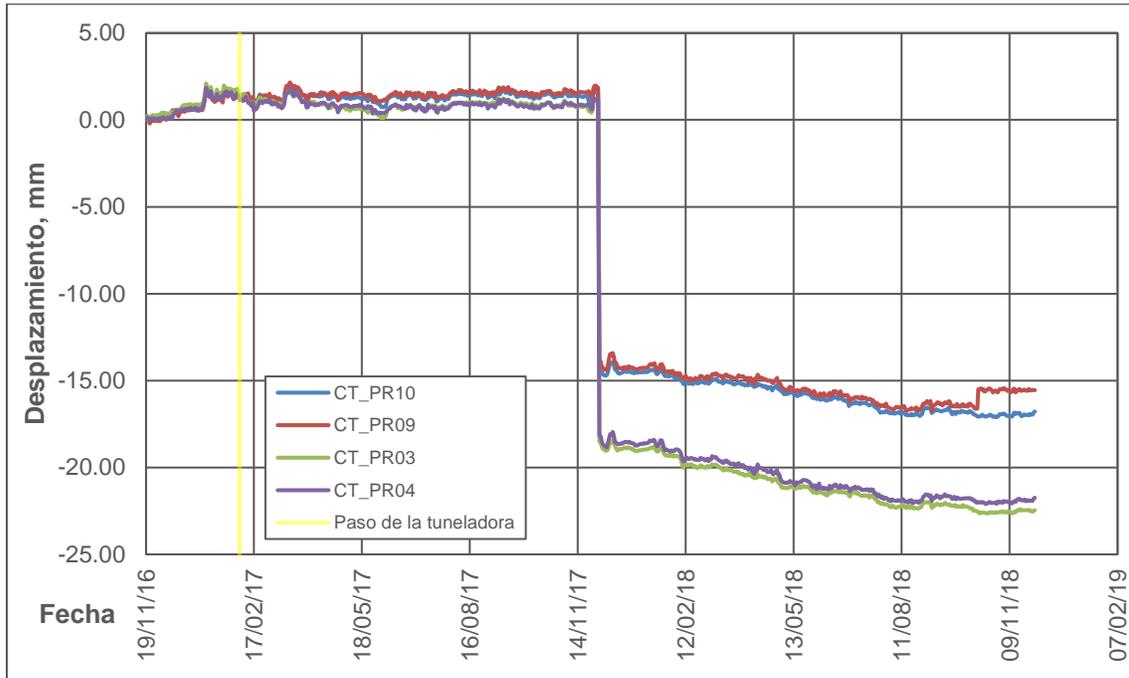


Figura 153. Desplazamiento Nte-Sur PR10, PR09, PR03 y PR04. Catedral Metropolitana.

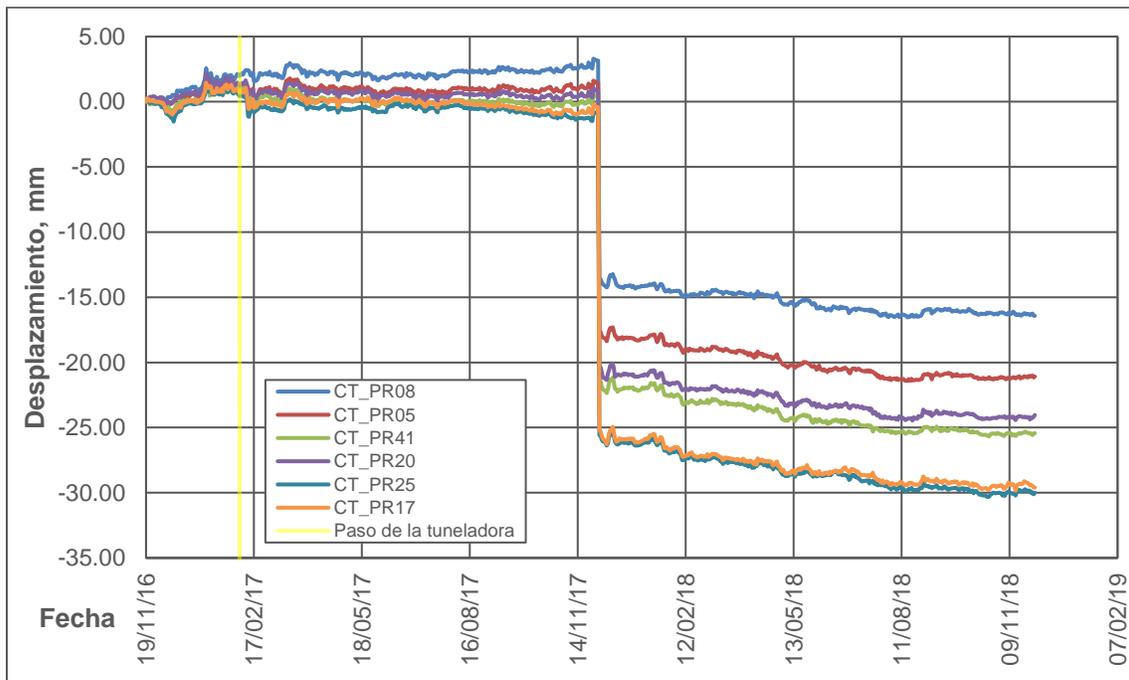


Figura 154. Desplazamiento Nte-Sur PR08, PR05, PR41, PR20, PR25 y PR17. Catedral Metropolitana.

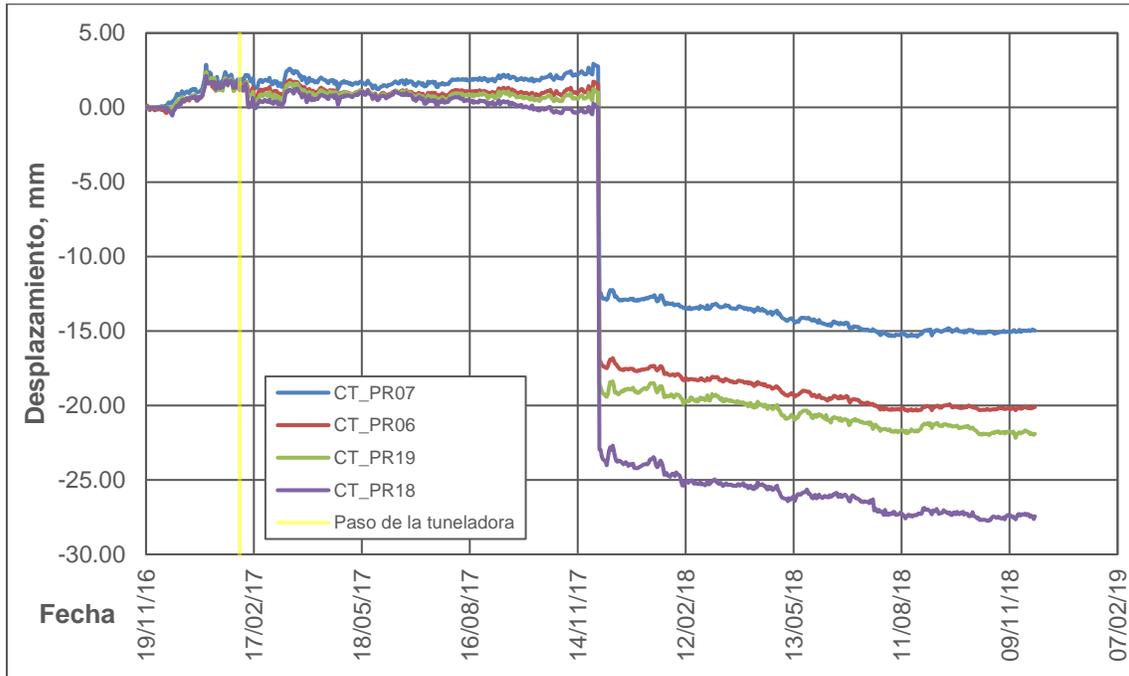


Figura 155. Desplazamiento Nte-Sur PR07, PR06, PR19 y PR18. Catedral Metropolitana.

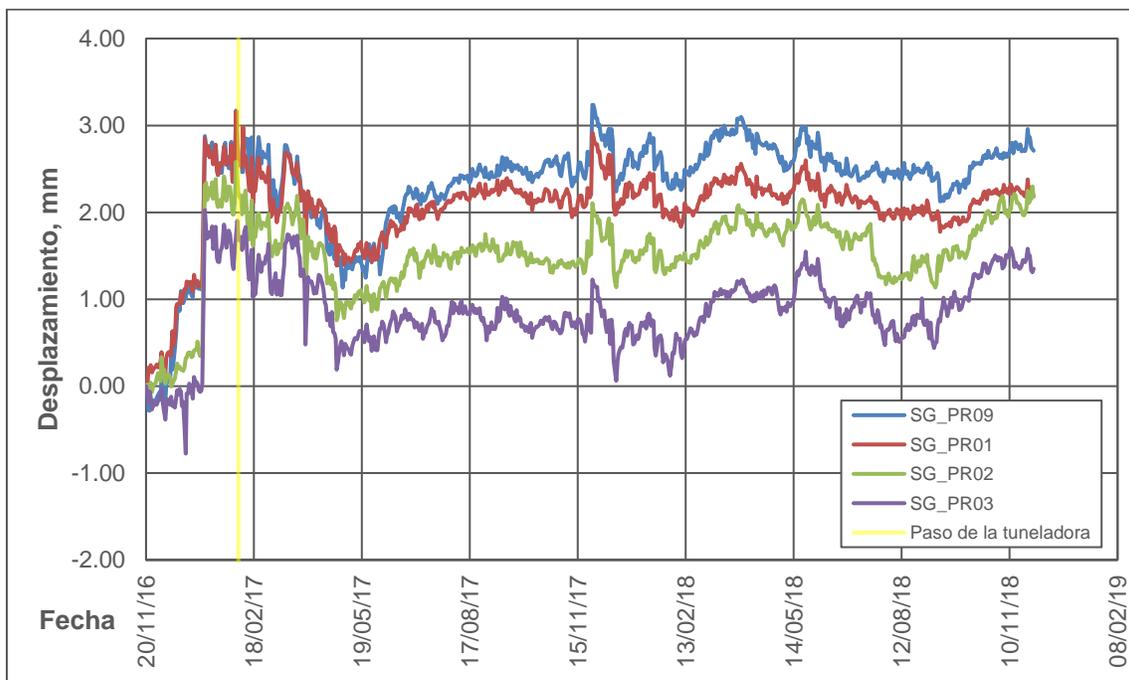


Figura 156. Desplazamiento Nte-Sur PR09, PR01, PR02 y PR03. Sagrario Metropolitan.

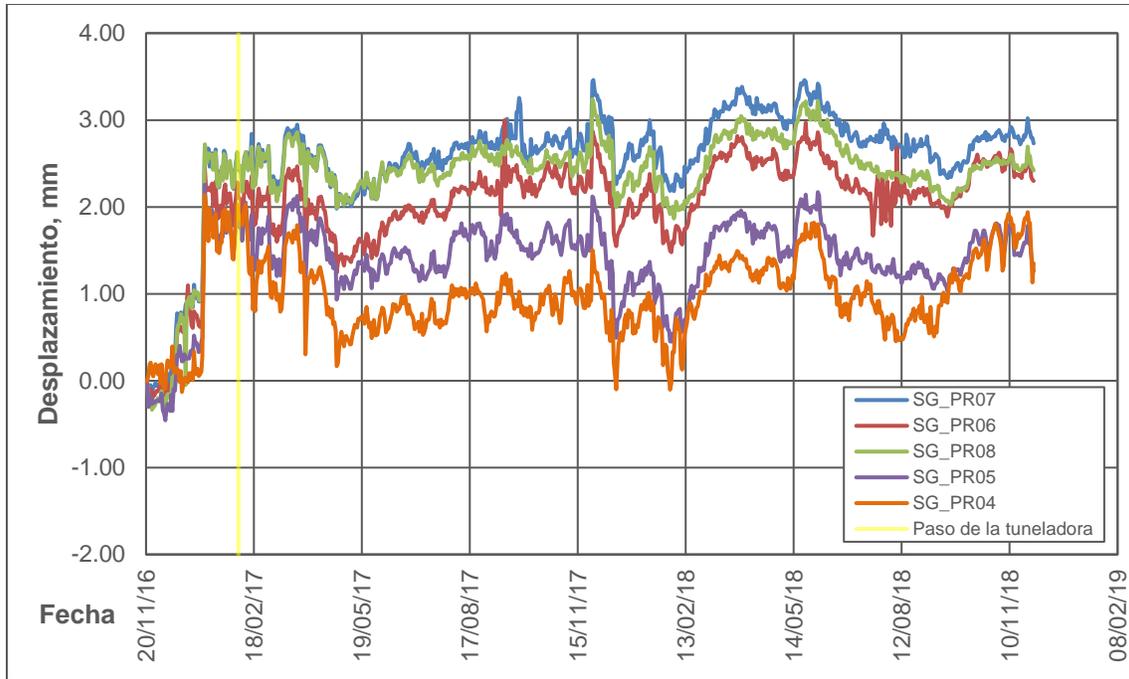


Figura 157. Desplazamiento Nte-Sur PR07, PR06, PR08, PR05 y PR04. Sagrario Metropolitano.

Desplazamiento Norte-Sur de dianas reflectantes en fachada sur.

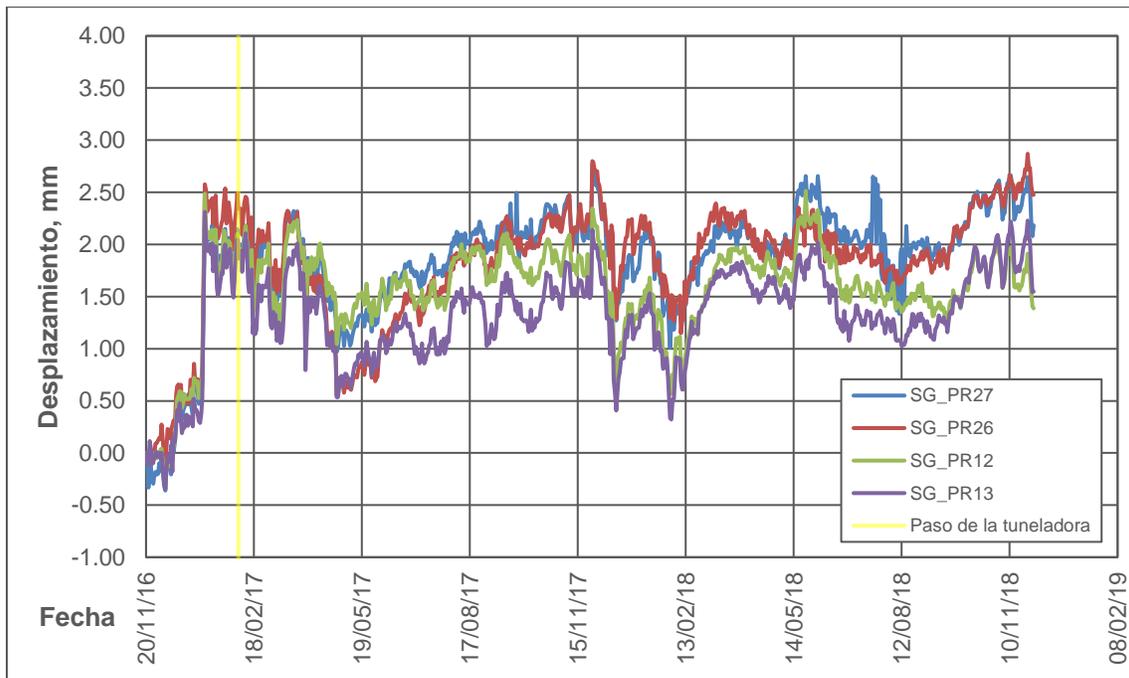


Figura 158. Desplazamiento Nte-Sur PR27, PR26, PR12 y PR13. Sagrario Metropolitano.

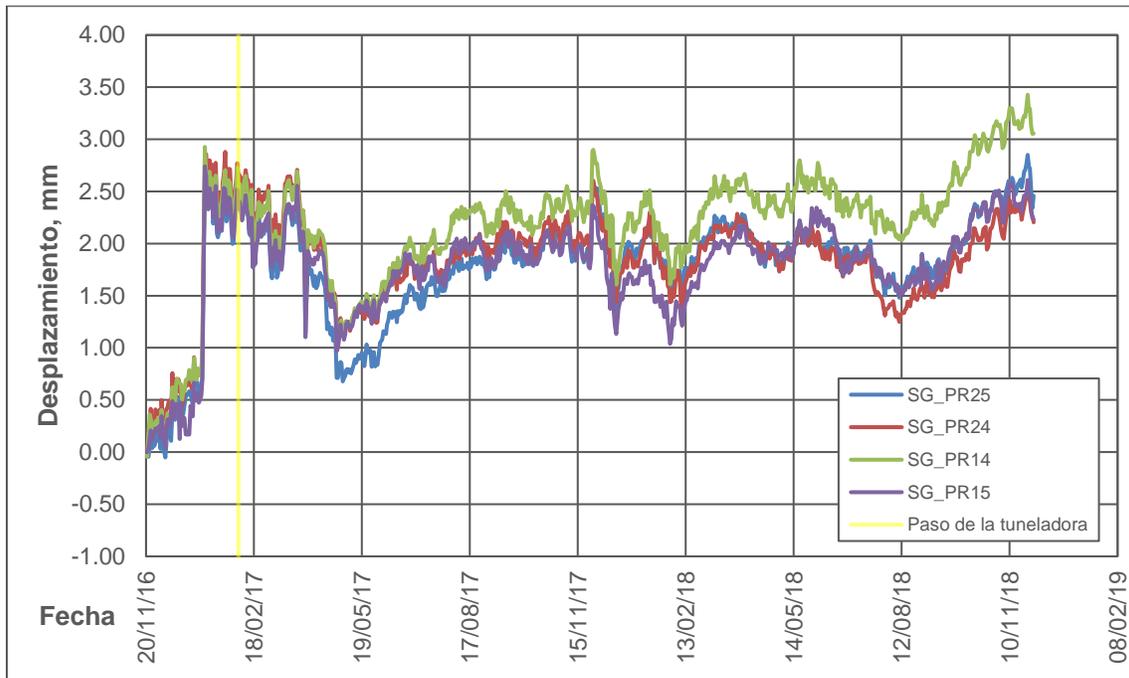


Figura 159. Desplazamiento Nte-Sur PR25, PR24, PR14 y PR15. Sagrario Metropolitano.

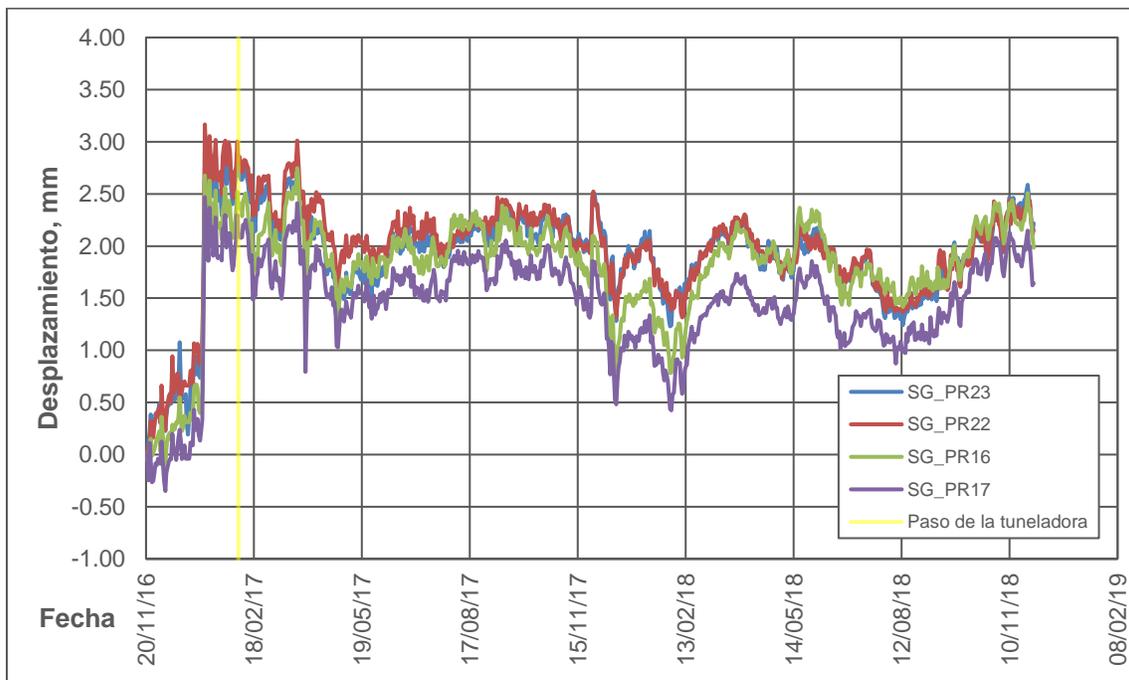


Figura 160. Desplazamiento Nte-Sur PR23, PR22, PR16 y PR17. Sagrario Metropolitano.

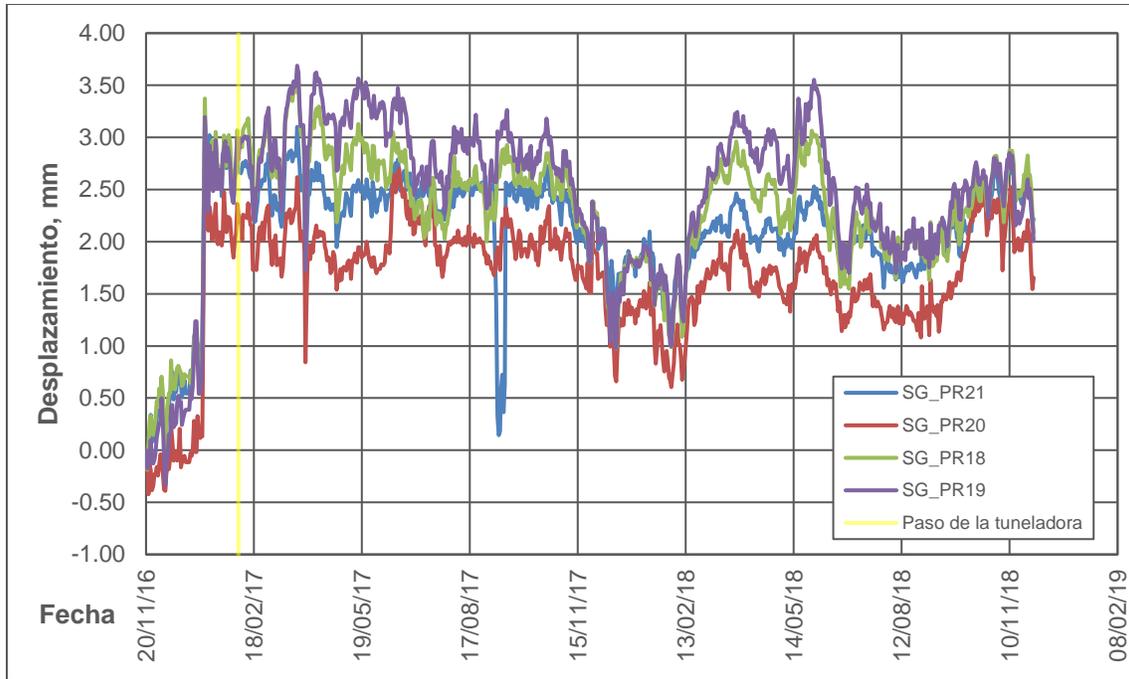


Figura 161. Desplazamiento Nte-Sur PR21, PR20, PR18 y PR19. Sagrario Metropolitano.

Desplazamiento Oriente-Poniente de dianas reflectantes en fachada norte.

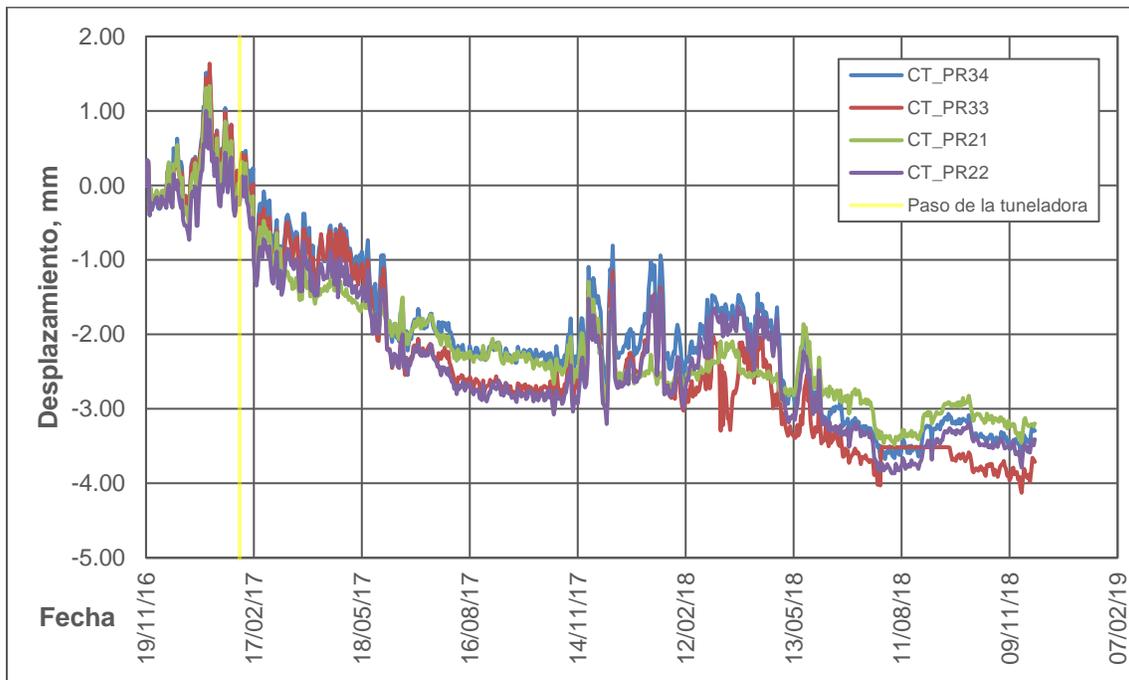


Figura 162. Desplazamiento Ote-Pte PR34, PR33, PR21 y PR22. Catedral Metropolitana.

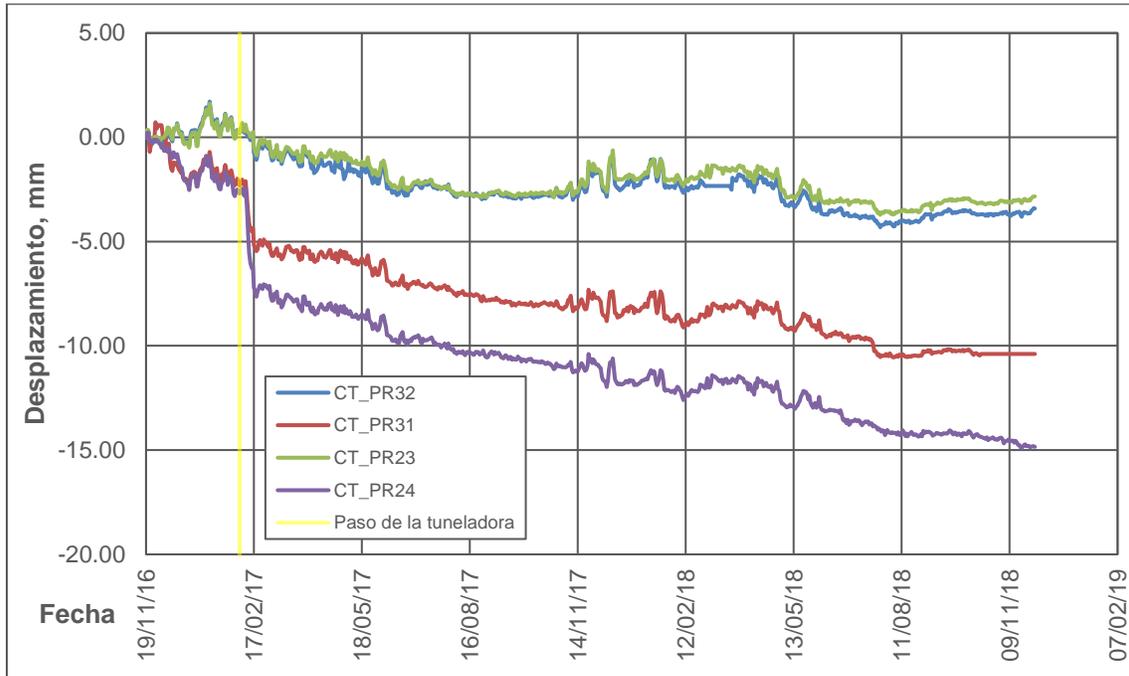


Figura 163. Desplazamiento Ote-Pte PR32, PR31, PR23 y PR24. Catedral Metropolitana.

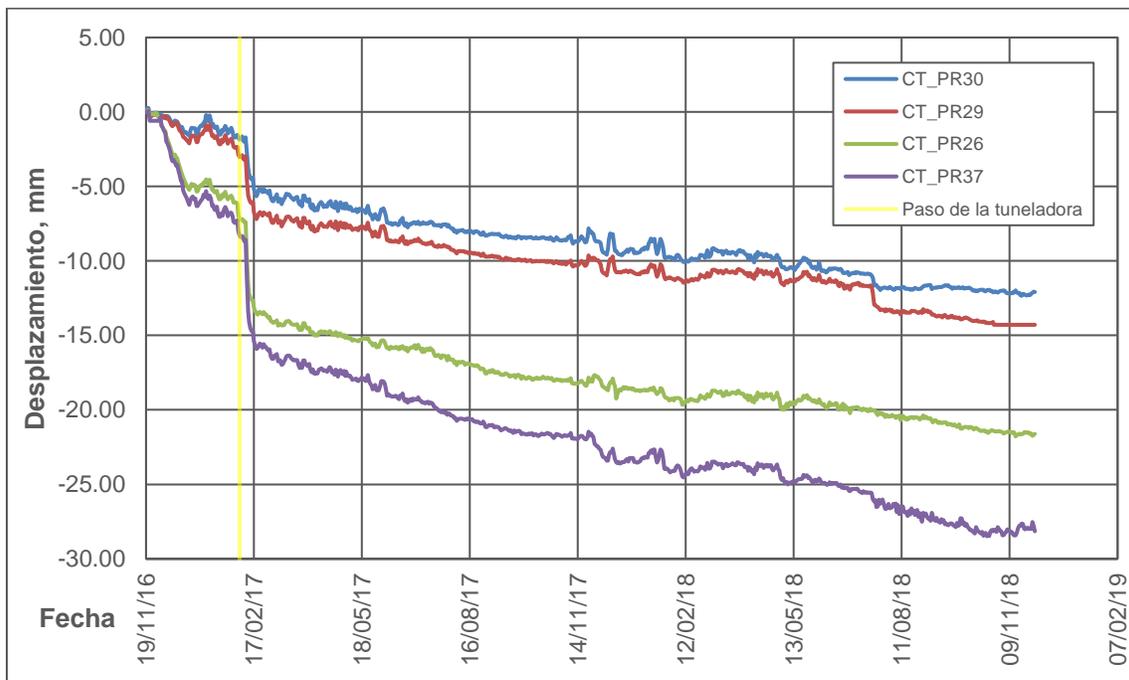


Figura 164. Desplazamiento Ote-Pte PR30, PR29, PR26 y PR37. Catedral Metropolitana.

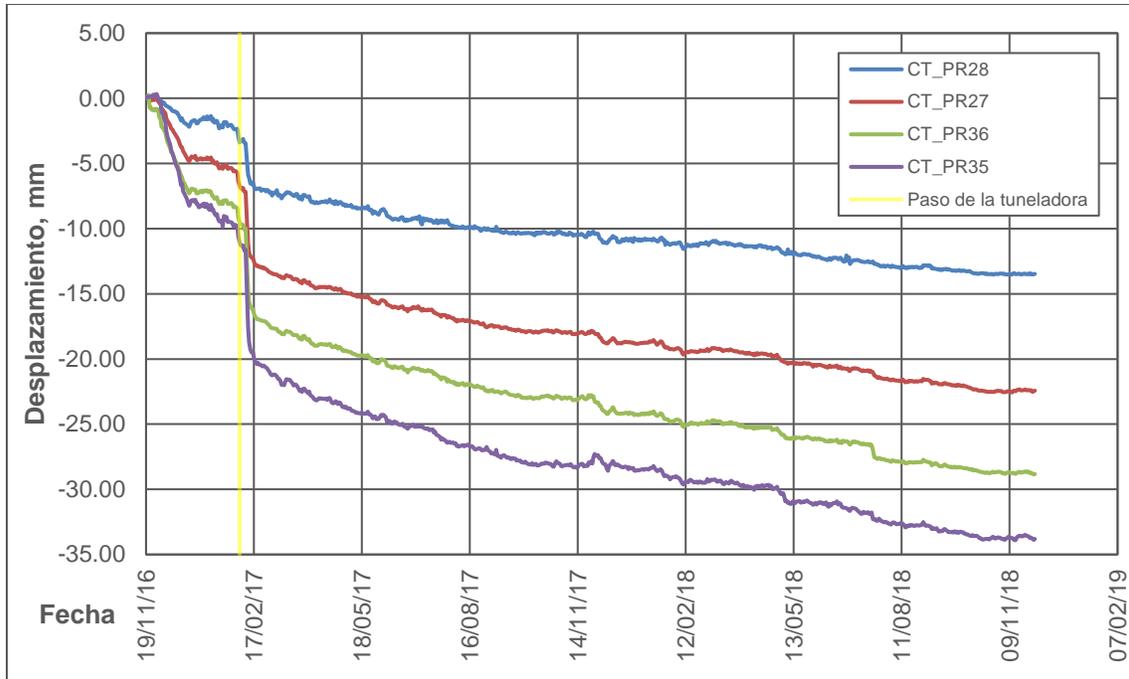


Figura 165. Desplazamiento Ote-Pte PR28, PR27, PR36 y PR35. Catedral Metropolitana.

Desplazamiento Oriente-Poniente de dianas reflectantes en fachada poniente.

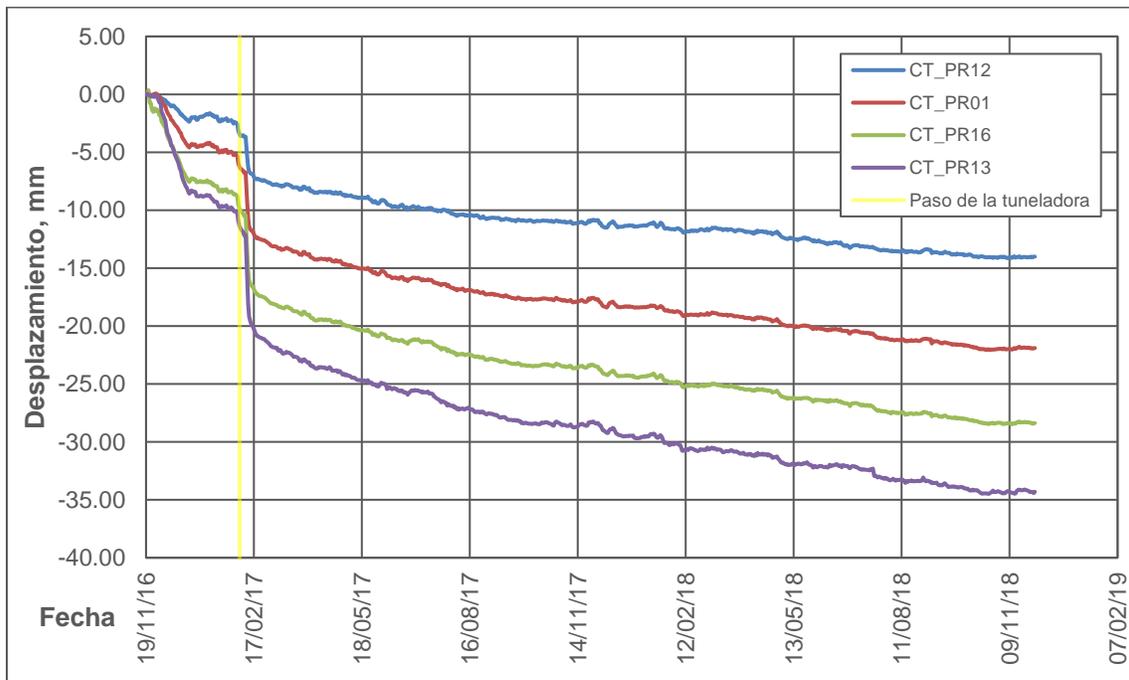


Figura 166. desplazamiento Ote-Pte PR12, PR01, PR16 y PR13. Catedral Metropolitana.

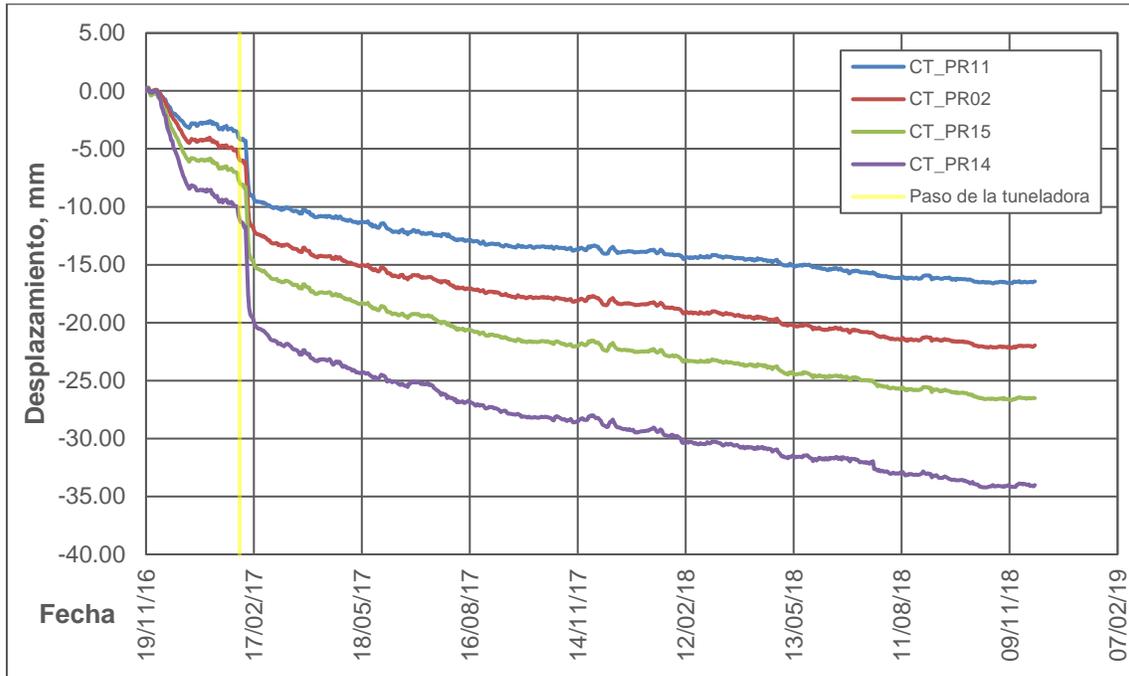


Figura 167. Desplazamiento Ote-Pte PR11, PR02, PR15 y PR14. Catedral Metropolitana.

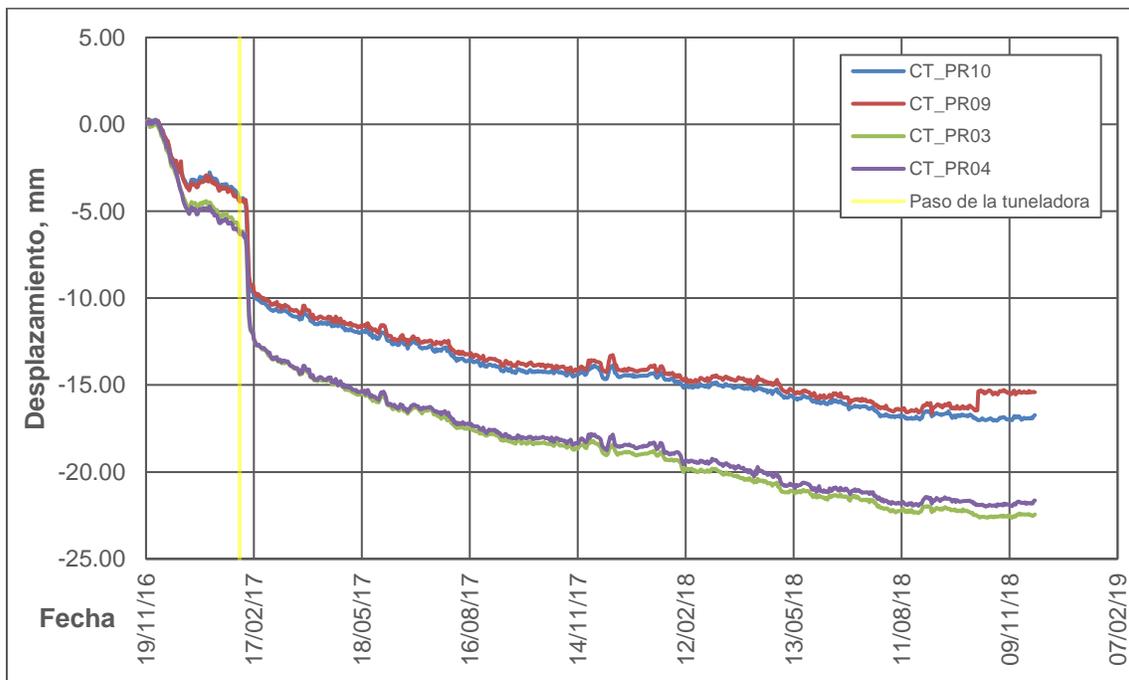


Figura 168. Desplazamiento Ote-Pte PR10, PR09, PR03 y PR04. Catedral Metropolitana.

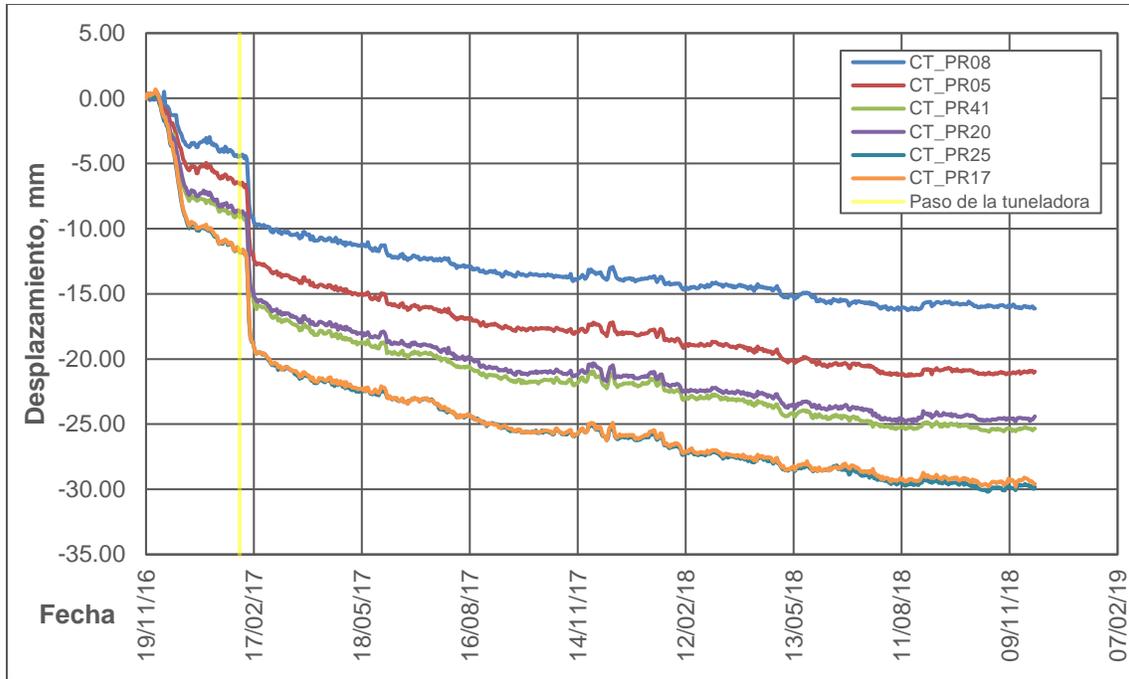


Figura 169. Desplazamiento Ote-Pte PR08, PR05, PR41, PR20, PR25 y PR17. Catedral Metropolitana.

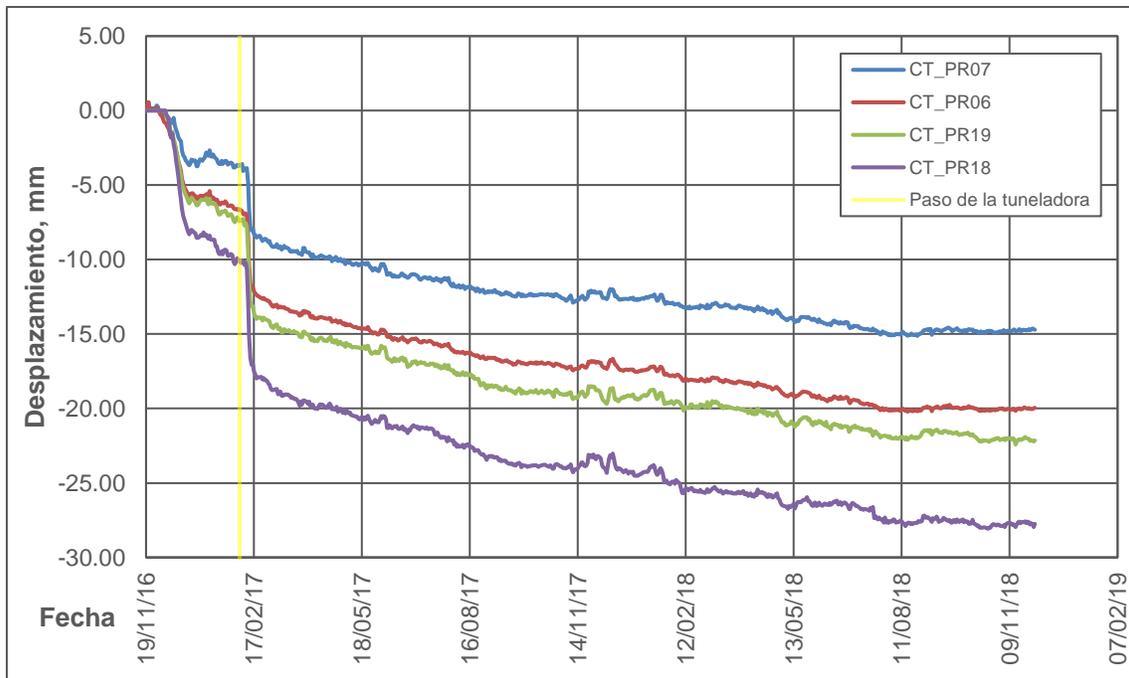


Figura 170. Desplazamiento Ote-Pte PR07, PR06, PR19 y PR18. Catedral Metropolitana.

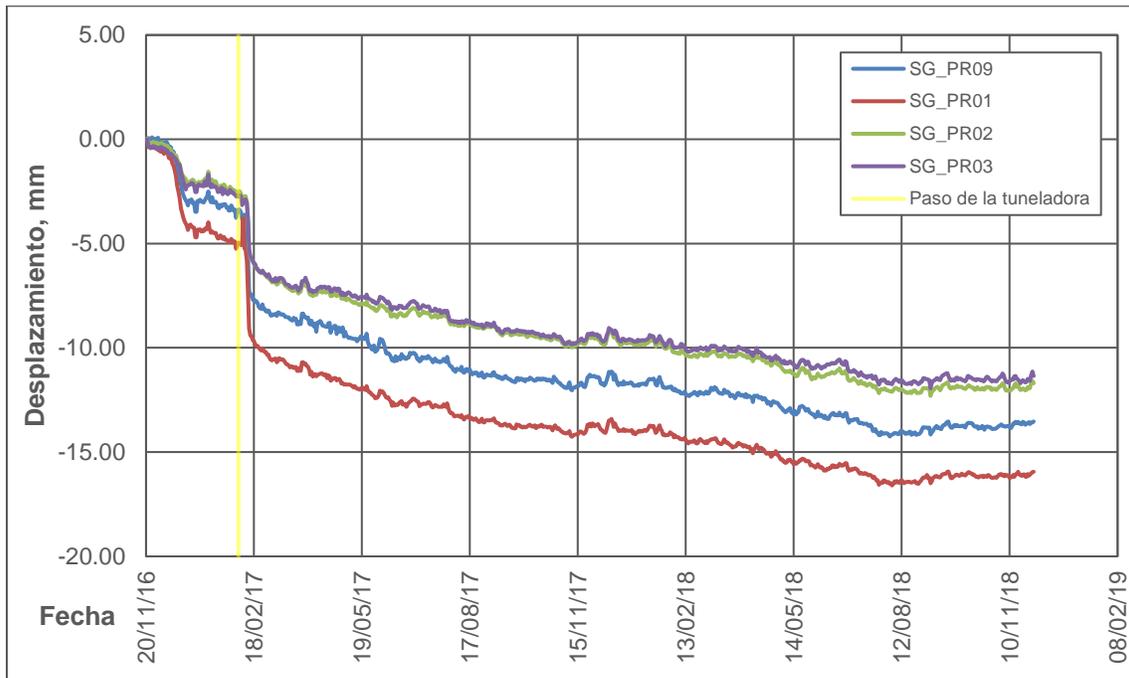


Figura 171. Desplazamiento Ote-Pte PR09, PR01, PR02 y PR03. Sagrario Metropolitano.

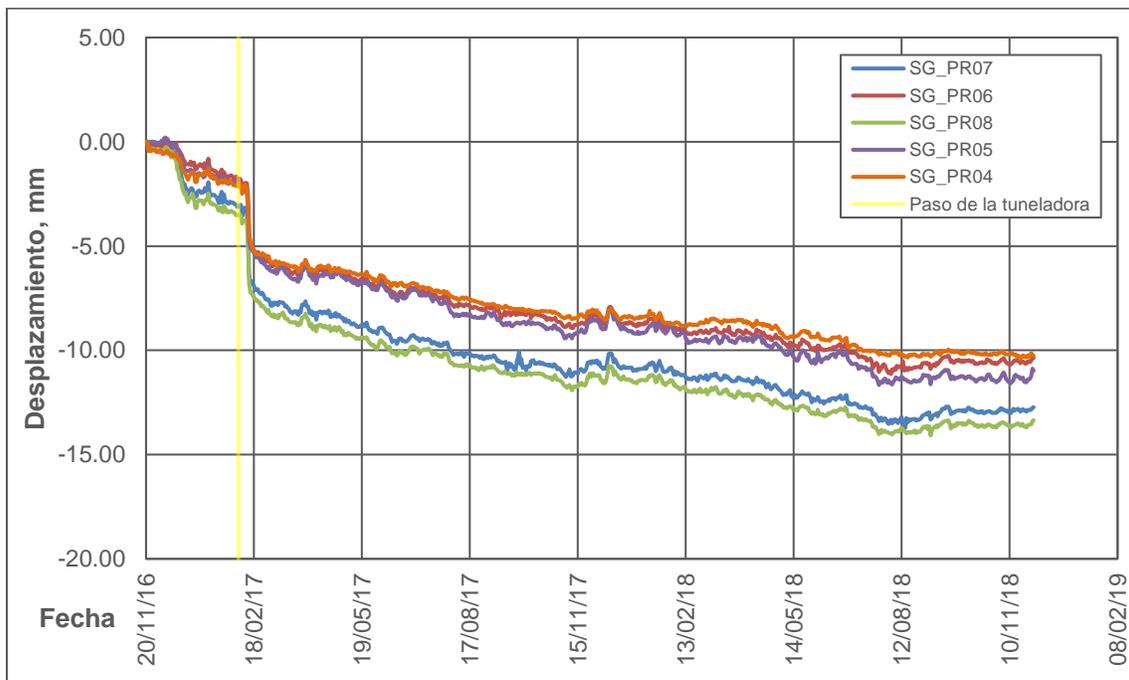


Figura 172. Desplazamiento Ote-Pte PR07, PR06, PR08, PR05 y PR04. Sagrario Metropolitano.

Desplazamiento Oriente-Poniente de dianas reflectantes en fachada sur.

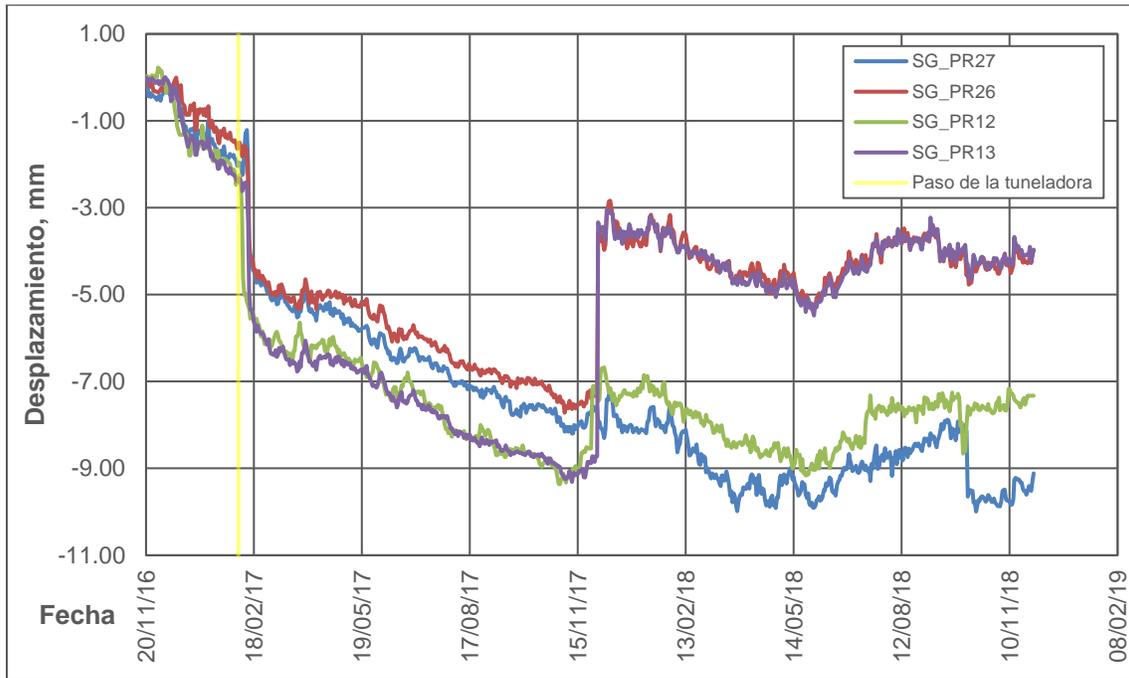


Figura 173. Desplazamiento Ote-Pte PR27, PR26, PR12 y PR13. Sagrario Metropolitano.

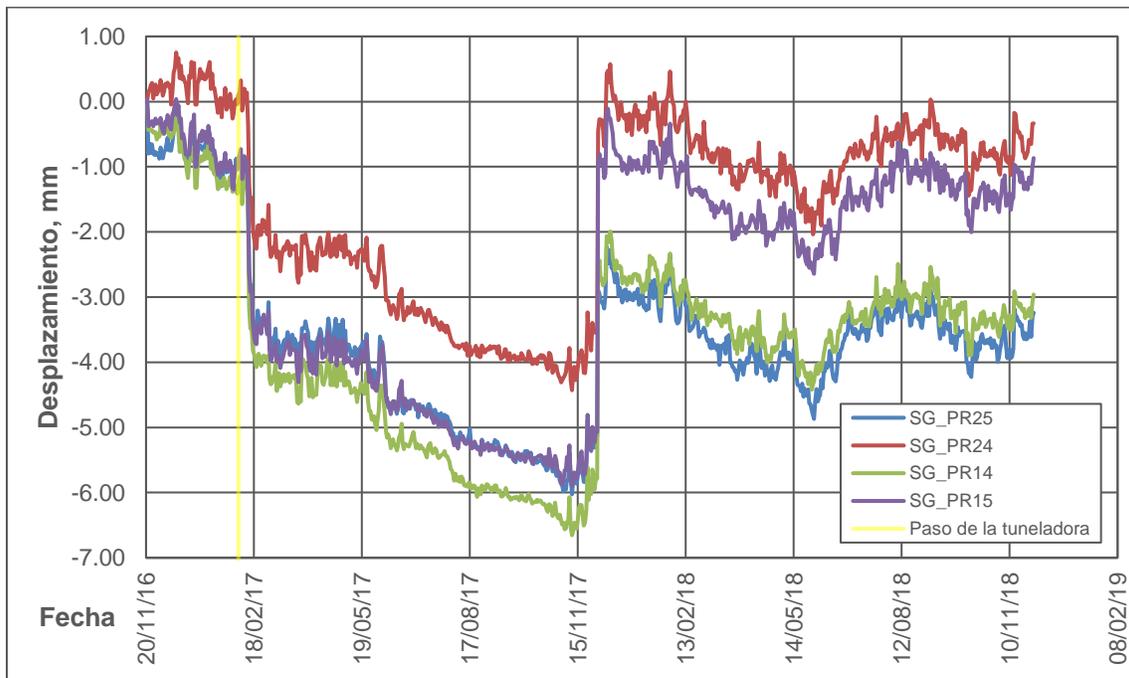


Figura 174. Desplazamiento Ote-Pte PR25, PR24, PR14 y PR15. Sagrario Metropolitano.

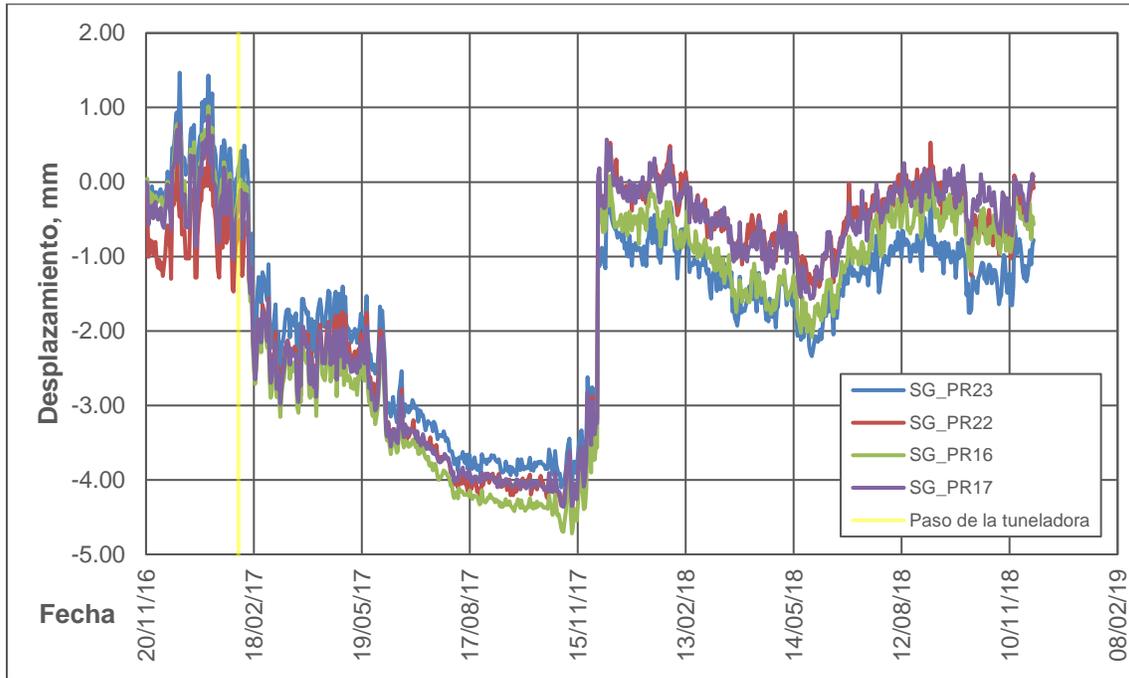


Figura 175. Desplazamiento Ote-Pte PR23, PR22, PR16 y PR17. Sagrario Metropolitano.

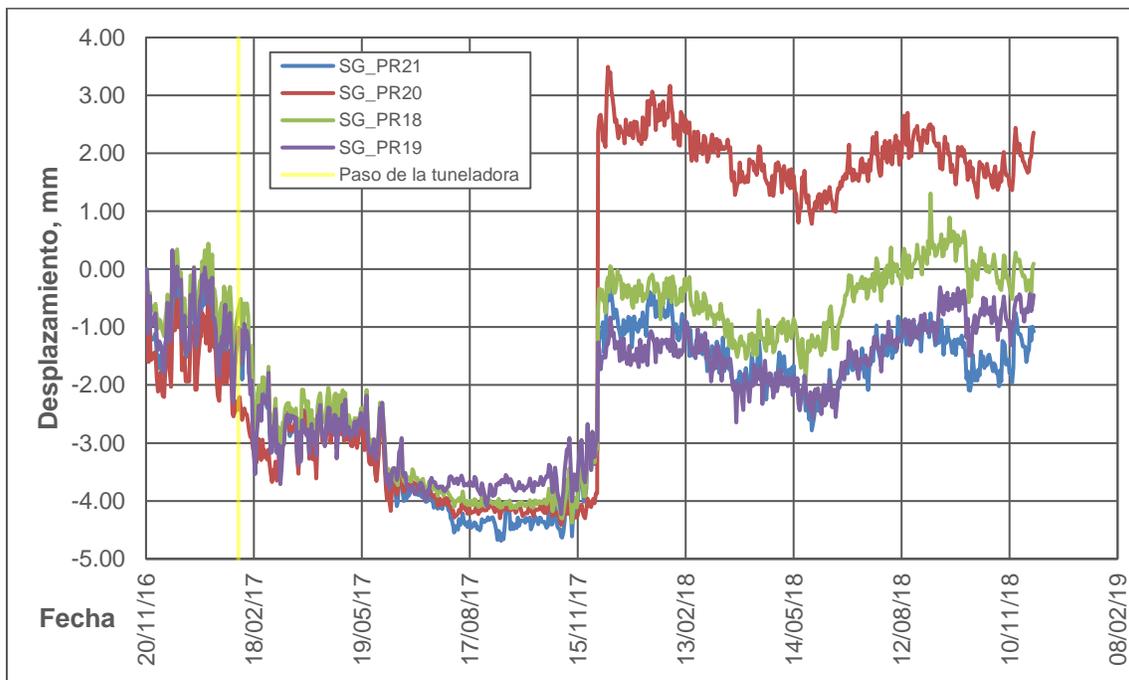


Figura 176. Desplazamiento Ote-Pte PR21, PR20, PR18 y PR19. Sagrario Metropolitano.

Asentamiento de dianas reflectantes en fachada norte.

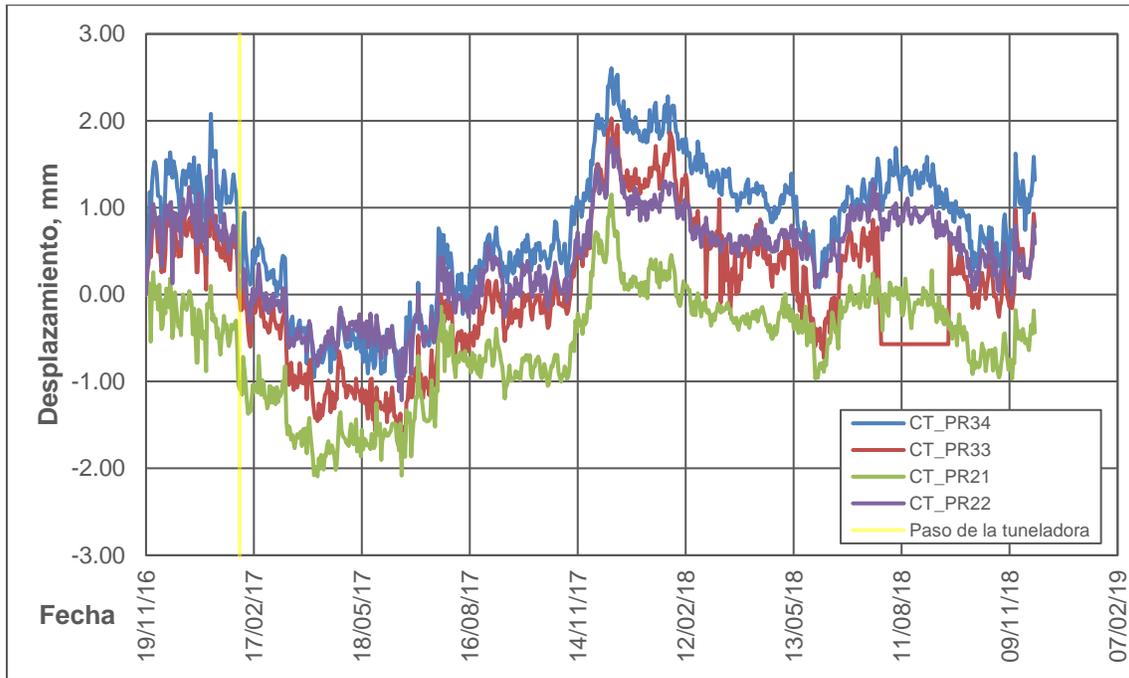


Figura 177. Asentamiento PR34, PR33, PR21 y PR22. Catedral Metropolitana.

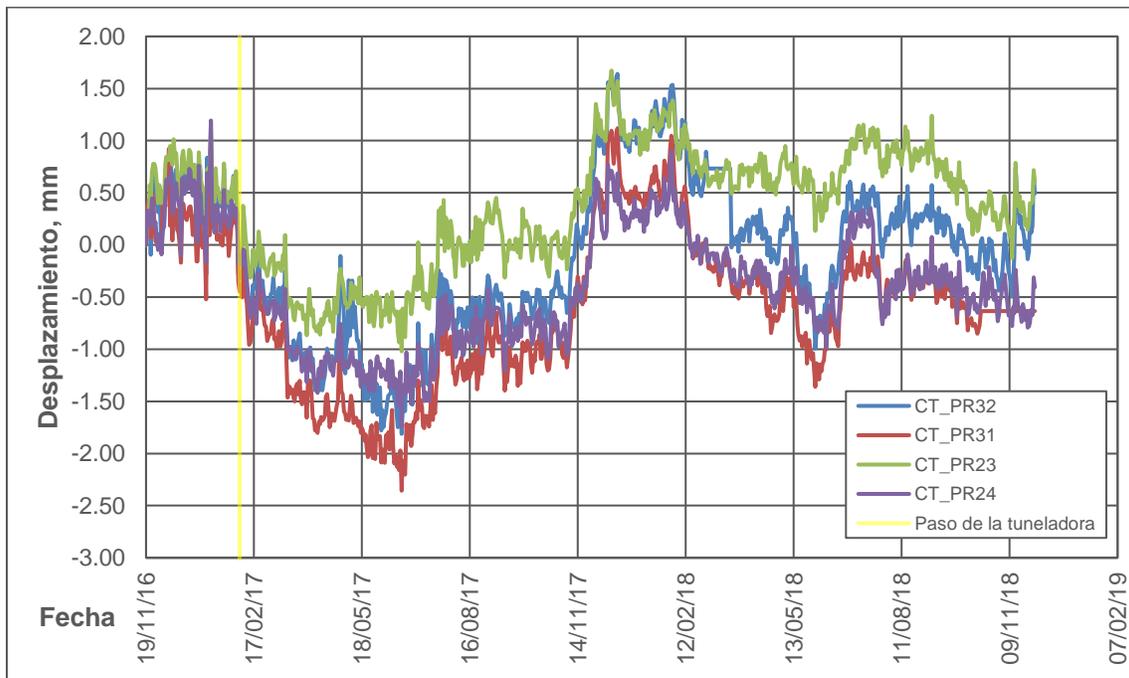


Figura 178. Asentamiento PR32, PR31, PR23 y PR24. Catedral Metropolitana.

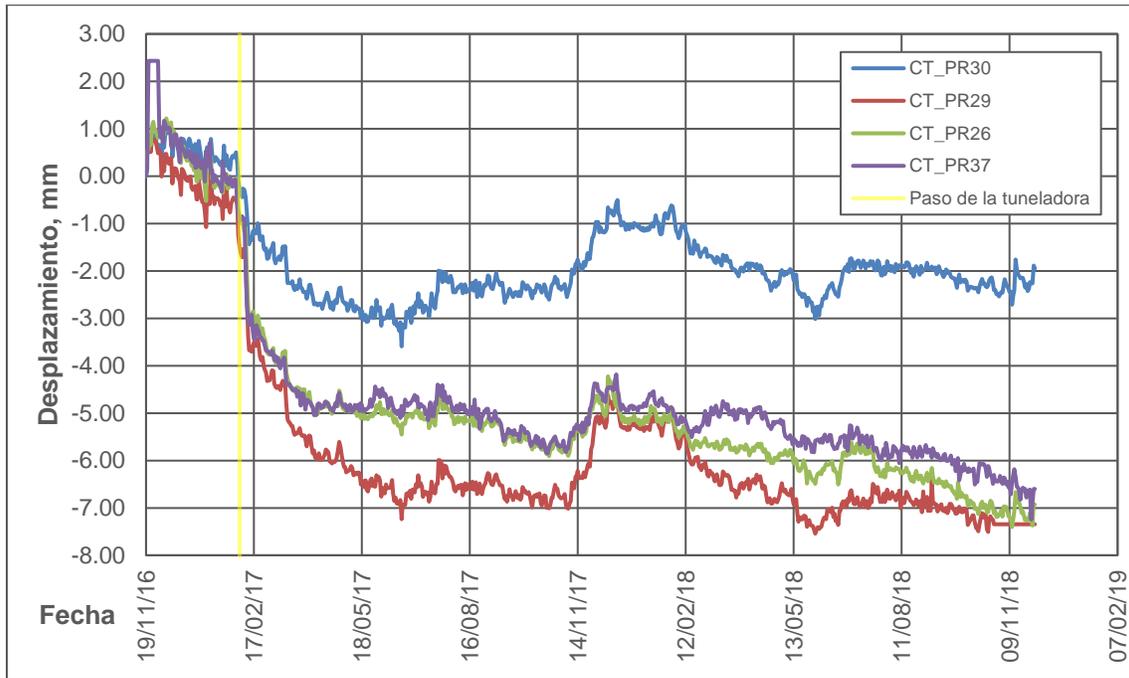


Figura 179. Asentamiento PR30, PR29, PR26 y PR37. Catedral Metropolitana.

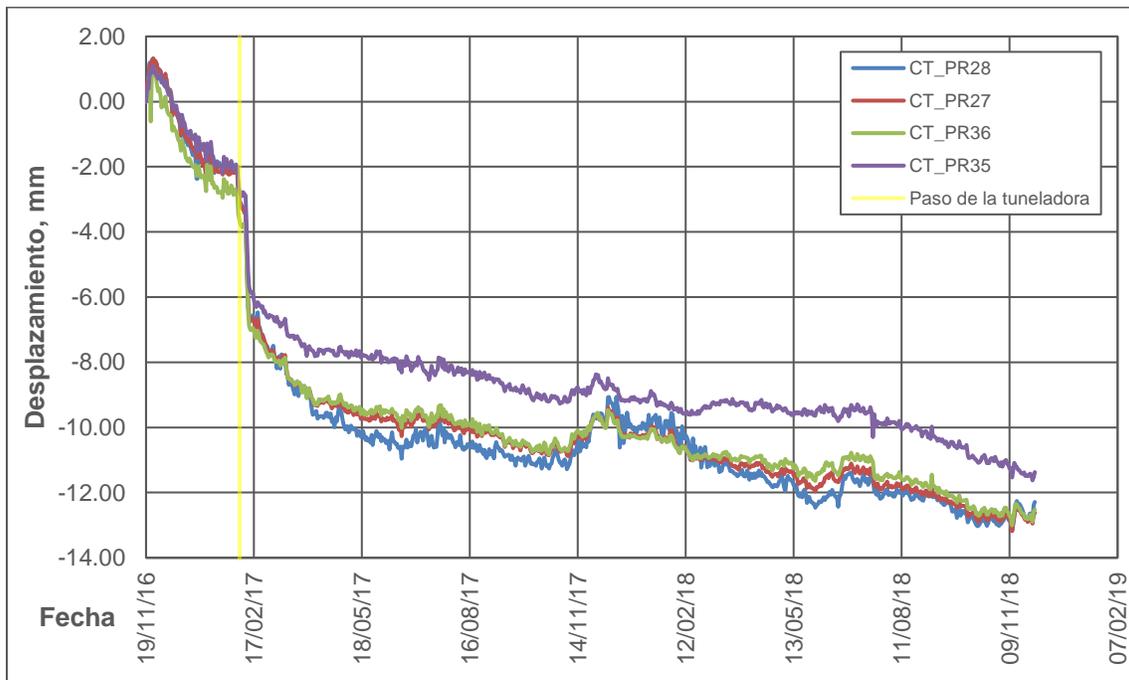


Figura 180. Asentamiento PR28, PR27, PR36 y PR35. Catedral Metropolitana.

Asentamiento de dianas reflectantes en fachada poniente.

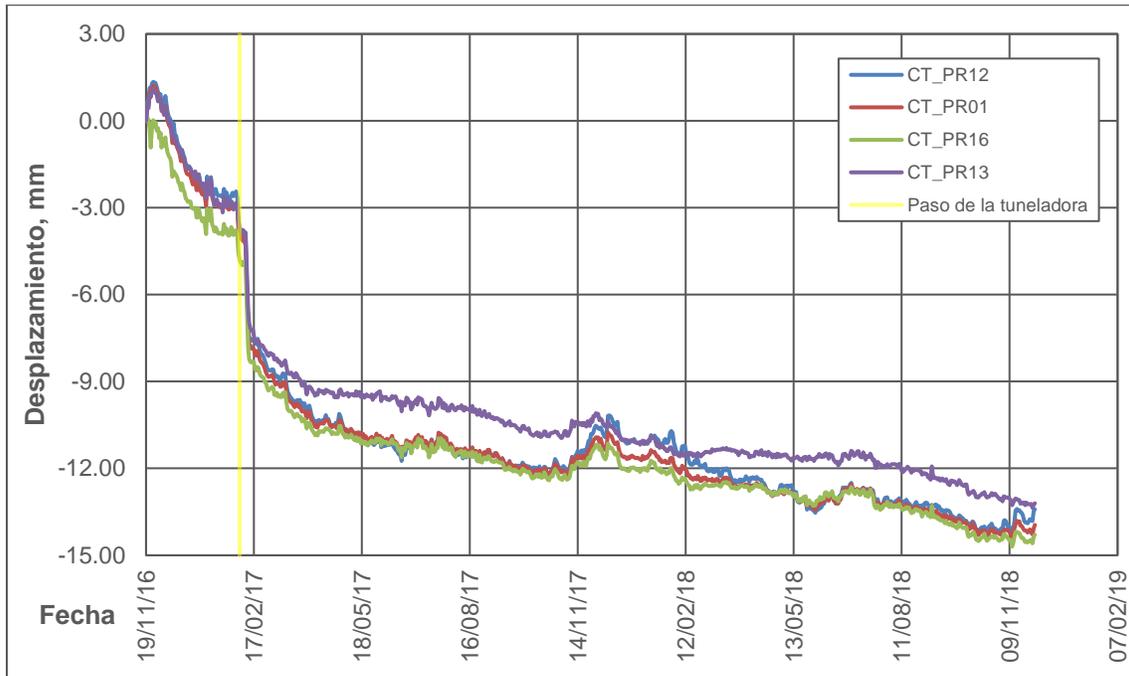


Figura 181. Asentamiento PR12, PR01, PR16 y PR13. Catedral Metropolitana.

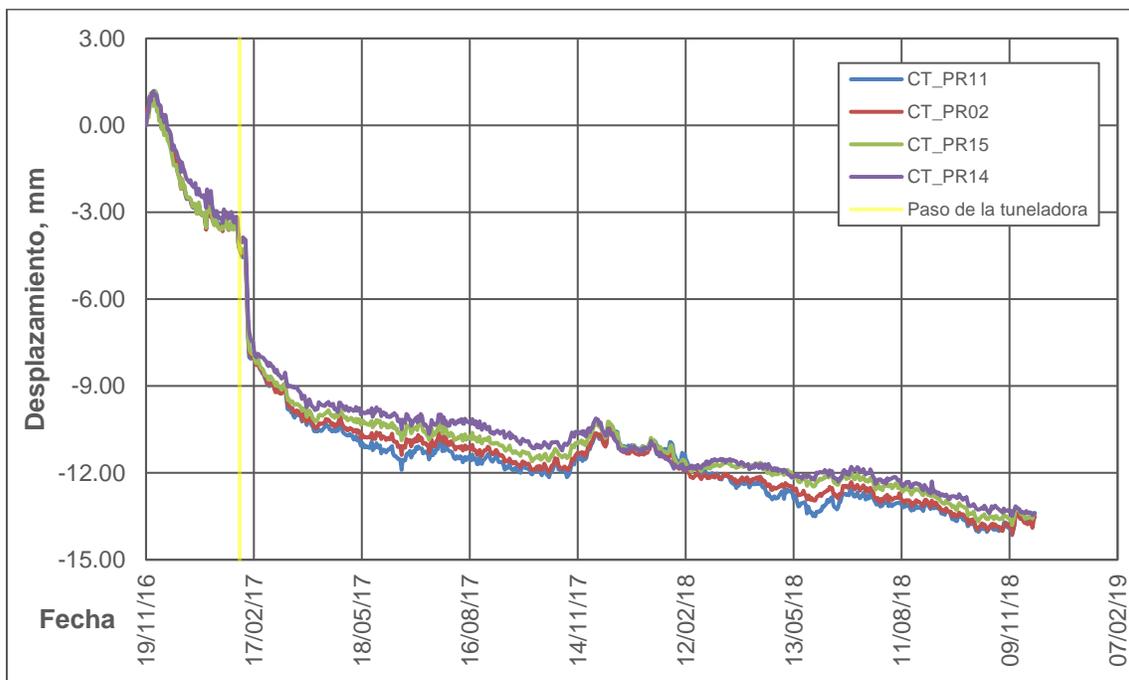


Figura 182. Asentamiento PR11, PR02, PR15 y PR14. Catedral Metropolitana.

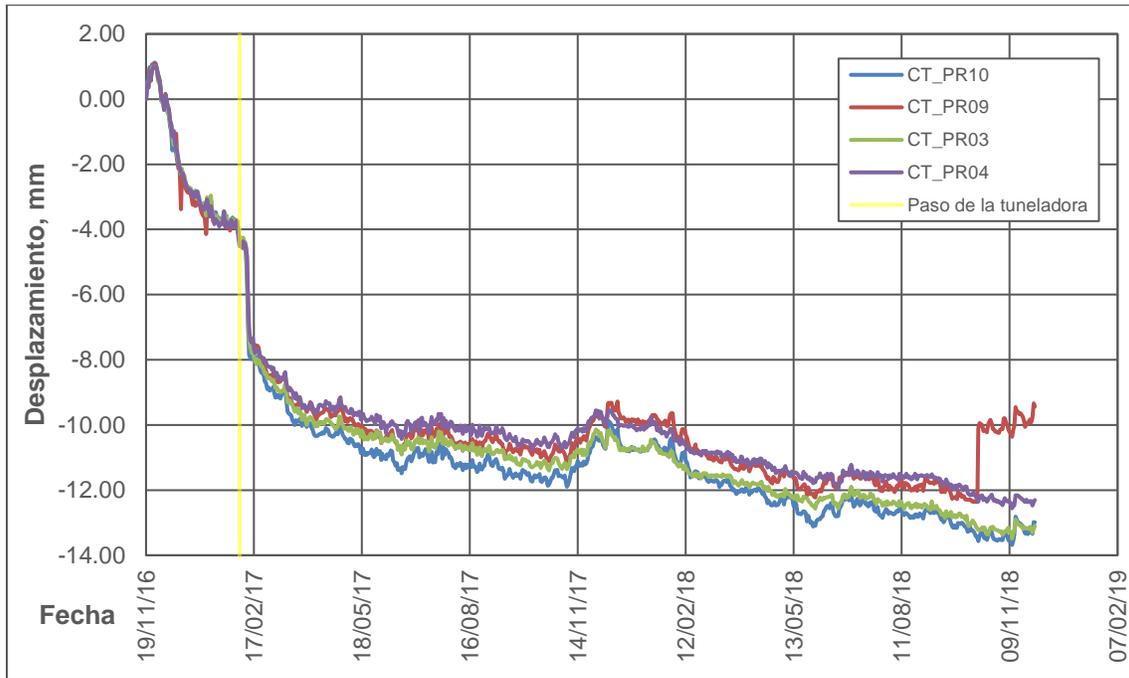


Figura 183. Asentamiento PR10, PR09, PR03 y PR04. Catedral Metropolitana.

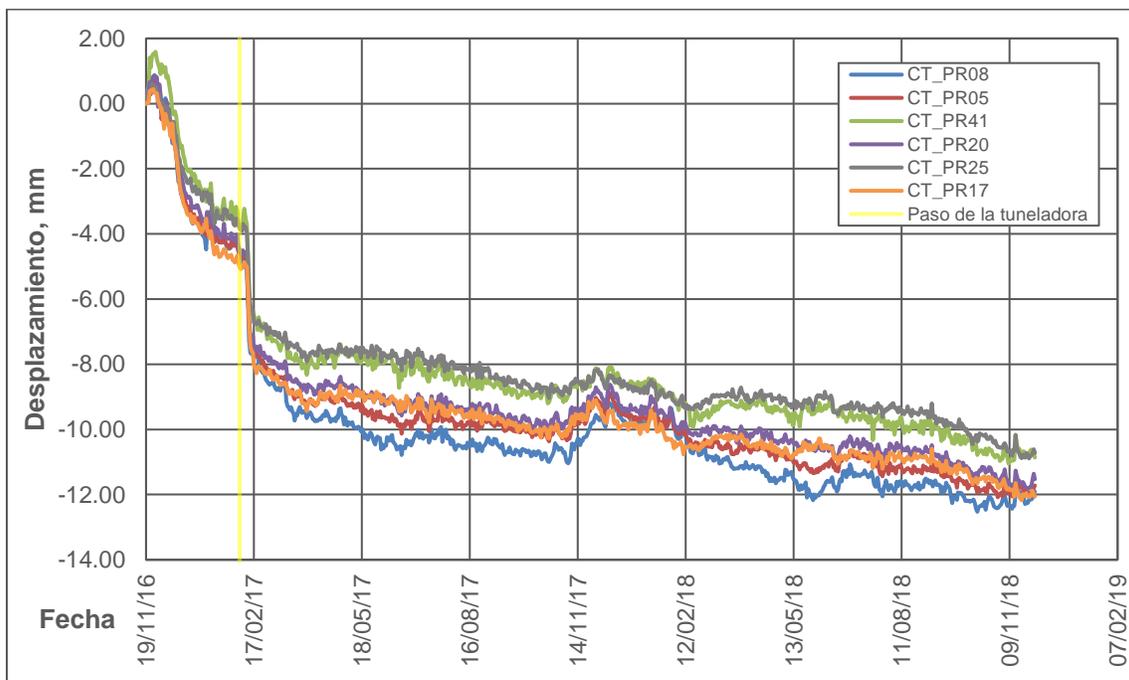


Figura 184. Asentamiento PR08, PR05, PR41, PR20, PR25 y PR17. Catedral Metropolitana.

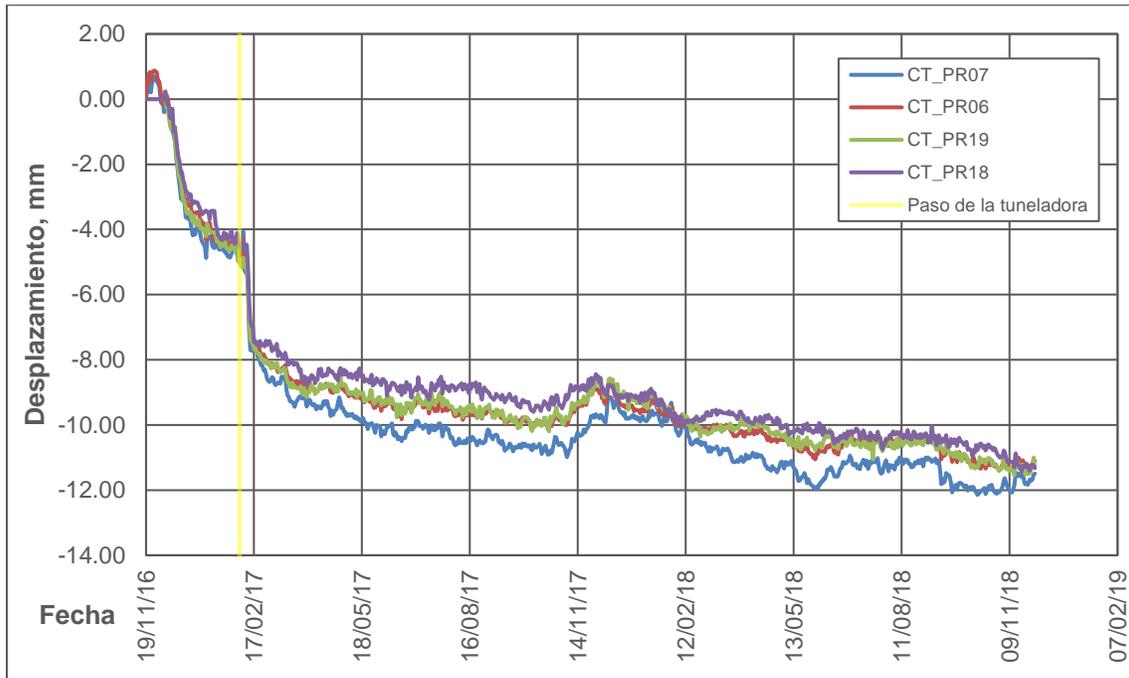


Figura 185. Asentamiento PR07, PR06, PR19 y PR18. Catedral Metropolitana.

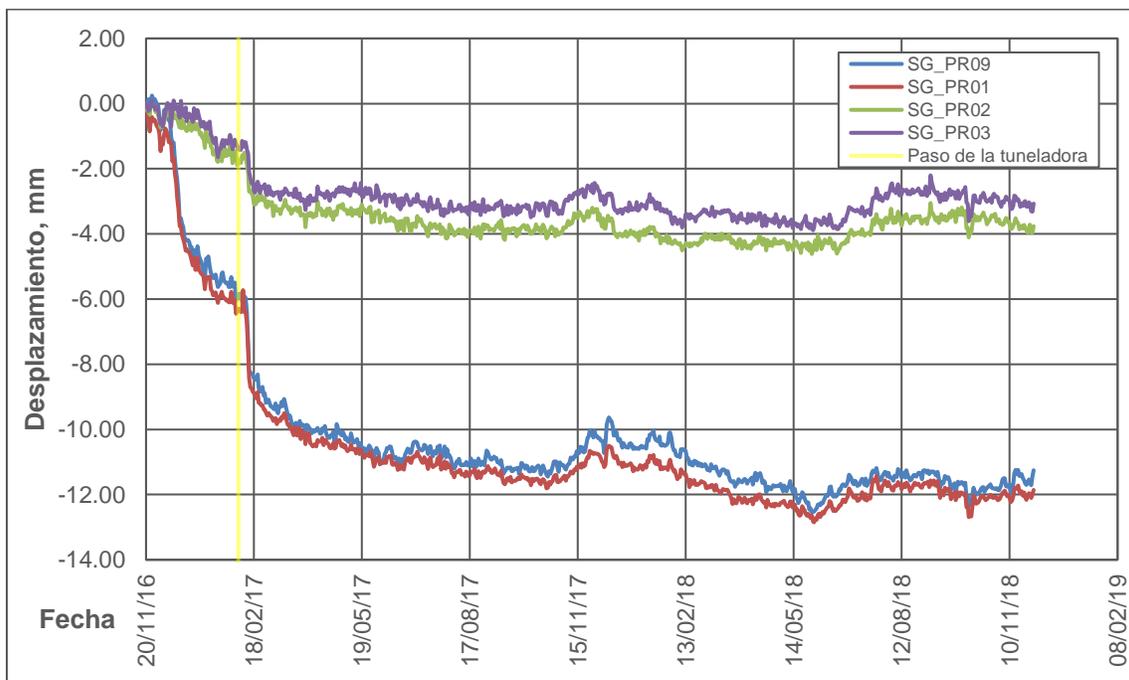


Figura 186. Asentamiento PR09, PR01, PR02 y PR03. Sagrario Metropolitano.

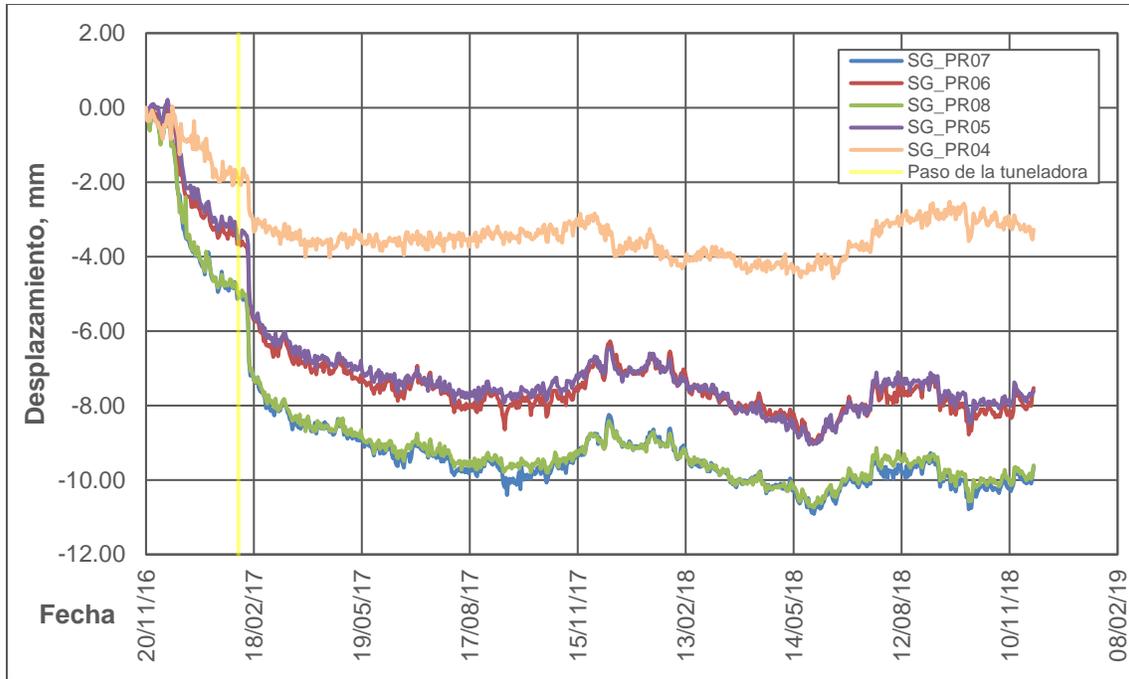


Figura 187. Asentamiento PR07, PR06, PR08, PR05 y PR04. Sagrario Metropolitano.

Asentamiento de dianas reflectantes en fachada sur.

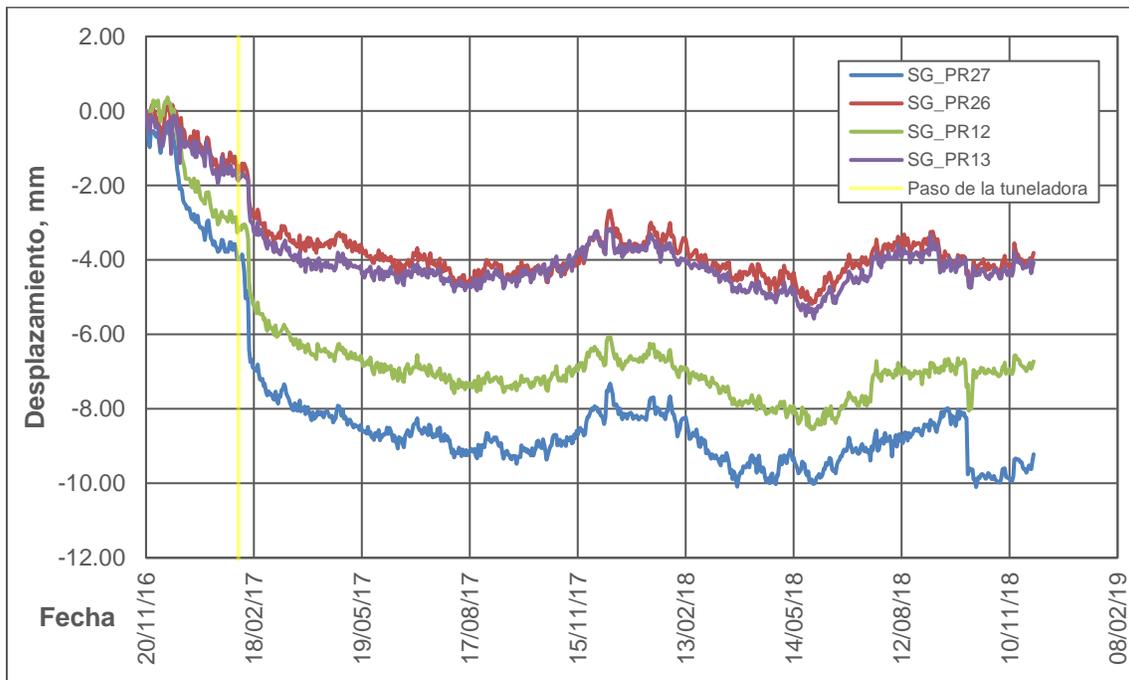


Figura 188. Asentamiento PR27, PR26, PR12 y PR13. Sagrario Metropolitano.

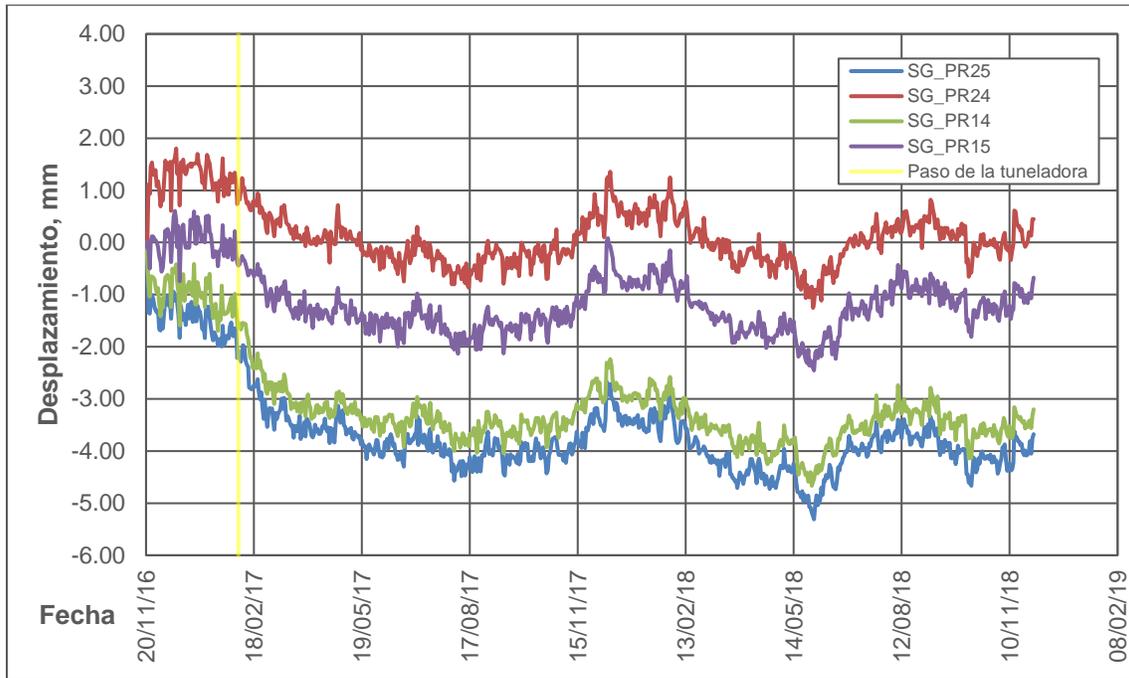


Figura 189. Asentamiento PR25, PR24, PR14 y PR15. Sagrario Metropolitano.

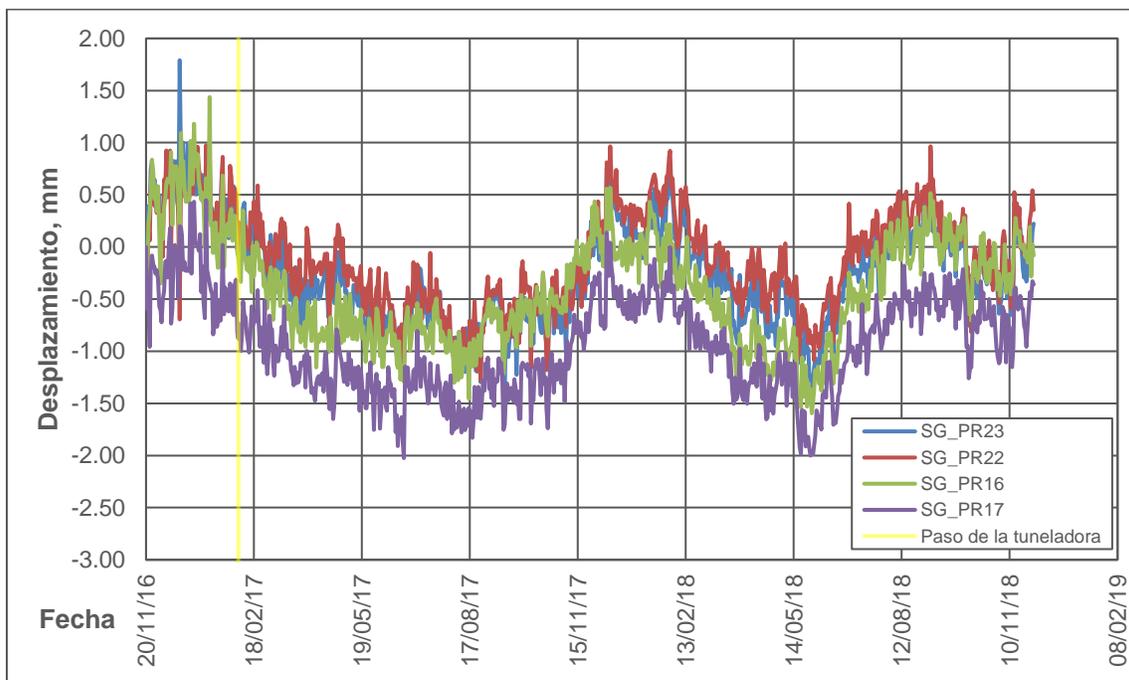


Figura 190. Asentamiento PR23, PR22, PR16 y PR17. Sagrario Metropolitano.

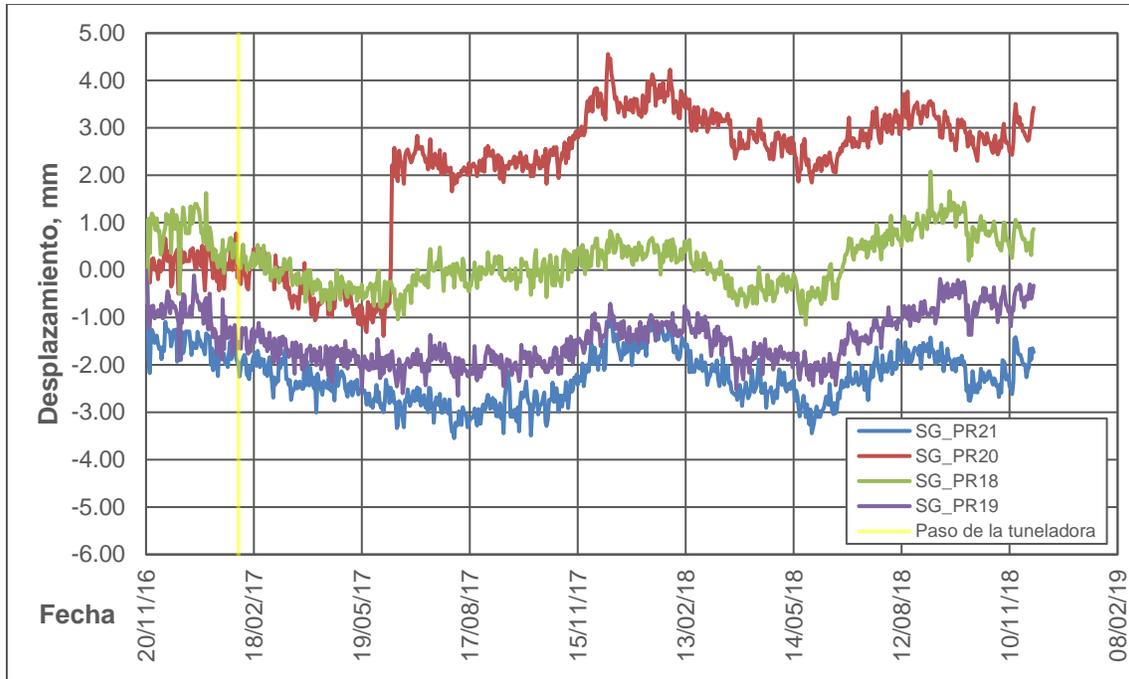


Figura 191. Asentamiento PR21, PR20, PR18 y PR19. Sagrario Metropolitano.

Rotación Oriente-Poniente de tiltmeters.

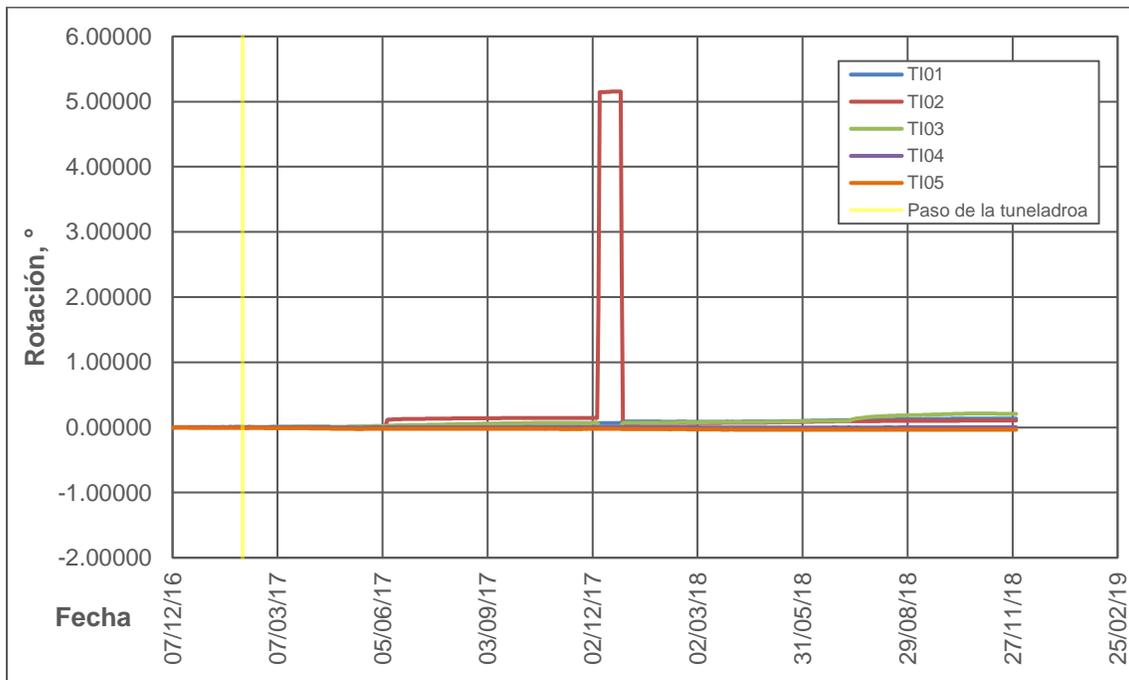


Figura 192. Rotación Ote-Pte. TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana.

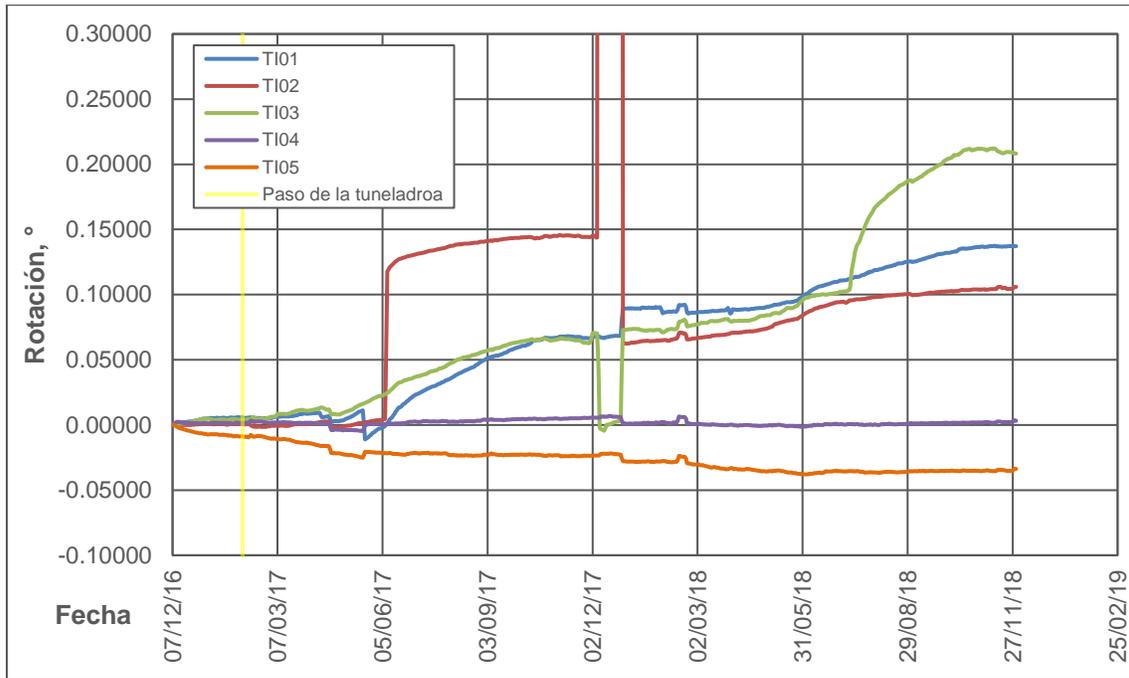


Figura 193. Rotación Ote-Pte. TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana. Anomalia truncada.

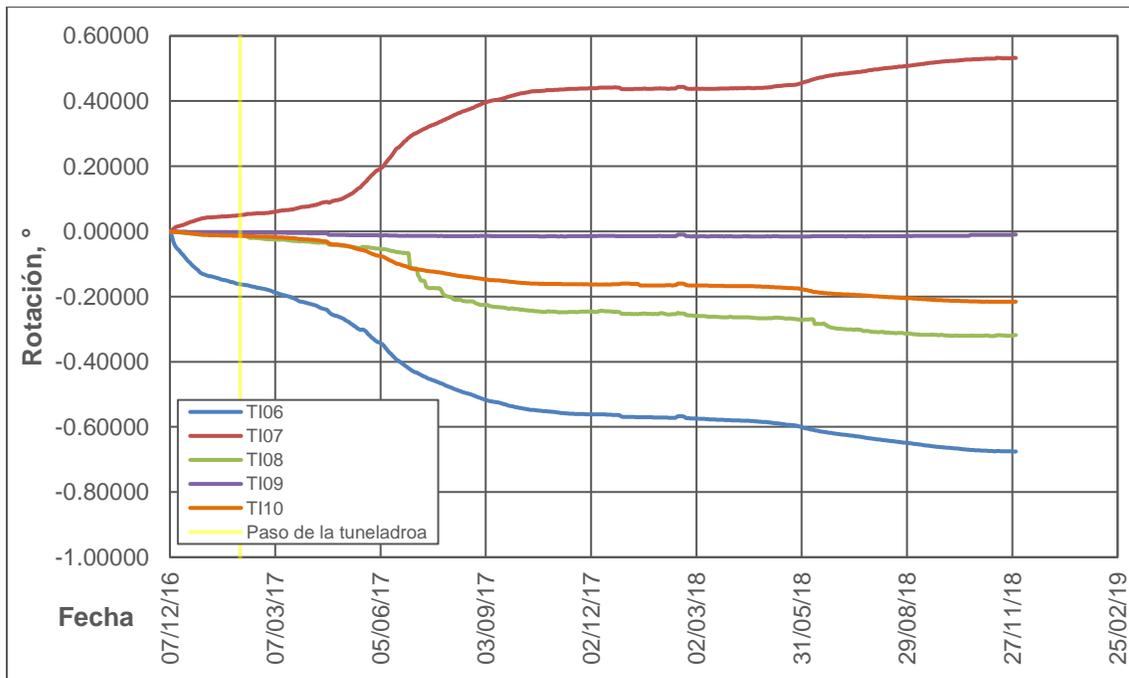


Figura 194. Rotación Ote-Pte TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Catedral Metropolitana.

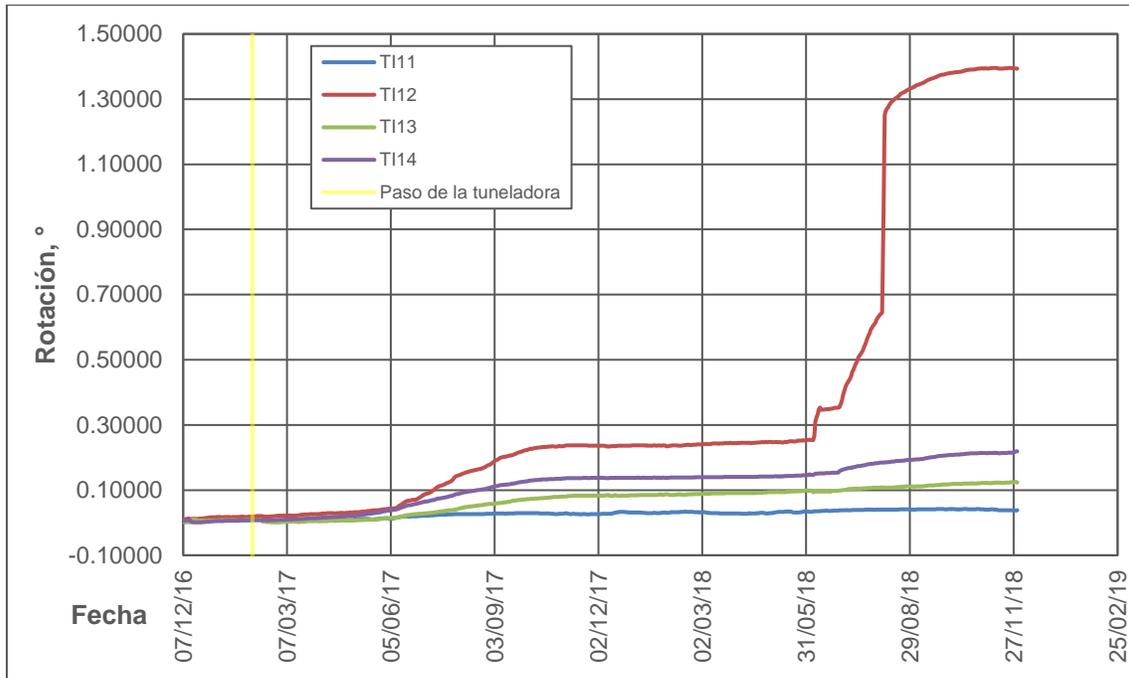


Figura 195. Rotación Ote-Pte TI11, TI12, TI13 y TI14. Sagrario Metropolitano.

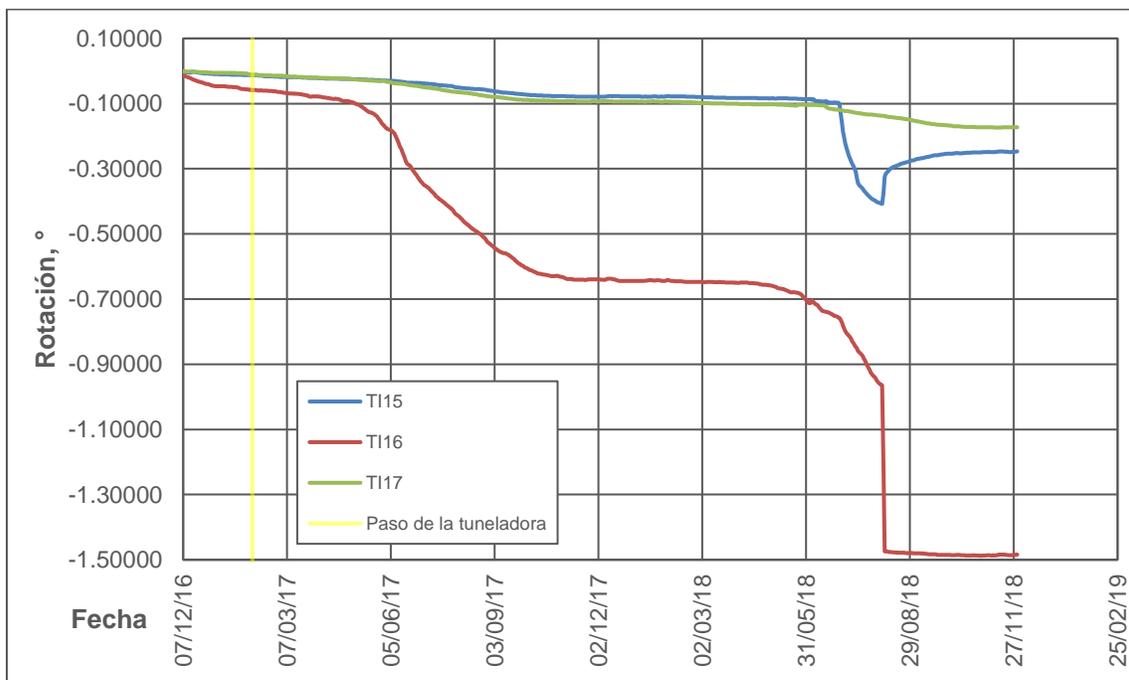


Figura 196 Rotación Ote-Pte TI15, TI16 y TI17. Sagrario Metropolitano.

Rotación Norte-Sur de tiltmeters.

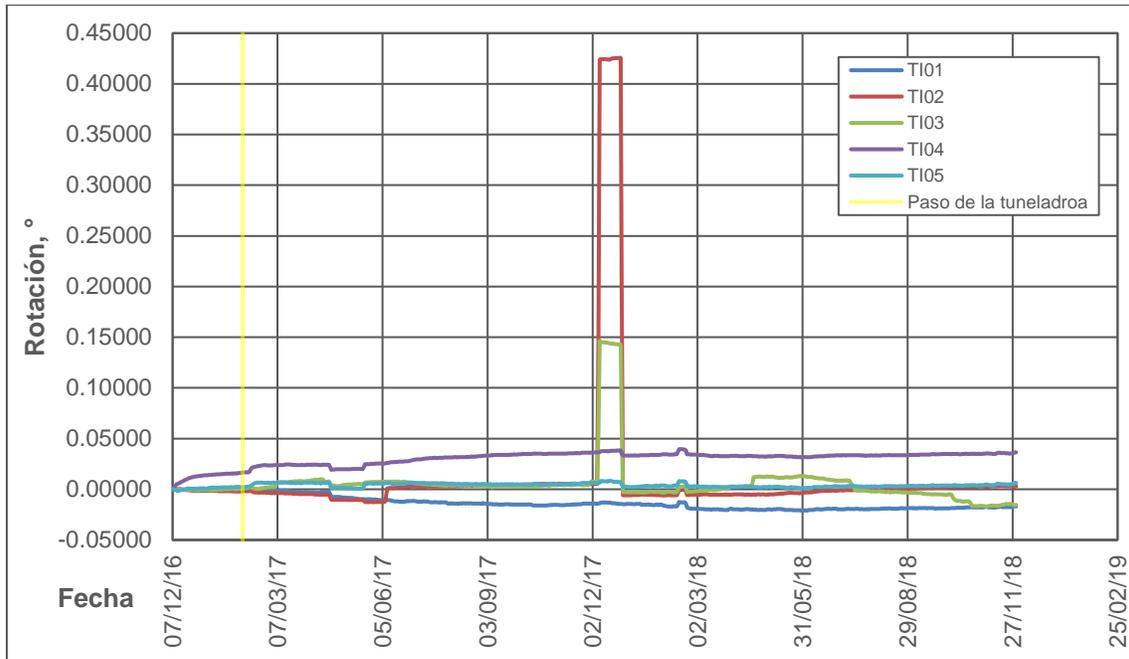


Figura 197. Rotación Nte-Sur. TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana.

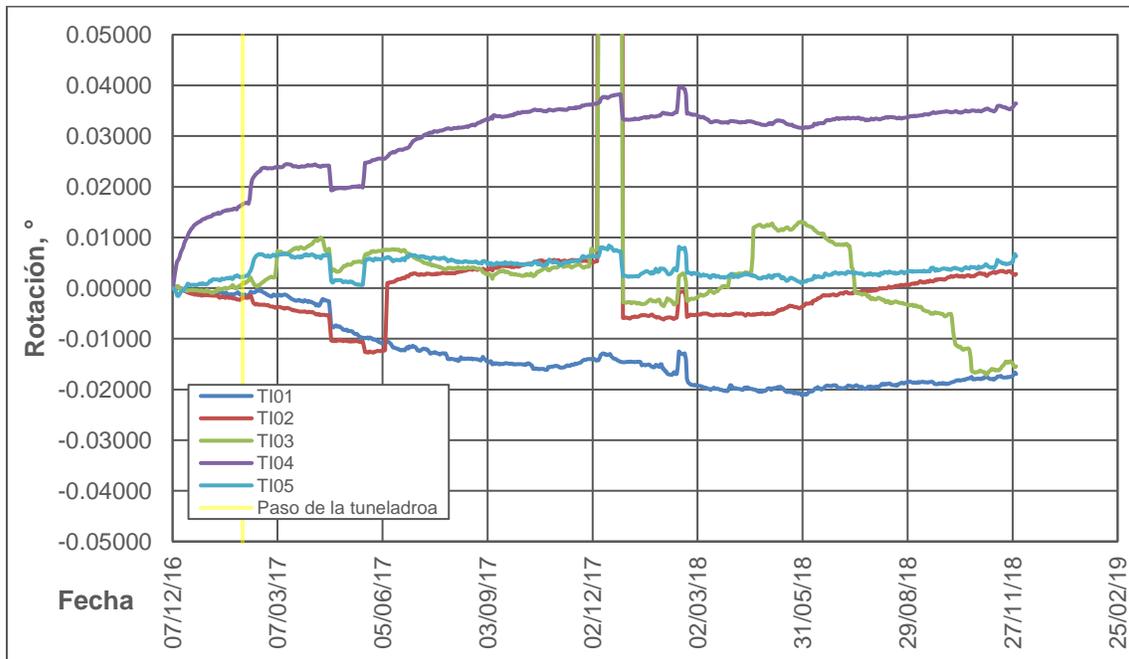


Figura 198. Rotación Nte-Sur. TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana. Anomalia truncada.

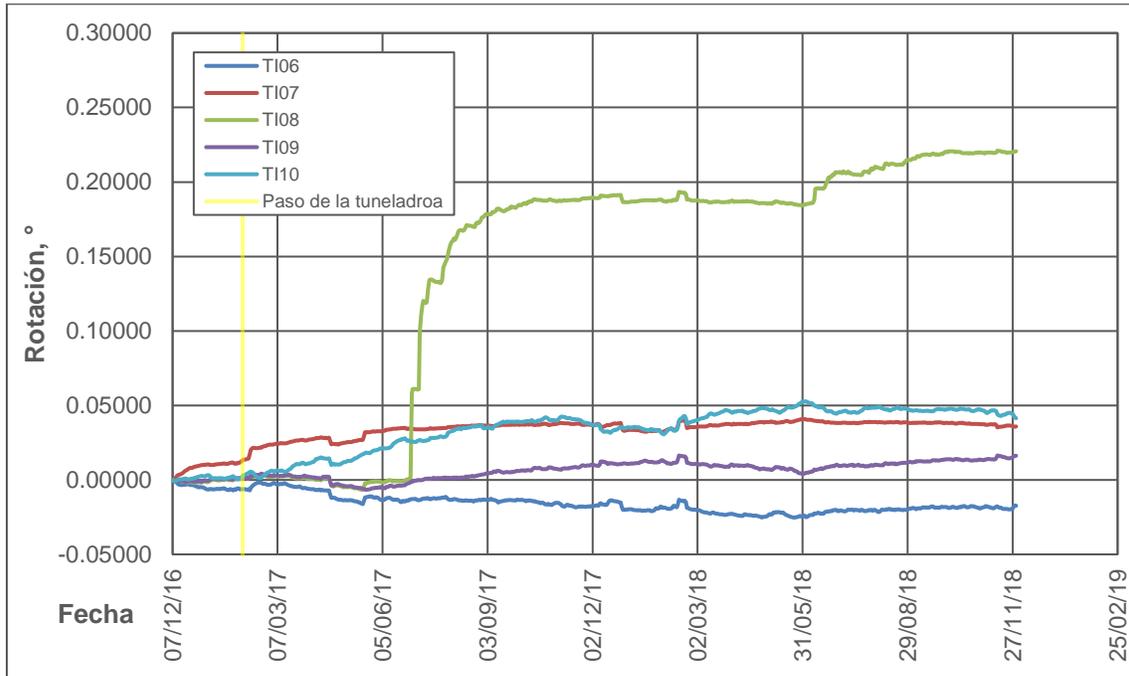


Figura 199. Rotación Nte-Sur TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Catedral Metropolitana.

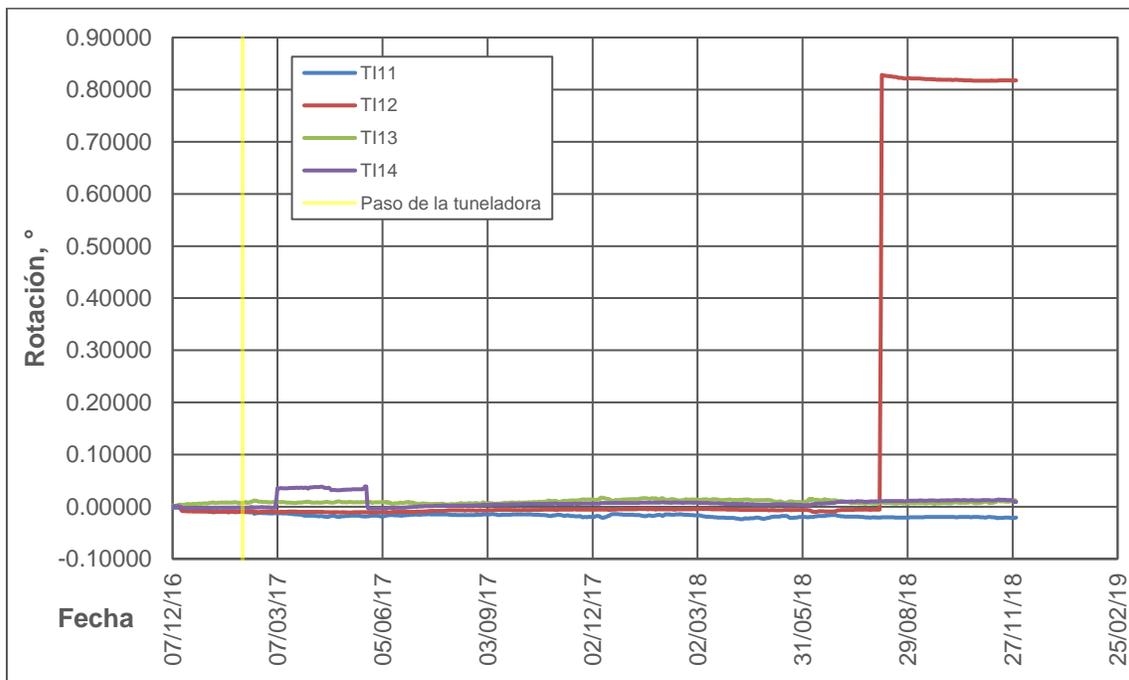


Figura 200. Rotación Nte-Sur TI11, TI12, TI13 y TI14. Sagrario Metropolitan.

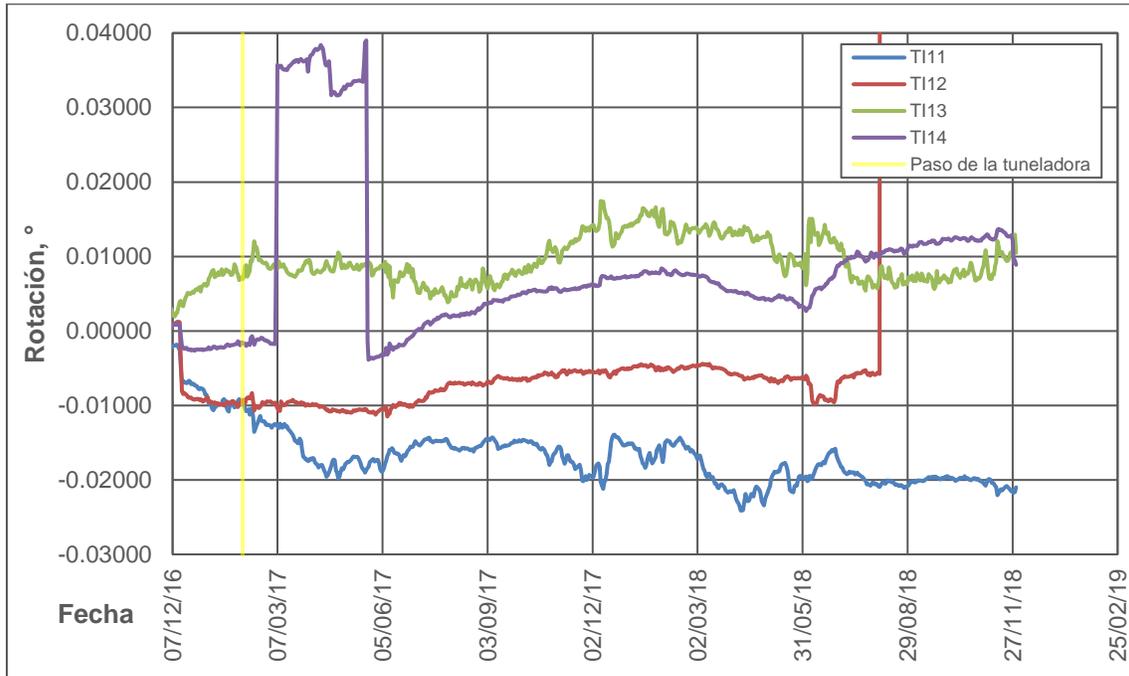


Figura 201. Rotación Nte-Sur TI11, TI12, TI13 y TI14. Sagrario Metropolitano. Anomalía truncada.

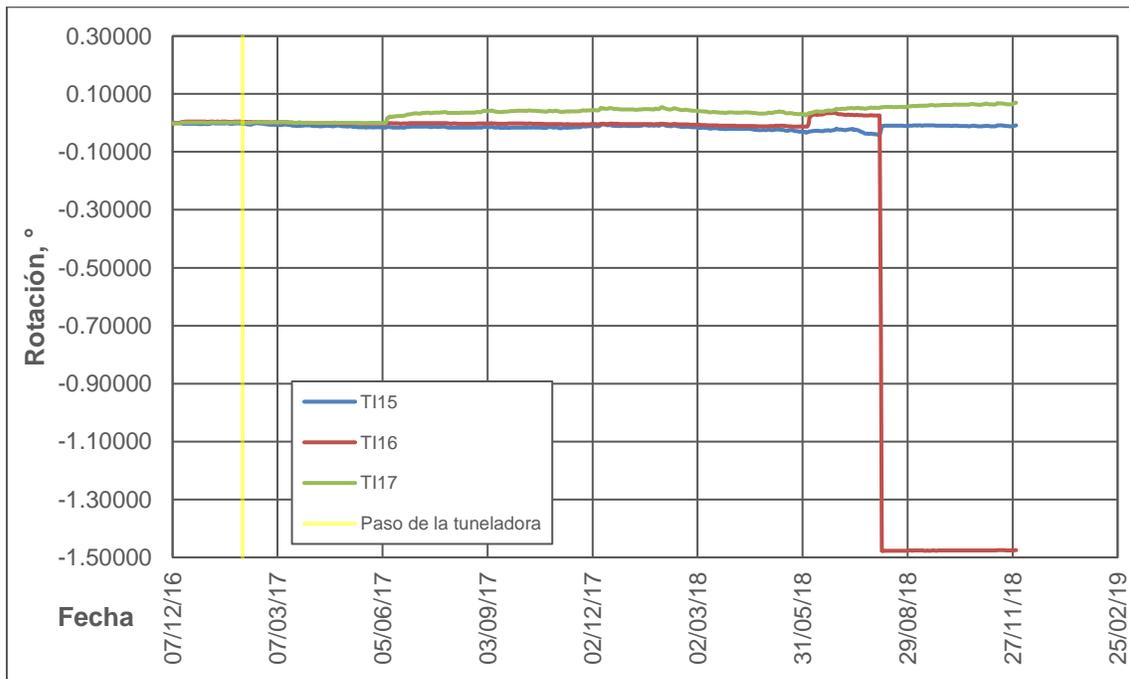


Figura 202. Rotación Nte-Sur TI15, TI16 y TI17. Sagrario Metropolitano.

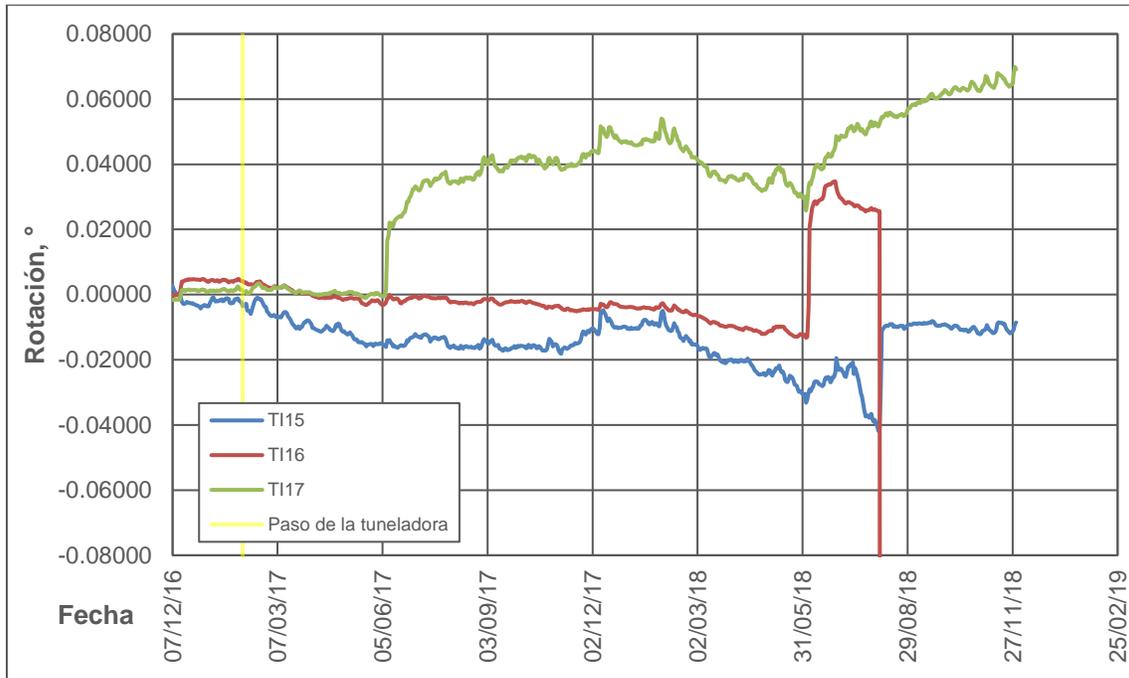


Figura 203. Rotación Nte-Sur TI15, TI16 y TI17. Sagrario Metropolitano. Anomalia truncada.

Desplazamiento Oriente-Poniente de tiltmeters.

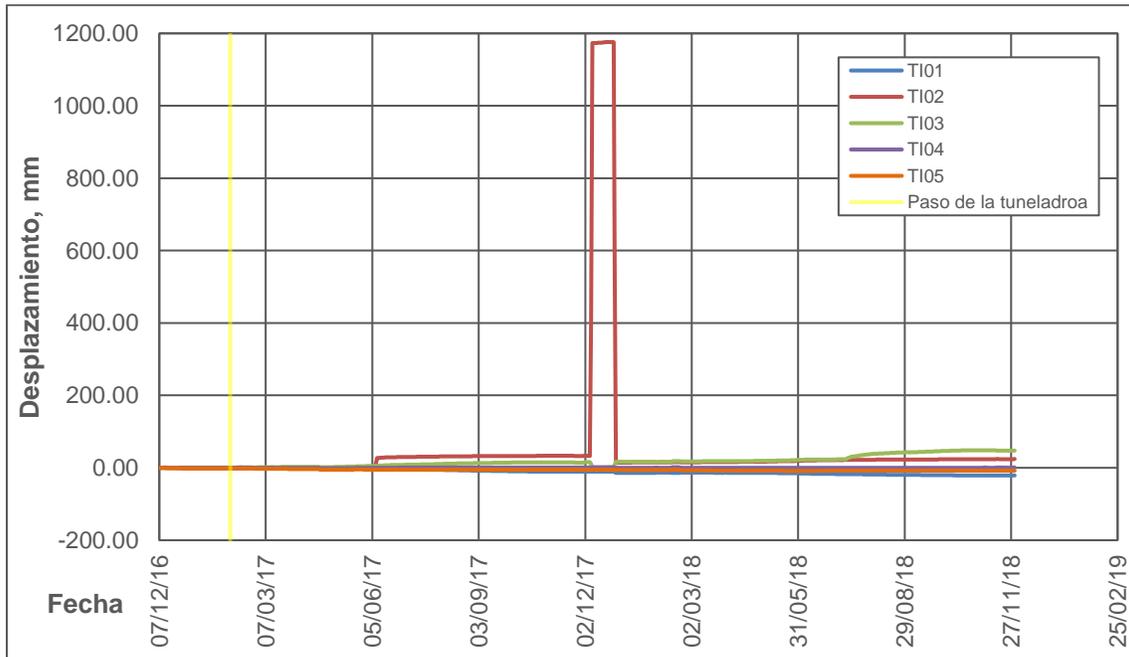


Figura 204. Desplazamiento Ote-Pte TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana.

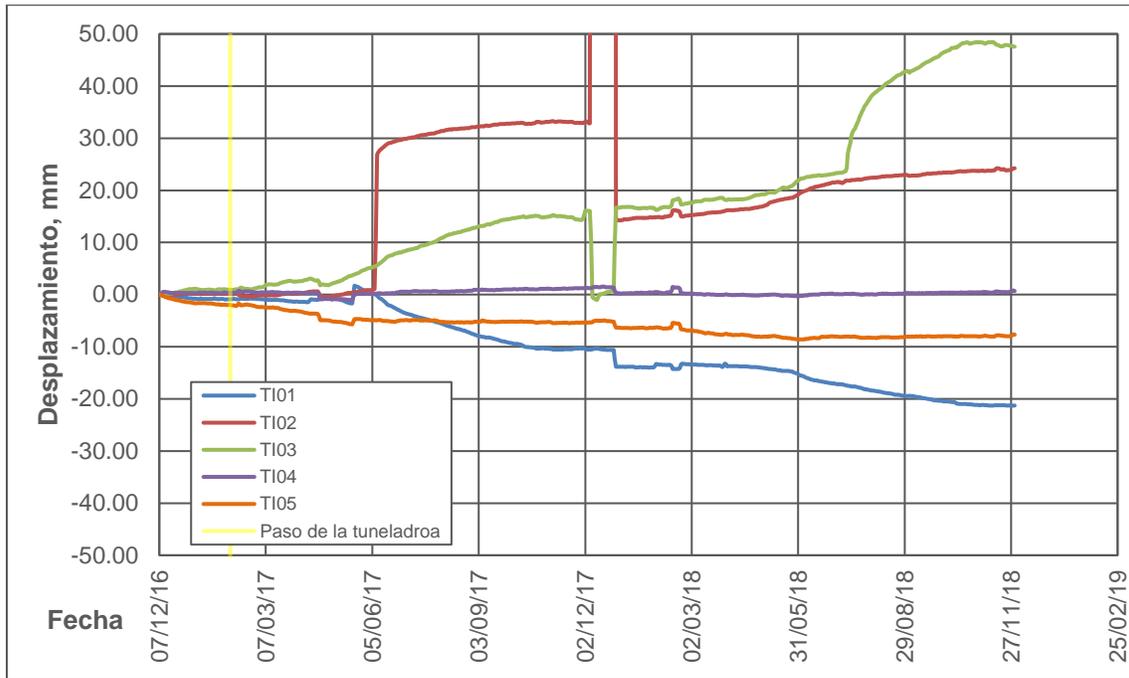


Figura 205. Desplazamiento Ote-Pte TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana. Anomalia truncada.

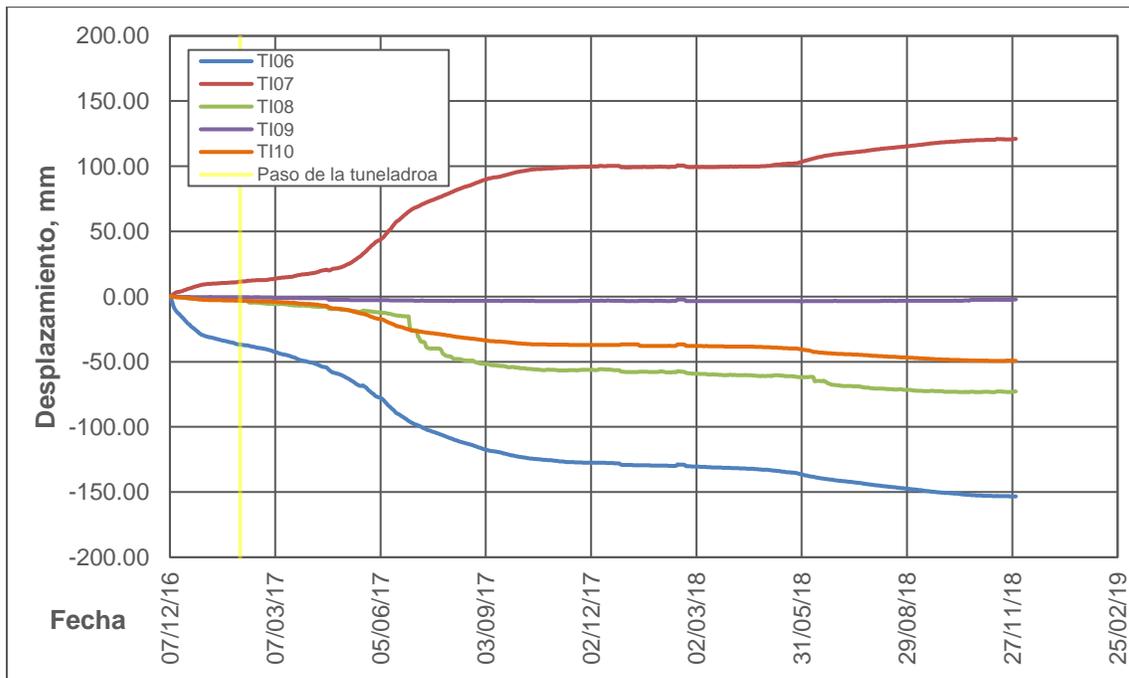


Figura 206. Desplazamiento Ote-Pte TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Catedral Metropolitana.

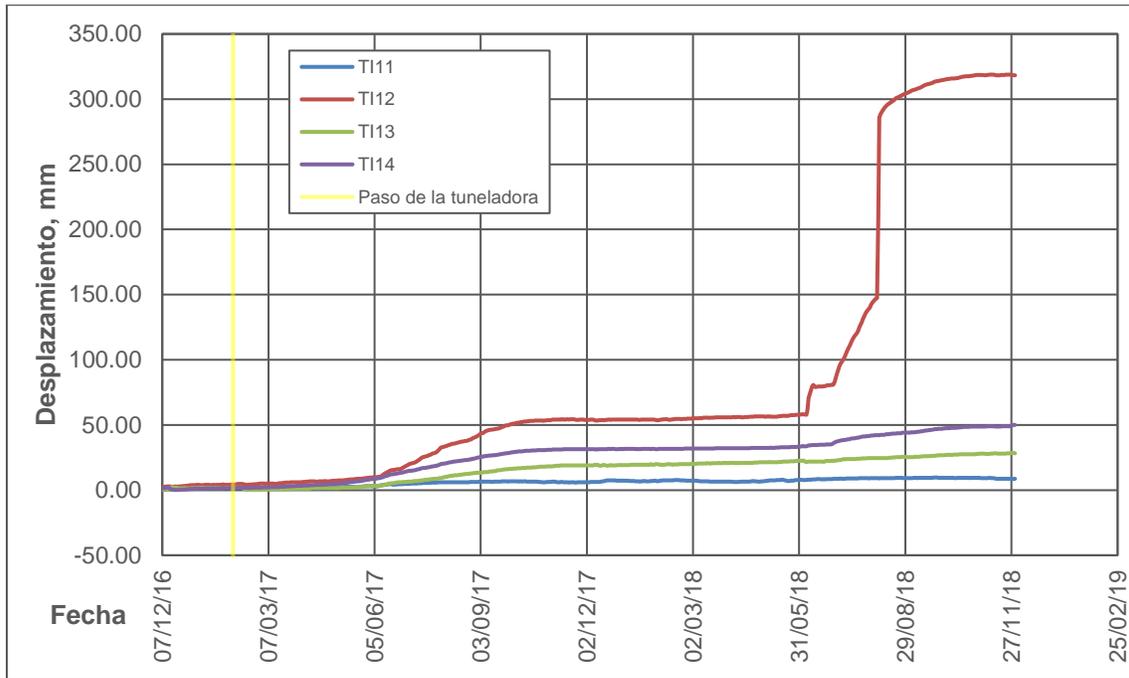


Figura 207. Desplazamiento Ote-Pte TI11, TI12, TI13 y TI14. Sagrario Metropolitano.

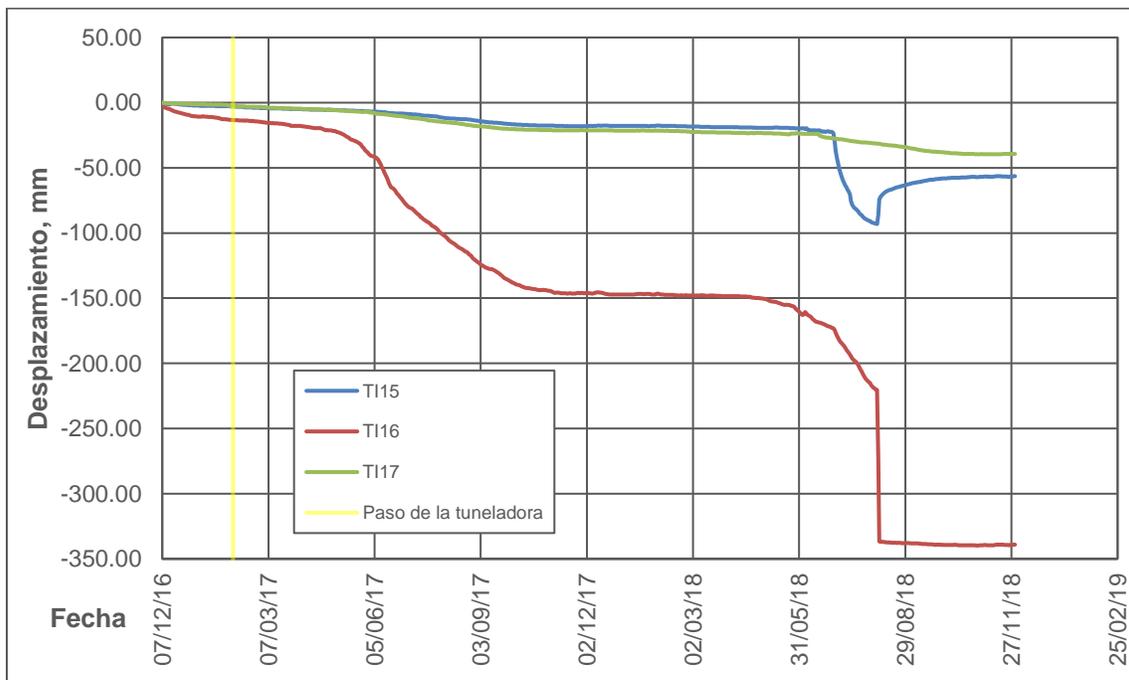


Figura 208. Desplazamiento Ote-Pte TI15, TI16 y TI17. Sagrario Metropolitano.

Desplazamiento Norte-Sur de tiltmeters.

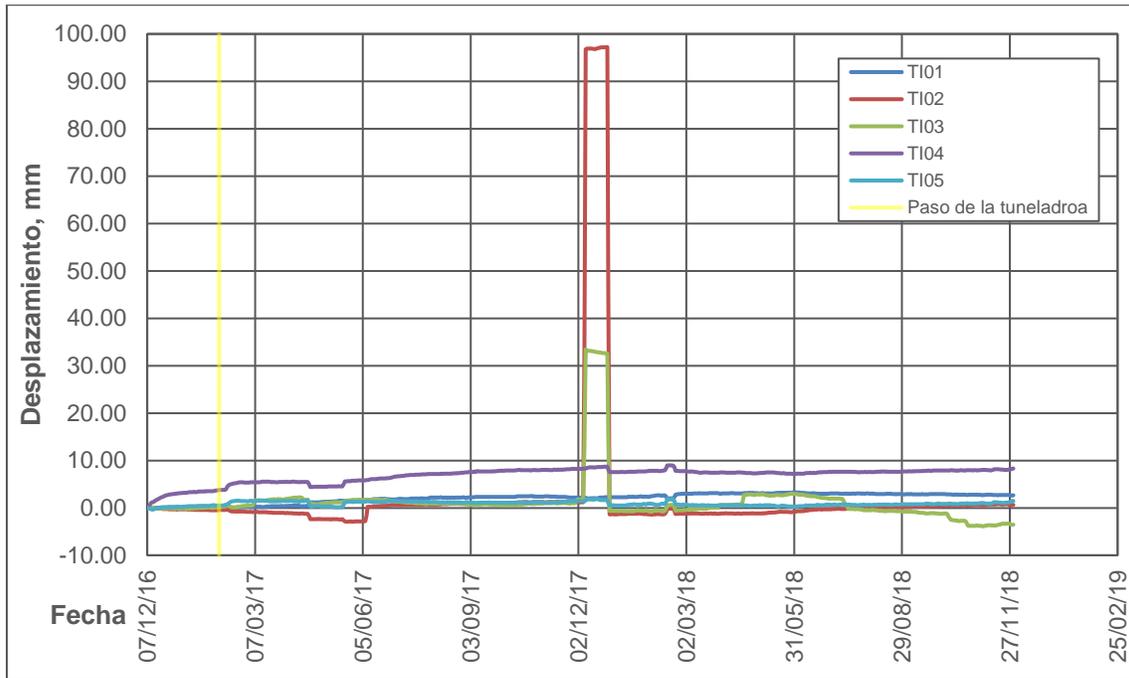


Figura 209. Desplazamiento Nte-Sur TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana.

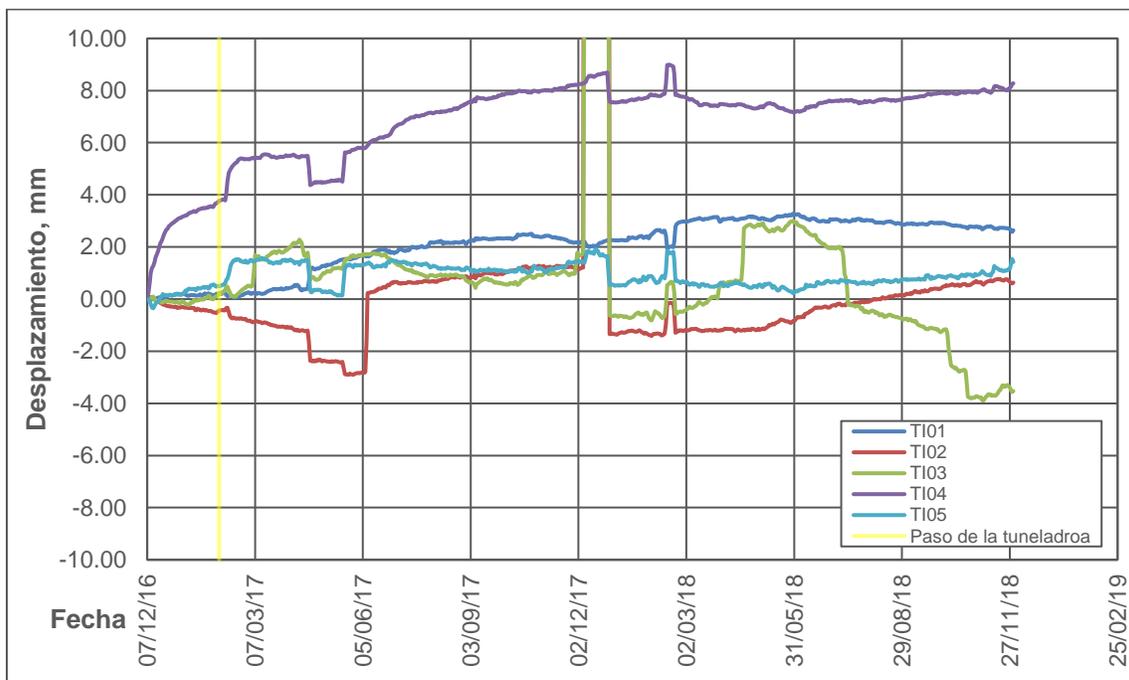


Figura 210. Desplazamiento Nte-Sur TI01, TI02, TI03, TI04 y TI05. Catedral Metropolitana. Anomalía truncada.

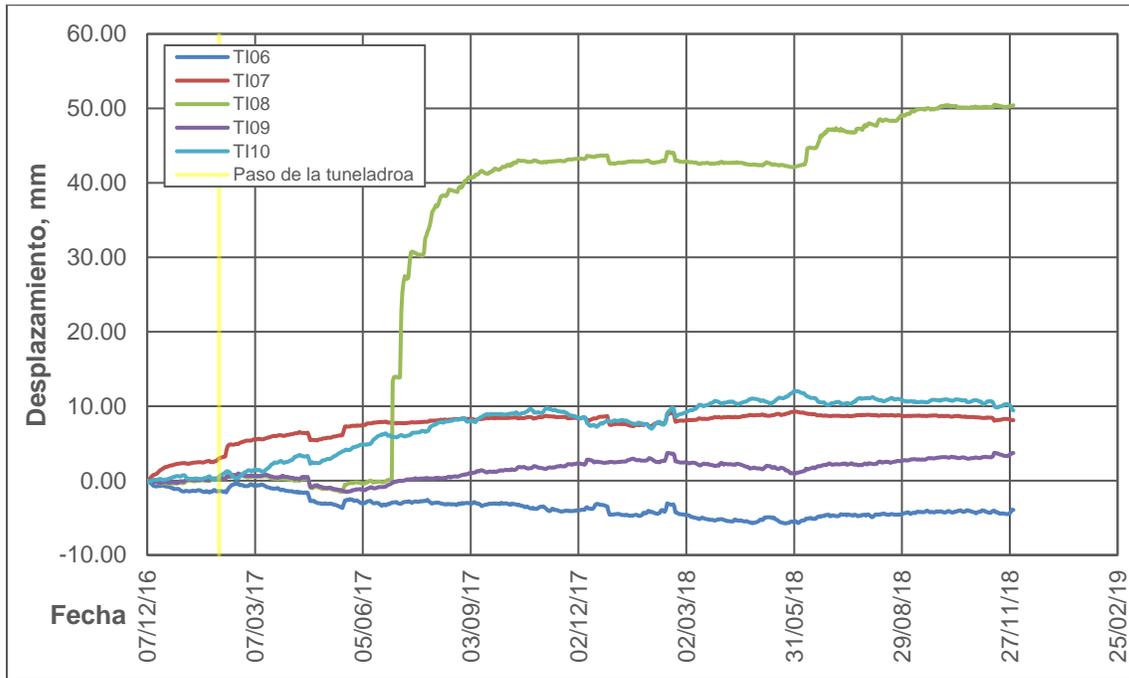


Figura 211. Desplazamiento Nte-Sur TI06, TI07, TI08, TI09 y TI10. Catedral Metropolitana.

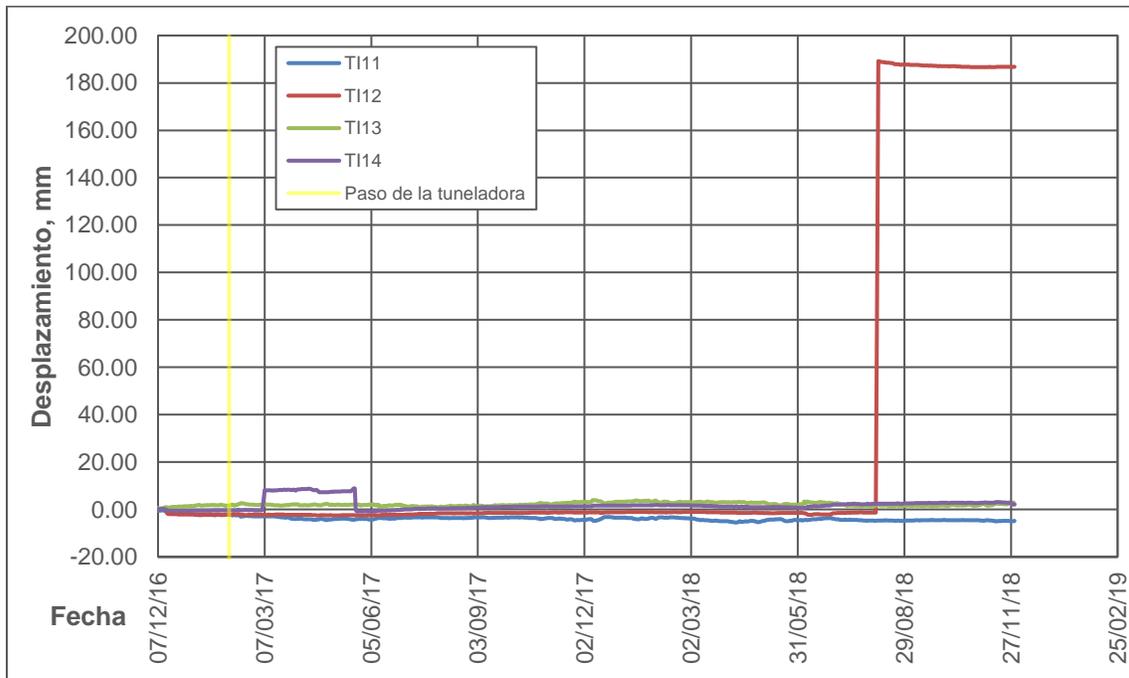


Figura 212. Desplazamiento Nte-Sur TI11, TI12, TI13 y TI14. Sagrario Metropolitana.

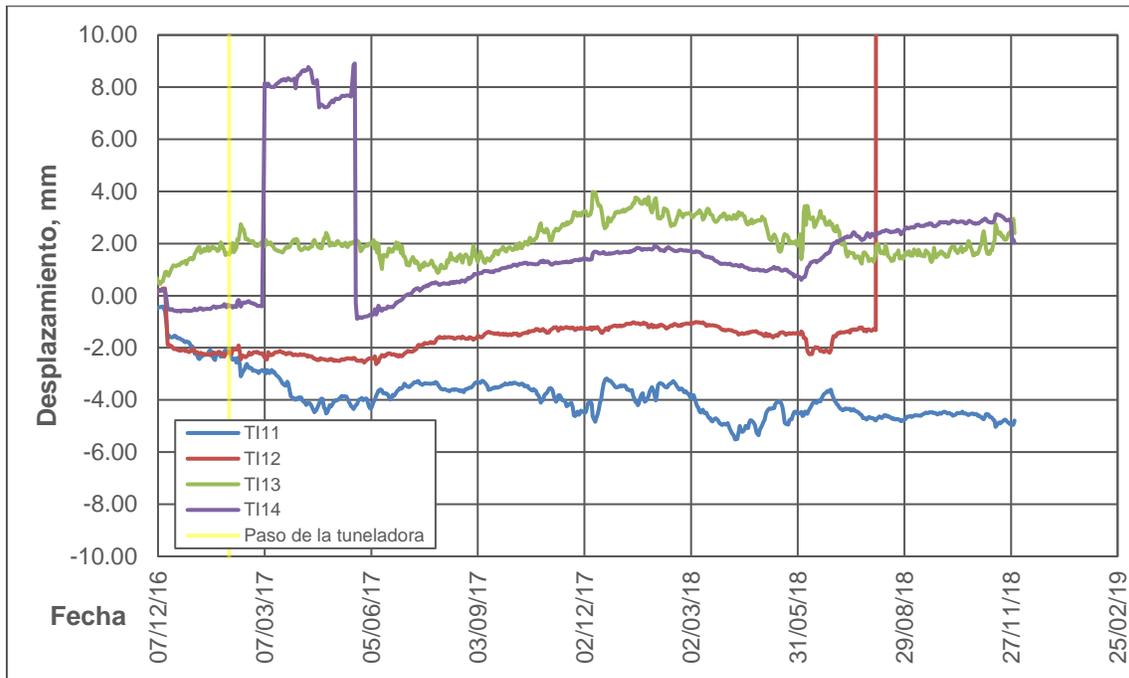


Figura 213. Desplazamiento Nte-Sur TI11, TI12, TI13 y TI14. Sagrario Metropolitano. Anomalia truncada.

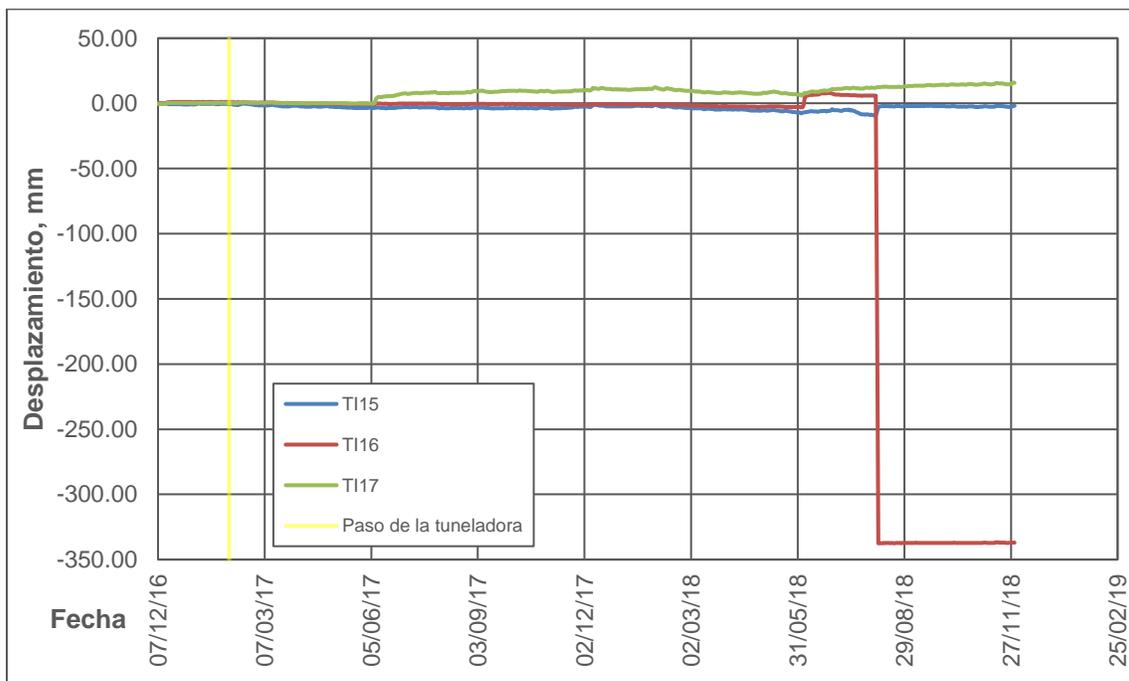


Figura 214. Desplazamiento Nte-Sur TI15, TI16 y TI17. Sagrario Metropolitano.

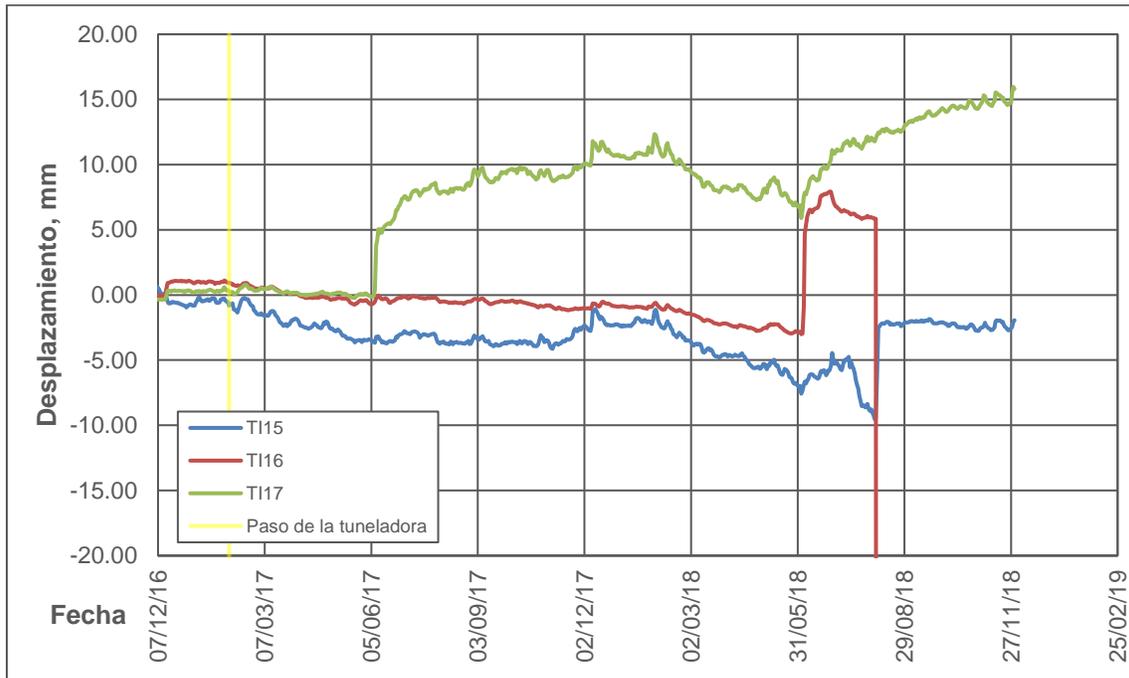


Figura 215. Desplazamiento Nte-Sur TI15, TI16 y TI17. Sagrario Metropolitano. Anomalía truncada.

ANEXO C. Gráficas de San Francisco de Asís.

Desplazamiento Norte-Sur de dianas reflectantes en fachada norte.

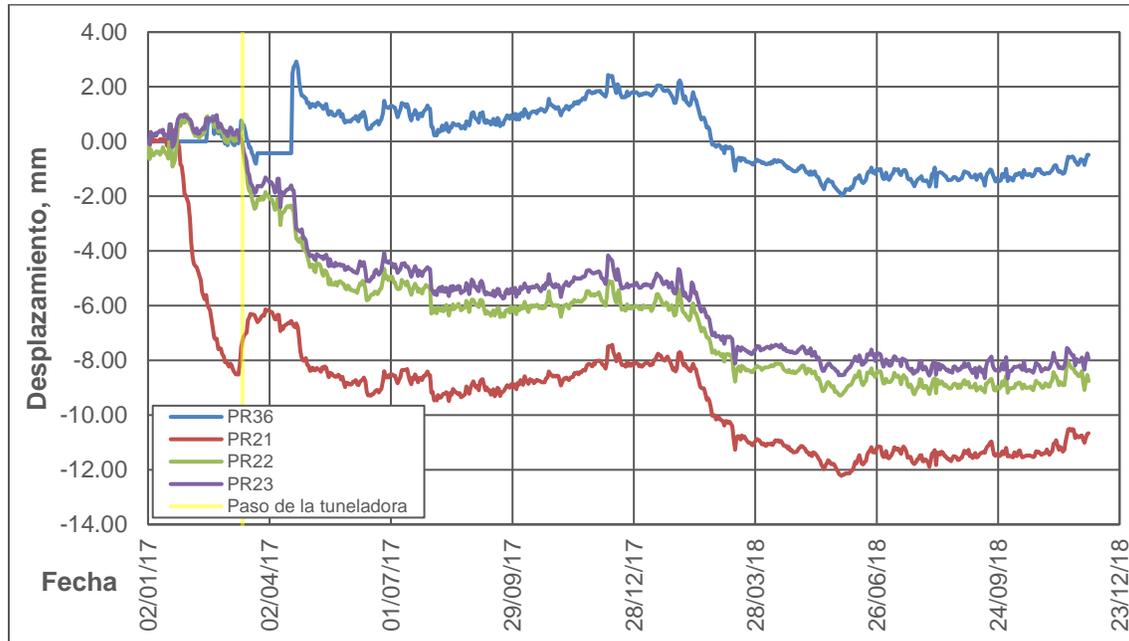


Figura 216. Desplazamiento Nte-Sur PR36, PR21, PR22 y PR23. Templo de San Francisco de Asís.

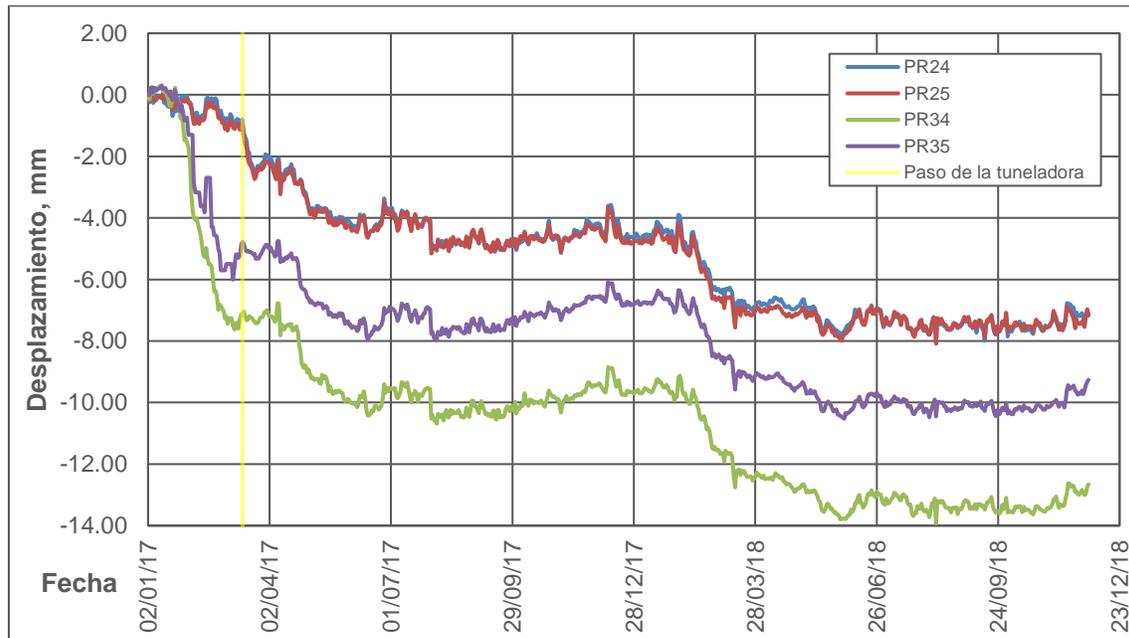


Figura 217. Desplazamiento Nte-Sur PR24, PR25, PR34 y PR35. Templo de San Francisco de Asís.

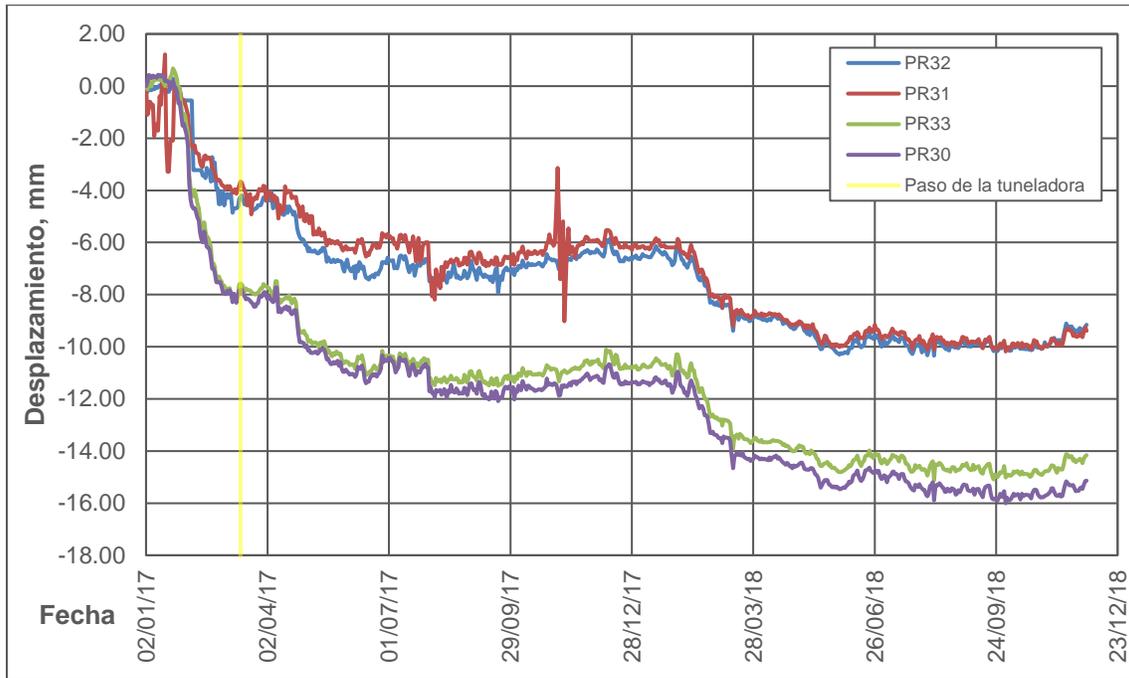


Figura 218. Desplazamiento Nte-Sur PR32, PR31, PR33 y PR30. templo de San Francisco de Asís.

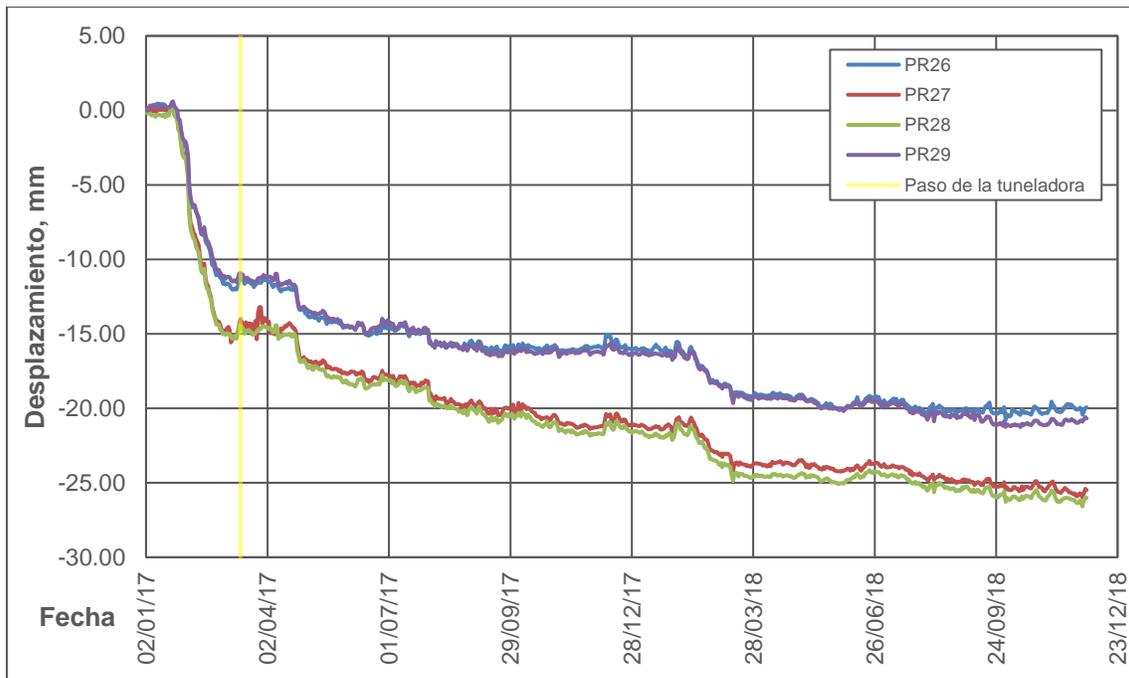


Figura 219. Desplazamiento Nte-Sur PR26, PR27, PR28 y PR29. Templo de San Francisco de Asís.

Desplazamiento Norte-Sur de dianas reflectantes en fachada oriente.

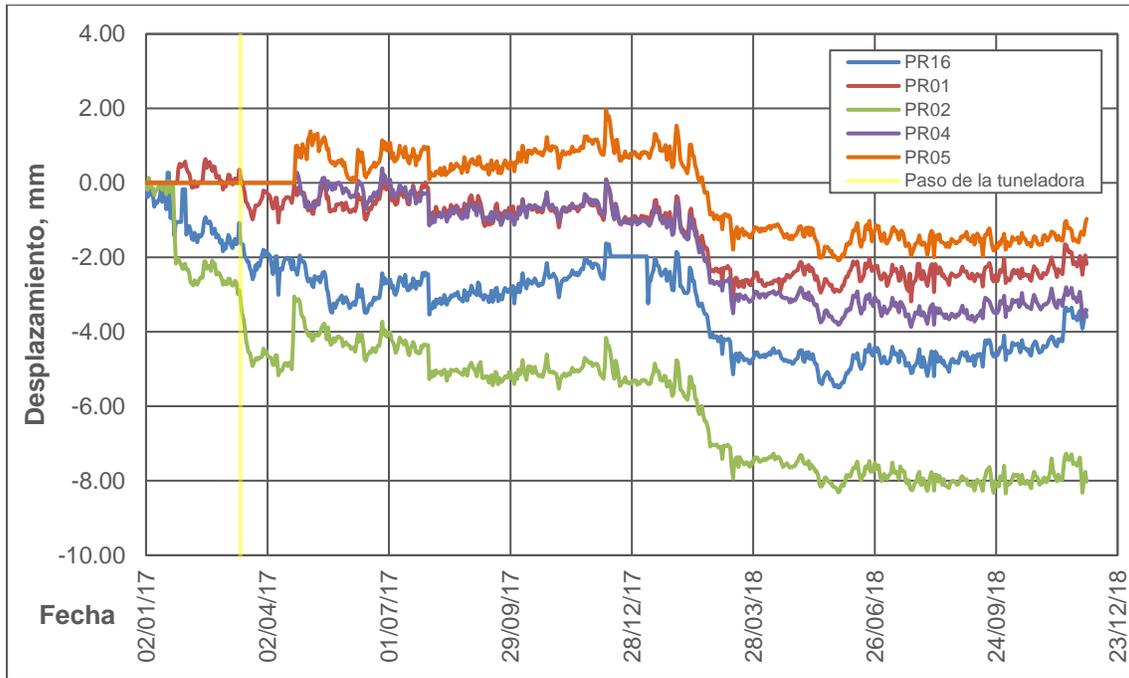


Figura 220. Desplazamiento Nte-Sur PR16, PR01, PR02, PR04 y PR05. Templo de San Francisco de Asís.

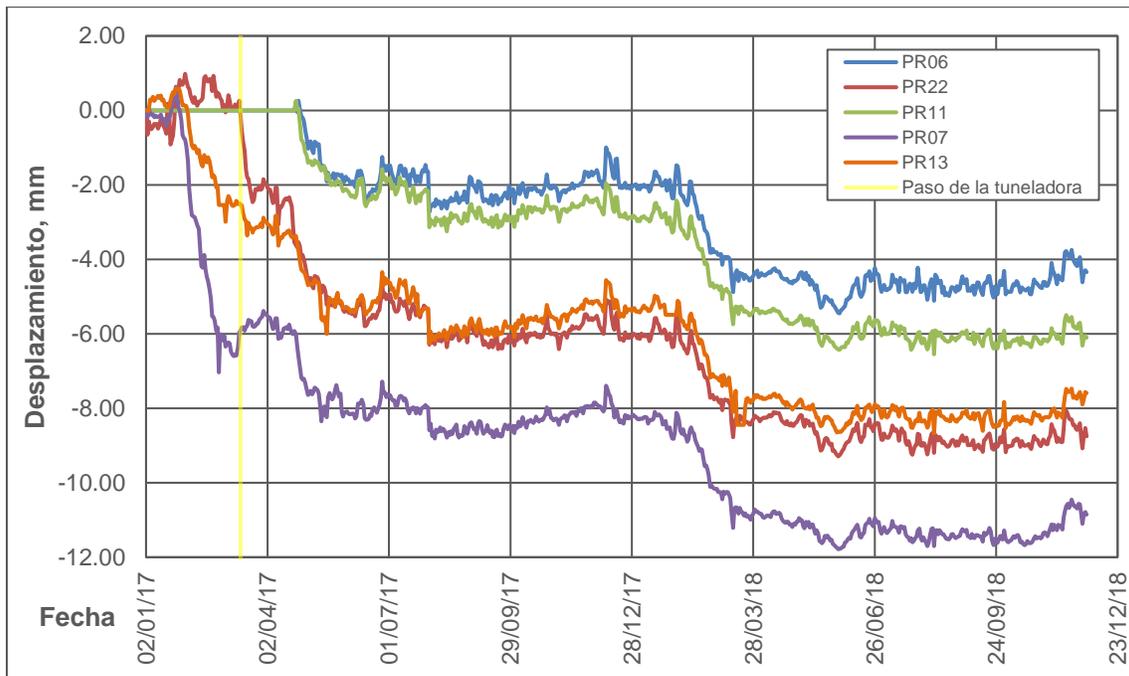


Figura 221. Desplazamiento PR06, PR22, PR11, PR07 y PR13. Templo de San Francisco de Asís.

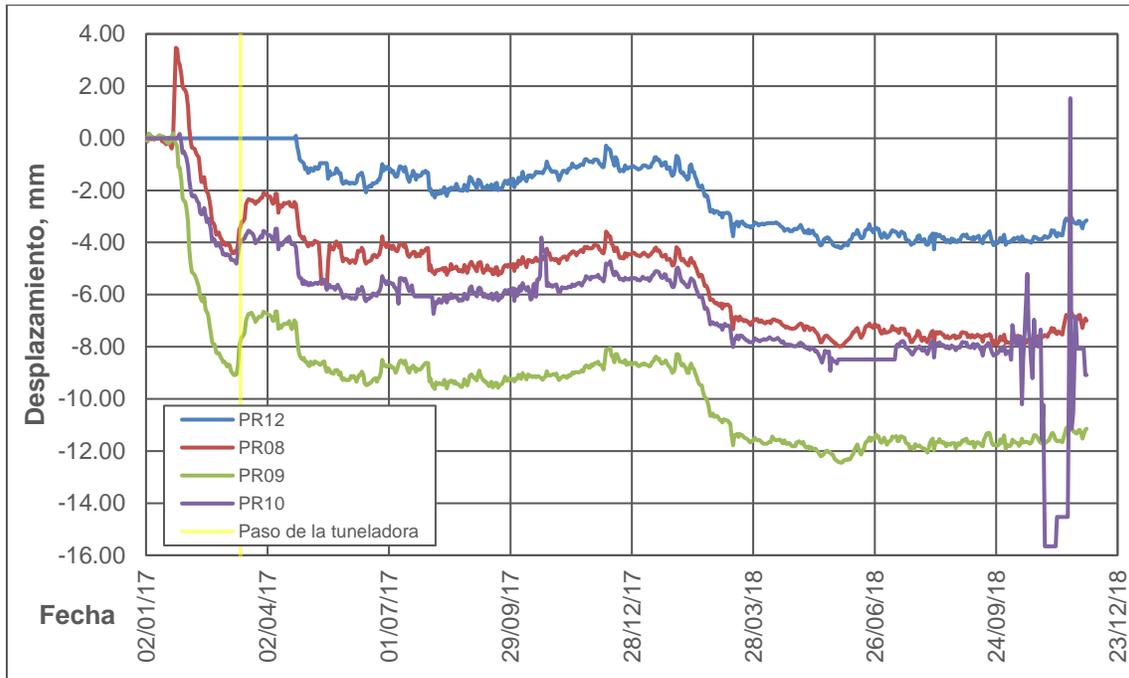


Figura 222. Desplazamiento Nte-Sur PR12, PR08, PR09 y PR10. Templo de San Francisco de Asís.

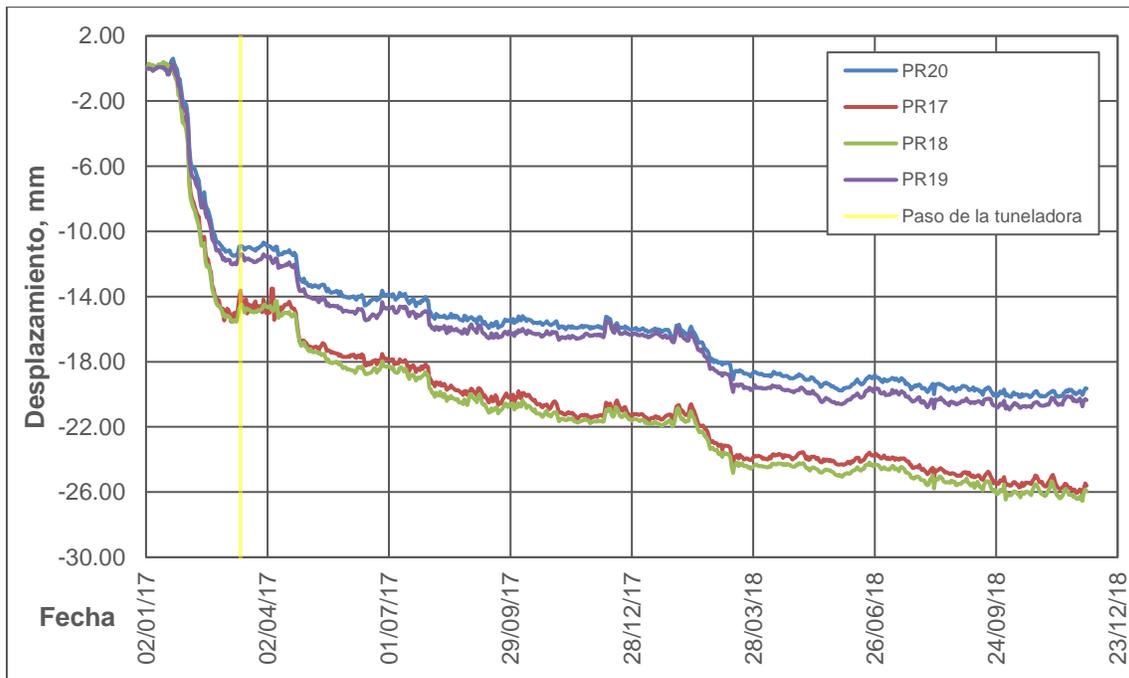


Figura 223. Desplazamiento Nte-Sur PR20, PR17, PR18 y PR19. Templo de San Francisco de Asís.

Desplazamiento Oriente-Poniente de dianas reflectantes en fachada norte.

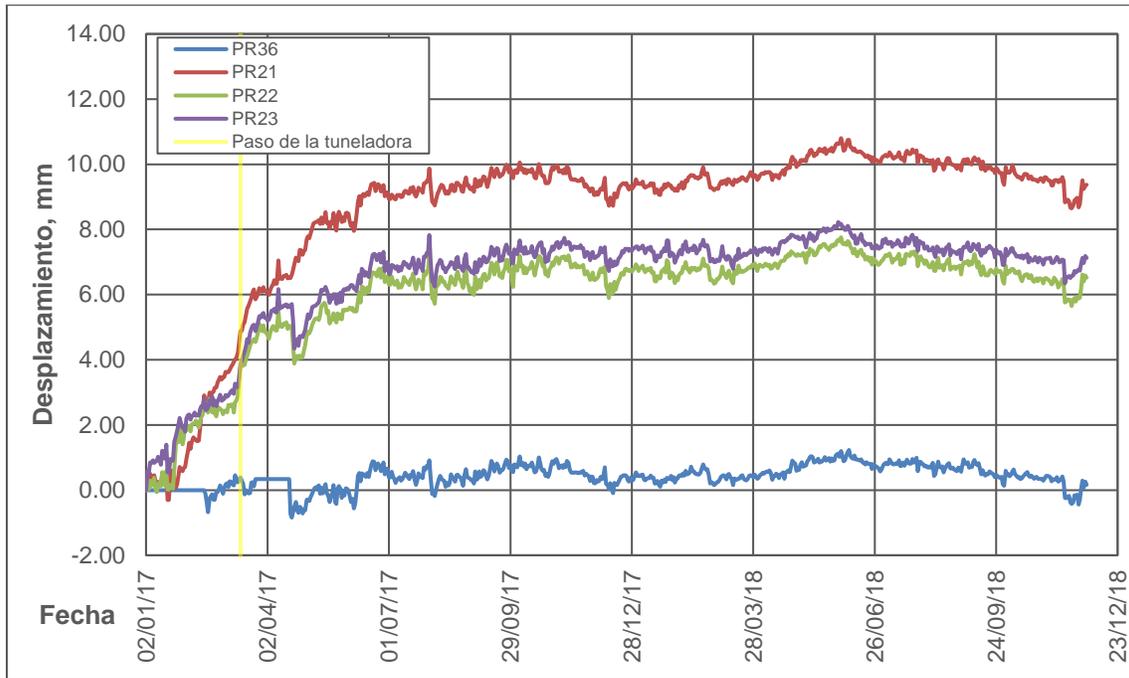


Figura 224. Desplazamiento Ote-Pte PR36, PR21, PR22 y PR23. Templo de San Francisco de Asís.

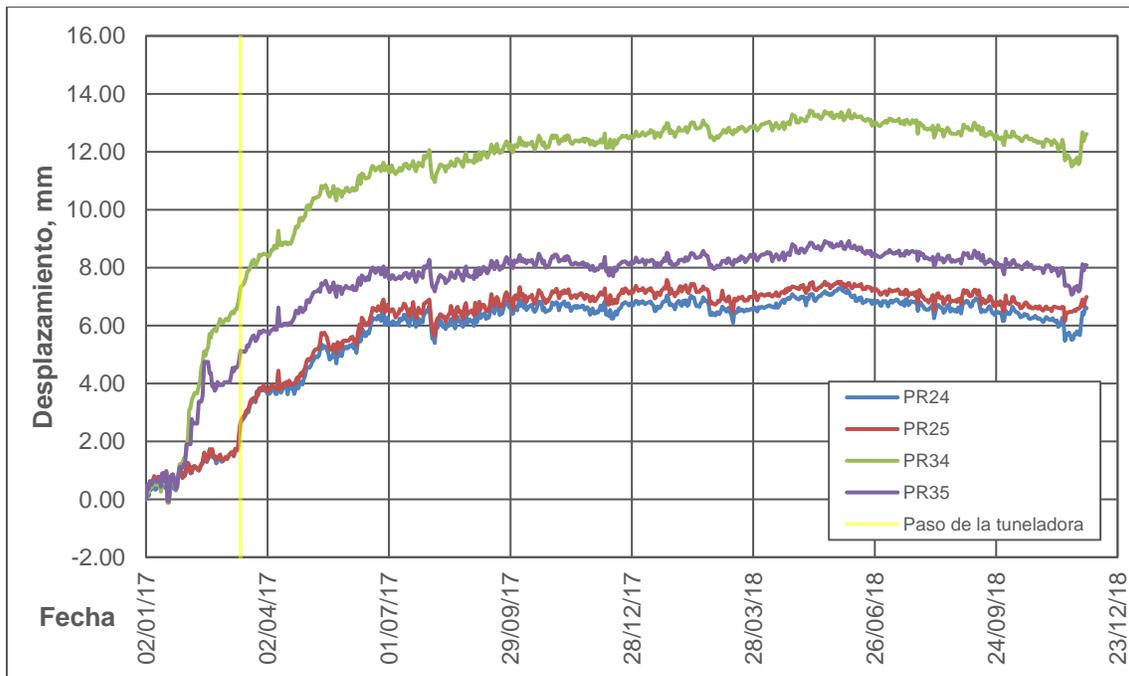


Figura 225. Desplazamiento Ote-Pte PR24, PR25, PR34 y PR35. Templo de San Francisco de Asís.

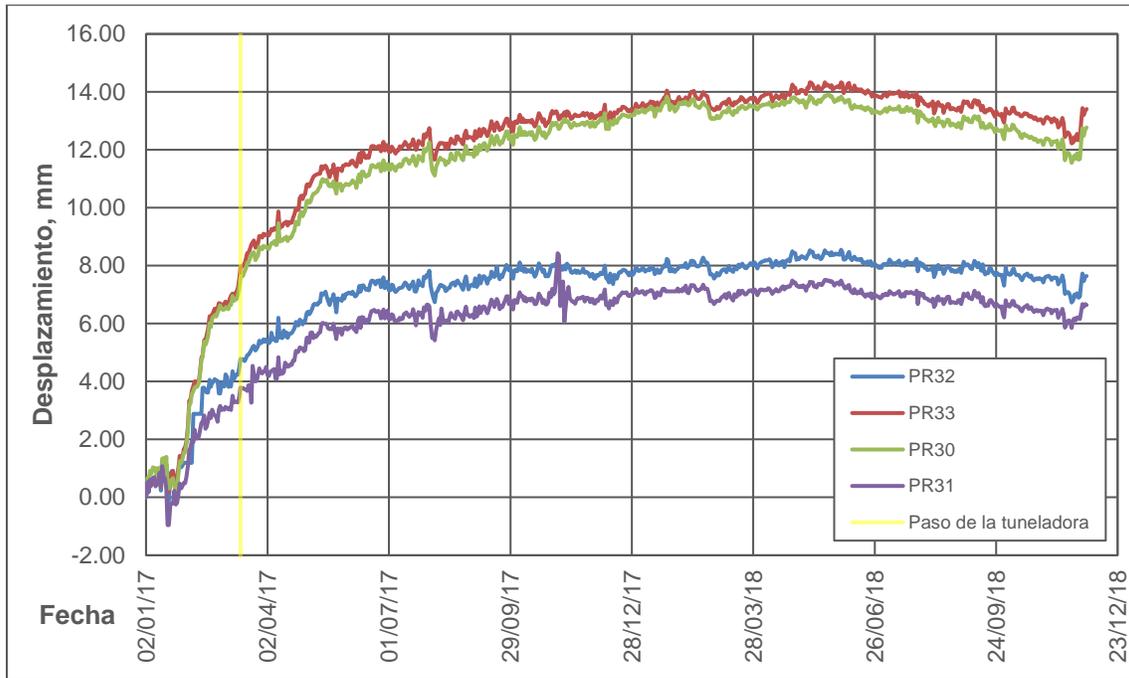


Figura 226. Desplazamiento Ote-Pte PR32, PR33, PR30 y PR31. Templo de San Francisco de Asís.

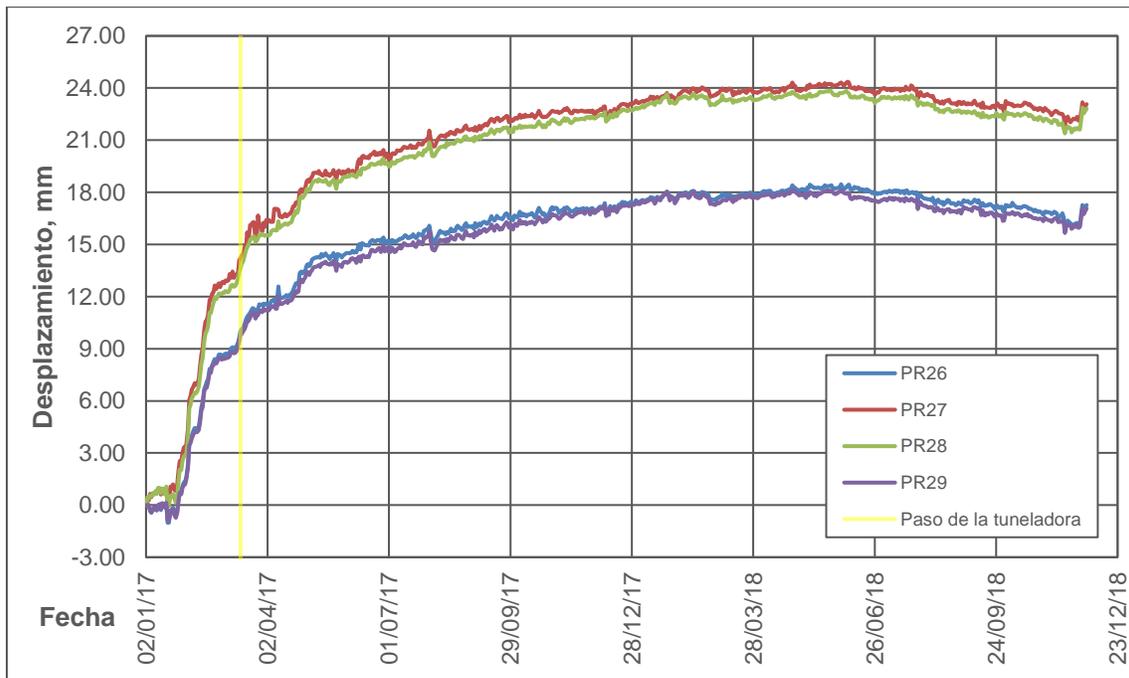


Figura 227. Desplazamiento Ote-Pte PR26, PR27, PR28 y PR29. Templo de San Francisco de Asís.

Desplazamiento Oriente-Poniente de dianas reflectantes en fachada oriente.

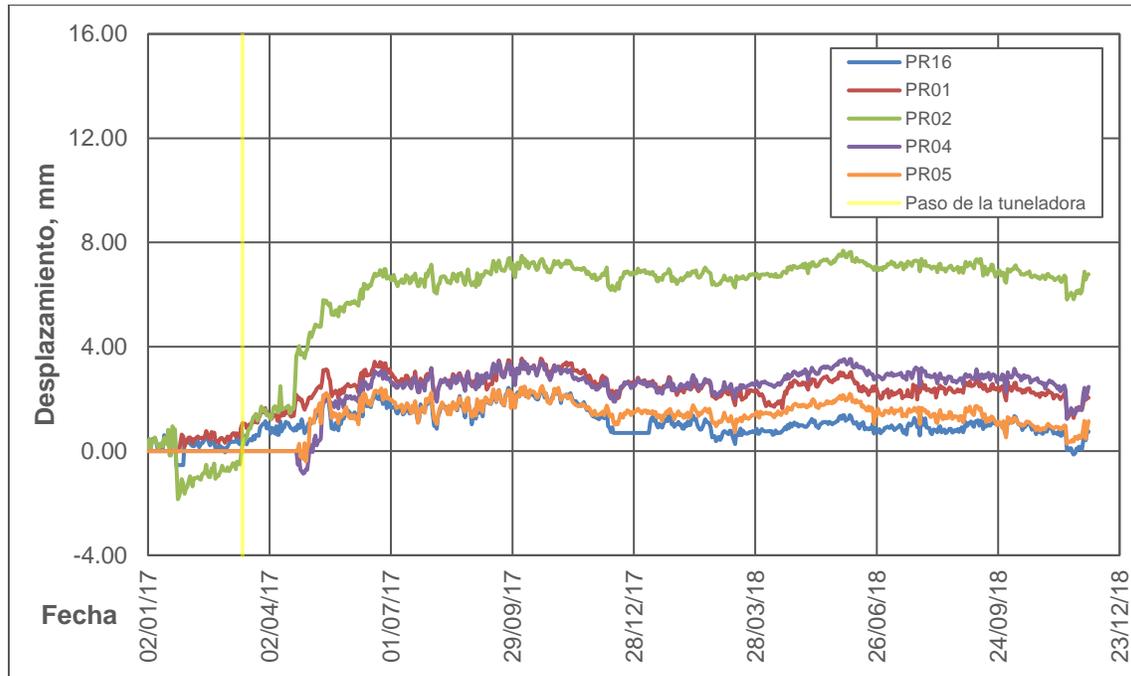


Figura 228. Desplazamiento Ote-Pte PR16, PR01, PR02, PR04 y PR05. Templo de San Francisco de Asís.

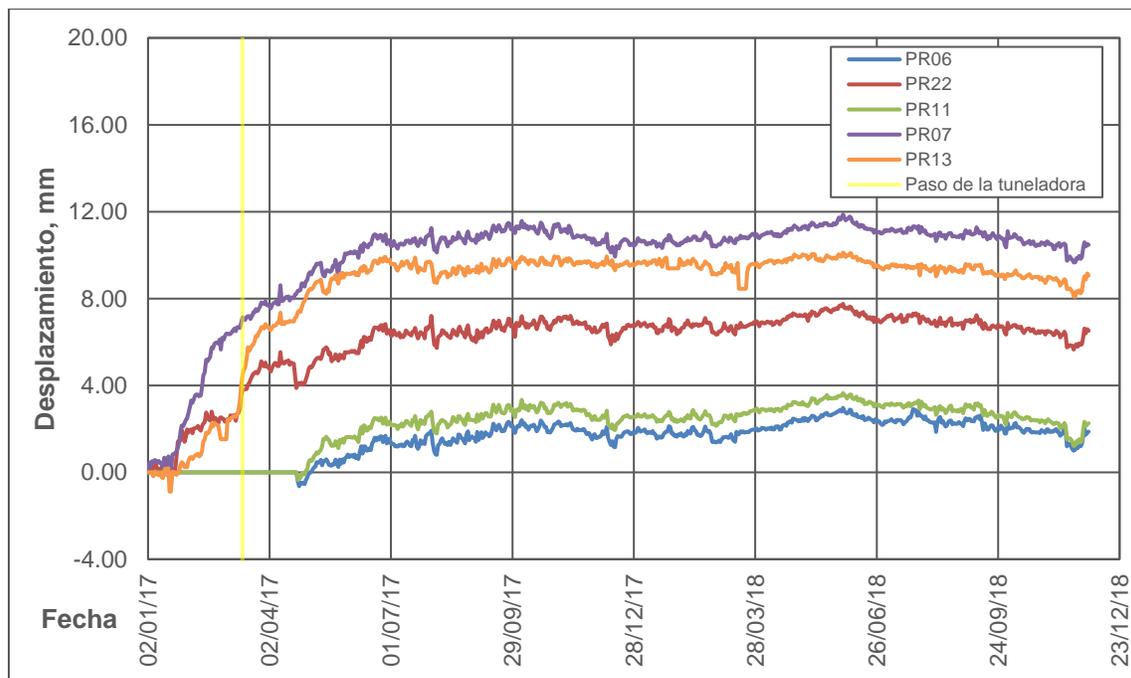


Figura 229. Desplazamiento Ote-Pte PR06, PR22, PR11, PR07 y PR13. Templo de San Francisco de Asís.

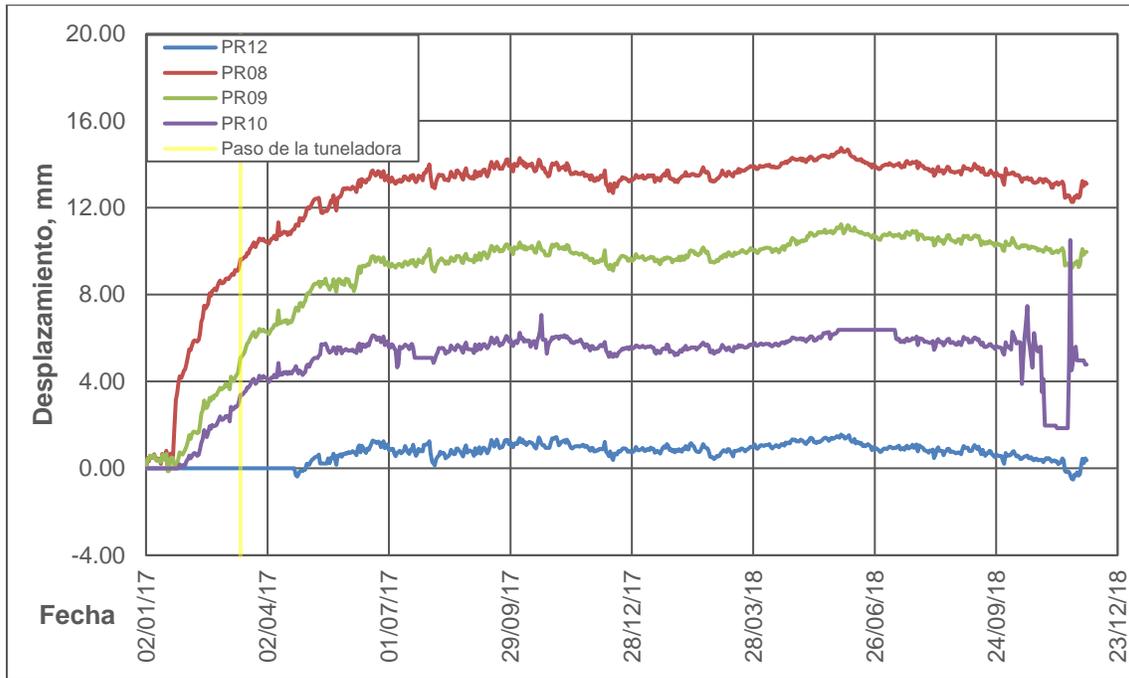


Figura 230. Desplazamiento Ote-Pte PR12, PR08, PR09 y PR10. Templo de San Francisco de Asís.

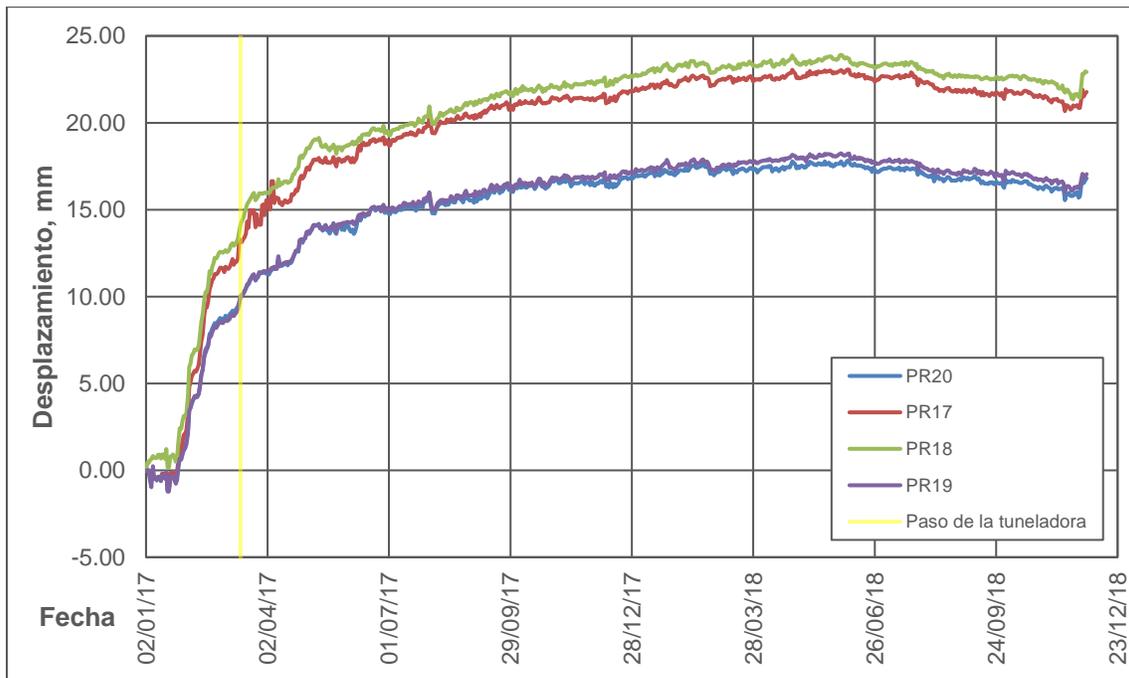


Figura 231. Desplazamiento Ote-Pte PR20, PR17, PR18 y PR19. Templo de San Francisco de Asís.

Asentamiento de dianas reflectantes en fachada norte.

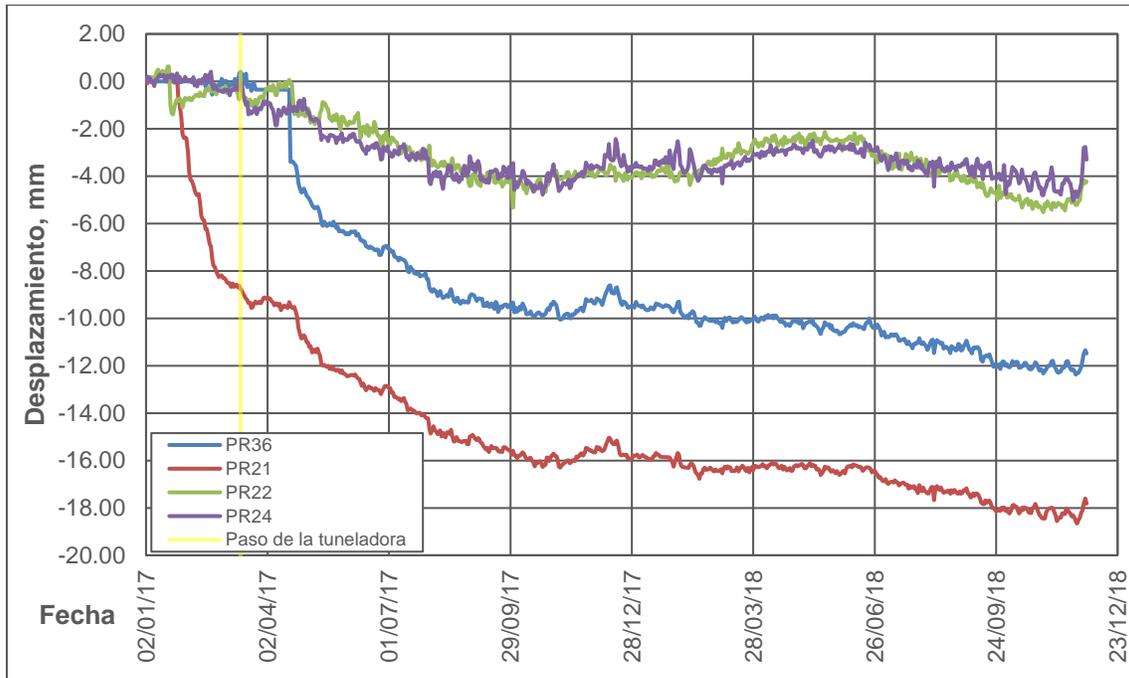


Figura 232. Asentamiento PR36, PR21, PR22 y PR24. Templo de San Francisco de Asís.

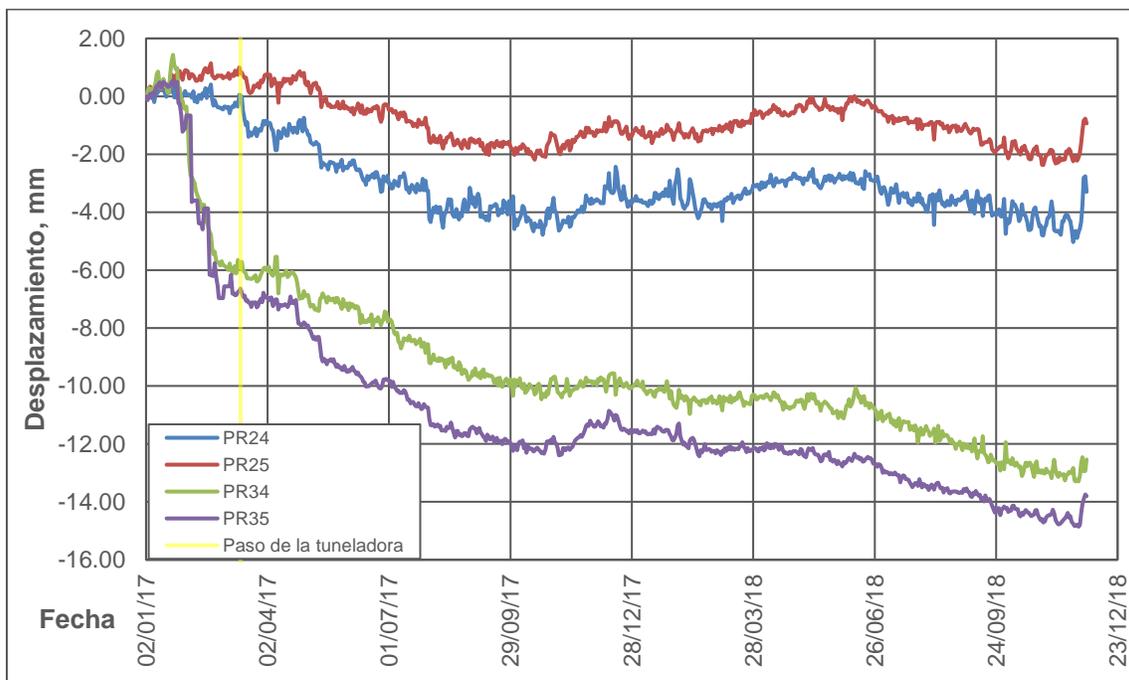


Figura 233. Asentamiento PR24, PR25, PR34 y PR35. Templo de San Francisco de Asís.

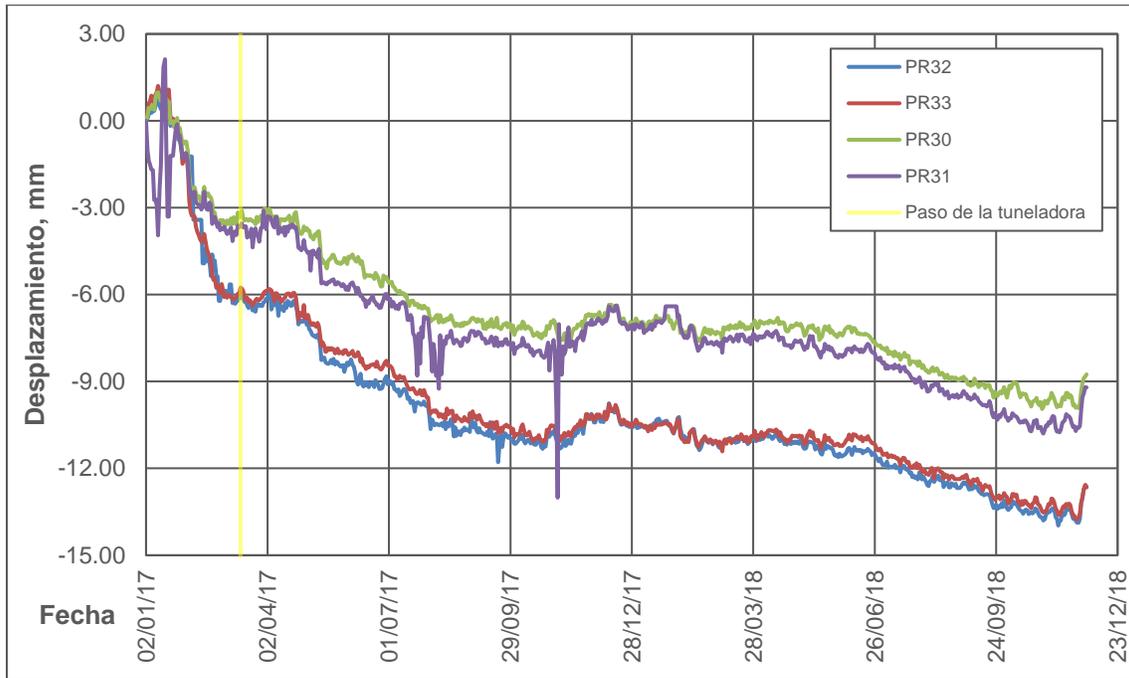


Figura 234. Asentamiento PR32, PR33, PR30 y PR31. Templo de San Francisco de Asís.

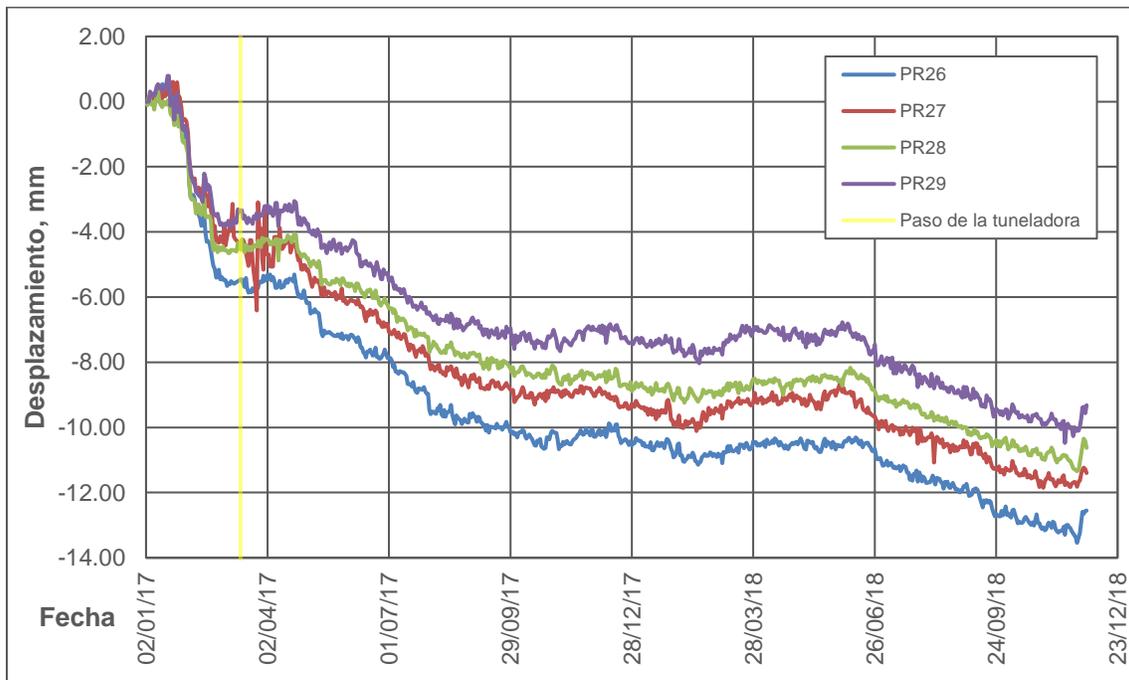


Figura 235. Sanetamiento PR26, PR27, PR28 y PR29. Templo de San Francisco de Asís.

Asentamiento de dianas reflectantes en fachada oriente.

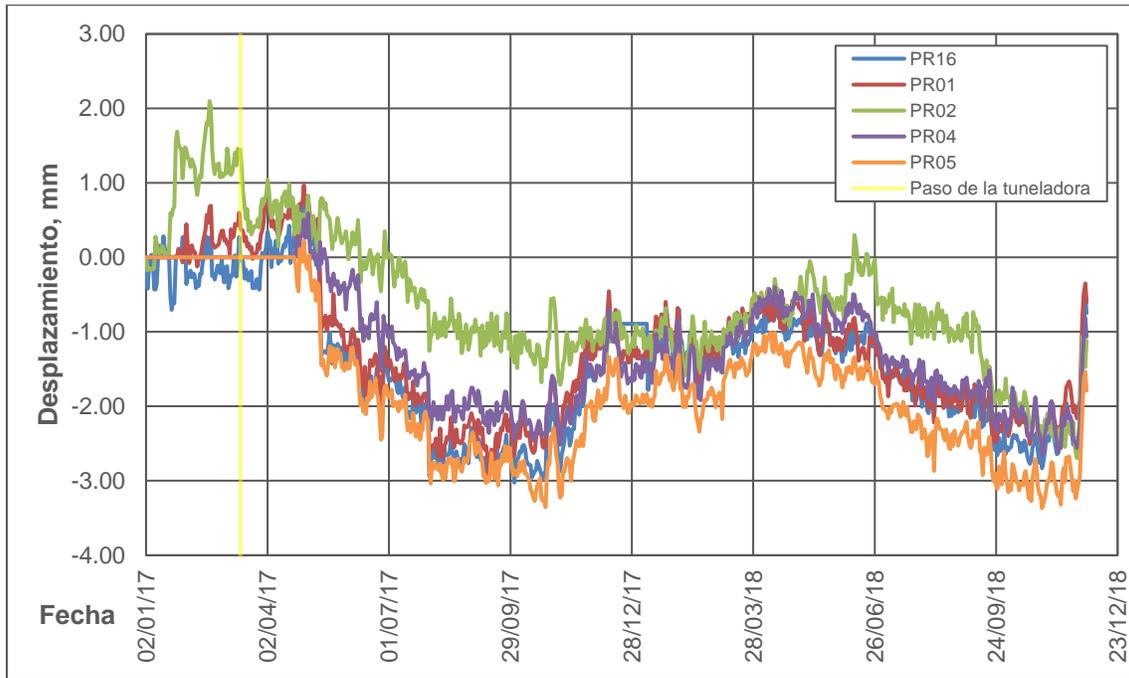


Figura 236. Asentamiento PR16, PR01, PR02, PR04 y PR05. Templo de San Francisco de Asís.

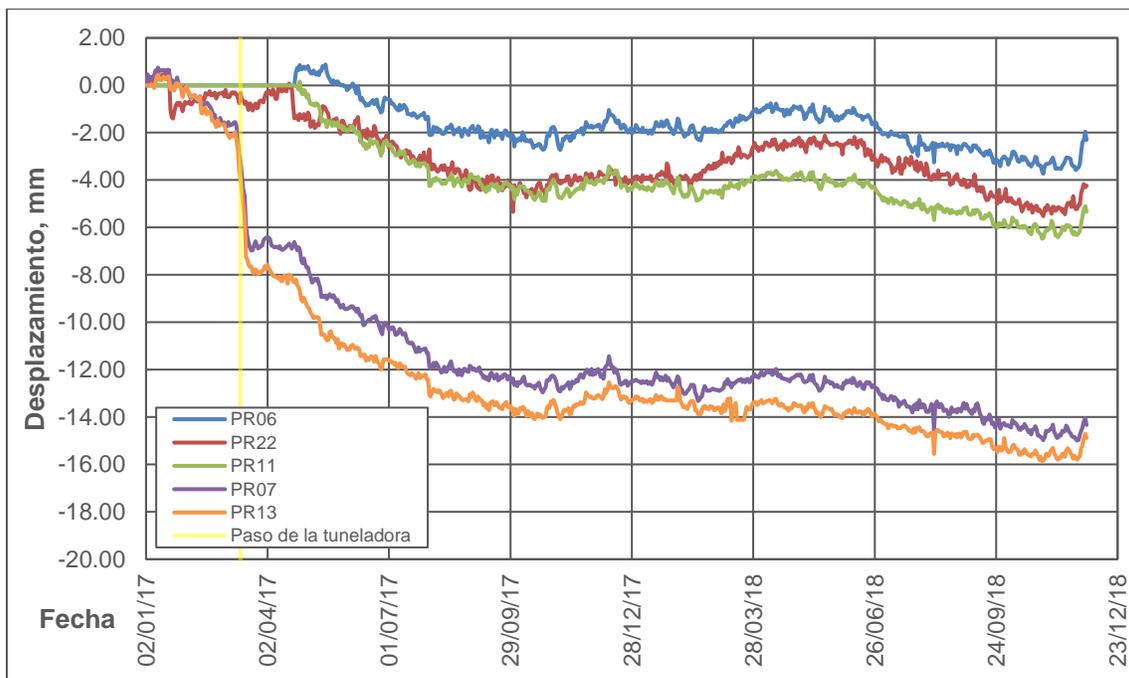


Figura 237. Asentamiento PR06, PR22, PR11, PR07 y PR13. Templo de San Francisco de Asís.

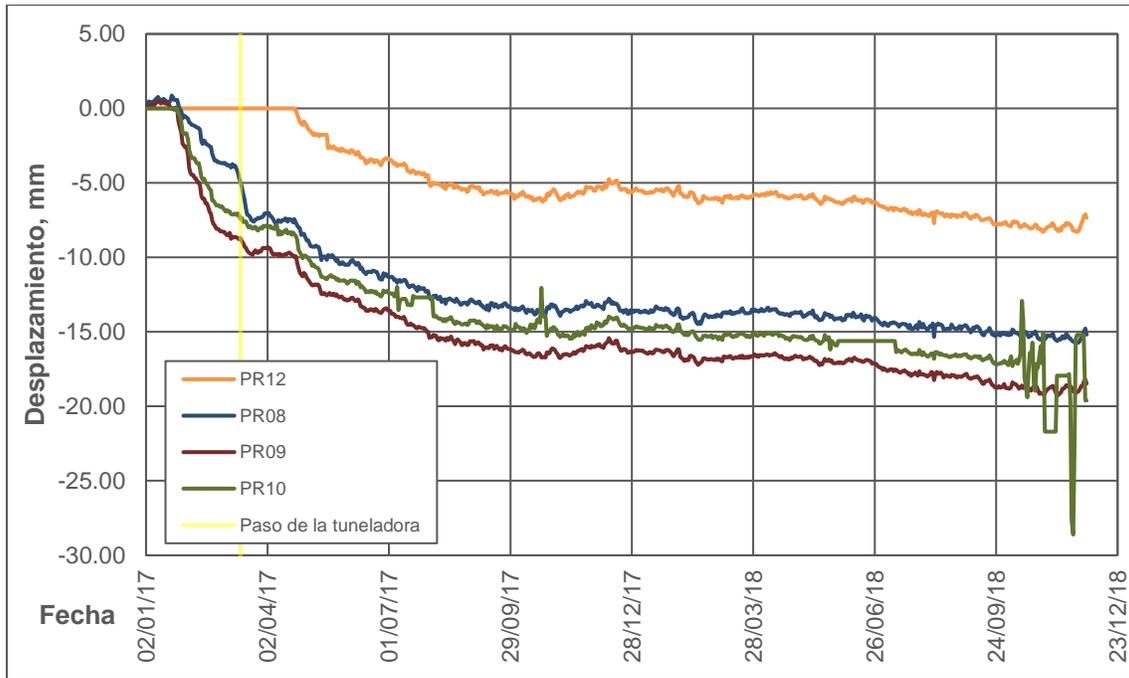


Figura 238. Asentamiento PR12, PR08, PR09 y PR10. Templo de San Francisco de Asís.

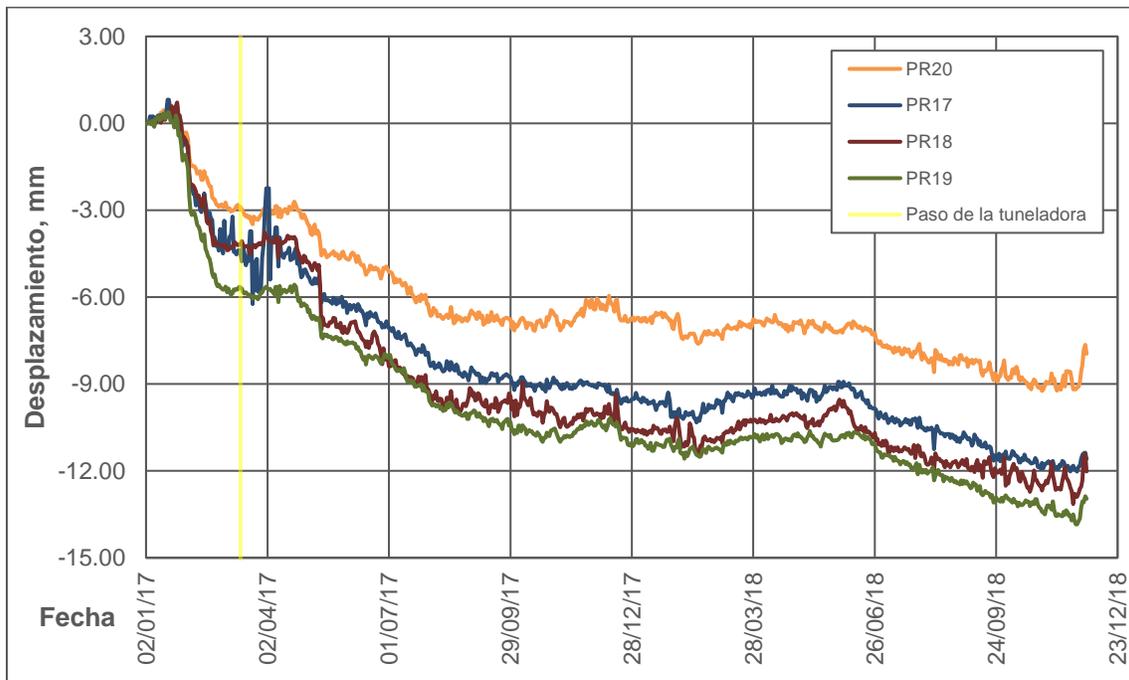


Figura 239. Asentamiento PR20, PR17, PR18 y PR19. Templo de San Francisco de Asís.

Rotación Oriente-Poniente de tiltmeters.

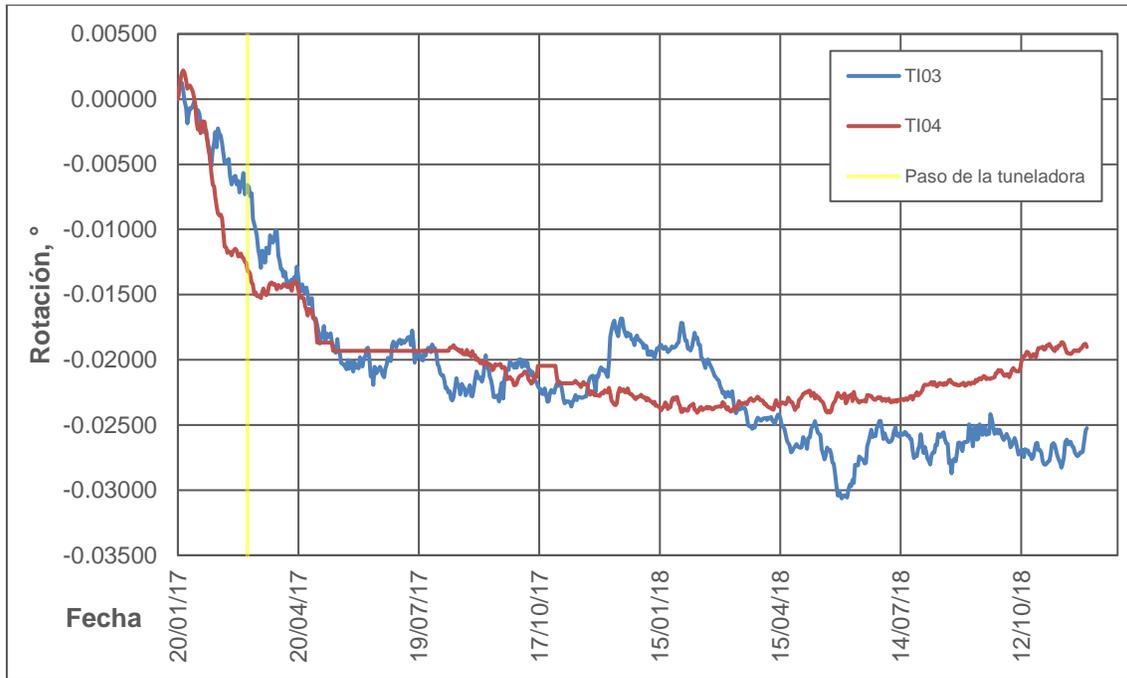


Figura 240. Rotación Ote-Pte TI03 y TI04. Templo de San Francisco de Asís.

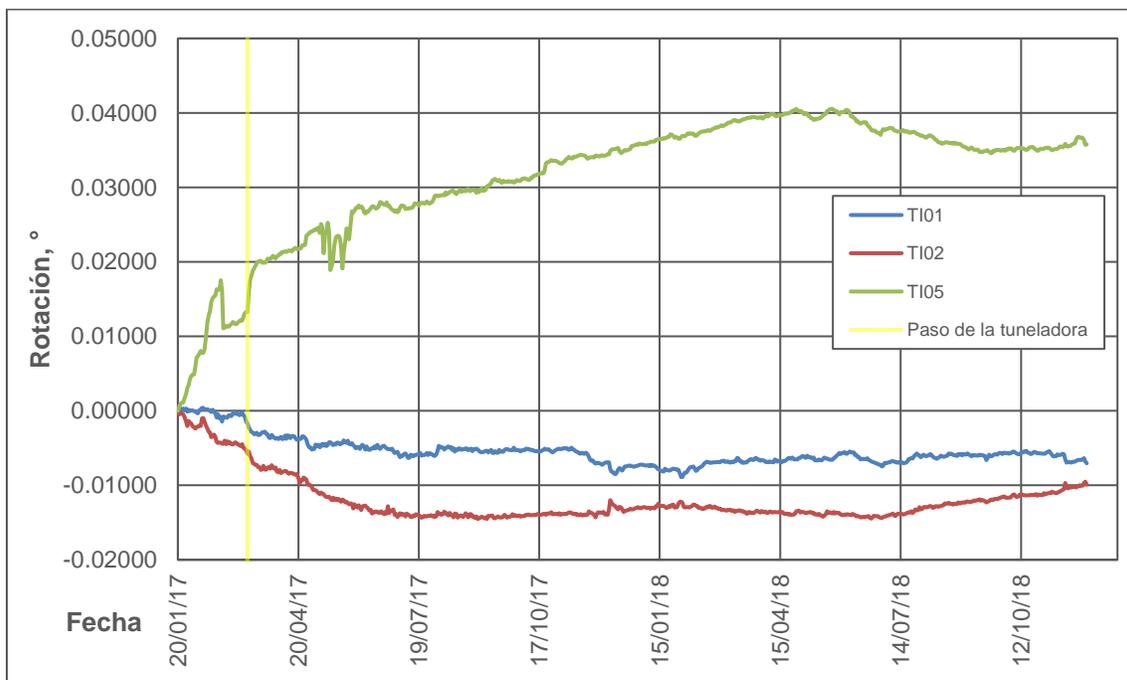


Figura 241. Rotación Ote-Pte TI01, TI02 y TI05. Templo de San Francisco de Asís.

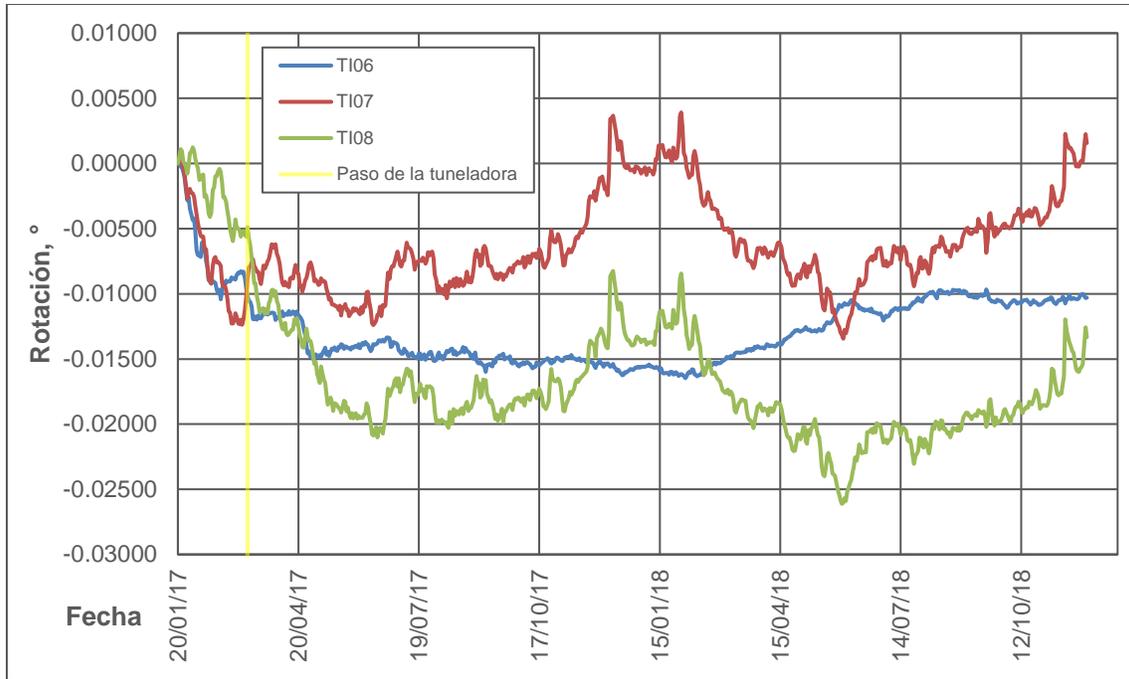


Figura 242. Rotación Ote-Pte TI06, TI07 y TI08. Templo de San Francisco de Asís.

Rotación Norte-Sur de tiltmeters.

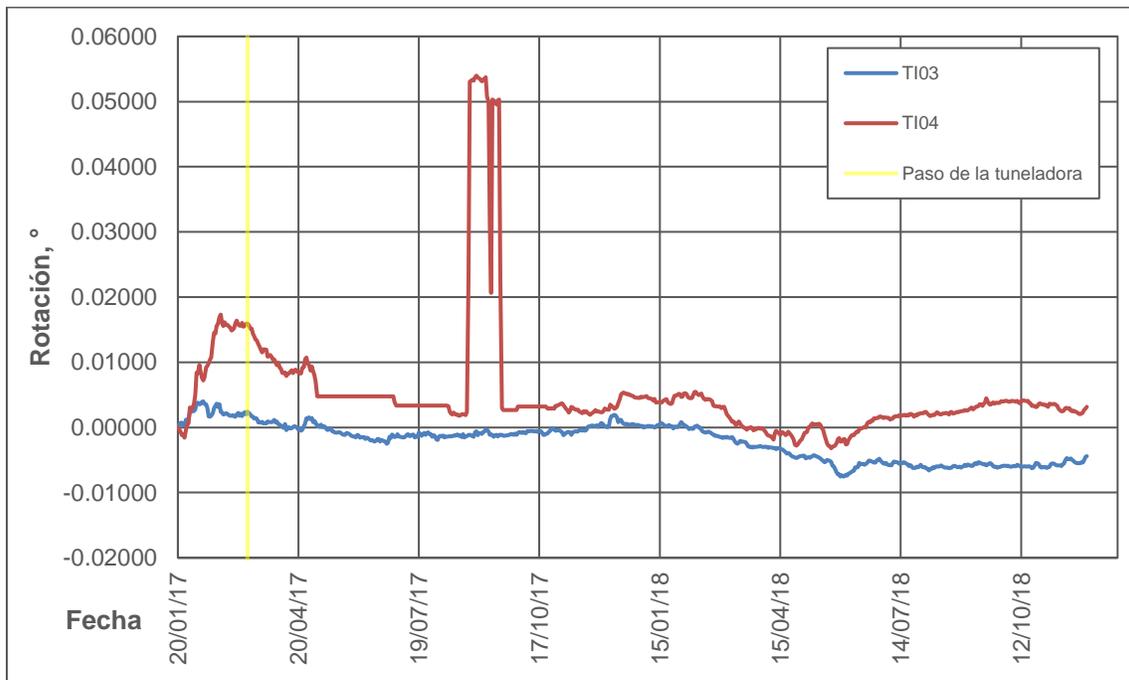


Figura 243. Rotación Nte-Sur TI03 y TI04. Templo de San Francisco de Asís.

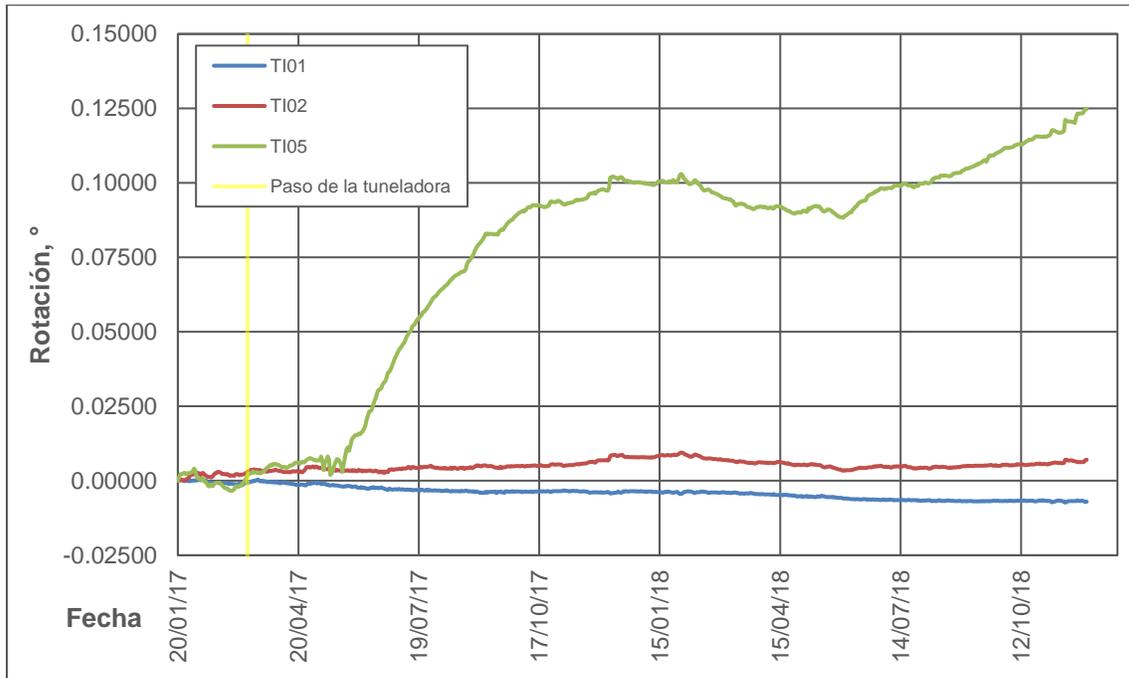


Figura 244. Rotación Nte-Sur TI01, TI02 y TI05. Templo de San Francisco de Asís.

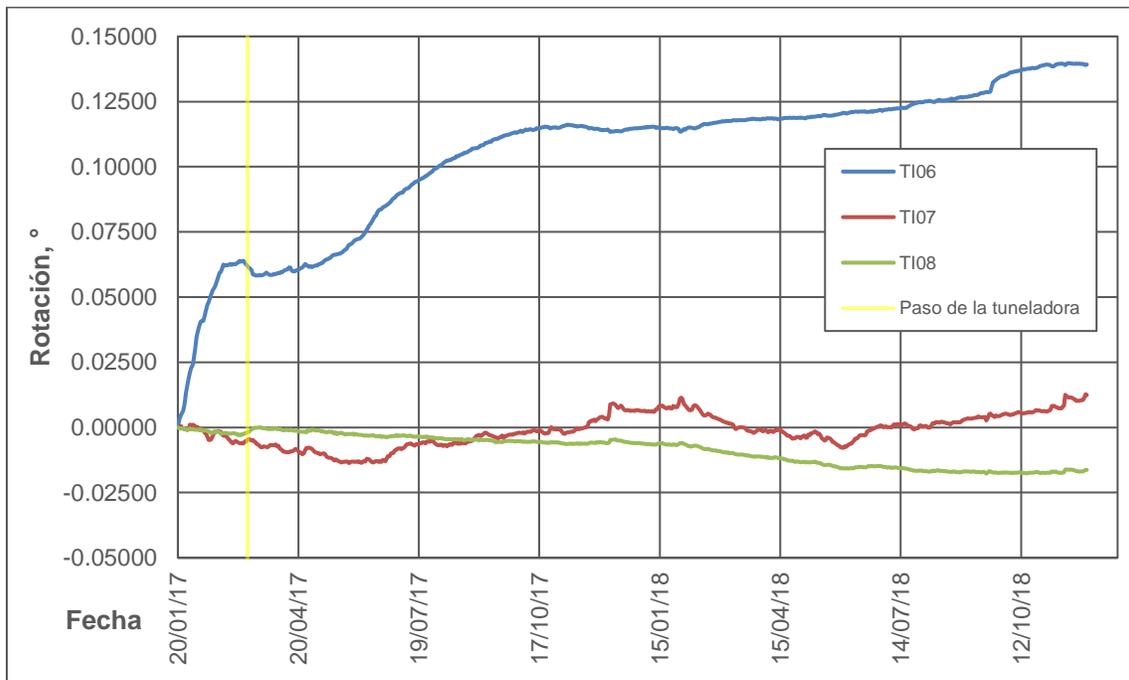


Figura 245. Rotación Nte-Sur TI06, TI07 y TI08. Templo de San Francisco de Asís.

Desplazamiento Oriente-Poniente de tiltmeters.

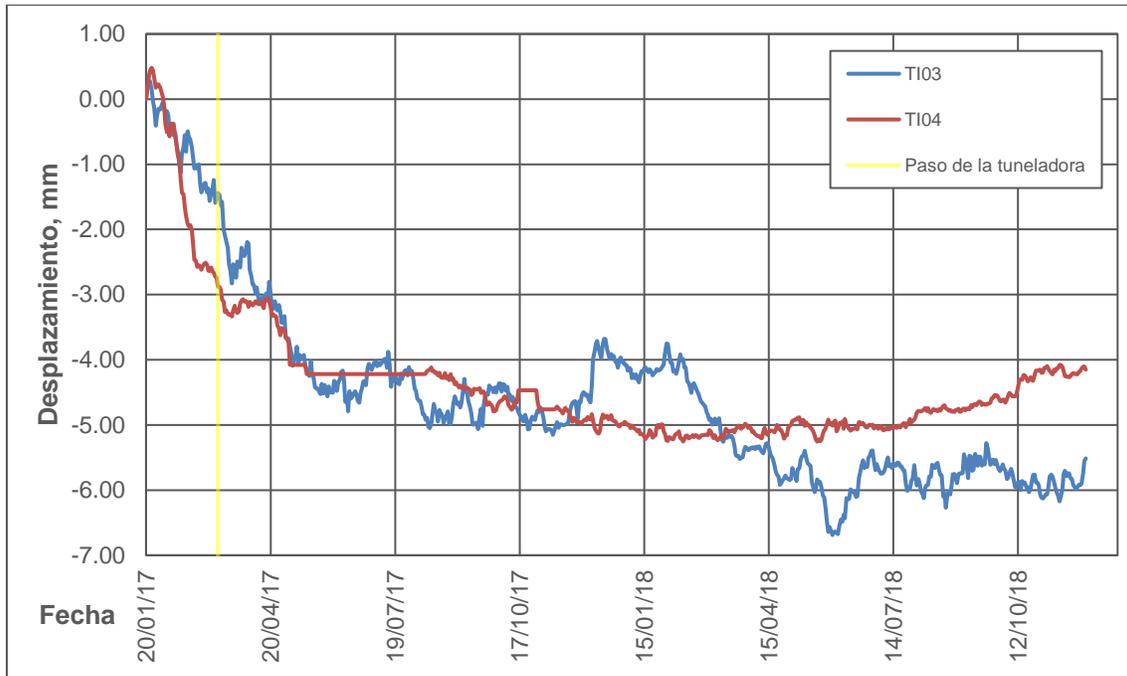


Figura 246. Desplazamiento Ote-Pte TI03 y TI04. Templo de San Francisco de Asís.

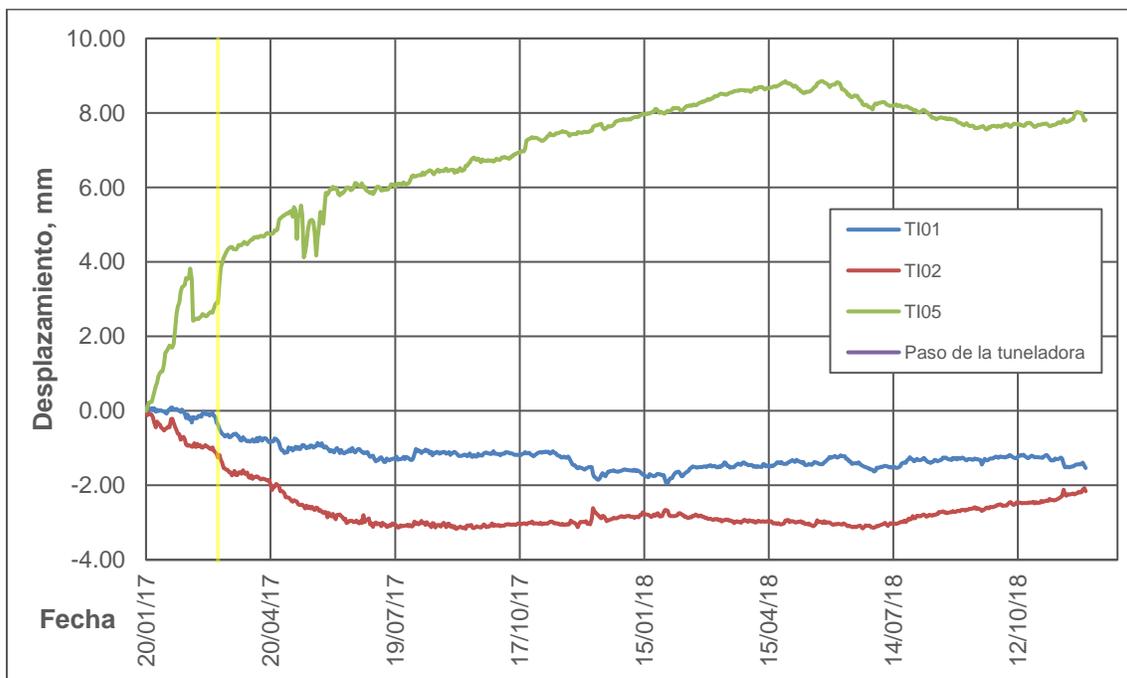


Figura 247. Desplazamiento Ote-Pte TI01, TI02 y TI05. Templo de San Francisco de Asís.

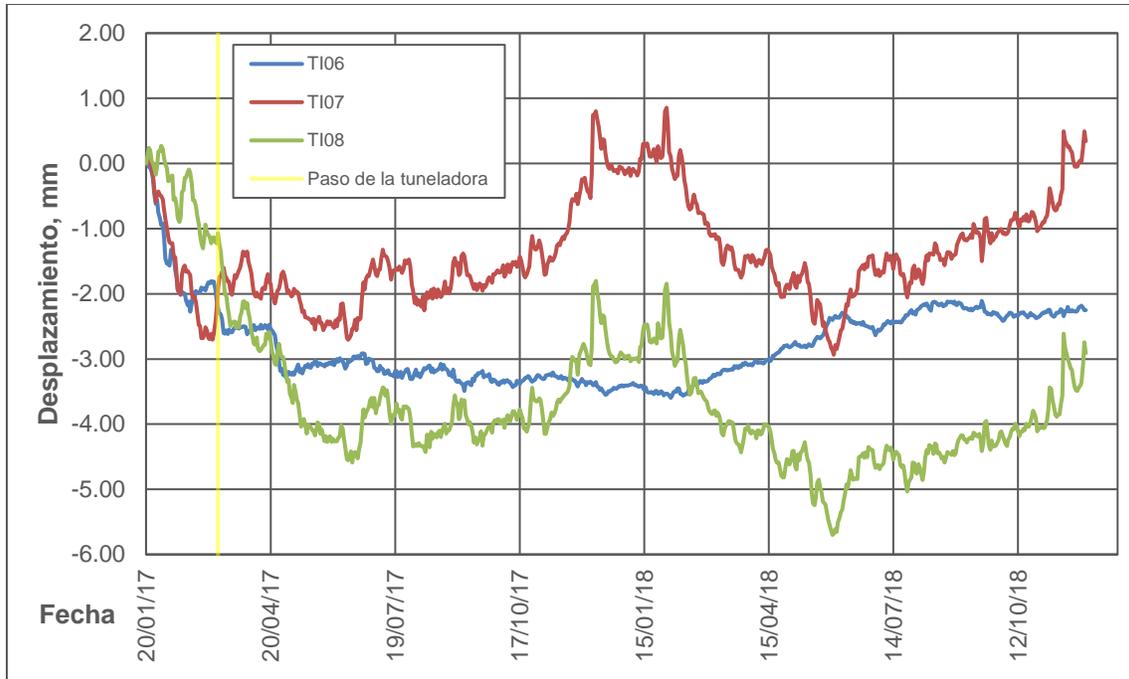


Figura 248. Desplazamiento Ote-Pte TI06, TI07 y TI08. Templo de San Francisco de Asís.

Desplazamiento Norte-Sur de tiltmeters.

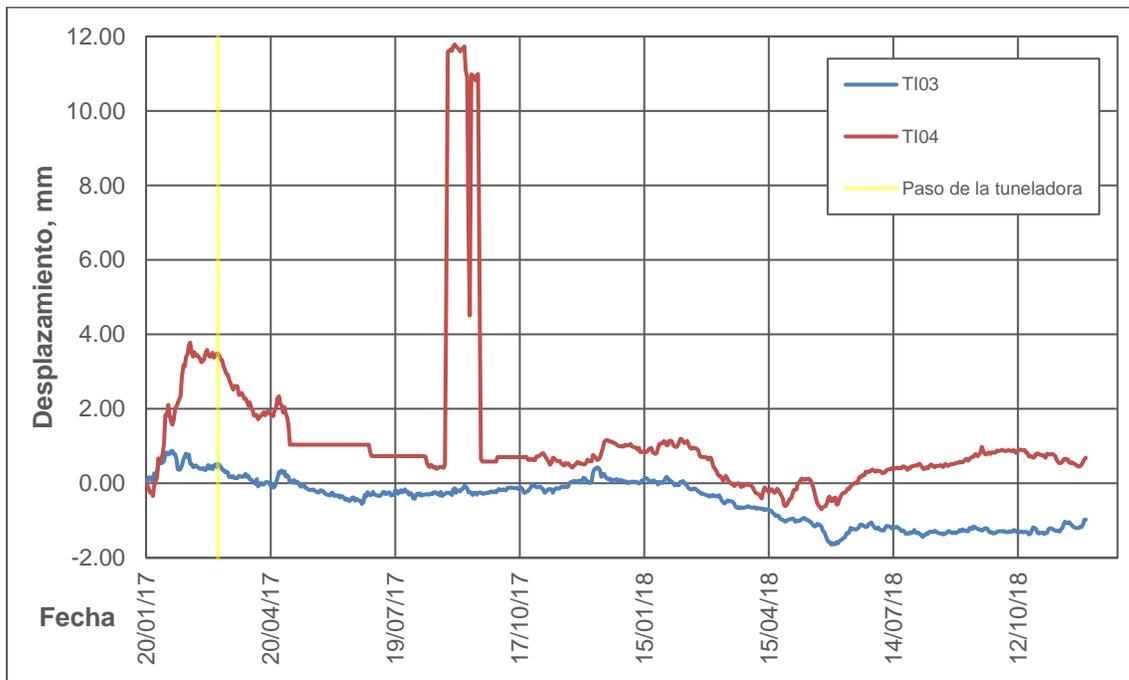


Figura 249. Desplazamiento Nte-Sur TI03 y TI04. Templo de San Francisco de Asís.

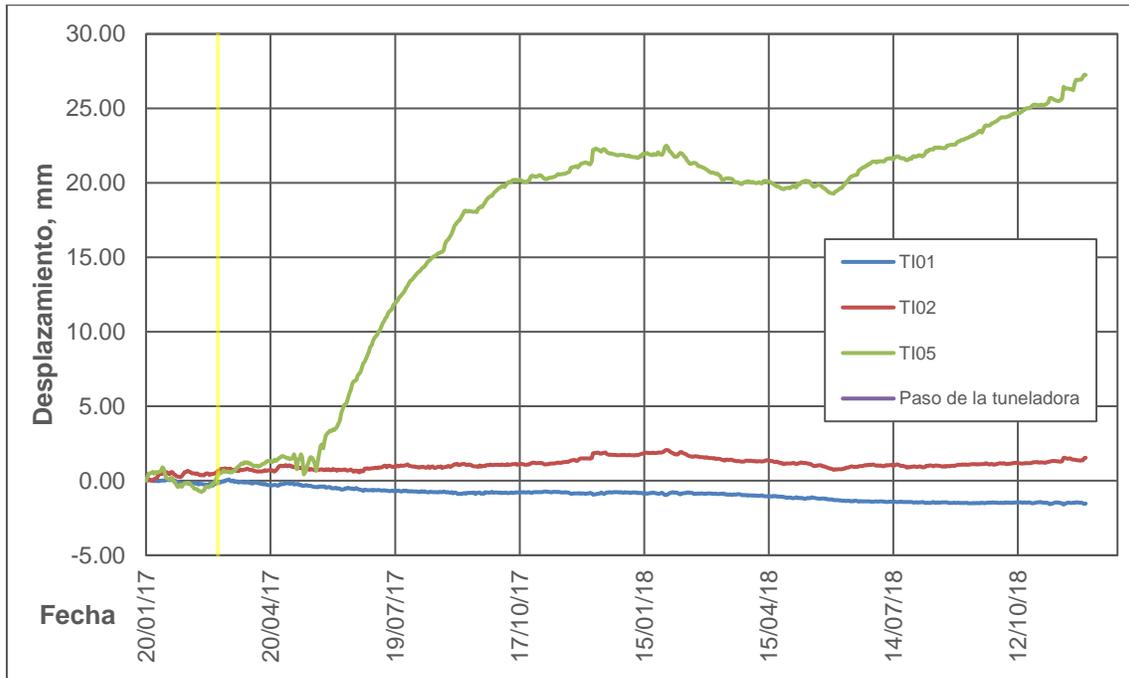


Figura 250. Desplazamiento Nte-Sur TI01, TI02 y TI05. Templo de San Francisco de Asís.

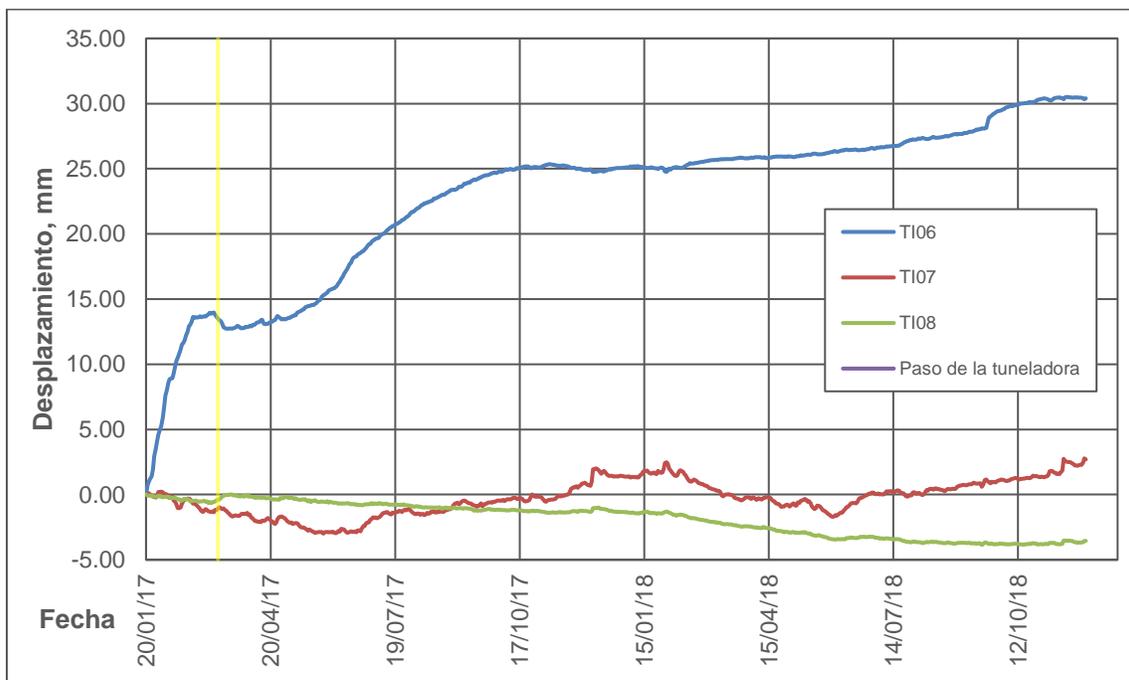


Figura 251. Desplazamiento Nte-Sur TI06, TI07 y TI08. Templo de San Francisco de Asís.

ANEXO D. Macro de actualización

La siguiente Macro de Visual Basic permite actualizar de forma automática los datos de las gráficas presentadas anteriormente. Para ello, se deben descargar los registros de los instrumentos con formato de fecha día/mes/año, y copiarlos en las hojas de Excel correspondientes. Estas hojas de cálculo están previamente programadas y, al utilizar la macro, se realizan las operaciones correspondientes.

La macro de actualización se compone de dos submacros que se ejecutan en las diferentes hojas del libro de Excel. Estas son *Lecturas* y *Promedios*; la primera reacomoda los datos en una nueva matriz, separándolos por día y permitiendo obtener el promedio diario de las lecturas mientras que la segunda reacomoda los promedios en una nueva matriz, presentando los promedios diarios de cada instrumento.

La macro presentada pertenece al libro de Excel con las lecturas de los tiltmeters en dirección Norte-Sur del Templo de San José de Gracia. Dependiendo de los registros analizados los nombres de las hojas varían.

Sub Lecturas() *Submacro de matriz de lecturas y promedios diarios*

```
Dim h As Long
    h = Range("G1").Value
    While Not Cells(h, 3) = ""
        h = (h + 1)
```

El valor en la celda G1 sirve como un contador para el proceso de actualización. El valor guardado en esta celda corresponde al renglón del último dato copiado en la columna original, evitando que el arreglo de datos de días anteriores se repita

```
Wend
Dim i As Long
    i = h
Dim j As Long
    j = h
Dim a As Long
    a = Range("H1").Value
```

El valor de la celda H1 sirve, al igual que la celda G1 como un contador. En este caso el valor corresponde al último renglón de la nueva matriz para evitar que se repitan procesos

```
While Not Cells(a, 8) = ""
    a = a + 1
Wend
Dim k As Long
    k = a
```

```

While Not Cells(i, 2) = ""
    i = (i + 1)
Wend
Range(Cells((h - 1), 3), Cells((h - 1), 6)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells((h - 1), 3), Cells(i - 1, 6)),
Type:=xlFillDefault
*Esta sección copia las fórmulas de las celdas correspondientes a la columna de
datos originales, las cuales facilitan la separación de los registros por día,
realizando las operaciones con los datos recién ingresados*

While Not Cells(j, 6) = ""
    j = (j + 1)
If Cells(j, 6) = 1 Then
    k = k + 1
    Range(Cells((a - 1), 8), Cells((a - 1), 154)).Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells((a - 1), 8), Cells(k, 154)),
Type:=xlFillDefault
End If
*Esta sección copia las fórmulas de la nueva matriz para presentar los datos de
los registros recién ingresados. De esta forma se tiene un arreglo con los
promedios diarios del instrumento de cada hoja*

Wend
Range("G1").Value = Range("G1").Value + (i - h)
Range("H1").Value = Range("H1").Value + (k - a + 1)
Range("A1").Select
*Esta sección actualiza los contadores de las celdas G1 y H1, de tal forma que la
próxima vez que se use la macro, se inicie desde los últimos renglones*
End Sub

```

Sub Promedios() *Submacro para hoja de cálculo con promedios diarios de todos los instrumentos*

```

Worksheets("SJ_TI01_B").Activate
Dim x As Long
    x = Range("H1").Value - 3
Worksheets("RESULTADOS").Activate
Dim y As Long
    y = Range("E1").Value
Dim z As Long
    z = x - (y - 5)
*Esta sección de la macro establece el rango de renglones que se actualizarán en
la hoja RESULTADOS de acuerdo con los nuevos datos ingresados en la hoja del
instrumento, en este caso la hoja SJ_TI01_B.*

Range(Cells(y, 1), Cells(y, 44)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(y, 1), Cells((y + z), 44)),
Type:=xlFillDefault
Range("E1").Value = Range("E1").Value + z
Range("A1").Select
*En esta sección se copian las fórmulas de la hoja RESULTADOS en las siguientes
filas para presentar los nuevos datos en la matriz y actualizar las gráficas*
End Sub

```

Sub Actualizar() *Macro que ejecuta las submacros anteriores en las hojas correspondientes para actualizar todo el documento*

```
Worksheets("SJ_TI01_B").Activate  
Macro1  
Worksheets("SJ_TI02_B").Activate  
Macro1  
Worksheets("SJ_TI03_B").Activate  
Macro1  
Worksheets("SJ_TI04_B").Activate  
Lecturas  
Worksheets("SJ_TI05_B").Activate  
Lecturas  
Worksheets("SJ_TI06_B").Activate  
Lecturas  
Worksheets("SJ_TI07_B").Activate  
Lecturas  
Worksheets("SJ_TI08_B").Activate  
Lecturas  
Worksheets("SJ_TI09_B").Activate  
Lecturas  
Worksheets("SJ_TI10_B").Activate  
Lecturas
```

Esta sección ejecuta la submacro Lecturas para cada uno de los instrumentos registrados en el libro de Excel. En este caso se ejecuta la submacro para los registros de rotación Norte-Sur de los 10 tiltmeters del Templo de San José de Gracia

```
Worksheets("RESULTADOS").Activate  
Promedios
```

Esta sección ejecuta la submacro Promedios en la hoja RESULTADOS, donde se presentan las lecturas diarias de todos los tiltmeters así como los datos proecados de desplazamiento y las gráficas correspondientes

End Sub