



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartográfica y Geofísica

**MODELO GEOLÓGICO E IDENTIFICACIÓN DEL MECANISMO DE
INESTABILIDAD QUE AFECTA DE LA LADERA DE LA MARGEN DERECHA DE
LA PRESA DE YESA**

-Informe Preliminar-

Departamento de Ingeniería del Terreno

Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, 17 Junio de 2013



Índice de contenidos

Resumen ejecutivo	6
Introducción	7
Objetivos	8
Trabajo realizado.....	9
Modelo geológico de la ladera.....	10
Reconstrucción de la estratigrafía local	10
Disposición geológico- estructural de la ladera	13
Mecanismo de inestabilidad que afecta la ladera derecha	18
Criterios para la definición de superficies de rotura.....	19
Superficie Principal de Rotura (SPR)	19
Superficie Inferior de Rotura (SIR)	21
Geometría de la superficie principal de rotura (SPR).....	23
Puntos de referencia utilizados para la generación de la SPR	23
Superficies generadas	28
Patrón de movimientos observado en la SPR	31
Referencias bibliográficas	39



Figura 1. Correlación entre las secuencias deposicionales entre los sondeos que atraviesan el Flysch de Yesa. El color gris corresponde a los niveles lutíticos y el naranja a los niveles de arenisca. Los triángulos de color rojo a lado de cada columna, indican como aumenta el tamaño de los sedimentos hacia el techo de cada secuencia.	11
Figura 2. Correlación realizada entre las secuencias deposicionales observadas en los sondeos que atraviesan el Flysch de Yesa y definición de las unidades litológicas locales.	12
Figura 3. Unidades del Flysch de Yesa observadas en la cabecera de la zona excavada (foto 22 de abril de 2013)	13
Figura 4. Buzamientos medidos en la ladera derecha de la presa de Yesa. La superficie topográfica es la que corresponde a la situación de la ladera a finales de Abril de 2013.	14
Figura 5. Pliegues anticlinales situados en la parte superior de la ladera de la Presa de Yesa (F1 a F3 son las unidades identificadas del Flysch de Yesa). (ac) argilita; (ar) arenisca.....	15
Figura 6. Situación de los cortes geológicos longitudinales y transversales realizado	16
Figura 7. Corte geológico longitudinal UPC-1 (ver situación en la figura 6), realizado siguiendo la dirección de máxima pendiente de los estratos.	17
Figura 8. Corte geológico transversal UPC-1 (ver situación en la figura 6), realizado siguiendo el trazado de la antigua carretera N-120.	17
Figura 9. Corte geológico transversal UPC-2 (ver situación en la figura 6), realizado aproximadamente a la cota de coronación (490m) de la presa actual.....	18
Figura 10. Corte UPC-1. Corte geológico sintético longitudinal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) así como otras superficies secundarias.	20
Figura 11. Perfil geológico sintético transversal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) así como otras superficies secundarias.	20
Figura 12. Modelo de doble cuña del deslizamiento definido por la SPR.....	21
Figura 13. Corte 3. Corte geológico sintético longitudinal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) y la SIR (contacto F1-MP).	22
Figura 14. Perfil geológico sintetizado transversal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) y la SIR (contacto F1-MP).....	23
Figura 15. Plano estriado en el sondeo SCI-3 a la profundidad de 52,5m. El buzamiento del plano es de 21º y un pitch 90º, consistente con la dirección de deslizamiento. Se interpreta como plano generado o reactivado por el deslizamiento.....	25
Figura 16. Plano estriado con fibras de calcita en el sondeo SCI-2 a la profundidad de 91,1m. El buzamiento del plano es de 16º y un pitch 5º. Se interpreta como plano/zona de debilidad del macizo rocoso pero que no muestra indicios de movimiento reciente.....	26



Figura 17. Izquierda: Zona brechificada en el sondeo SCI-11, a la profundidad de 35,3m. Derecha: la brecha está asociada a un plano de cizalla de buzamiento 24º, con estrías compatibles con la dirección de deslizamiento.	26
Figura 18. Izquierda: Zona brechificada en el sondeo SX1, a la profundidad de 99 m. Derecha: La brecha está asociada a un plano de cizalla de buzamiento 19º. La superficie no muestra indicios de movimiento reciente.....	27
Figura 19. Zona cizallada y brechificada identificada entre 29,3 y 30m de profundidad en el sondeo SCI-6, coincidente con las observaciones inclinométricas.	27
Figura 20. Corte geológico UPC-1 siguiendo la línea de máxima pendiente de las capas. Se comprueba que la SPR se acomoda perfectamente a las superficies de cizalla y zonas brechificadas identificadas en los testigos de los sondeos.	28
Figura 21. Sucesión de bloques diagrama y cortes longitudinales mostrando la superficie principal de rotura (SPR) (en rojo) y el techo de la formación de Margas de Pamplona (en azul). La intensidad de los colores expresa la cota topográfica a la que se encuentra cada punto de la superficie.	30
Figura 22. Disposición de la SPR y la del techo de la formación de Margas de Pamplona	31
Figura 23. Vectores de desplazamiento acumulado en el pie de la ladera (octubre 2012 a 7 de febrero de 2013). El límite del deslizamiento es el facilitado por la Asesoría Técnica.	32
Figura 24. Vectores de desplazamiento acumulado en el pie de la ladera (7 de Febrero a 4 de Marzo de 2013). El límite del deslizamiento es el facilitado por la Asesoría Técnica.	33
Figura 25. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido paralelo al valle E-O, para el periodo 11 de Febrero a 22 de Marzo de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el E y negativos hacia el O. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR obtenido en el apartado anterior.	34
Figura 26. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido paralelo al valle E-O, para el periodo 19 de Marzo a 19 de Abril de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el E y negativos hacia el O.....	34
Figura 27. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido perpendicular al valle N-s, para el periodo 11 de Febrero a 22 de Marzo de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el fondo del valle. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR obtenido en el apartado anterior.....	35
Figura 28. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido perpendicular al valle N-s, para el periodo 11 de Febrero a 22 de Marzo de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el fondo del valle. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR obtenido en el apartado anterior.....	36
Figura 29. Componente vertical “z” de los desplazamientos en el deslizamiento para el periodo 27 de Febrero a 19 de Abril de 2013. Se constata que el sentido ascendente o descendente de	



los movimientos es coherente con la presencia del pliegue sinclinal situado en la base de la ladera. 37



Resumen ejecutivo

La ladera derecha de la Presa de Yesa está compuesta por una secuencia de estratos que se han agrupado en cuatro unidades litológicas, siendo de muro a techo: Unidad de Margas de Pamplona (MP), Unidad Inferior del Flysch de Yesa (F1) compuesta por una alternancia de lutitas y areniscas, con predominancia de las primeras, Unidad Intermedia del Flysch de Yesa (F2) compuesta mayoritariamente por lutitas, y Unidad Superior del Flysch de Yesa (F3) compuesta por una alternancia de lutitas y areniscas, con predominancia de las segundas. La disposición de las capas define un doble pliegue en rodilla en la parte superior de la ladera y un pliegue sinclinal por debajo de la antigua carretera N-120.

La ladera derecha está afectada por un mecanismo de **deslizamiento traslacional** que tiene lugar a través de por lo menos **dos superficies de rotura**, cada una con distintas velocidades.

La mayor parte de la deformación se concentra en la que se ha denominado **superficie principal de rotura (SPR)**. Esta superficie se ha desarrollado de forma continua a través de las argilitas del techo de la Unidad Intermedia del Flysch de Yesa (F2), acomodándose a la disposición de los estratos. La geometría del deslizamiento definido por la SPR se ha determinado a partir de la distribución de grietas en la superficie del terreno, los desplazamientos detectados en los inclinómetros y la identificación de planos de cizalla en los testigos de sondeo. El volumen movilizado se estima **en unos 4,7 millones de metros cúbicos**.

Se ha identificado una superficie, que se ha denominado **superficie inferior de rotura (SIR)**, situada en la parte basal de la Unidad Inferior del Flysch de Yesa (F1), próxima al contacto con la Unidad de Margas de Pamplona (MP). Todavía no se ha podido definir el límite occidental del movimiento y la estimación del volumen se presentará en el informe definitivo.

La geometría de la SPR indica que la superficie del deslizamiento se inclina hacia el interior del macizo en la parte inferior de la ladera, por lo que se trata de un **deslizamiento traslacional de doble cuña**.

Los vectores desplazamiento obtenidos a partir de las medidas en las señales de puntería en superficie muestran que el deslizamiento experimenta una **rotación** en sentido horario. Esta rotación se explica por la presencia de la terminación periclinal del pliegue sinclinal situado en la base de la ladera. La rotación justificaría la apertura de una grieta de tracción que se desarrolla de S a N a media ladera y es visible en la Urbanización de Lasaitasuna así como la presencia de una zona de compresión en la superficie de cizalla al pie de la misma.



Introducción

A petición de la Confederación Hidrográfica del Ebro, se emite informe sobre el Modelo Geológico de la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa y la descripción del mecanismo de inestabilidad que ha afectado a la misma, especialmente en los primeros meses de 2013.

Este informe ha sido preparado por Jordi Corominas, doctor en geología y catedrático de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya y ha contado con la colaboración de José Moya, doctor en geología y profesor agregado y con la de Roger Ruiz, ingeniero geólogo, miembros ambos del citado Departamento.

El presente documento es un avance del informe que se entregará en el mes de julio de 2013, según el plan de trabajo previsto.

En este informe preliminar se presentan: (a) el modelo geológico de la ladera derecha del embalse de Yesa así como los criterios con los que ha sido elaborado; (b) los criterios y evidencias con los que identificado y localizado la superficie principal de rotura (SPR); (c) los criterios y evidencias con los que identificado y localizado la superficie inferior de rotura (SIR) (d) la definición del mecanismo de inestabilidad que afecta la ladera y el patrón de movimiento.

En el informe definitivo se verificará la presencia de una superficie inferior de rotura (SIR), su posible geometría y la relación con el denominado deslizamiento del Inglés. Asimismo abordarán las similitudes, diferencias y aspectos complementarios existentes con otros informes realizados previamente.



Objetivos

El objetivo fundamental de este informe es la presentación de un modelo geológico conceptual que permita la comprensión del mecanismo de inestabilidad que afecta la ladera y que pueda ser utilizado en los análisis de estabilidad y en otras actividades.

Más específicamente se han abordado los puntos siguientes:

- a) Definición de la estructura geológica de la ladera derecha de la Presa de Yesa
- b) Identificar el mecanismo de inestabilidad que afecta la ladera
- c) Localizar la-s superficie-s de rotura
- d) Definir la extensión y geometría de la masa en movimiento
- e) Proporcionar parámetros relativos al mecanismo de inestabilidad que se consideren relevantes para el análisis de estabilidad y para otras actividades

La información que sirve de base para la confección del modelo geológico se adjunta en anejos para facilitar su consulta y comprobación.



Trabajo realizado

Desde el mes de Abril de 2013 se ha procedido a:

- a) Revisar la documentación existente y, en especial, la información geológica y los datos suministrados por los dispositivos de auscultación
- b) Reconocimiento geológico de superficie
- c) Completar la descripción de los testigos extraídos en los sondeos perforados en la ladera (pendiente de completar)
- d) Revisión de las columnas litológicas y definición de las unidades litológicas (litotipos)
- e) Análisis e interpretación de los datos de auscultación
- f) Preparación de los perfiles y plantas geológicas y validación de las observaciones

La revisión de la documentación y los nuevos datos obtenidos ha comportado la reinterpretación de algunos resultados previos, especialmente en lo que se refiere a la profundidad y número de superficies de deslizamiento y a las velocidades calculadas. Los detalles, se especificarán en el informe definitivo.



Modelo geológico de la ladera

El contexto geológico general del embalse de Yesa ha sido descrito en diversas publicaciones e informes, por lo que aquí no se repetirá. El lector encontrará información más completa en Lafuente et al. (2007), Gutiérrez et al. (2010) y especialmente, en el informe geológico de la presa preparado por la Asistencia Técnica (documento 09.123.126/2123-D1a04-v03, Anejo 4- Estudio Geológico-Geotécnico y de Materiales).

El embalse de Yesa está situado en el extremo occidental de la depresión erosiva conocida como Canal de Berdún, en el límite de las provincias de Zaragoza y Navarra.

En la ladera de la margen derecha de la presa afloran las unidades litoestratigráficas siguientes (de muro a techo): **Margas de Pamplona** (Eoceno medio-superior de color gris azulado con intercalaciones de areniscas (de Rojas y Latorre, 1972; Puigdefábregas, 1975); **Flysch de Yesa** (Eoceno superior), constituido por una alternancia de niveles de areniscas y lutitas con un espesor superior a los 120 m (de Rojas y Latorre, 1972; Puigdefábregas, 1975; Lafuente et al., 2007)¹. Recubriendo estas formaciones aparece un coluvión de espesor irregular que localmente se trata de un depósito deslizado.

Reconstrucción de la estratigrafía local

Un aspecto que se ha considerado prioritario ha sido el establecimiento de una serie estratigráfica local de la ladera derecha. El motivo radica en la necesidad de confirmar la presencia y continuidad lateral de los tramos lutíticos (p.e. argilitas, limolitas) de la formación Flysch de Yesa y determinar hasta que punto las superficies de rotura hayan podido desarrollarse a través de los mismos sin necesidad de atravesar los niveles de areniscas.

El establecimiento de la serie estratigráfica local en el Flysch se ve dificultada por la ausencia de niveles guía. En efecto, el Flysch consiste en la repetición de ciclos sedimentarios cuya base está compuesta por areniscas que gradualmente dejan paso a lutitas (limolitas, argilitas). La naturaleza de esta formación hace que el grosor y extensión de los bancos de arenisca y las capas de lutitas sea muy variable y no se mantengan de un sondeo a otro. A todo ello se le añade la dificultad de conocer en cada sondeo en qué parte de la serie se ha realizado la perforación.

¹ El término marga es ambiguo y designa rocas con un comportamiento geomecánico dispar, siendo preferible el de argilita, limolita o grauvacca, más preciso. De todos modos, en este informe se mantendrá el término “marga” para referirnos a las “margas de Pamplona” cuyo uso está muy extendido en la literatura científica

Con objeto superar esta limitación, se ha trabajado con **secuencias deposicionales (ver Informe UPC-Anejo 1)**. Cada secuencia deposicional está constituida por un nivel inferior predominantemente lutítico y otro superior predominantemente de areniscas (Figura 1)

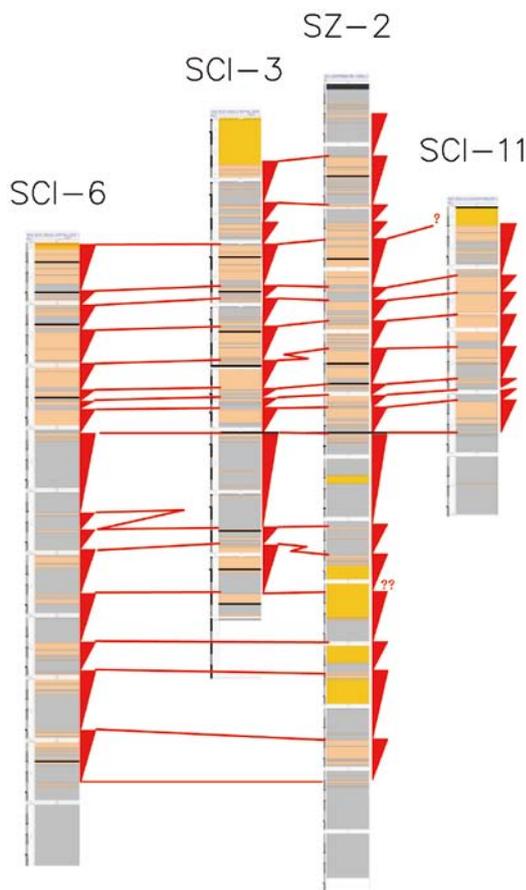


Figura 1. Correlación entre las secuencias deposicionales entre los sondeos que atraviesan el Flysch de Yesa. El color gris corresponde a los niveles lutíticos y el naranja a los niveles de arenisca. Los triángulos de color rojo a lado de cada columna, indican como aumenta el tamaño de los sedimentos hacia el techo de cada secuencia.

Se han definido cuatro unidades, que de base a techo son (Figura 2):

Unidad de Margas de Pamplona (MP). Está caracterizada por un tramo de 10 o más metros de margas grises oscuras con intercalaciones de capas de arenisca ocasionales y de grosor centimétrico. Corresponde a la parte superior de las Margas de Pamplona.

Unidad inferior del Flysch (F1). Constituida por una alternancia de niveles decimétricos y métricos de lutitas y areniscas. Los niveles de areniscas muestran un grosor máximo de unos 2 metros mientras que niveles de lutita suelen tener un grosor de 1 a 2 metros aunque ocasionalmente llegan a superar los 7 metros. La proporción de lutitas respecto al grosor total de la unidad es del 60 a 70%. El grosor de la unidad es de 30 a 35 metros. El contacto con la unidad Margas de Pamplona se ha fijado por la aparición

de un tramo de 2 a 5 metros que contiene varias capas de arenisca con un grosor de 10 cm hasta casi 2 m, dependiendo del sondeo.

Unidad intermedia del Flysch (F2). Definida un tramo de lutitas de 15 a 20 metros de grosor con algunas de intercalaciones capas de areniscas con grosor habitualmente de hasta 30 cm, aunque en alguna ocasión alcanzan los 2 m. La proporción de lutitas es generalmente superior al 80%.

Unidad superior del Flysch (F3). Formada por un tramo de hasta 50 m de grosor en el que dominan claramente las areniscas. En esta unidad pueden distinguirse dos subunidades. En la inferior, los niveles de areniscas suponen más del 70% y las capas superan frecuentemente potencias de un metro. Aun así los niveles de lutitas son frecuentes y pueden llegar a alcanzar grosores de 0.5 a 1 m. El grosor de esta subunidad es de 30 a 35 metros. En la subunidad superior la proporción de areniscas es menos importante y varía entre el 40 y el 60%.

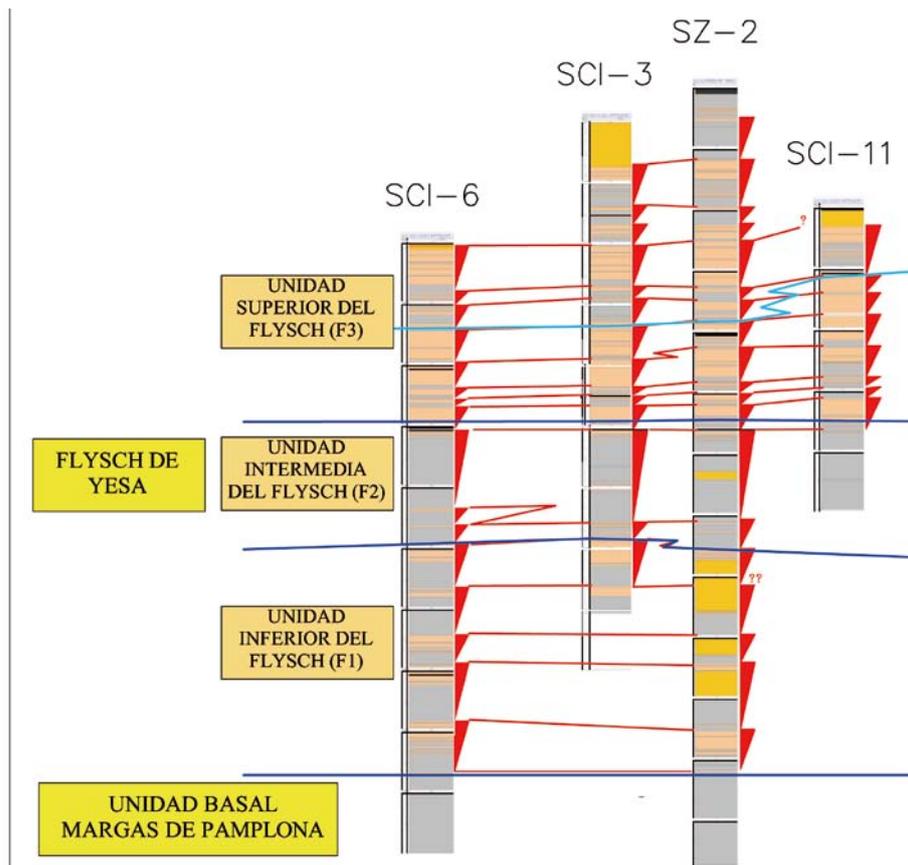


Figura 2. Correlación realizada entre las secuencias deposicionales observadas en los sondeos que atraviesan el Flysch de Yesa y definición de las unidades litológicas locales.

Las tres unidades del Flysch (F1 a F3) han podido ser observadas directamente en el terreno excavado, durante la visita realizada (Figura 3).

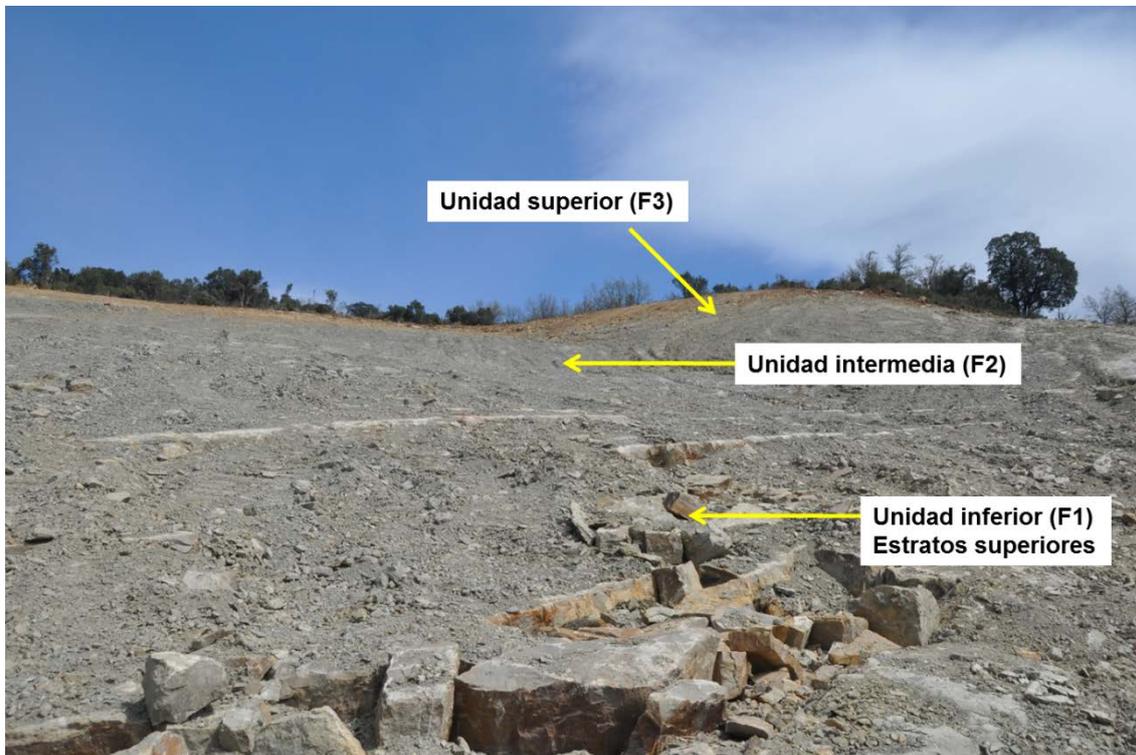


Figura 3. Unidades del Flysch de Yesa observadas en la cabecera de la zona excavada (foto 22 de abril de 2013)

Disposición geológico- estructural de la ladera

En la ladera derecha de la presa, las Margas de Pamplona (MP) y la Formación del Flysch de Yesa (unidades F1 a F3) están afectadas por pliegues de orientación predominante ONO-ESE. La estructura geológica local se ha obtenido a partir de la siguiente información:

- (a) observaciones y medidas en los afloramientos, especialmente en la parte superior de la ladera y en la antigua carretera N-120
- (b) observación y medida de los buzamientos en los testigos de sondeo
- (c) correlación entre columnas de sondeos.

La ladera muestra en la parte superior la presencia de un doble anticlinal y en su parte inferior, un sinclinal con orientación preferente ONO-ESE e inmersión oeste (Figura 4 y Figura 5).

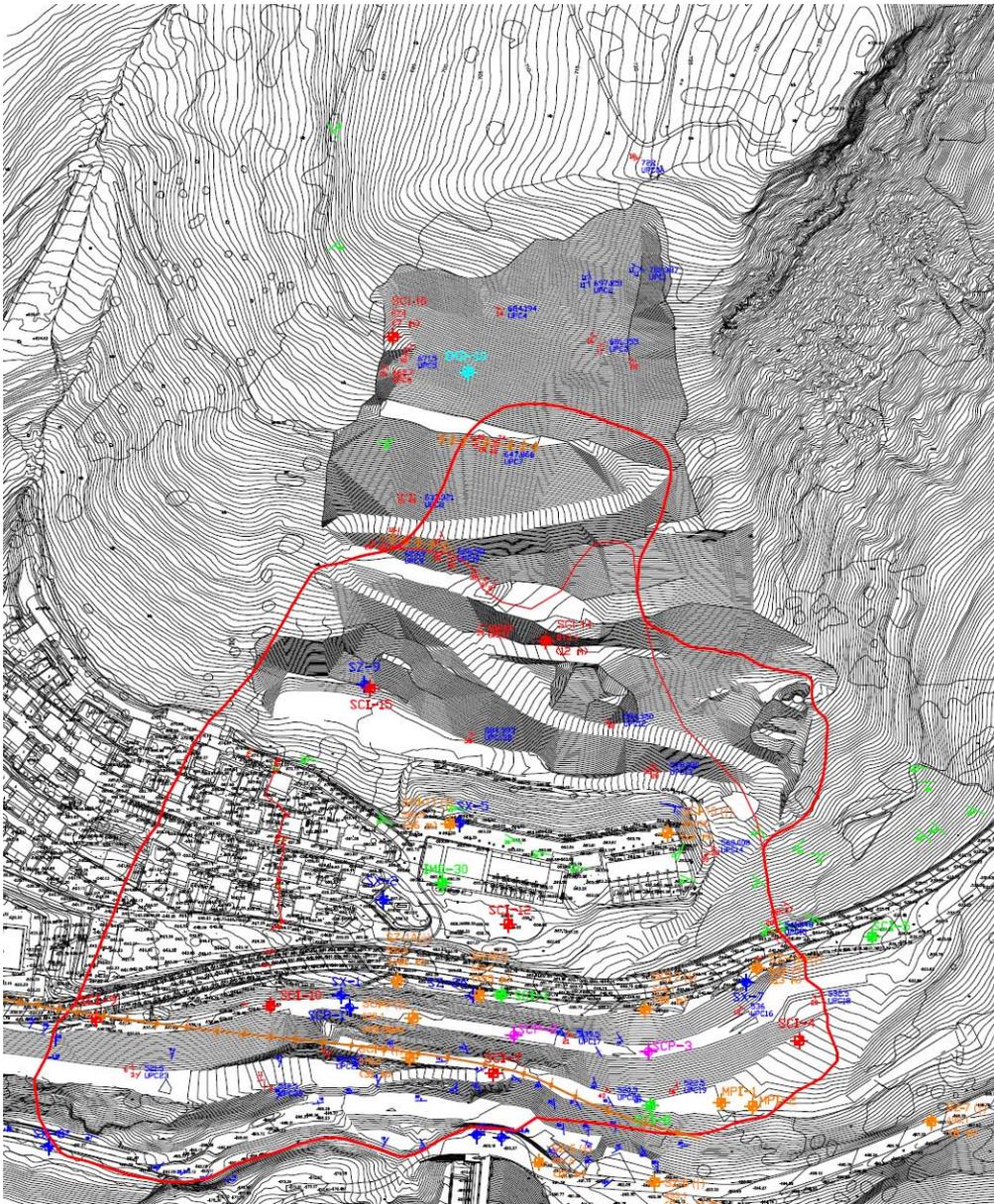


Figura 4. Buzamientos medidos en la ladera derecha de la presa de Yesa. La superficie topográfica es la que corresponde a la situación de la ladera a finales de Abril de 2013.

La superficie topográfica original del proyecto de recrecimiento de la presa, ha sido actualizada con un levantamiento topográfico de la zona de excavación con fecha de 27 de Abril de 2013.

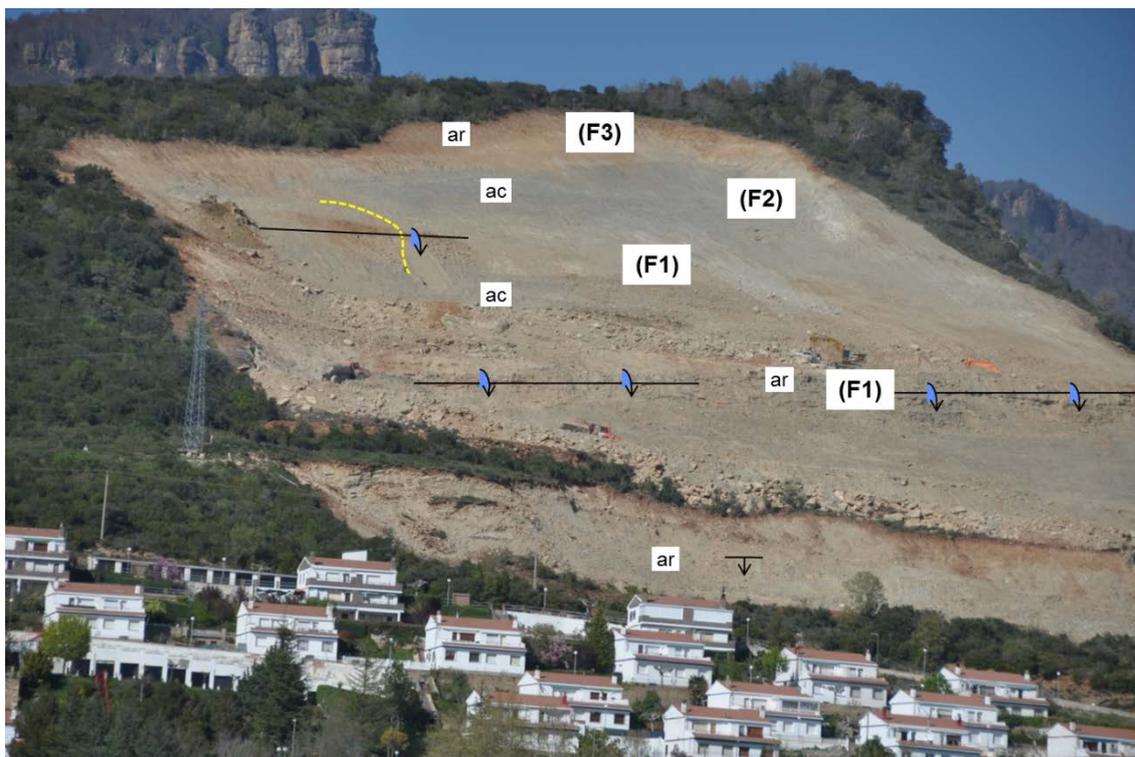


Figura 5. Pliegues anticlinales situados en la parte superior de la ladera de la Presa de Yesa (F1 a F3 son las unidades identificadas del Flysch de Yesa). (ac) argilita; (ar) arenisca

En el rellano situado al Norte de la ladera (Marmayor), el flysch presenta una disposición subhorizontal. La parte superior de la ladera contiene dos pliegues anticlinales en rodilla (Figura 5). A partir de la cota aproximada de 645m, el flanco sur del anticlinal observa buzamientos predominantes comprendidos entre los 35 y 50º que se suavizan hacia el pie de la ladera.

El eje del sinclinal se sitúa justo al Sur de la carretera N-120, por debajo de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa. En la zona excavada del nuevo estribo de la presa se observan direcciones y buzamientos variables, predominantes hacia el interior del talud.

Se han confeccionado varios cortes geológicos (ver situación en la Figura 6) que coinciden y mantienen la misma numeración que los preparados por la Asistencia Técnica, así como nuevos cortes (cortes UPC). En el **anejo 2** se adjuntan todos los perfiles geológicos confeccionados.

Para la preparación de los cortes se han respetado los buzamientos observados en superficie y en los testigos de sondeo mientras que la profundidad de los contactos entre unidades litológicas es la observada en los sondeos. Finalmente, con objeto de respetar la profundidad de los contactos, las columnas de los sondeos situados fuera de cada perfil han sido proyectadas siguiendo la dirección de capa (perfil longitudinal) o según el ángulo de buzamiento de los estratos (perfil transversal).

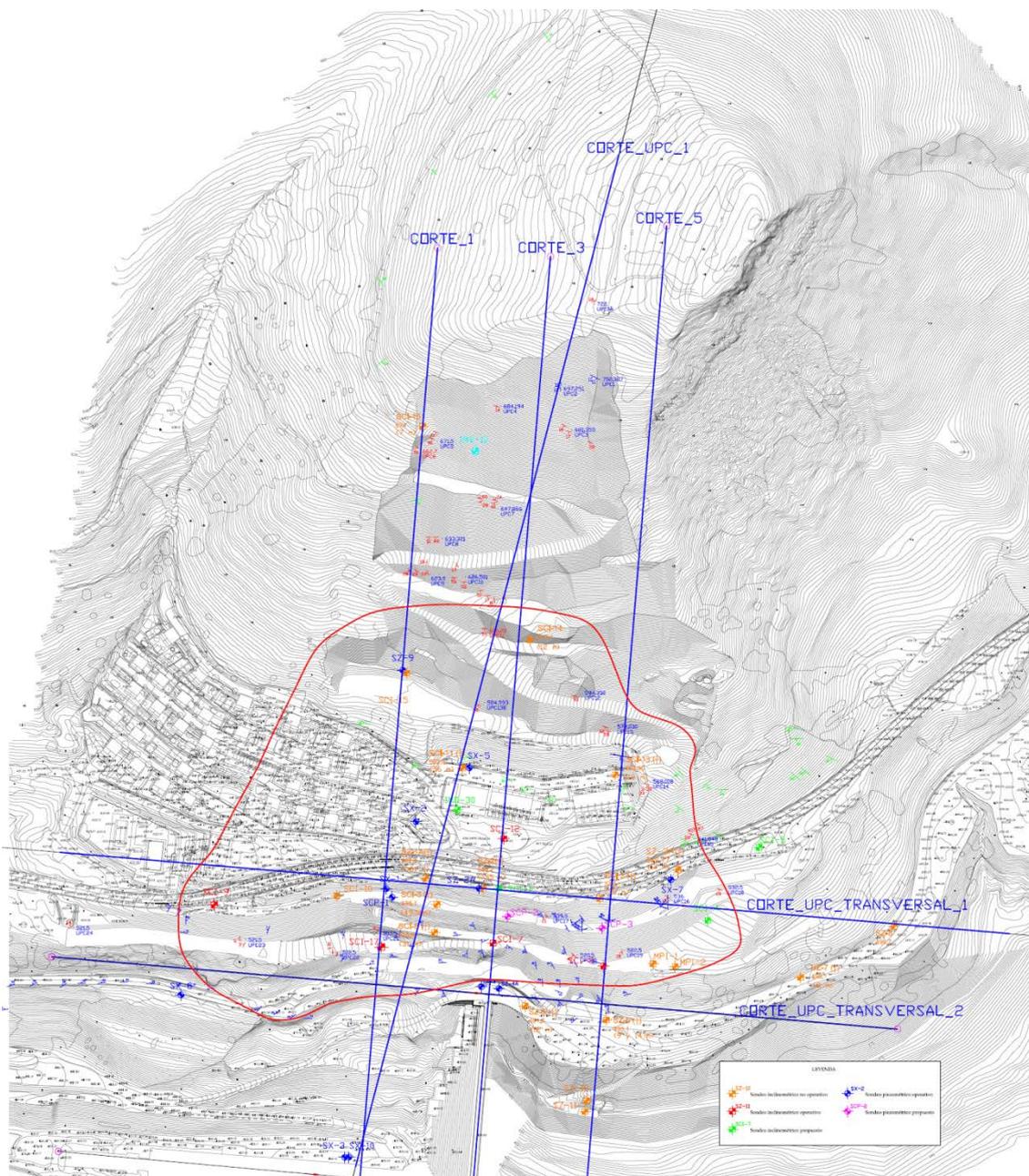


Figura 6. Situación de los cortes geológicos longitudinales y transversales realizado

La estructura geológica se sintetiza en el perfil geológico longitudinal de la Figura 7 y en los cortes geológicos transversales de la Figura 8 y Figura 9. El corte longitudinal UPC-1 se ha seleccionado porque coincide con la dirección de máxima pendiente de los estratos. En el **anexo 2** se adjuntan cortes geológicos según otras direcciones consideradas en los informes de la Asistencia Técnica.

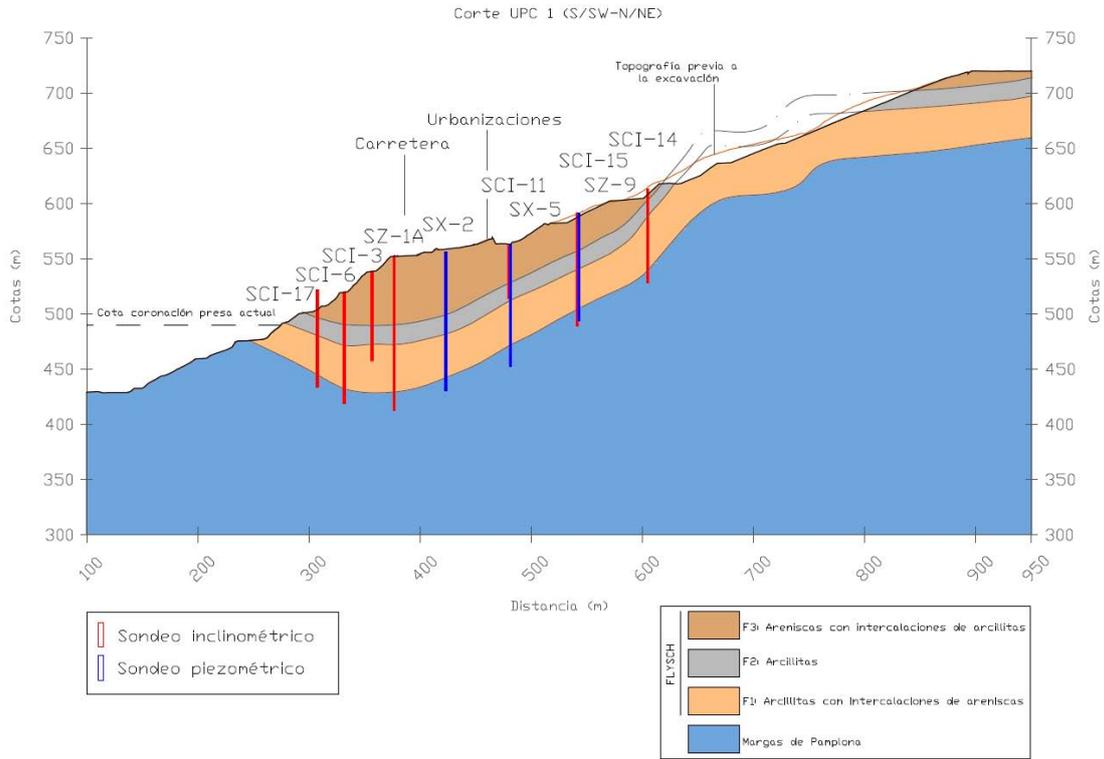


Figura 7. Corte geológico longitudinal UPC-1 (ver situación en la figura 6), realizado siguiendo la dirección de máxima pendiente de los estratos.

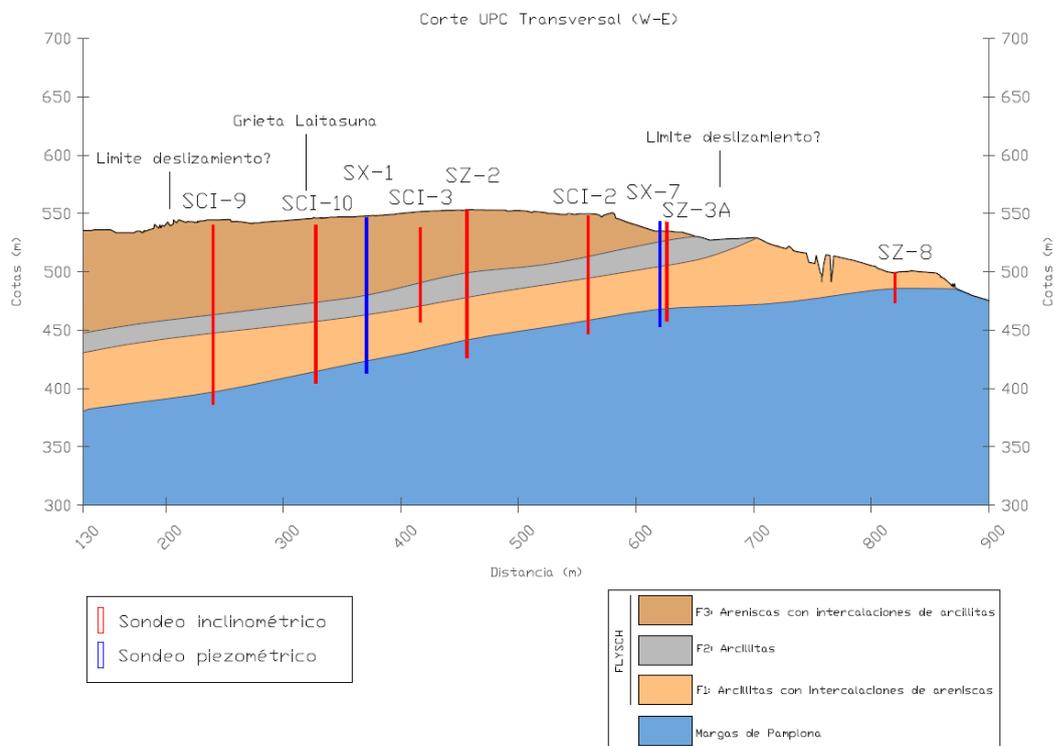


Figura 8. Corte geológico transversal UPC-1 (ver situación en la figura 6), realizado siguiendo el trazado de la antigua carretera N-120.

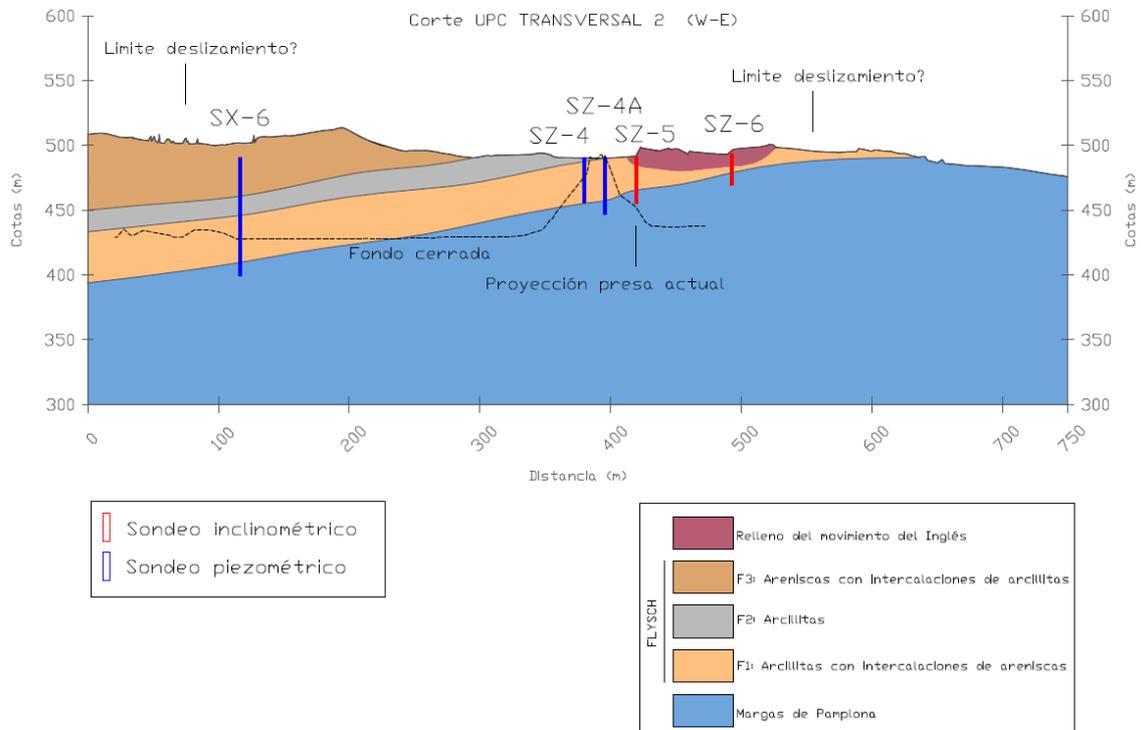


Figura 9. Corte geológico transversal UPC-2 (ver situación en la figura 6), realizado aproximadamente a la cota de coronación (490m) de la presa actual.

Mecanismo de inestabilidad que afecta la ladera derecha

Para determinar el mecanismo de inestabilidad y la geometría de la rotura se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- El desarrollo de una superficie de rotura continua que afecte al conjunto la ladera puede verse favorecido por la estructura geológica (disposición favorable de las capas)
- Los niveles “a priori” más débiles son las argilitas que, además, pueden contener planos de debilidad heredados del plegamiento de la formación



- En un deslizamiento traslacional, debe esperarse la existencia de un nivel-es o capa-s que favorezca-n el desarrollo de la superficie-s rotura-s (estrato, zona de falla, etc)

Criterios para la definición de superficies de rotura

Los indicadores utilizados para detectar y definir superficies de rotura son los siguientes (Pinyol et al. 2011):

- (a) Los registros inclinométricos
- (b) Correlación entre las lecturas inclinométricas
- (c) Coherencia en la interpolación entre sondeos. Continuidad litológica (argilitas)
- (d) Presencia y continuidad de los planos de cizalla. Definición de manera coherente de una superficie de deslizamiento que sea reconocible y compatible en todos los sondeos de un mismo perfil
- (e) Calidad del testigo por encima y por debajo del plano de cizalla

Los perfiles inclinométricos son la fuente de información más utilizada y fiable para determinar la geometría de las superficies de rotura. Las lecturas de los inclinómetros están sujetas a posibles errores y anomalías, por lo que hemos procedido a una reinterpretación de los datos en bruto (originales), corrigiéndolas si se ha considerado necesario. Los detalles de esta reinterpretación se encuentran en el **anejo 3**.

Superficie Principal de Rotura (SPR)

En un gran número de inclinómetros ha sido posible identificar una zona en la que se producen los mayores desplazamientos que ha sido definida como **superficie principal de rotura (SPR)**. La superficie se desarrolla a través del nivel de argilitas de la Unidad F2, acomodándose a la disposición de los estratos. La geometría de la superficie obtenida permite afirmar que se trata de un **deslizamiento traslacional**.

La superficie principal de rotura (SPR) definida conecta de manera coherente las superficies de rotura observadas en los inclinómetros que aparecen en cada uno de los perfiles (Figura 10 y Figura 11).

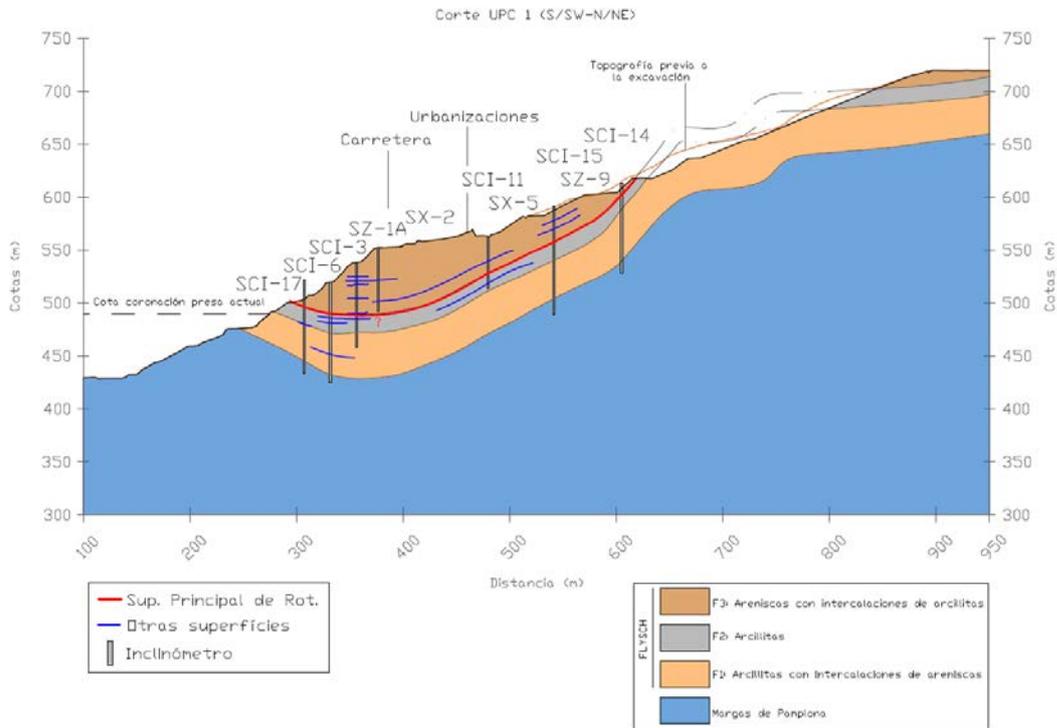


Figura 10. Corte UPC-1. Corte geológico sintético longitudinal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) así como otras superficies secundarias.

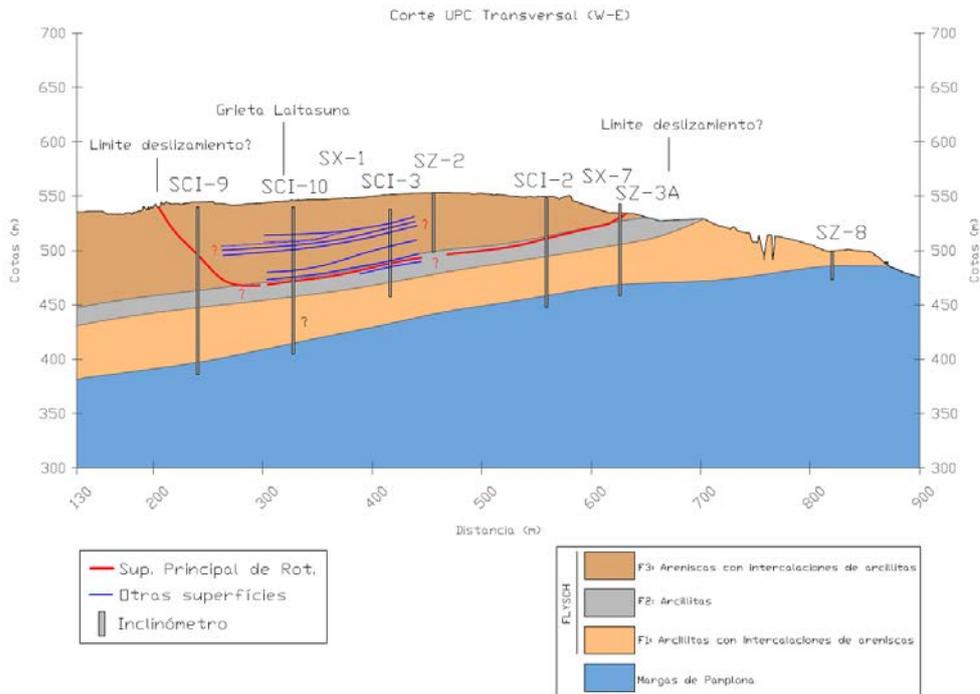


Figura 11. Perfil geológico sintético transversal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) así como otras superficies secundarias.

El perfil de la **Figura 12** indica que la parte de la ladera que reposa sobre el pliegue sinclinal actúa a modo de **cuña pasiva**. La masa de terreno situada aguas arriba del eje del pliegue sinclinal actúa a modo de **cuña activa**. Por este motivo, el deslizamiento translacional debe interpretarse como de **dobles cuñas**.

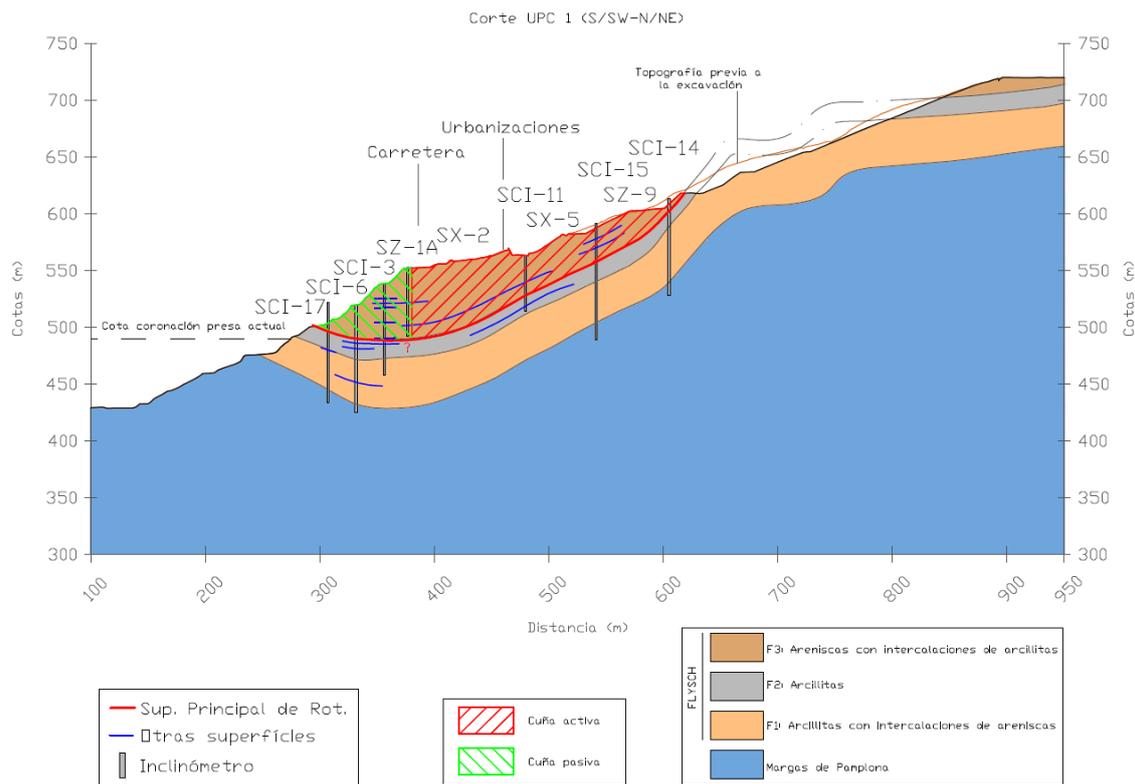


Figura 12. Modelo de doble cuña del deslizamiento definido por la SPR.

Superficie Inferior de Rotura (SIR)

Utilizando el mismo procedimiento, se ha identificado la presencia de una **superficie inferior de rotura (SIR)**. La existencia de esta superficie viene avalada además por los siguientes indicadores:

- Diversos registros inclinométricos sugieren la presencia de más de una superficie de rotura (p.e. SZ-2, SZ5, SCI-3, SCI-6, SCI-10, SCI-15)
- La comparación de las lecturas inclinométricas de algunos sondeos (SCI-6, SCI-10) con las de señales de puntería en superficie (V-20, V-22), para el mismo periodo de tiempo, muestran un mayor desplazamiento de las señales de puntería
- Daños en el muro de mampostería situado al Este de la presa, por debajo de la SPR
- Existencia de movimientos de izamiento en el cuerpo de la presa (bloques N21 a N23)

Las primeras interpretaciones indican que la SIR se desarrolla en el contacto de la unidad inferior del Flysch de Yesa (F1) y la Unidad de Margas de Pamplona (MP) (Figura 13 y Figura 14).

La SIR no ha sido detectada en todos los perfiles y su extensión lateral todavía no ha podido ser determinada por completo. Todavía quedan por interpretar columnas de sondeo y las medidas de los nuevos inclinómetros. La extensión y continuidad de la SIR deberá ser confirmada en el informe definitivo.

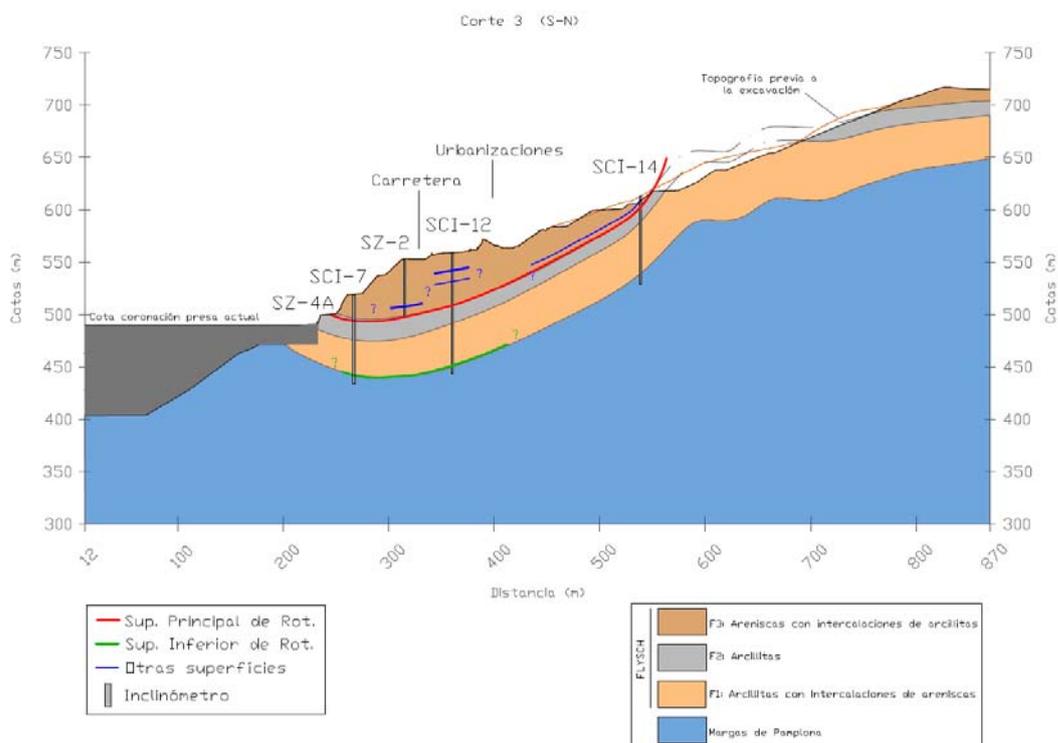


Figura 13. Corte 3. Corte geológico sintético longitudinal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) y la SIR (contacto F1-MP).

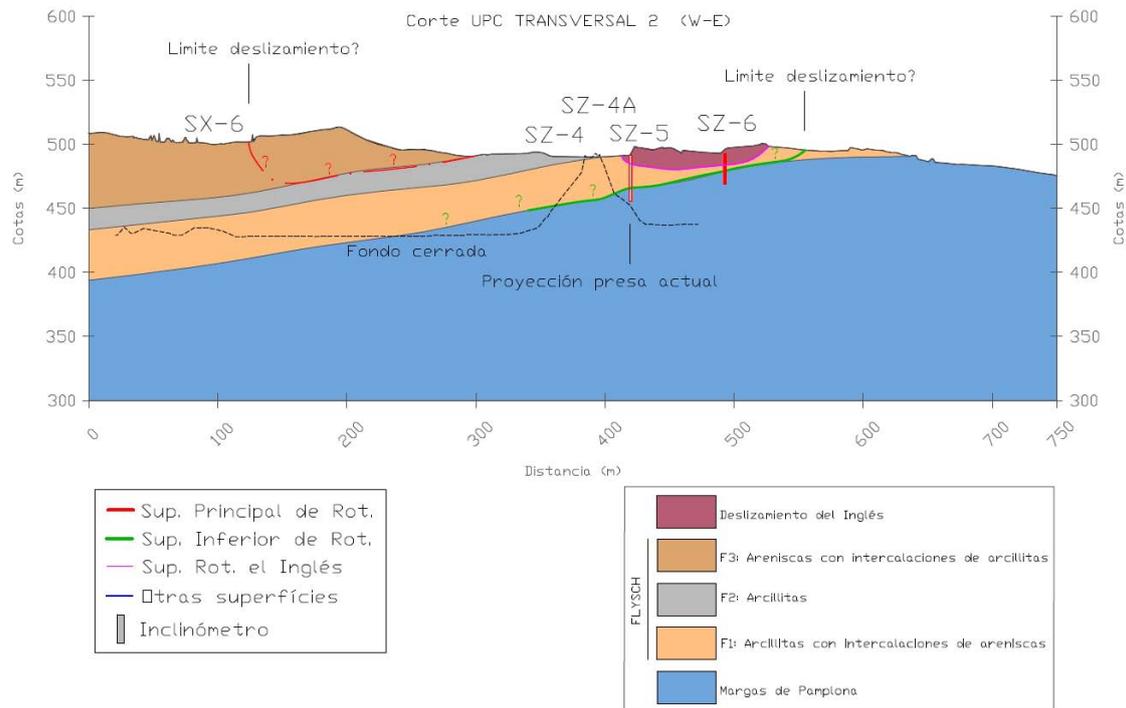


Figura 14. Perfil geológico sintetizado transversal de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa, con indicación de la SPR (por debajo de la F3) y la SIR (contacto F1-MP).

Geometría de la superficie principal de rotura (SPR)

Se ha procedido a la definición geométrica de la superficie SPR. Para ello se ha utilizado el programa Surfer v.9.9, de generación de superficies.

Puntos de referencia utilizados para la generación de la SPR

Los programas de krigeage para generación de superficies son extremadamente sensibles a la cantidad y calidad de los datos disponibles. Cuantos más puntos se conozcan, más fiable es la geometría obtenida

Los datos utilizados para generar la SPR han sido los siguientes:

- Profundidad de la SPR obtenida en los sondeos inclinométricos
- Profundidad de la SPR obtenida a partir de la identificación de puntos de referencia (p.e. superficies de cizalla) los testigos de sondeo y comprobación de la consistencia de la extrapolación



- Límites laterales del deslizamiento en superficie obtenidos a partir de indicadores de deformación (grietas en edificios y carretera, daños estructurales, abombamientos, entre otros). La superficie lateral que limita el deslizamiento por el Oeste se ha supuesto de gran inclinación.

La lectura de los inclinómetros permite situar razonablemente la profundidad de la superficie de deslizamiento SPR en los sondeos. Sin embargo, la definición de su extensión y geometría, requiere idealmente de una mayor información. El número disponible de inclinómetros perforados en la ladera es limitado, por lo que la geometría de las superficies de rotura debe obtenerse por interpolación entre sondeos y por extrapolación hacia la superficie topográfica, con la ayuda de las evidencias observadas en el exterior (grietas, daños estructurales, entre otros).

Para generar una superficie de mayor fiabilidad, se aumentado el número de puntos de referencia conocidos en la SPR a partir de la observación detallada de los testigos de sondeos que no disponen de inclinómetro. El objetivo consiste en identificar la presencia de la superficie del deslizamiento en los sondeos con los siguientes criterios:

- La superficie de deslizamiento debería desarrollarse siguiendo superficies o niveles de debilidad presentes en el macizo rocoso. Estos niveles y/o superficies consisten en litologías de baja resistencia (argilitas) o planos preexistentes en el macizo, heredados o no.
- Si el sondeo ha sido perforado con posterioridad a la detección del deslizamiento, habría la posibilidad de encontrar el plano o planos de cizalla reciente en los testigos de sondeo que pudieran correlacionarse con los identificados en los inclinómetros. La comprobación no es evidente. En el plano de deslizamiento es frecuente que aparezcan superficies de cizalla bien desarrolladas y continuas. Sin embargo, las superficies de cizalla pueden tener también un origen tectónico, sin relación directa con el deslizamiento. La formación de Flysch de Yesa se ha visto afectada por diversos pliegues asociados al cabalgamiento de Leyre. El plegamiento da lugar necesariamente al movimiento relativo entre estratos y al desarrollo de planos de cizalla. El reto es distinguir los planos de cizalla asociados al deslizamiento reciente de los de origen tectónico. Estos últimos pueden haber sido aprovechados por el propio deslizamiento.

La identificación del plano de deslizamiento se ha basado en la concurrencia simultánea de diversos indicadores, entre ellos:

- (a) Presencia de planos de cizalla. Estos planos suelen ser de fácil identificación debido a la existencia de estrías y superficies pulimentadas (Figura 15 y Figura 16)
- (b) Consistencia entre la dirección de las estrías y la dirección observada del deslizamiento
- (c) Continuidad y paralelismo de los planos de cizalla y zonas falladas respecto al posible plano de deslizamiento (Figura 17 y Figura 18)

- (d) Correlación con las superficies definidas mediante las lecturas inclinométricas.
- (e) Grado de recuperación y calidad de los testigos por encima del plano de cizalla. En el caso de terreno deslizado, el movimiento puede haber roto los estratos más rígidos y dar como resultado un macizo de peor calidad cuando se compara con los testigos de roca no deslizada (Figura 19).
- (f) La interpolación del plano de deslizamiento entre sondeos no debe mostrar incoherencias



Figura 15. Plano estriado en el sondeo SCI-3 a la profundidad de 52,5m. El buzamiento del plano es de 21° y un pitch 90° , consistente con la dirección de deslizamiento. Se interpreta como plano generado o reactivado por el deslizamiento



Figura 16. Plano estriado con fibras de calcita en el sondeo SCI-2 a la profundidad de 91,1m. El buzamiento del plano es de 16° y un pitch 5° . Se interpreta como plano/zona de debilidad del macizo rocoso pero que no muestra indicios de movimiento reciente.



Figura 17. Izquierda: Zona brechificada en el sondeo SCI-11, a la profundidad de 35,3m. Derecha: la brecha está asociada a un plano de cizalla de buzamiento 24° , con estrías compatibles con la dirección de deslizamiento.



Figura 18. Izquierda: Zona brechificada en el sondeo SX1, a la profundidad de 99 m. Derecha: La brecha está asociada a un plano de cizalla de buzamiento 19° . La superficie no muestra indicios de movimiento reciente.



Figura 19. Zona cizallada y brechificada identificada entre 29,3 y 30m de profundidad en el sondeo SCI-6, coincidente con las observaciones inclinométricas.

En la Figura 20 se muestran todos los indicadores asociados a la presencia de zonas de debilidad que han sido observados en las columnas de sondeo y la disposición de la superficie de deslizamiento. La correspondencia con los datos disponibles, es satisfactoria.

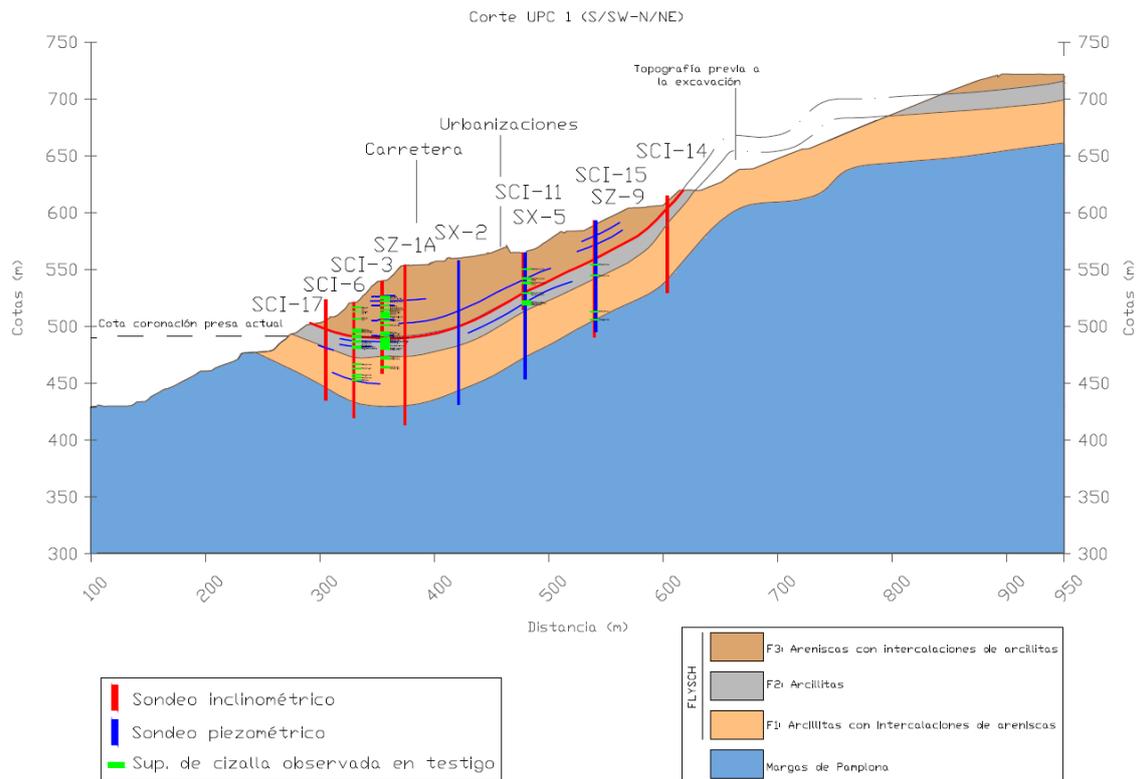


Figura 20. Corte geológico UPC-1 siguiendo la línea de máxima pendiente de las capas. Se comprueba que la SPR se acomoda perfectamente a las superficies de cizalla y zonas brechificadas identificadas en los testigos de los sondeos.

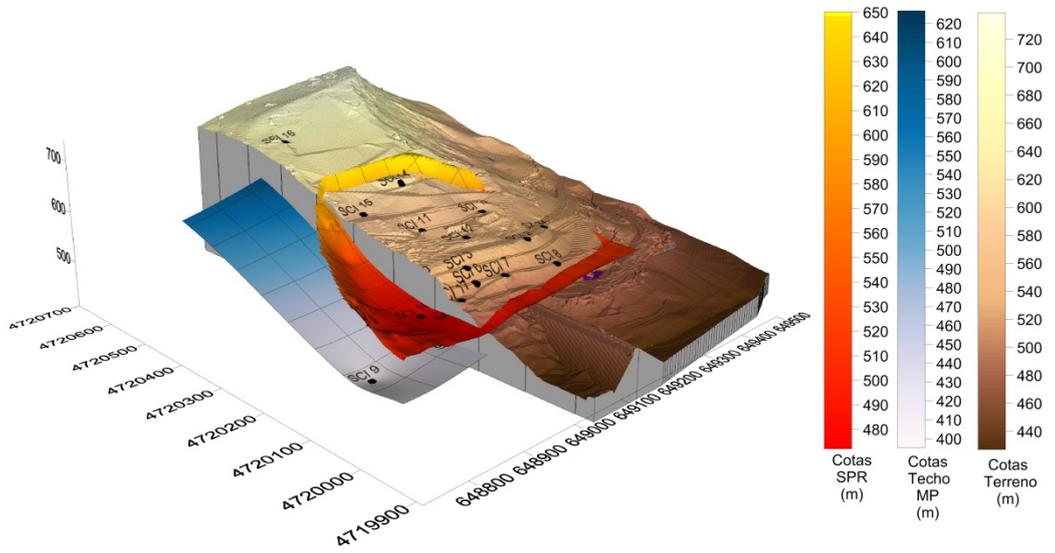
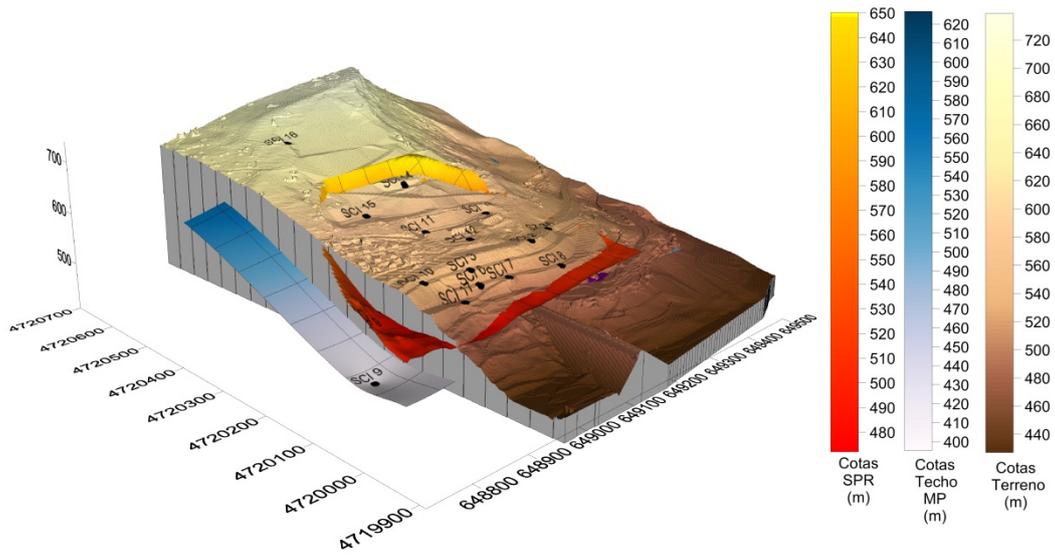
Aunque el proceso de comprobación no ha finalizado porque todavía quedan columnas de sondeo por revisar, los primeros resultados muestran una buena coherencia de las superficies extrapoladas (figura 18).

Superficies generadas

Los trabajos realizados hasta el momento presente han permitido generar la SPR y la superficie del contacto entre el Flysch de Yesa y la Unidad de Margas de Pamplona (contacto F1-MP).

La SIR se generará cuando terminen los trabajos en curso de levantamiento de las columnas litológicas de los nuevos sondeos y la integración con los datos de auscultación disponibles.

Diversos bloques que muestran cortes de la SPR y del techo de la unidad MP se presentan en la Figura 21 (otras figuras están recogidas en el **Anejo 5**)



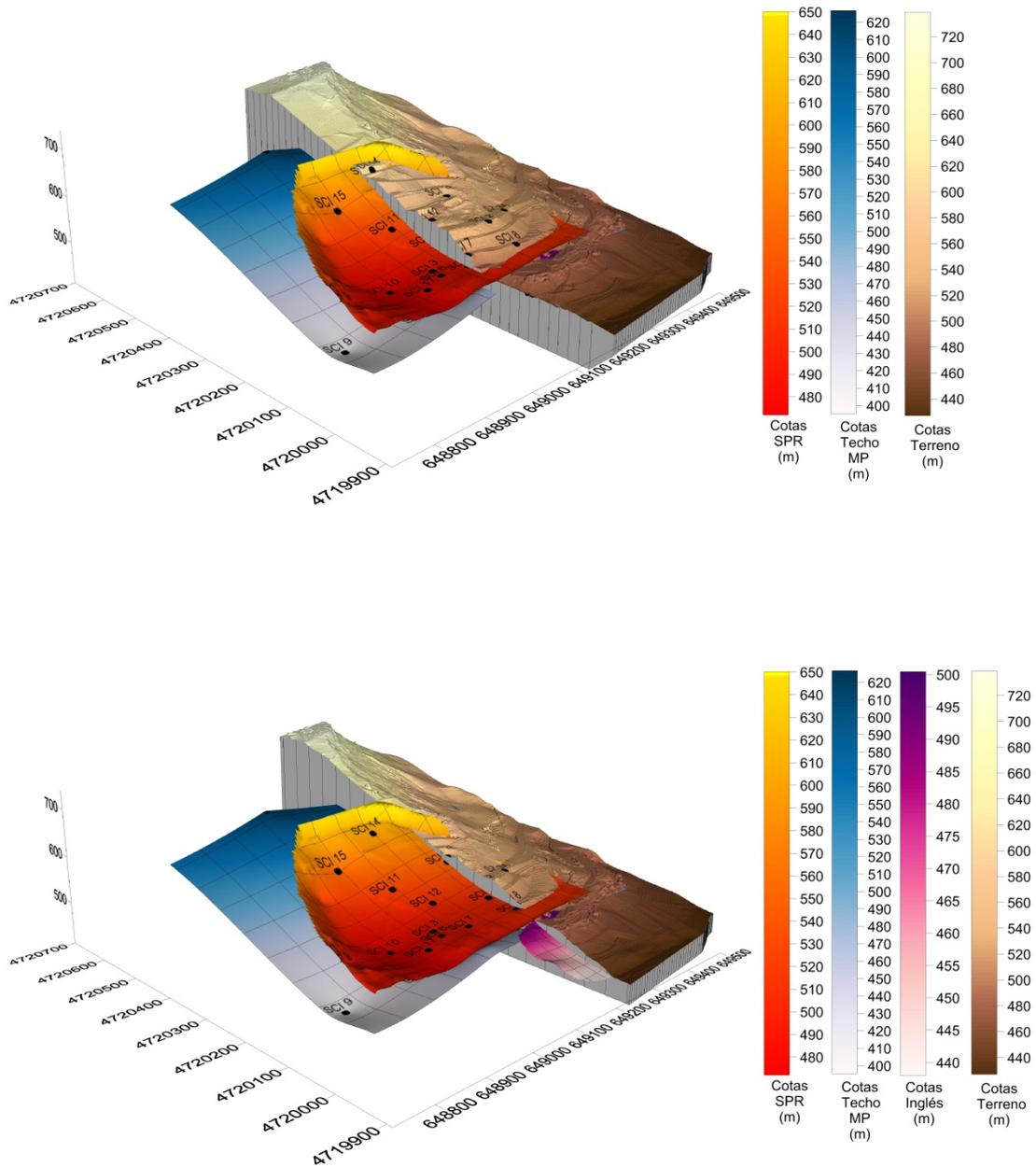


Figura 21. Sucesión de bloques diagrama y cortes longitudinales mostrando la superficie principal de rotura (SPR) (en rojo) y el techo de la formación de Margas de Pamplona (en azul). La intensidad de los colores expresa la cota topográfica a la que se encuentra cada punto de la superficie.

Se comprueba que la superficie generada no muestra ninguna anomalía destacable en su disposición.

El volumen del deslizamiento delimitado por la SPR se ha estimado en unos **4,7 millones de metros cúbicos**.

Si bien la SPR se desarrolla en la base de la formación (F1) acomodándose al buzamiento de los estratos, se constata que ésta se dispone independientemente del techo de las Margas de Pamplona (Figura 22)

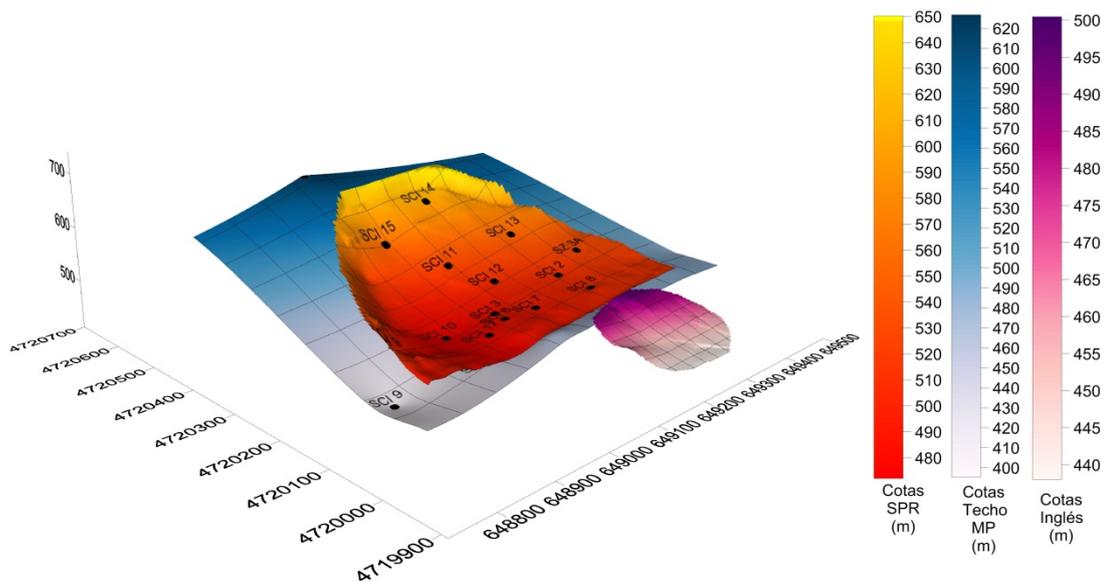


Figura 22. Disposición de la SPR y la del techo de la formación de Margas de Pamplona

Patrón de movimientos observado en la SPR

Las velocidades medidas en las señales de puntería y en los inclinómetros sugieren **la rotación del pie del deslizamiento** en el sentido de las agujas del reloj (Figura 23 y Figura 24). Los vectores de desplazamiento acumulado aumentan de oeste a este de la ladera. Esta rotación es observable en la propia evolución de algunos de los puntos (Figura 24).

En una primera interpretación, la rotación estaría facilitada por la existencia de **la terminación periclinal del pliegue sinclinal**, cuyo eje se sitúa entre la presa y antigua la carretera nacional N-120.

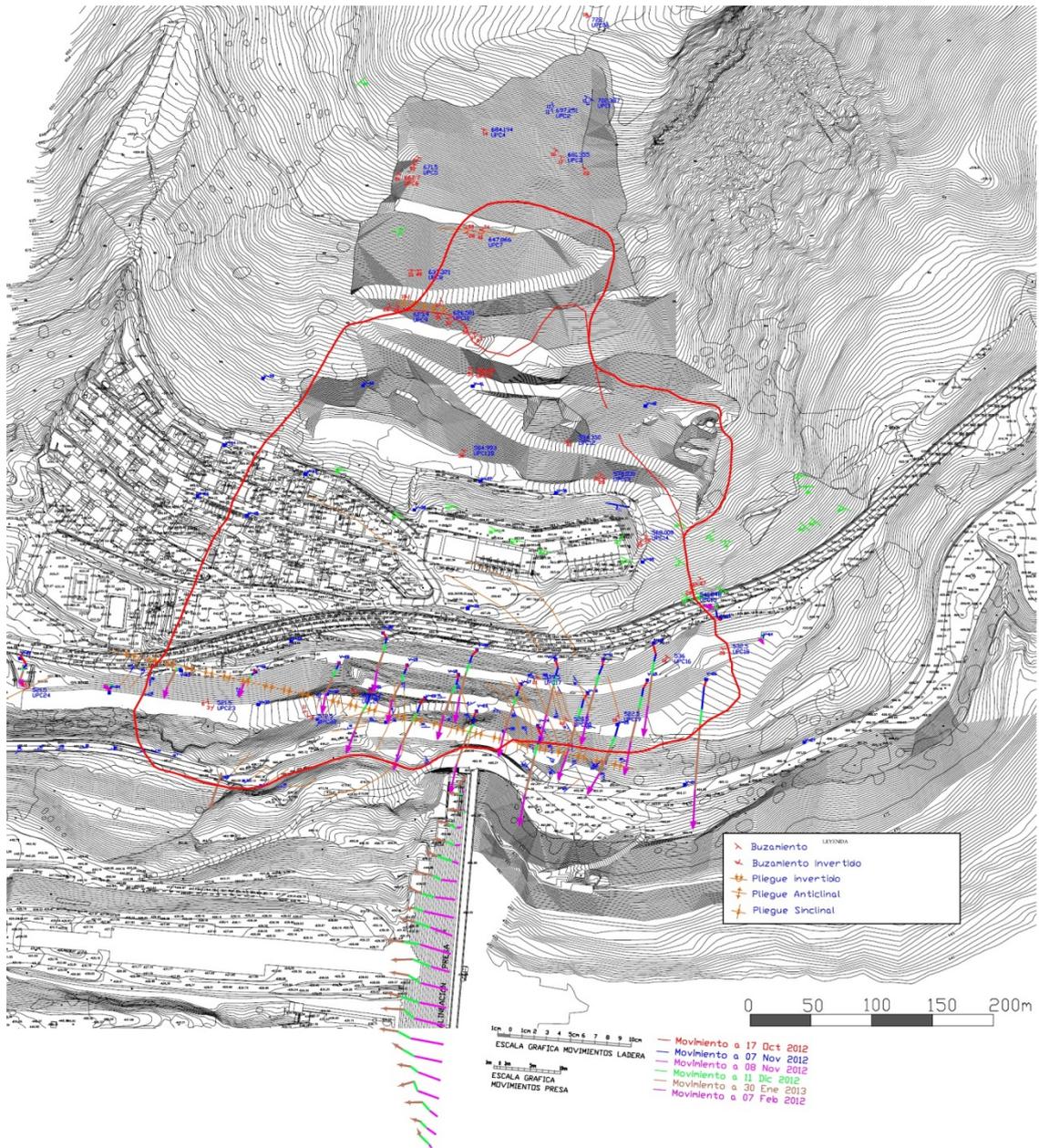


Figura 23. Vectores de desplazamiento acumulado en el pie de la ladera (octubre 2012 a 7 de febrero de 2013). El límite del deslizamiento es el facilitado por la Asesoría Técnica.

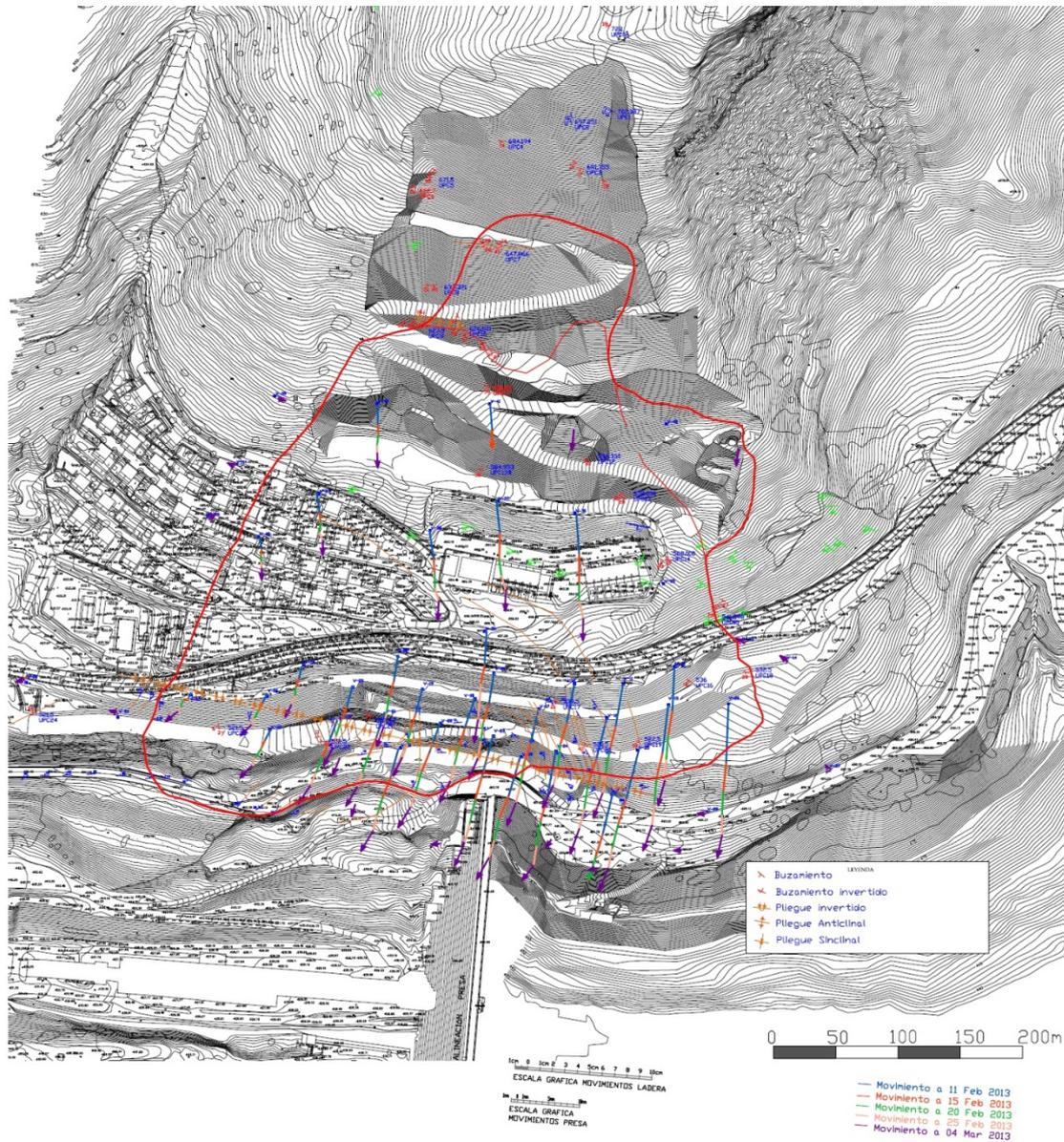


Figura 24. Vectores de desplazamiento acumulado en el pie de la ladera (7 de Febrero a 4 de Marzo de 2013). El límite del deslizamiento es el facilitado por la Asesoría Técnica.

Observando la componente de movimiento en sentido paralelo al valle O-E (componente "X" del movimiento), la rotación se hace más evidente (Figura 25 y Figura 26)

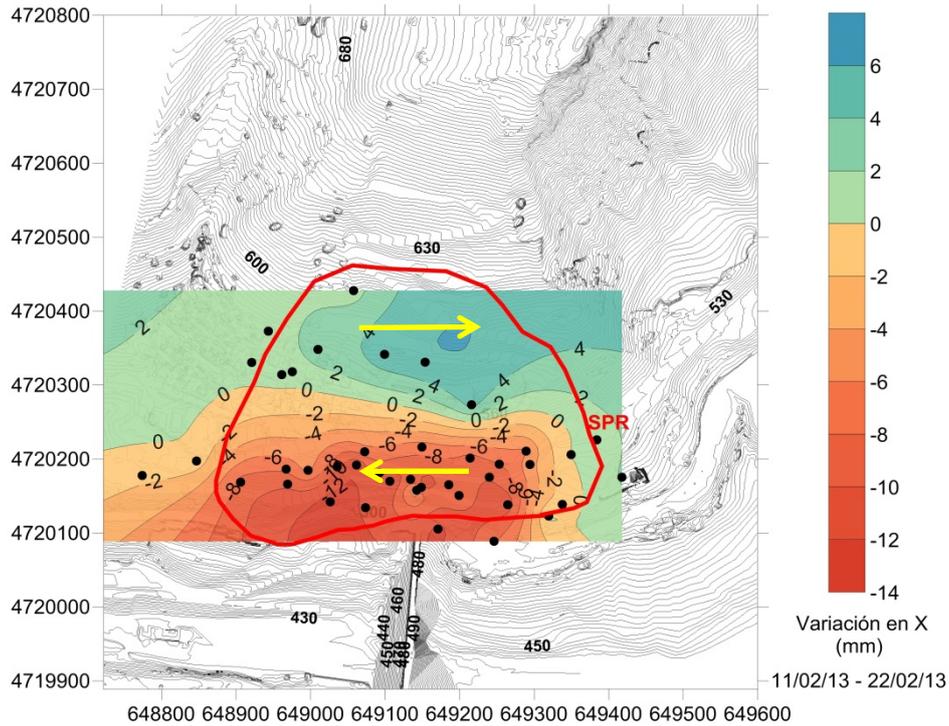


Figura 25. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido paralelo al valle E-O, para el periodo 11 de Febrero a 22 de Marzo de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el E y negativos hacia el O. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR obtenido en el apartado anterior.

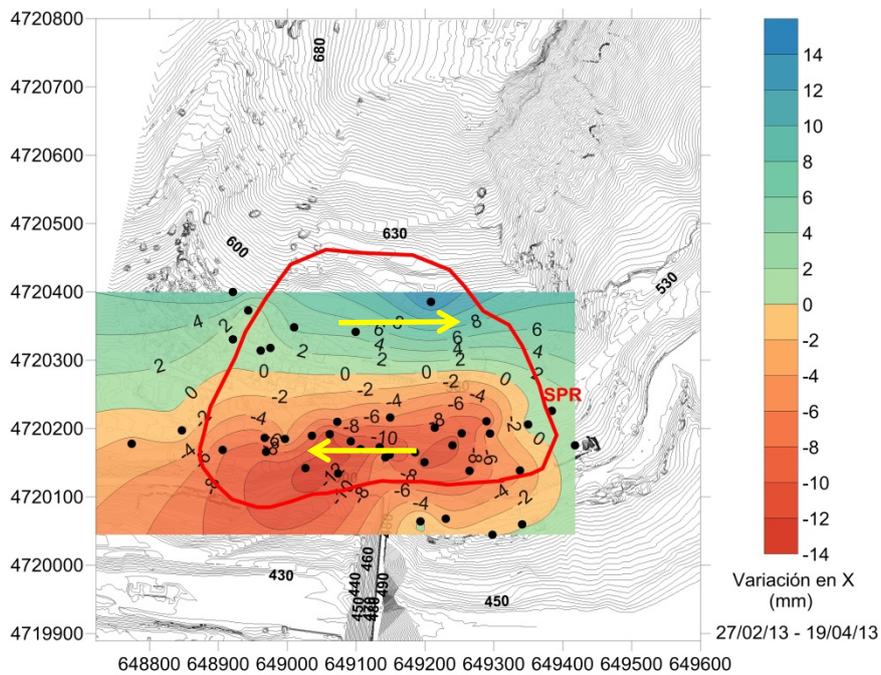


Figura 26. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido paralelo al valle E-O, para el periodo 19 de Marzo a 19 de Abril de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el E y negativos hacia el O.

El par de rotación dibujado por la componente del deslizamiento en el sentido O-E explicaría la aparición de la grieta de tracción al Oeste de la masa deslizada (en la Urbanización de Lasaitasuna) e indicaría la existencia de esfuerzos de compresión por debajo de la antigua carretera N-120.

La componente del desplazamiento hacia el fondo del valle, componente "Y", indica que el movimiento descendente es mayoritario. La magnitud del movimiento es mayor en la mitad oriental del deslizamiento y significativamente menor en su parte más occidental coincidiendo con el desarrollo de la grieta de tracción (Figura 27 y Figura 28).

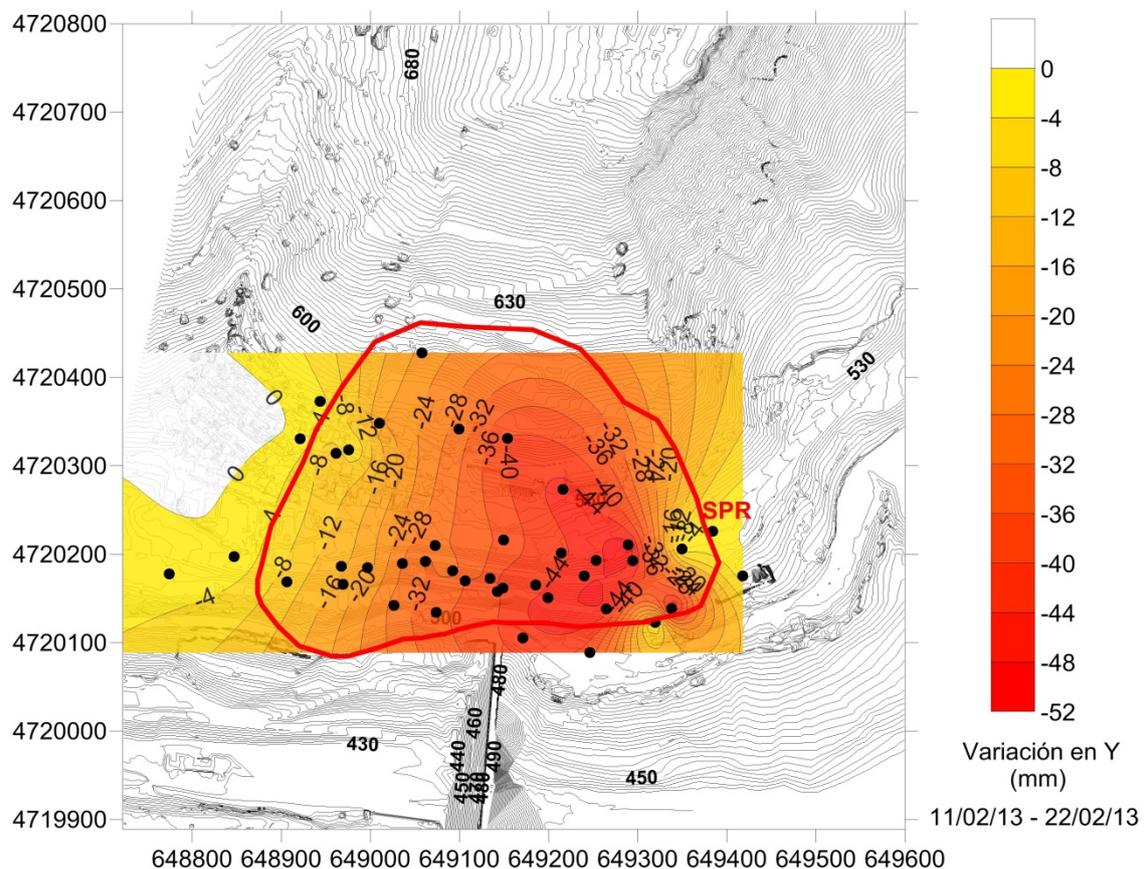


Figura 27. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido perpendicular al valle N-s, para el periodo 11 de Febrero a 22 de Marzo de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el fondo del valle. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR obtenido en el apartado anterior.

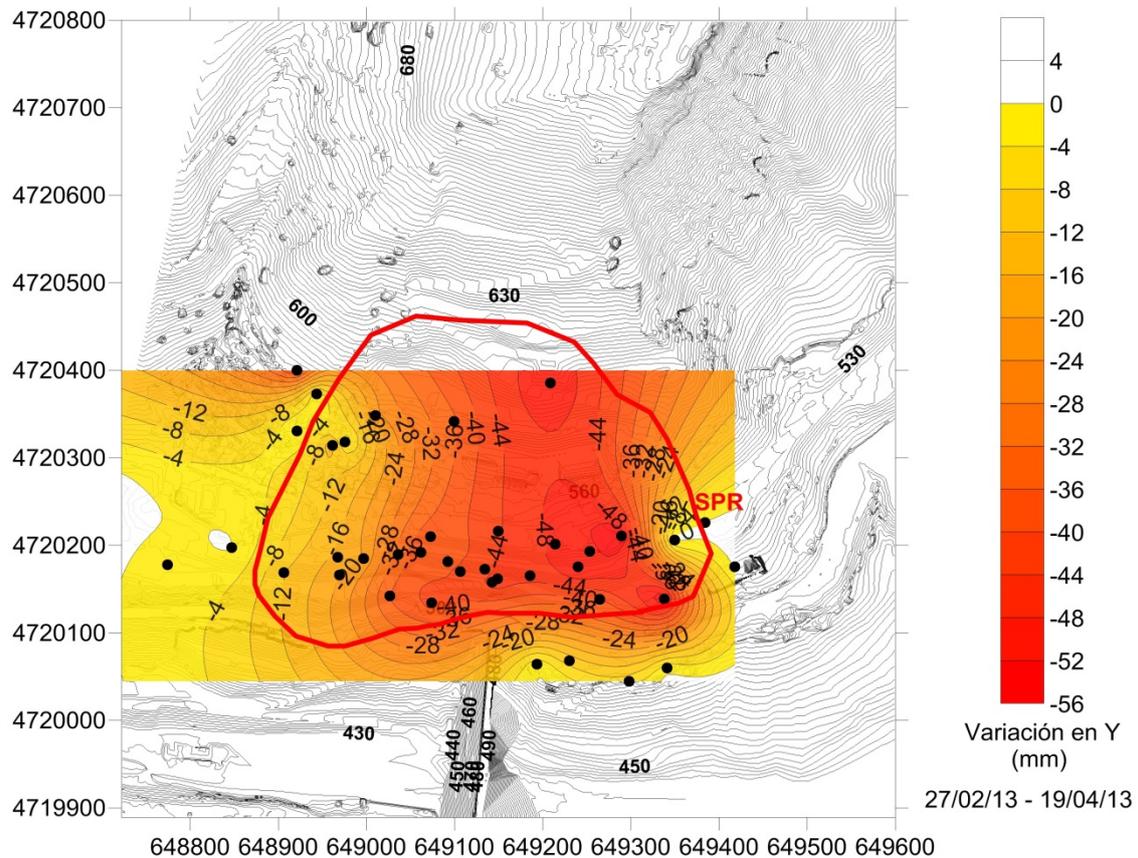


Figura 28. Componente del movimiento del deslizamiento en el sentido perpendicular al valle N-s, para el periodo 11 de Febrero a 22 de Marzo de 2013. Valores positivos indican desplazamiento hacia el fondo del valle. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR obtenido en el apartado anterior.

La Figura 29 muestra la componente del desplazamiento del deslizamiento en cota, componente "Z". Los valores obtenidos ascendentes y descendentes son consistentes con la disposición del eje del pliegue sinclinal cuya orientación se ha indicado en la propia figura.

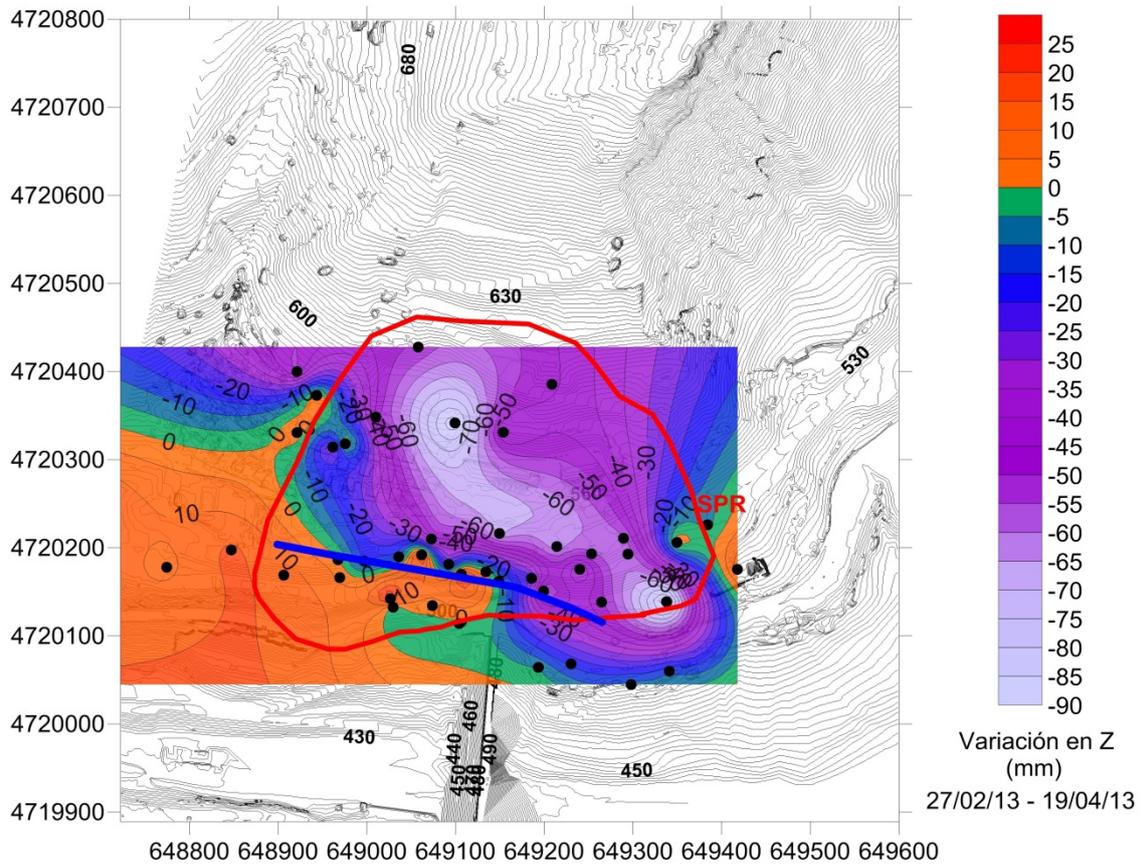


Figura 29. Componente vertical "z" de los desplazamientos en el deslizamiento para el periodo 27 de Febrero a 19 de Abril de 2013. Se constata que el sentido ascendente o descendente de los movimientos es coherente con la presencia del pliegue sinclinal situado en la base de la ladera.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartografía y Geofísica

Barcelona 17 de Junio de 2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jordi Corominas', enclosed within a simple blue rectangular border.

Jordi Corominas

Catedrático de Ingeniería del Terreno



Referencias bibliográficas

De Rojas, B.J.; Latorre, F. (1972). Mapa Geológico de España. Sigüés (175). E: 1:50.000. IGME. Madrid, 15 p.

Gutiérrez, F.; Lucha, P.; Galve, J.P. (2010). Reconstructing the geochronological evolution of large landslides by means of the trenching technique in the Yesa Reservoir (Spanish Pyrenees). *Geomorphology*, 124, 124-136.

Lafuente, R.J.; Gómez, R.; Merino, M.; De Diego, P.; Martínez, J.L.; García, J. (2007). Laderas del Embalse de Yesa. Jornadas técnicas sobre estabilidad de laderas en embalses. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza, 277-293.

Pinyol, N.M., Alonso, E.E., Corominas, J. y Moya, J. (2012). Canelles landslide. Modelling rapid drawdown and fast potential sliding. *Landslides*, 9: 33-51

Puigdefábregas, C. (1975). La sedimentación molásica en la Cuenca de Jaca. Monografía del Instituto de Estudios Pirenaicos, 104, 188 p.

.



Anejo 1

Estratigrafía local de la ladera derecha de la presa de Yesa

Por José Moya

Dpto. de Ingeniería del Terreno. UPC-BarcelonaTech

Trabajos realizados

Se han estudiado las columnas litológicas de los 19 sondeos que nos han sido facilitadas hasta el momento y se han correlacionado entre ellas. Un análisis preliminar indicó que la correlación estratigráfica no podía realizarse simplemente utilizando niveles guía, que raramente están definidos en series formadas por alternancia de dos tipos de rocas, como ocurre en un flysch. Por otra parte, el grosor de los niveles de arenisca puede variar lateralmente de forma rápida cuando se trata de depósitos turbidíticos, como ocurre en este caso. Esto dificulta o imposibilita la correlación basada en el grosor de niveles.

La descripción litológica es detallada en la mayoría de las columnas estratigráficas de sondeos, esto nos ha permitido realizar la correlación utilizando secuencias deposicionales. Una de las ventajas de trabajar con secuencias deposicionales radica en que su grosor suele ser menos variable lateralmente que el de las capas. En las columnas pueden definirse secuencias a varias escalas, las más pequeñas que se han observado tienen una escala decimétrica. En este trabajo se han empleado secuencias con grosor métrico a decamétrico, que se ha considerado suficiente para realizar la correlación entre columnas. Concretamente, el grosor de las secuencias empleadas varía en general entre los 5 y los 15 metros. A esta escala, las secuencias que se han observado son estrato y granocrecientes (secuencias negativas), esto se traduce en que cada secuencia está constituida por un nivel inferior predominantemente argilítico y uno superior esencialmente de areniscas.

En la Figura A1.1 se muestra cómo se han definido las secuencias con el ejemplo de uno de los sondeos. La Figura A1.2 muestra un ejemplo de correlación entre los sondeos de un corte geológico de la ladera.

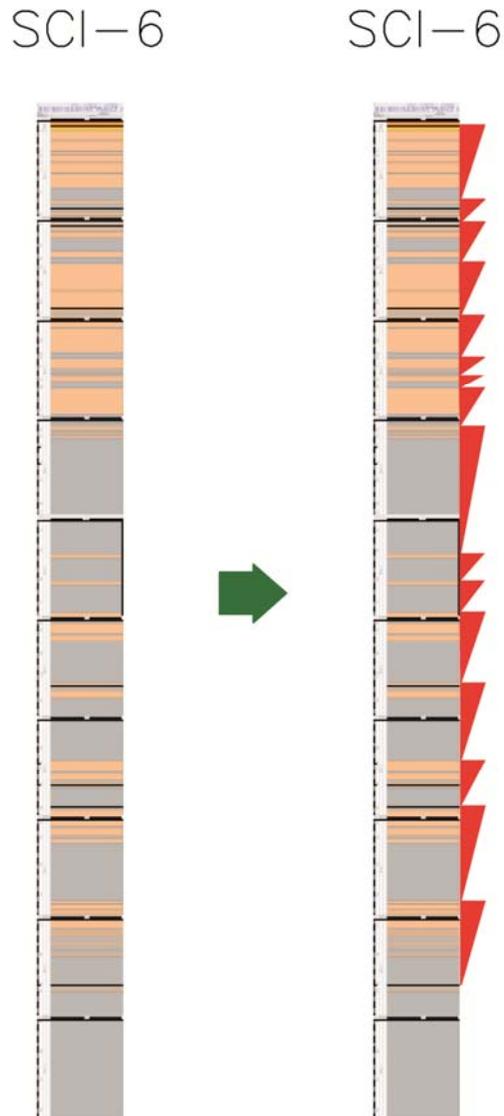


Figura A1.1. Ejemplo de definición de secuencias deposicionales en las columnas estratigráficas de los sondeos. A la izquierda se muestra la columna estratigráfica en la que se indica simplemente la litología (areniscas en color rosado, argilitas en color gris). A la derecha se muestra la columna con las secuencias diferenciadas (triángulos rojos). El ejemplo mostrado corresponde al sondeo SCI-6.

Una vez correlacionadas las columnas, se definieron varios grandes tramos o unidades litológicas, fácilmente distinguibles entre sí y representables a escala de perfil geológico de la ladera. Son estas unidades las que se muestran en los perfiles geológicos. Cada una de estas unidades está caracterizada, por un lado, por la proporción entre argilitas y areniscas y, por otro lado, por su posición en la serie estratigráfica local.

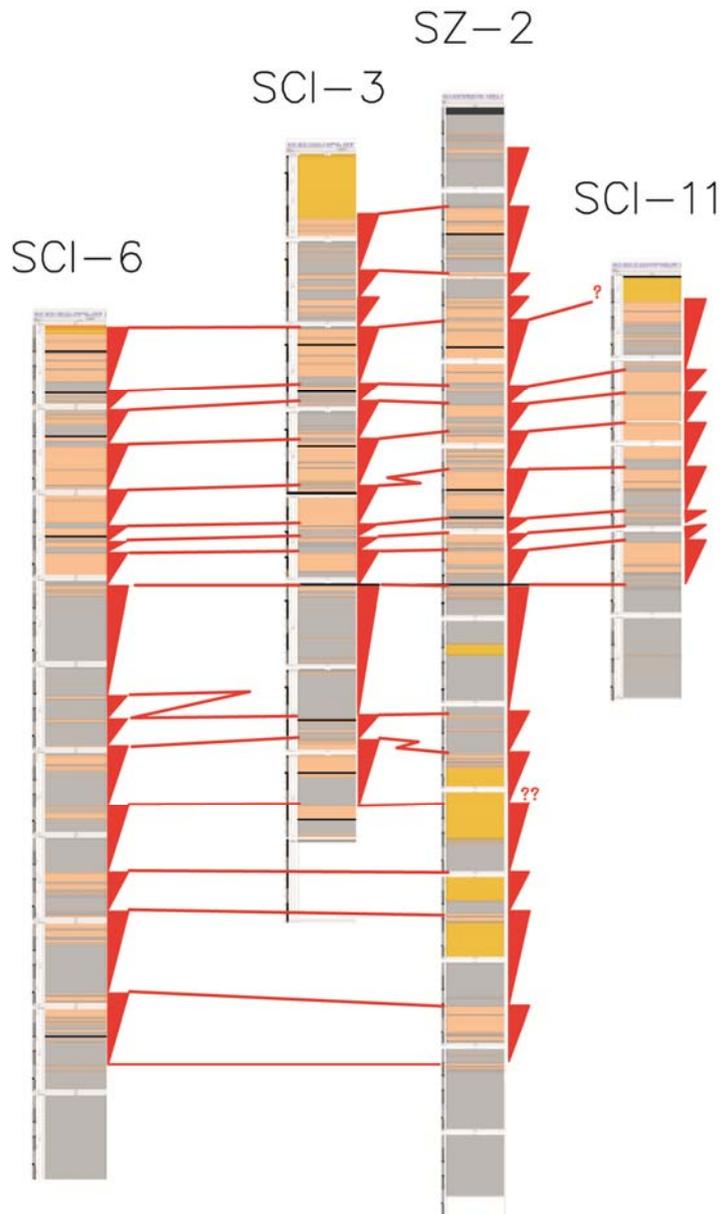


Figura A1.2. Correlación entre los sondeos del perfil UPC 1 de los que se dispone de la columna estratigráfica. En cada columna se muestra simplemente la litología (color rosado: areniscas color gris: argilitas, color naranja: tramos con mala recuperación y con predominio de areniscas) y la secuencias definidas. Las líneas rojas entre columnas corresponden a la correlación de secuencias. La secuencia más antigua corresponde al contacto entre el Flysch de Yesa y las Margas de Pamplona. Para facilitar la correlación, la base de dicho contacto se ha alineado horizontalmente entre sondeos. La figura muestra por lo tanto un panel de correlación, en el que las columnas no están dispuestas manteniendo su posición vertical relativa, como se haría en un perfil geológico.

Resultados

La Figura A1.3 muestra la definición de unidades en el Flysch de Yesa a partir de las columnas estratigráficas correlacionadas.

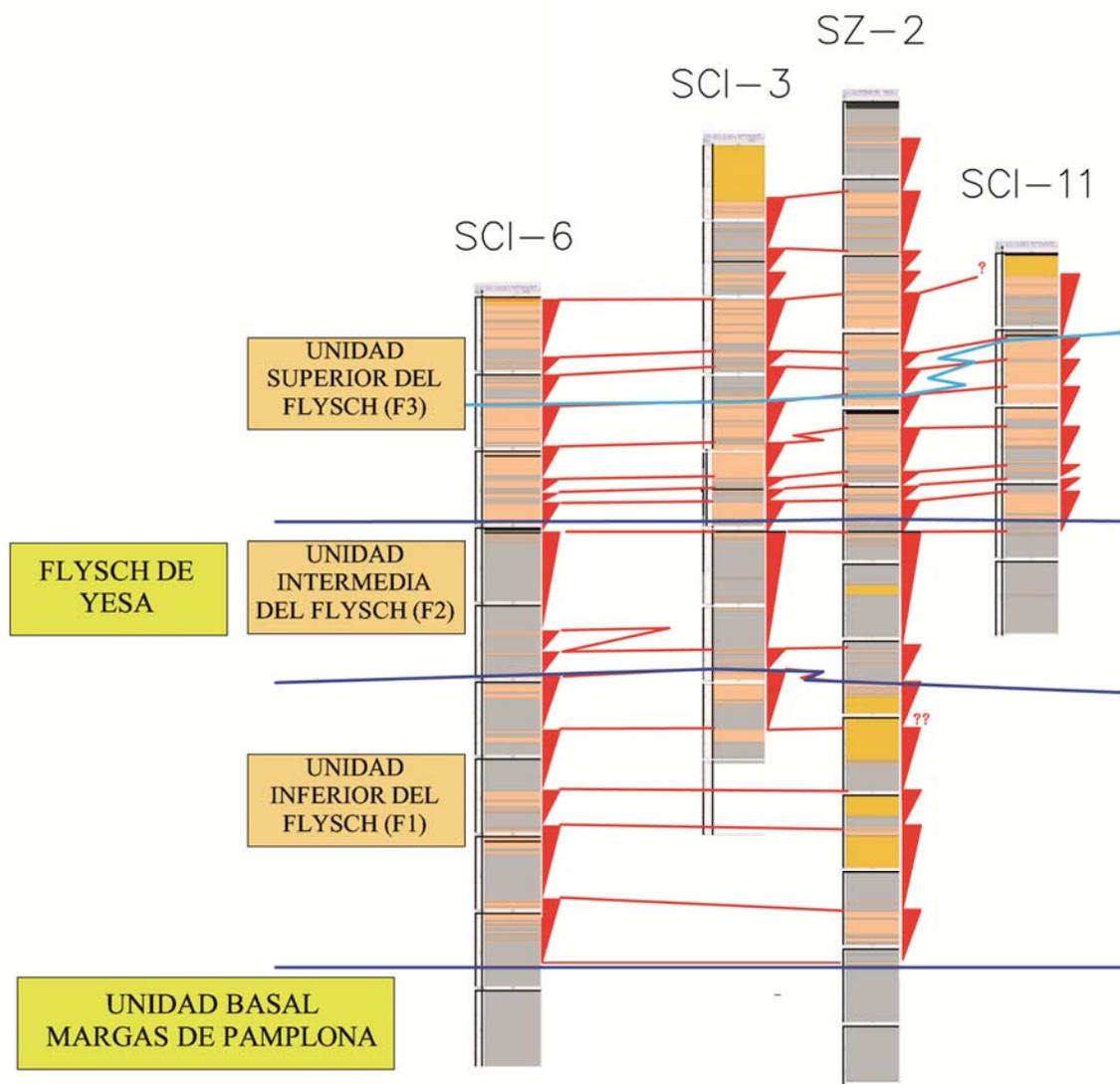


Figura A1.3. Panel de correlación de los sondeos del perfil UPC 1 mostrado en la figura anterior en el que se han distinguido cuatro unidades estratigráficas, tres de ellas correspondientes al Flysch de Yesa.

Se han definido cuatro unidades, que de base a techo son:

1. Unidad de Margas de Pamplona (MP). En la serie estratigráfica local está caracterizada por un tramo de 10 o más metros de margas grises oscuras con intercalaciones de capas de arenisca ocasionales y con grosor centimétrico (Figura A1.4). Corresponde al tramo superior de la Formación Margas de Pamplona.



Figura A1.4. Margas de Pamplona (Sondeo SC-6, profundidad 91,8 a 96,5m).

2. Unidad Inferior del Flysch (F1). Constituida por una alternancia de niveles decimétricos y métricos de argilitas y areniscas (Figura A1.5). Los niveles de areniscas muestran un grosor máximo de unos 2 metros mientras que niveles de argilitas suelen tener un grosor de 1 a 2 metros aunque ocasionalmente llegan a superar los 7 metros. La proporción de argilitas respecto al grosor total de la unidad es del 60 a 70%. El grosor de la unidad es de 30 a 35 metros. El contacto con la unidad Margas

de Pamplona se ha fijado por la aparición de un tramo de 2 a 5 metros que contiene varias capas de arenisca con un grosor de 10 cm hasta casi 2 m, dependiendo del sondeo.



Figura A1.5. Unidad Inferior del Flysch –F1 (Sondeo SC-6, profundidad 55,1 a 59,6m). Las argilitas tienen un color gris oscuro cuando no están meteorizadas, mientras que las areniscas muestran generalmente un color gris claro.

3. Unidad Intermedia del Flysch (F2). Definida un tramo de argilitas de 15 a 20 metros de grosor con algunas de intercalaciones capas de areniscas con grosor habitualmente de hasta 30 cm (Figura A1.6), aunque en alguna ocasión alcanzan los 2 m. La proporción de argilitas es generalmente superior al 80%.



Figura A1.6. Unidad Intermedia del Flysch –F2 (Sondeo SCI-6, profundidad 32,5 a 37,1m).

4. Unidad superior del Flysch (F3). Formada por un tramo de hasta 50 m de grosor en el que dominan claramente las areniscas (Figura A1.7). En esta unidad pueden distinguirse dos subunidades. En la inferior, los niveles de areniscas suponen más del 70% y las capas superan frecuentemente potencias de un metro. Aun así los niveles de argilitas son frecuentes y pueden llegar a alcanzar grosores de 0.5 a 1 m. El grosor

de esta subunidad es de 30 a 35 metros. En la subunidad superior la proporción de areniscas es menos importante y varía entre el 40 y el 60%.

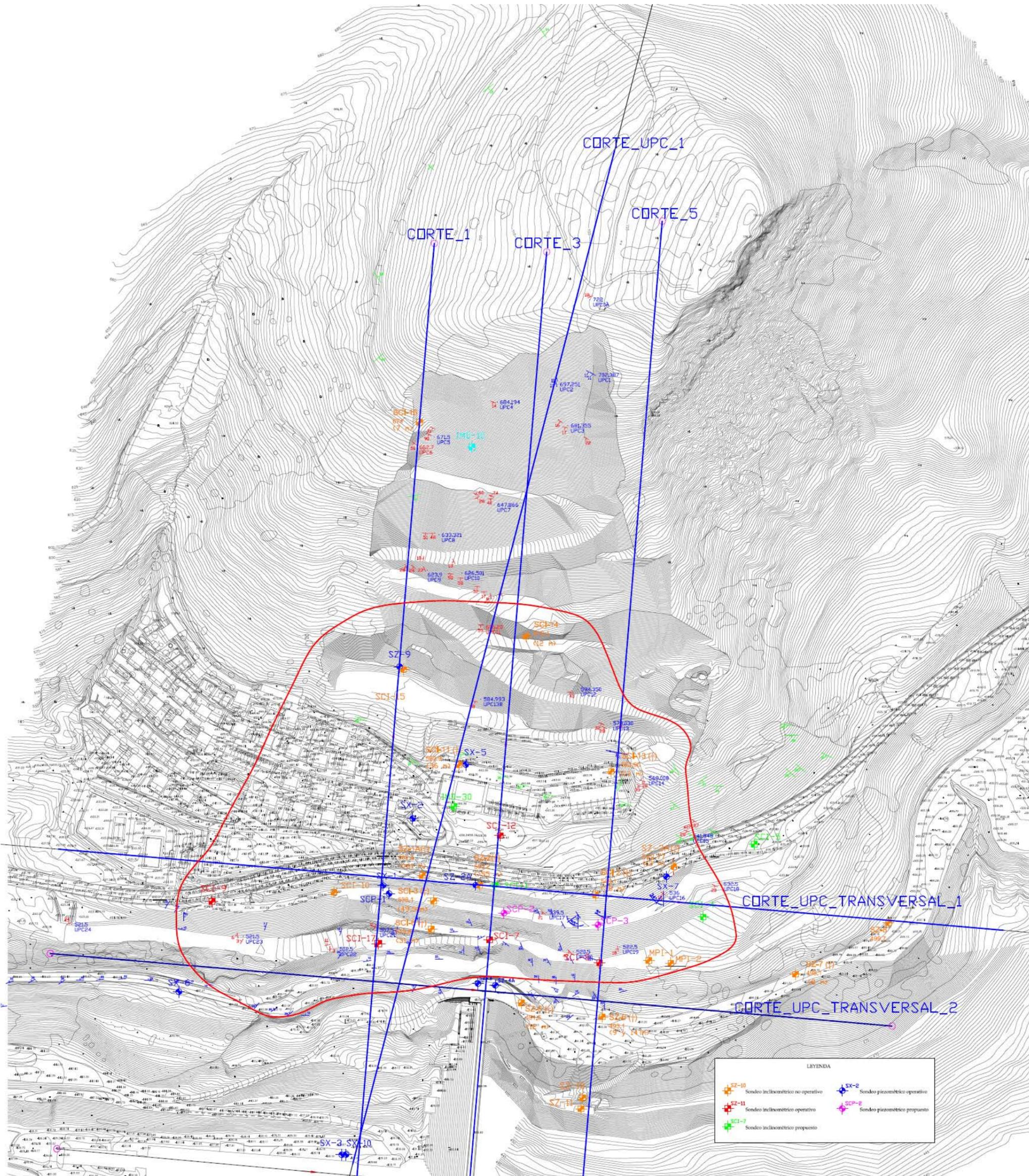


Figura A1.7. Unidad Superior del Flysch –F3 (Sondeo SC-6, profundidad 14,2 a 18,9m)

El anejo 1b contiene una tabla con la profundidad de dichas unidades en cada uno de los sondeos de los que se ha dispuesto de la descripción de la columna estratigráfica.

Barcelona, 28 de Mayo de 2013

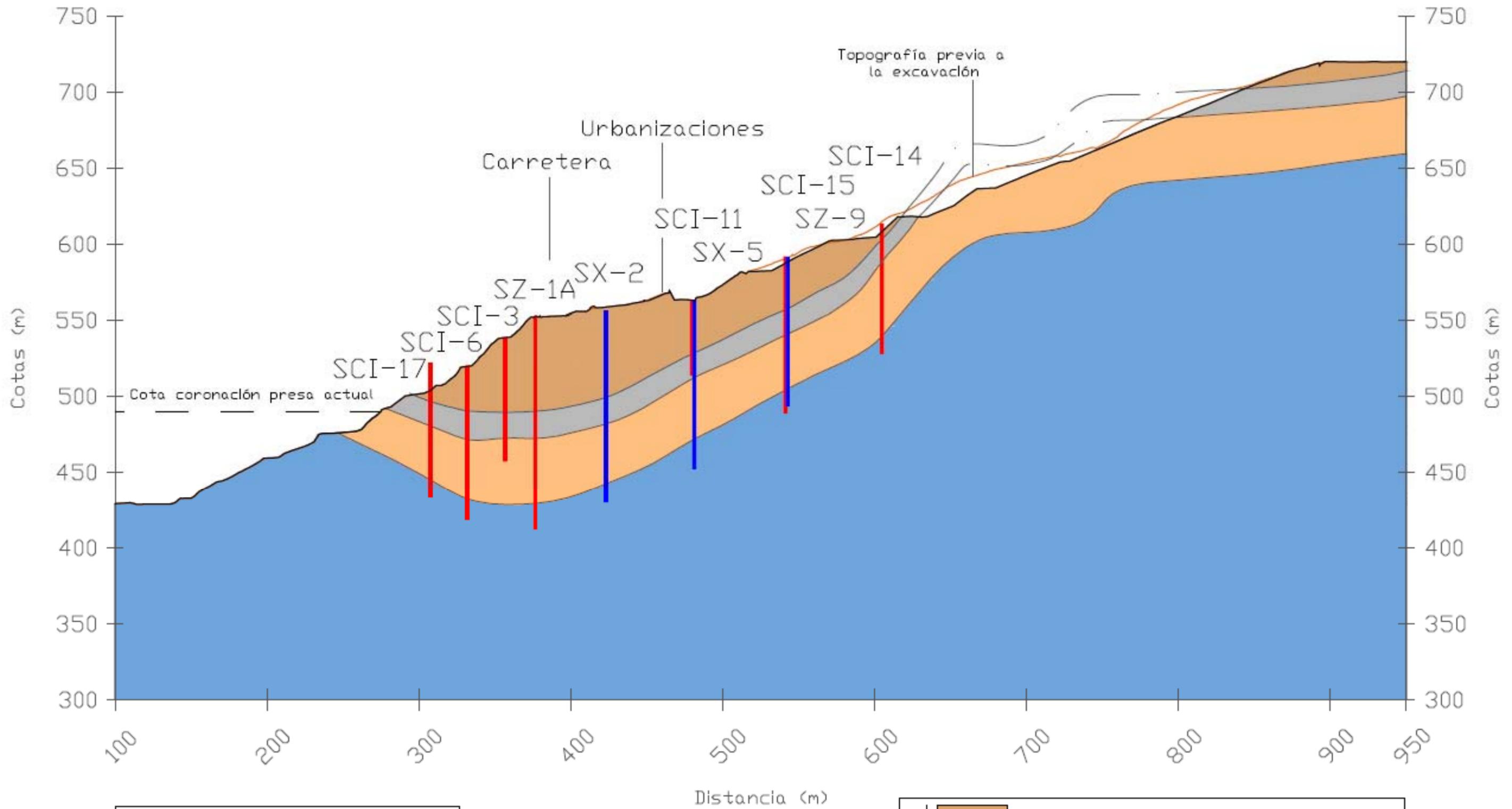
Anejo 2. Cortes Geológicos



LEYENDA

	Sondeo inclinométrico no operativo		Sondeo piezométrico operativo
	Sondeo inclinométrico operativo		Sondeo piezométrico propuesto
	Sondeo inclinométrico propuesto		

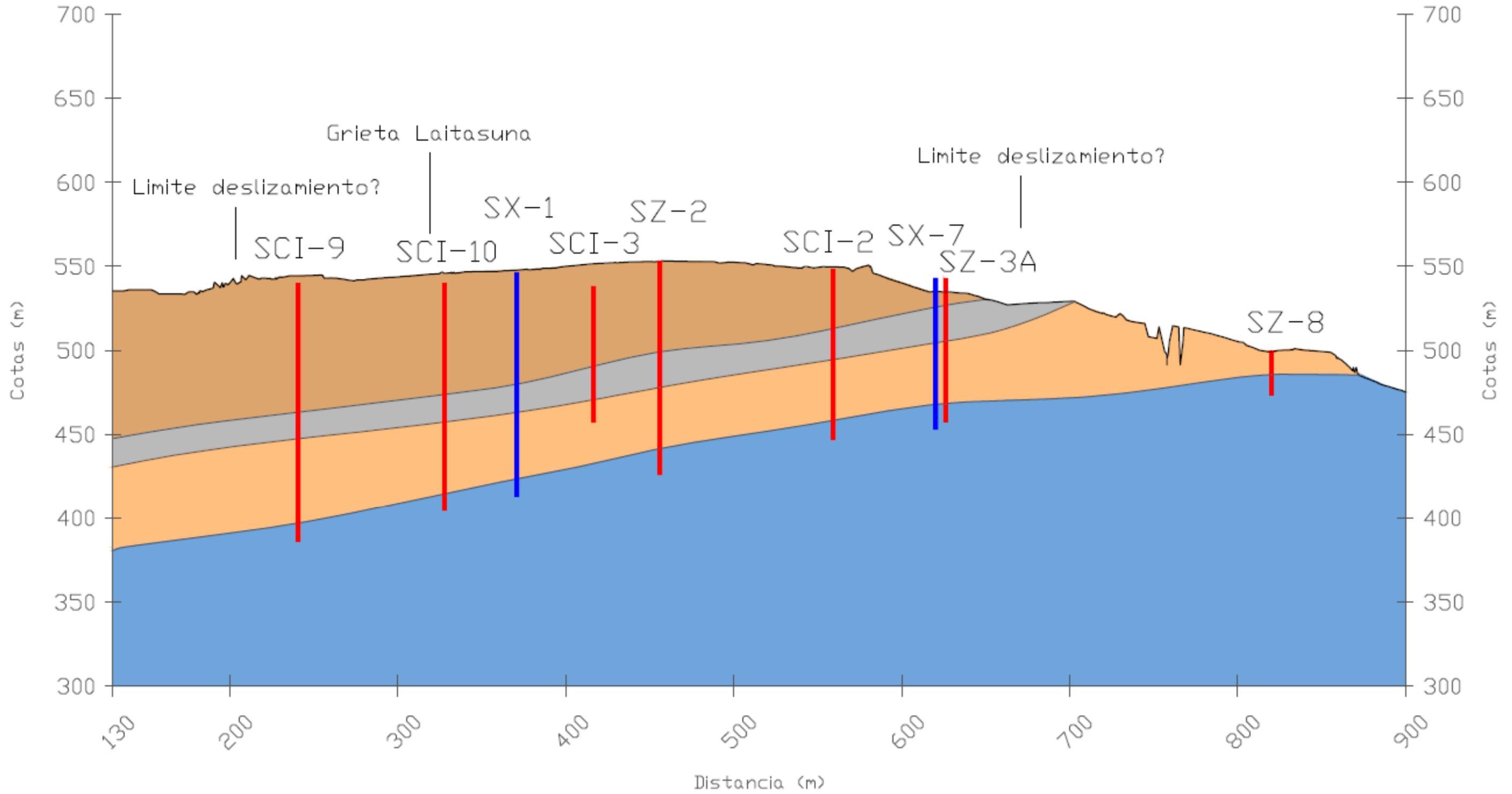
Corte UPC 1 (S/SW-N/NE)



Sondeo inclinométrico
 Sondeo piezométrico

FLYSCH		F3i Areniscas con intercalaciones de arcillitas
		F2i Arcillitas
		F1i Arcillitas con Intercalaciones de areniscas
		Margas de Pamplona

Corte UPC Transversal (W-E)

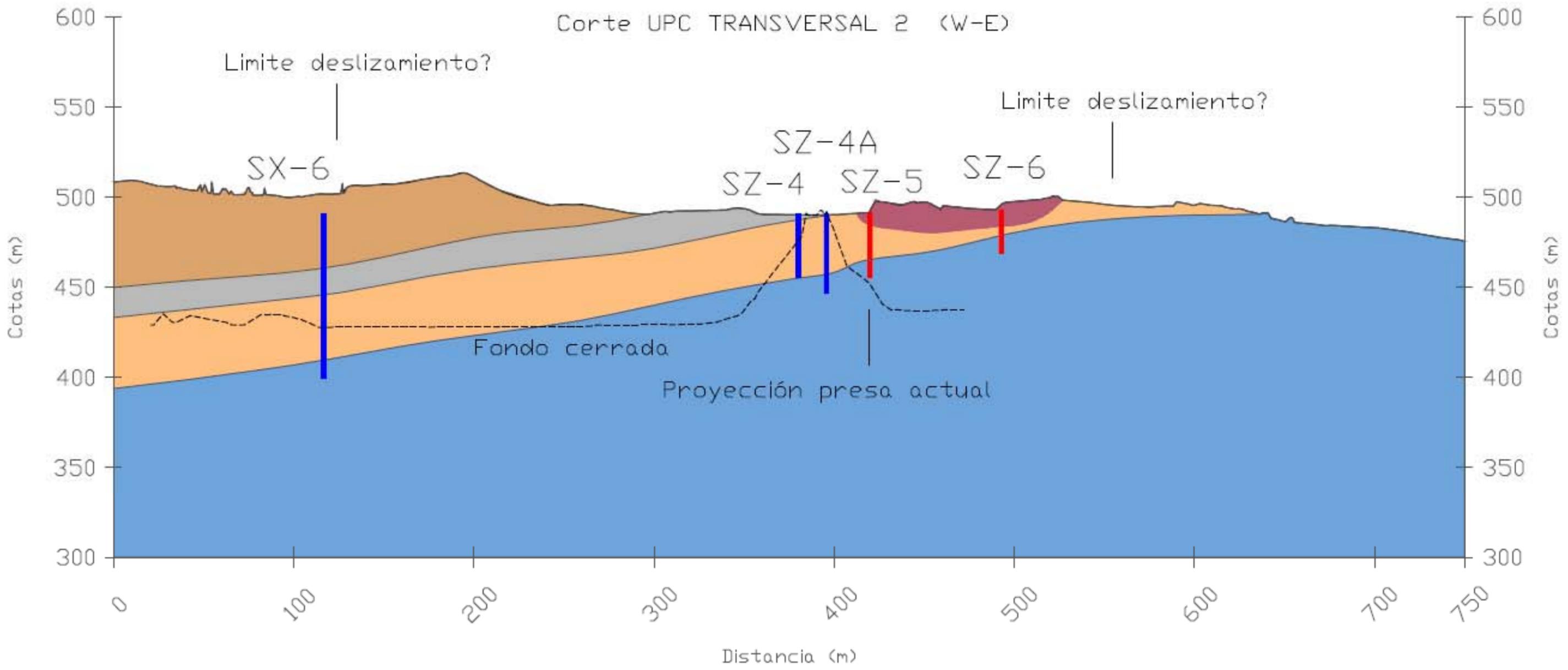


Red box: Sondeo inclinométrico
Blue box: Sondeo piezométrico

FLYSCH

- F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
- F2: Arcillitas
- F1: Arcillitas con Intercalaciones de areniscas
- Margas de Pamplona

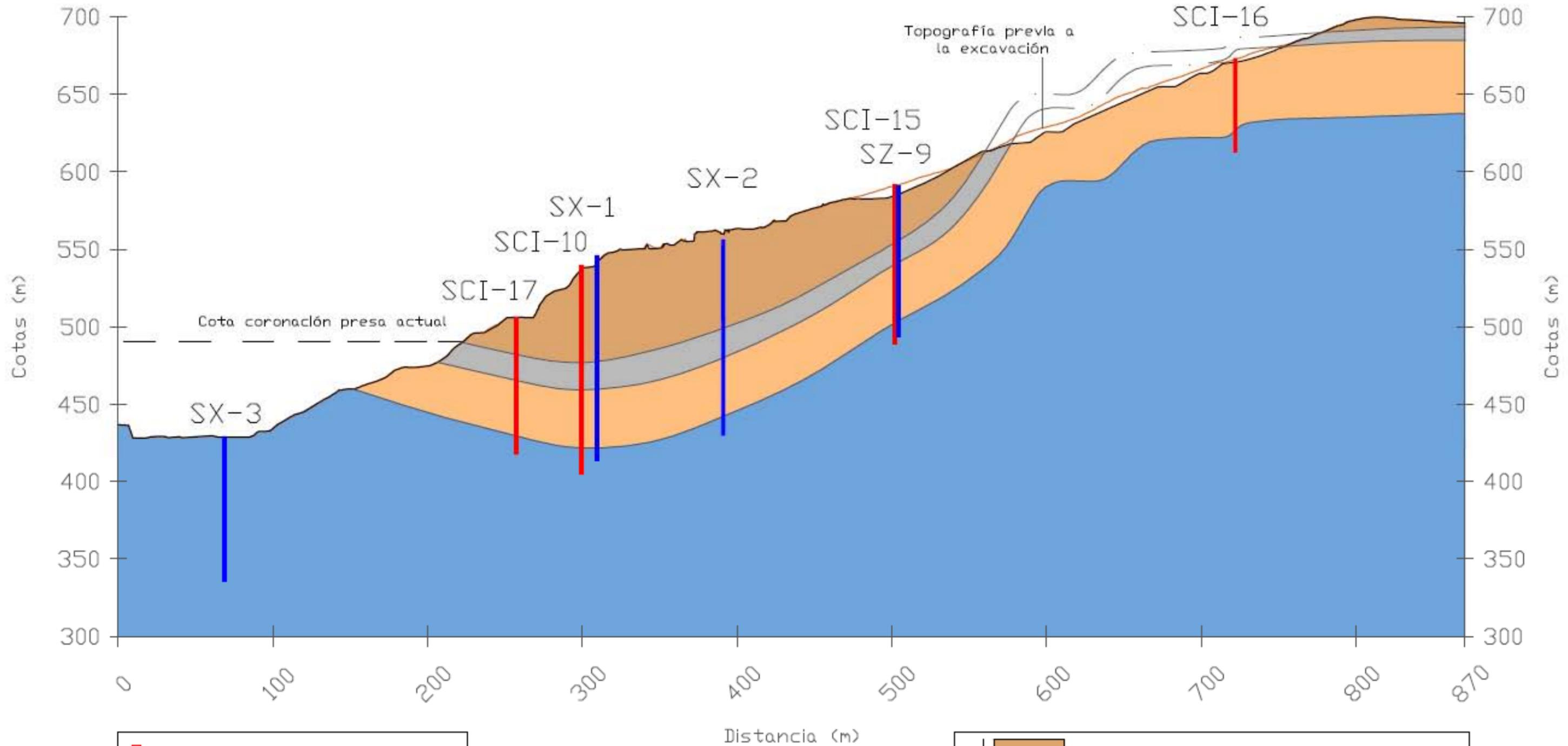
Corte UPC TRANSVERSAL 2 (W-E)



Red vertical line: Sondeo inclinométrico
Blue vertical line: Sondeo piezométrico

- Deslizamiento del Inglés
- F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
- F2: Arcillitas
- F1: Arcillitas con intercalaciones de areniscas
- Margas de Pamplona

Corte 1 (S-N)

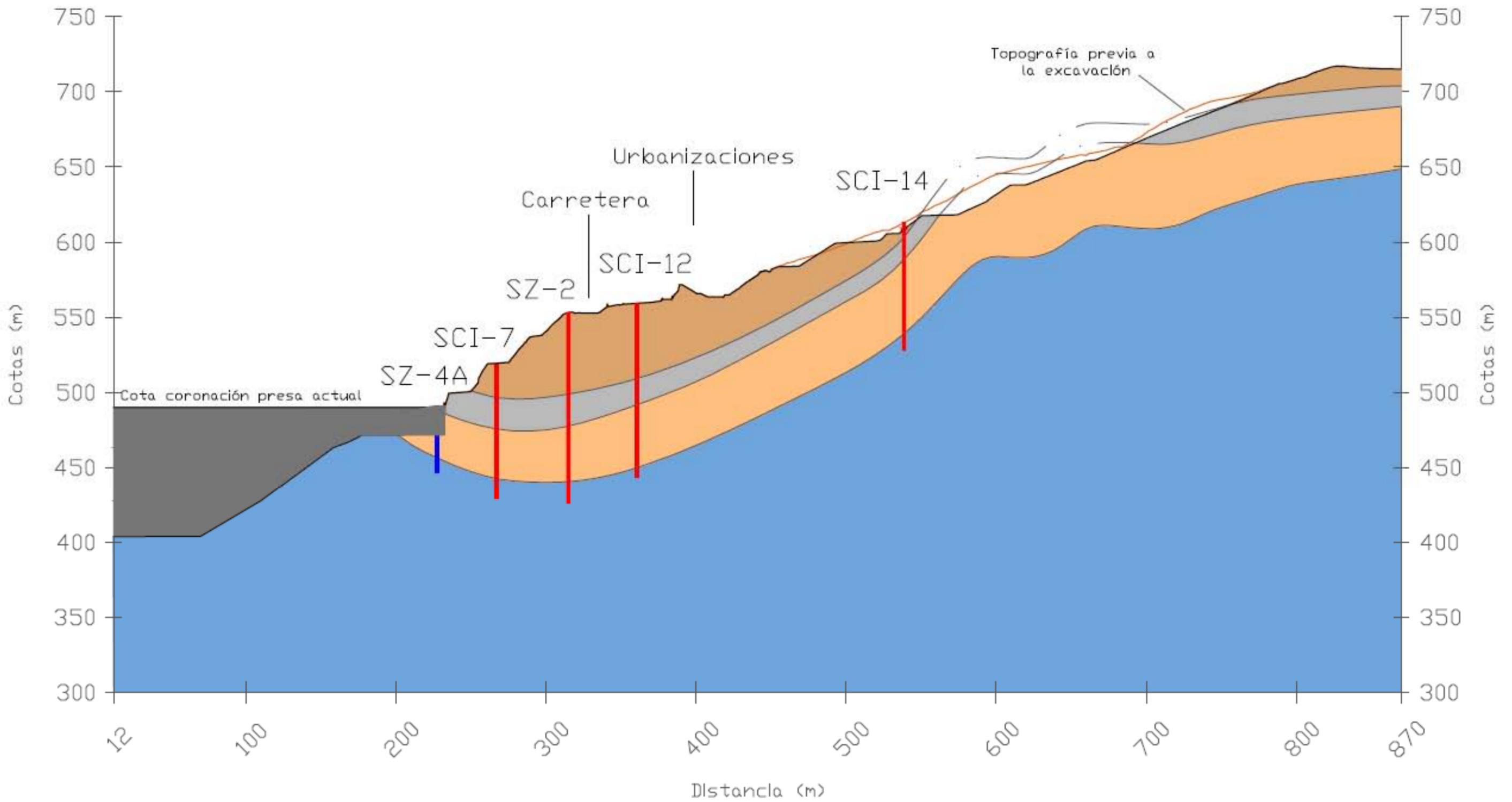


Red vertical line: Sondeo inclinométrico
Blue vertical line: Sondeo piezométrico

FLYSCH

- F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
- F2: Arcillitas
- F1: Arcillitas con intercalaciones de areniscas
- Margas de Pamplona

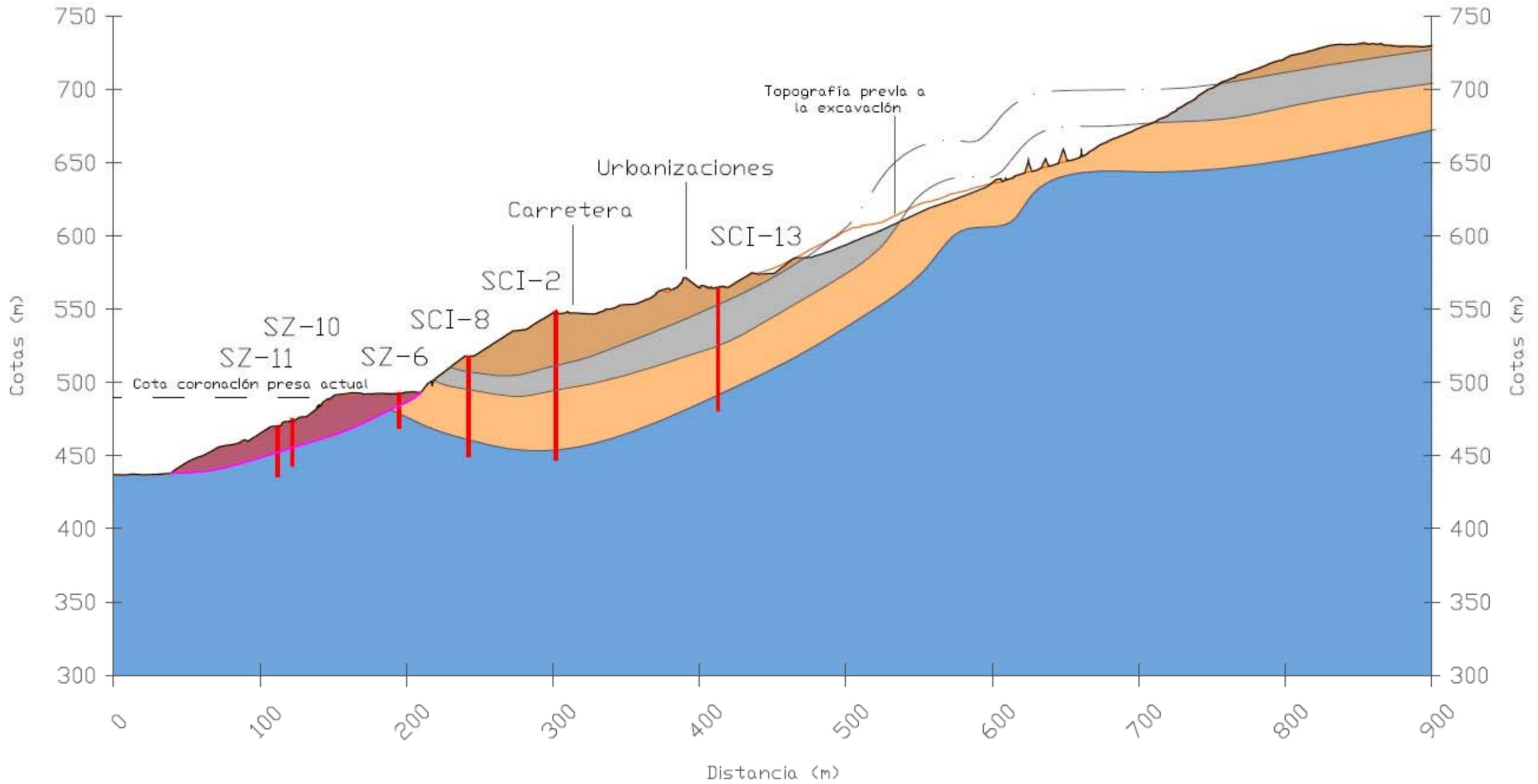
Corte 3 (S-N)



- Sondeo inclinométrico
- Sondeo piezométrico

- FLYSCH
- F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
 - F2: Arcillitas
 - F1: Arcillitas con intercalaciones de areniscas
 - Margas de Pamplona

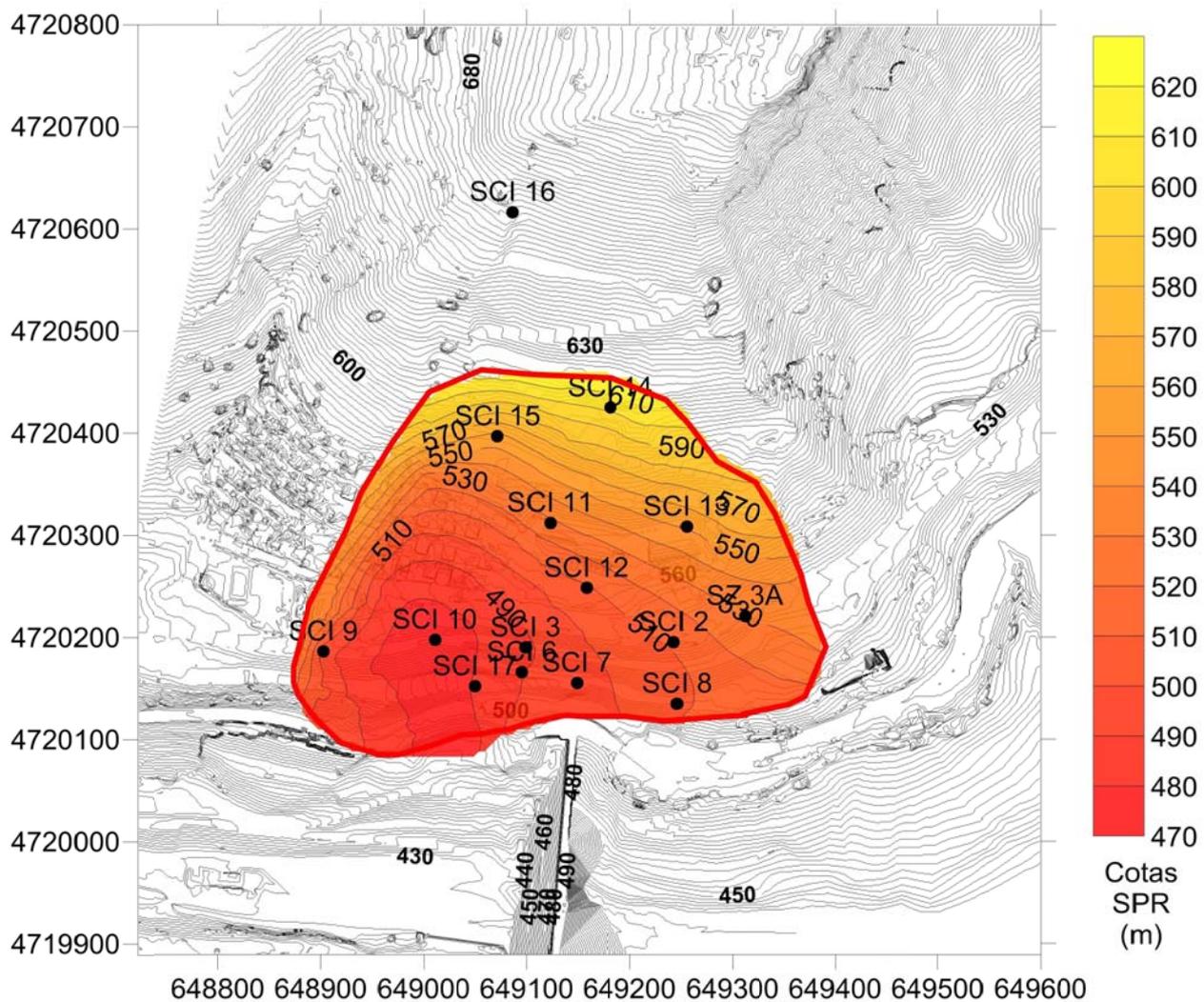
Corte 5 (S-N)

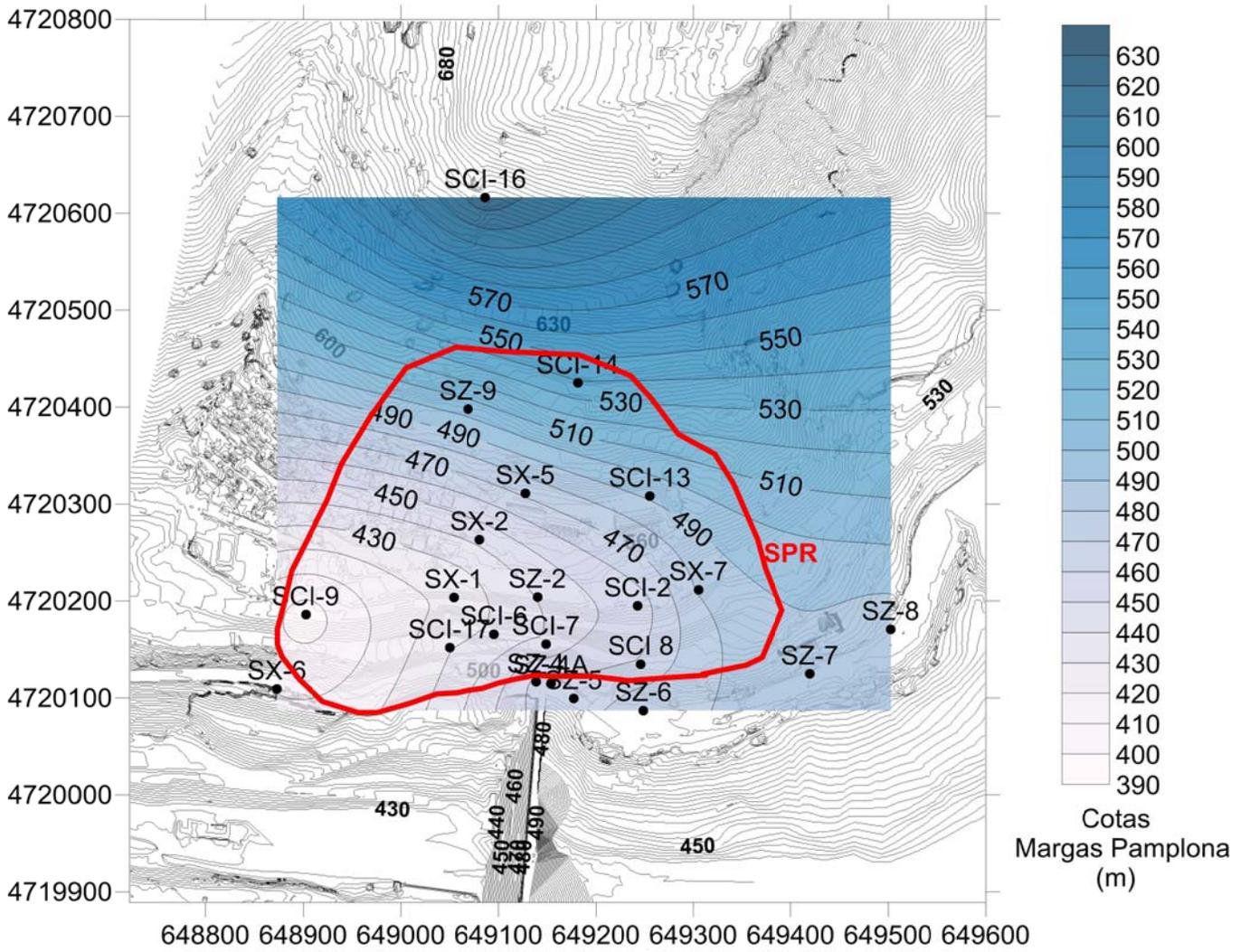


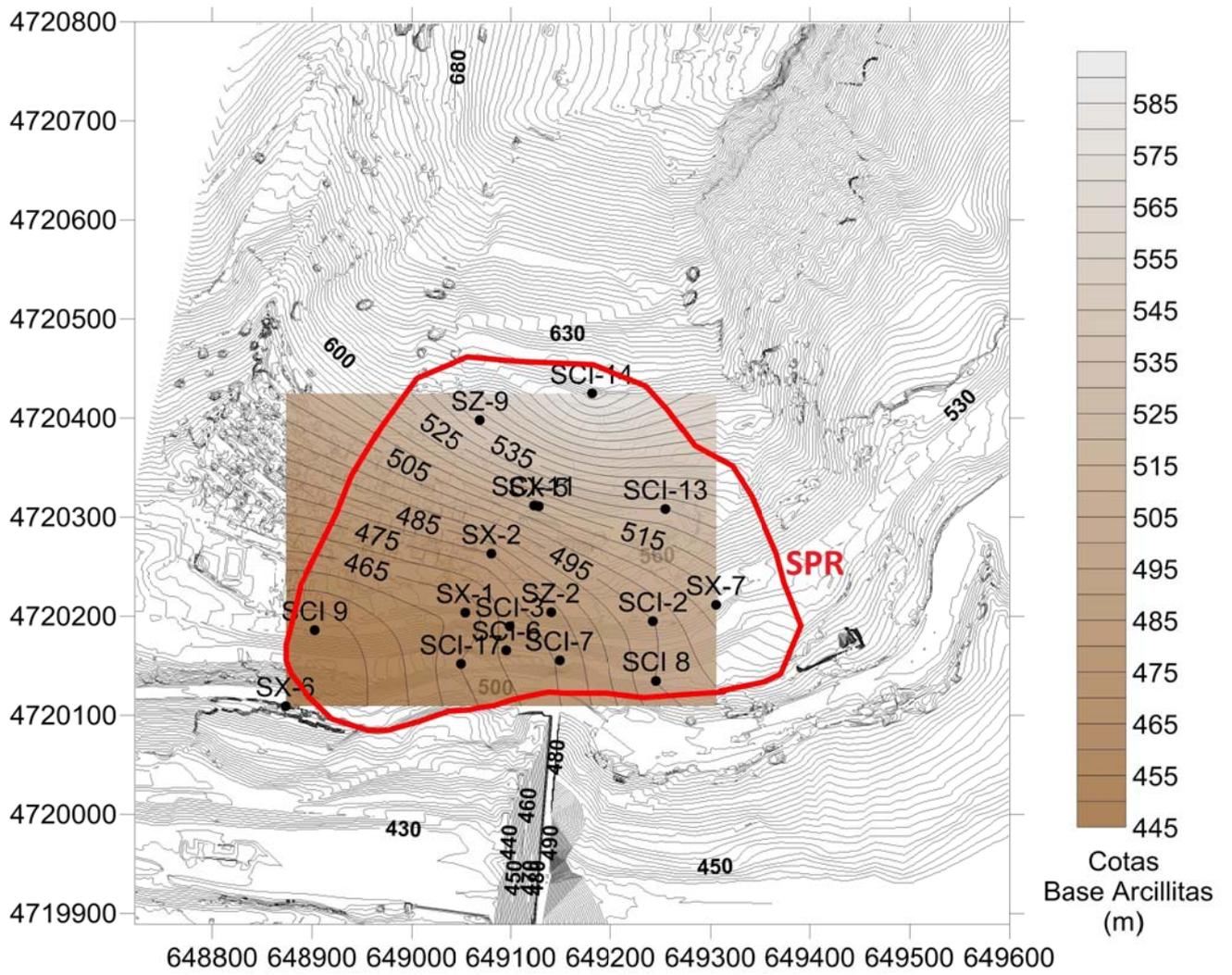
- Sondeo inclinométrico
- Sondeo piezométrico

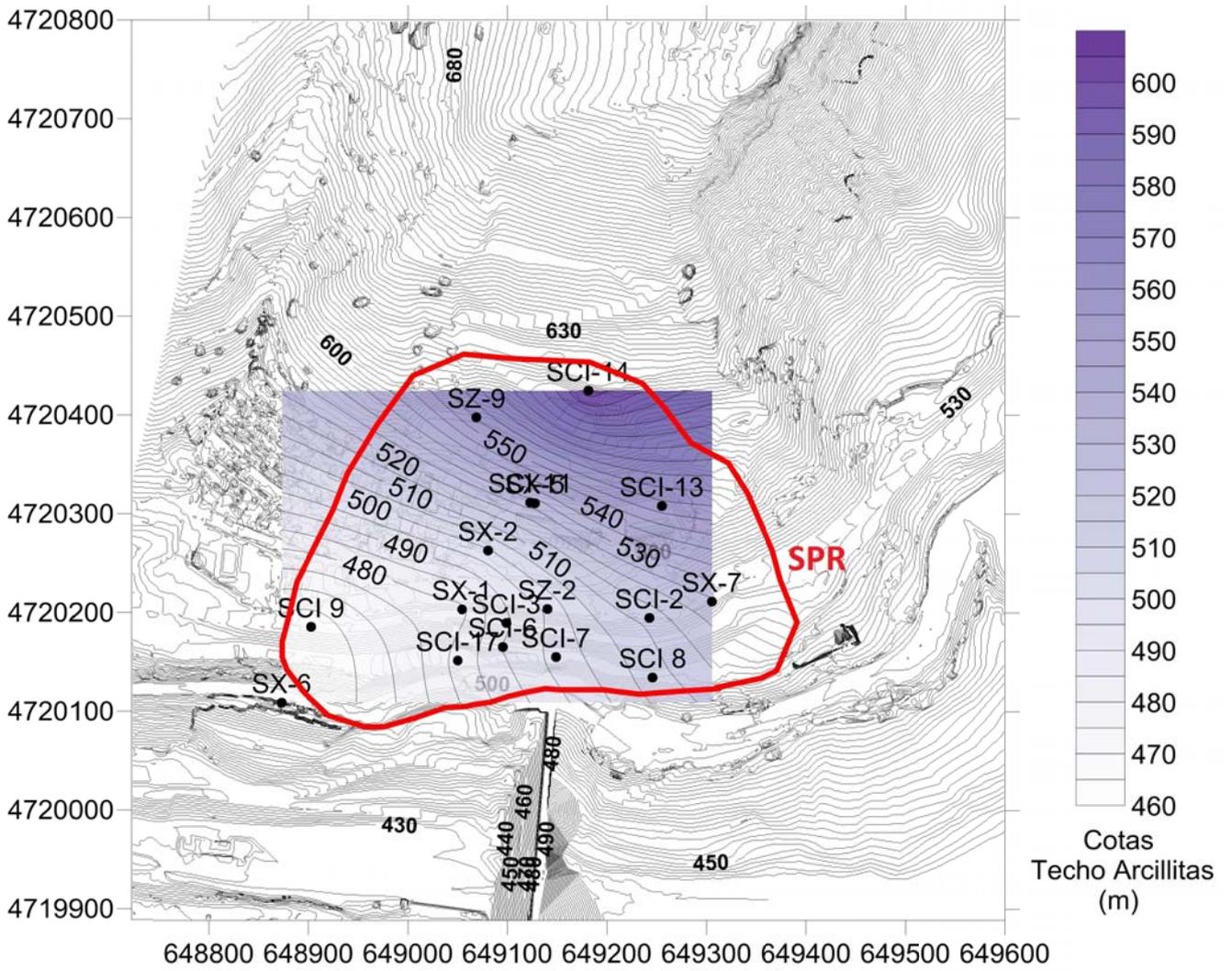
- Deslizamiento del Inglés
- FLYSCH**
 - F3: Areniscas con Intercalaciones de arcillitas
 - F2: Arcillitas
 - F1: Arcillitas con Intercalaciones de areniscas
- Margas de Pamplona

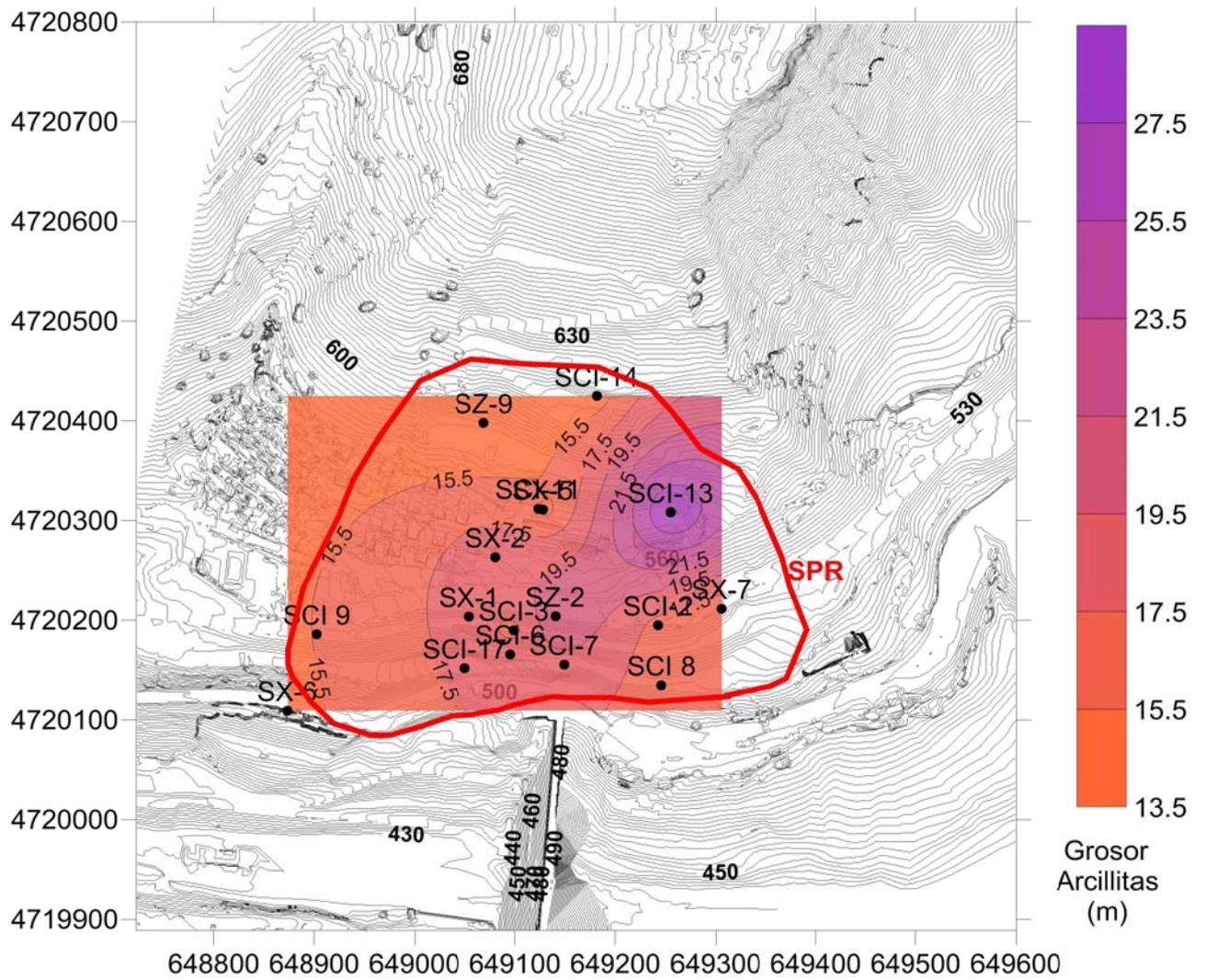
Anejo 2. Plantas Geológicas











Anejo 3

Inclinometría corregida

Por José Moya

Dpto. de Ingeniería del Terreno. UPC-BarcelonaTech

Motivación

El análisis de los perfiles inclinométricos facilitados mostró que en algunos casos su interpretación no es sencilla y requiere de un procesado adicional de los datos. Este procesado consiste en eliminar algunos errores sistemáticos propios de la técnica que, cuando son significativos y los desplazamientos a medir pequeños, enmascaran estos últimos y dificultan la identificación de superficies de deslizamiento. Las características de los errores sistemáticos más importantes se explican más abajo. Los errores pueden llegar a ser muy problemáticos cuando se analizan la gráficas de desplazamiento acumulado (según la vertical) puesto que se trata de errores sistemáticos, que se acumulan también a medida que se van sumando las lecturas según la vertical. El resultado de la acumulación de error en la vertical puede resultar en falsos grandes desplazamientos (Figura A3.1).

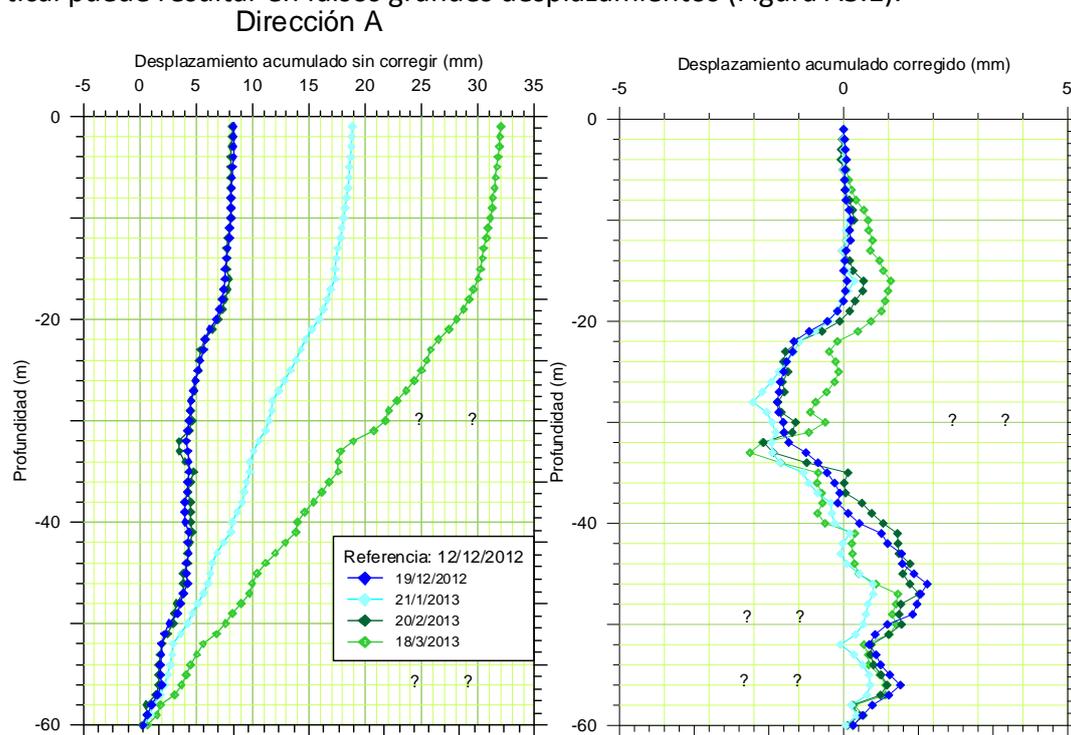


Figura A3.1. Ejemplo de perfil inclinométrico de desplazamiento acumulado en el que existe un error de rotación significativo. A la izquierda se muestra el perfil sin corregir, sugiriendo un desplazamiento acumulado en superficie de más de 30 mm. A la derecha se muestra el perfil tras la corrección de dicho error. En el perfil corregido se notan todavía desplazamientos no explicables de hasta 2 mm, pero el desplazamiento en superficie acumulado es nulo. Los perfiles mostrados corresponden a la dirección A del sondeo SZ-1A.

La interpretación directa de los perfiles de desplazamiento incremental (incremental según la vertical, pero acumulado en el tiempo) permite soslayar en muchas ocasiones este efecto y facilita la interpretación de las lecturas cuando los errores son importantes. Sin embargo, en algunos casos el análisis de desplazamientos incrementales no es suficiente. Un caso se da cuando existe una zona de cizalla en el que los desplazamientos incrementales son muy pequeños y difícilmente detectables si no se acumulan en la vertical. En la Figura A3.2 se muestra un ejemplo. Analizando el desplazamiento incremental (gráfica de la izquierda) aparentemente sólo se observa una superficie de deslizamiento situada a 6 m de profundidad. En la gráfica de desplazamiento acumulado sin corregir (gráfica central), inmediatamente bajo la superficie de deslizamiento anterior se intuye la existencia de una zona de cizalla entre los 6 y los 13 m. En la gráfica de desplazamiento acumulado corregido (gráfica de la derecha), dicha zona de cizalla se aprecia claramente.

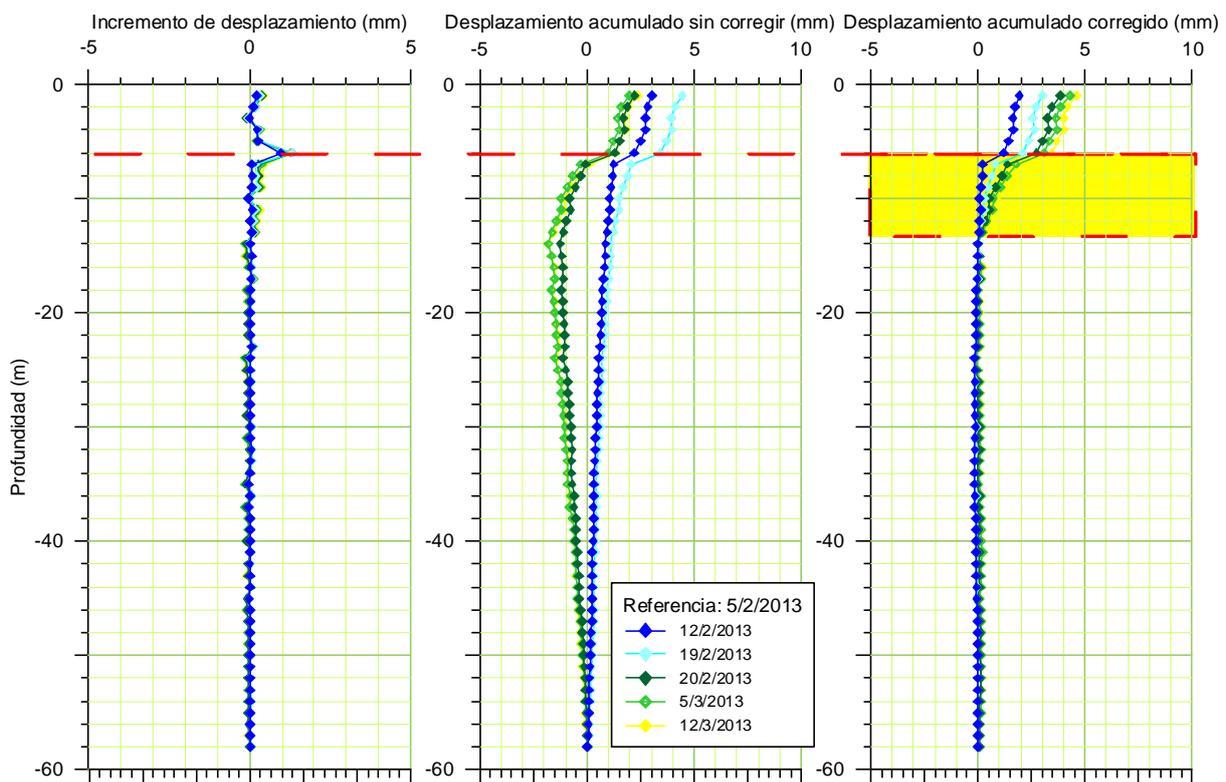


Figura A3.2. Inclínómetro en el que existe una zona de cizalla. Dicha zona es difícil de identificar analizando desplazamientos incrementales pero puede notarse en el gráfico de desplazamiento acumulado. Sin embargo, un error de deriva enmascara esta zona de cizalla (gráfico de la izquierda); zona que se detecta claramente tras eliminar dicho error (gráfica de la derecha). Perfiles correspondientes a la dirección A del inclinómetro SCI-16.

Otro caso importante en el que el análisis de perfiles incrementales no es suficiente aparece cuando se comparan los desplazamientos inclinométricos con los medidos en la superficie del terreno con otra técnica independiente (p .ej. con estación total). En este caso, obviamente se han de utilizar los perfiles de desplazamiento inclinométrico acumulado, por lo cual es imprescindible eliminar los errores sistemáticos.

El tipo de error sistemático más común en inclinometría es el debido a la deriva del sensor (“bias-shift error”) entre diferentes campañas de medida o incluso a lo largo de una misma campaña (Mikkelsen, 1996¹ y 2003²; Stark and Choi, 2008³). El valor de la deriva es comúnmente constante en una misma campaña de lectura y, en este caso, se identifica por la presencia de una línea base no nula en el perfil de desplazamiento incremental y como una recta inclinada en el perfil de desplazamiento acumulado (Figura A3.3.1). El error de deriva puede ocurrir, por ejemplo, si la sonda no se adaptado a la temperatura del fondo del sondeo o con el simple uso a lo largo del tiempo debido a la pérdida de la calibración inicial.

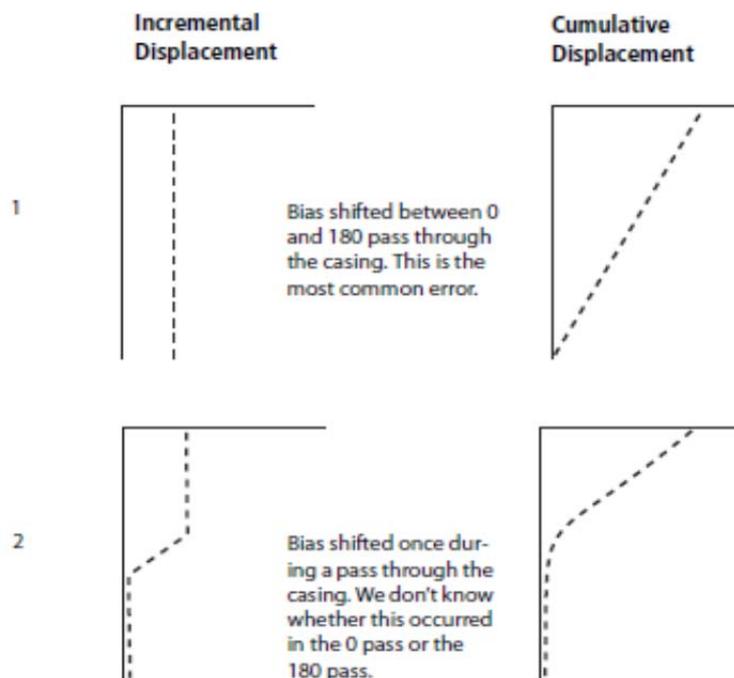


Figura A3.3. Error de deriva observado en el gráfico de desplazamiento incremental y en el de desplazamiento acumulado (1). El error puede ser constante en la vertical (1) o variar (2) (Mikkelsen, 2003).

¹ Mikkelsen , E. 1996. Ground displacement measurement. In: Turner A.K. and Schuster R.L. (Eds.) *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, USA. Special Report 247. Chapter 11 Field instrumentation, pp. 282-295.

² Mikkelsen , E. 2003 Advances in inclinometer data analysis. *Symposium on Field Measurement in Geomechanics*, Oslo, September 2003. 13 p.

³ Stark T.D. and Choi H. 2008. Slope inclinometers for landslides. *Landslides*, 5:339-350.

Otro tipo de error sistemático frecuente es el error de rotación. Este error es debido a la combinación de pequeños cambios en la alineación del servoacelerómetro que realiza la medida en una dirección y la existencia de una inclinación apreciable de la tubería inclinométrica en la dirección perpendicular (en la dirección B si se trata del perfil A y viceversa) (Mikkelsen, 1996 y 2003). El origen de este error se ilustra en la figura A3.4. Este error es relativamente fácil de detectar comparando el perfil de desplazamiento acumulado en estudio con el perfil real del sondeo en la dirección perpendicular. El error de rotación es proporcional a la inclinación del sondeo en la dirección perpendicular (Figura A3.5).

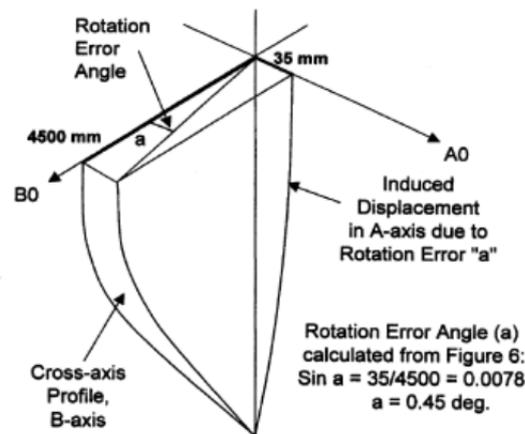


Figura A3.4. Error de rotación en función de la inclinación del eje perpendicular al de lectura (Mikkelsen, 2003).

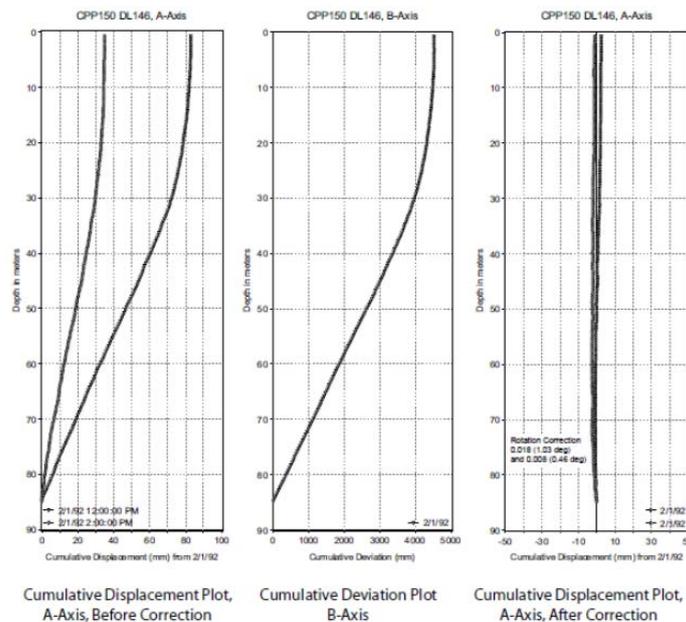


Figura A3.5. Detección del error por comparación del desplazamiento acumulado con el perfil del sondeo según el eje perpendicular (Mikkelsen, 2003).



A.3.2. Trabajos realizados

El procesado de los datos inclinométricos ha consistido en:

- 1) Calcular la media de las dos primeras lecturas de cada inclinómetro, realizadas el mismo día. Los valores medios calculados según las direcciones A y B se toman como referencia para el resto de campañas de lectura. Con esta operación se minimizan los errores aleatorios.
- 2) Eliminar sistemáticamente las tendencias lineales observadas en los perfiles, tendencias que son atribuibles a la existencia de un error de deriva. Para cada inclinómetro y dirección de lectura, la tendencia se ha calculado utilizando los datos correspondientes a las lecturas situadas por debajo de la superficie de deslizamiento inferior que se haya detectado. Esto significa que no se ha considerado la posibilidad de una variación del error de deriva en la vertical.
- 3) Eliminar el error de rotación en aquellos casos en los que se ha detectado comparando los perfiles de desplazamiento acumulado con el perfil del sondeo en la dirección perpendicular.

A.3.3 Resultados

En el Anejo 3b se muestran los perfiles inclinométricos corregidos de los sondeos con la indicación de la localización de la superficie o superficies de deslizamiento. Para cada sondeo se incluyen también los perfiles de desplazamiento incremental y de desplazamiento acumulado calculado directamente con los datos originales (no corregidos).

Para cada sondeo se muestran los perfiles de desplazamiento incremental (originales, esto es, sin corregir), los perfiles de desplazamiento acumulado sin corregir errores (aunque utilizando como referencia la media de las dos primeras lecturas) y los perfiles de desplazamiento acumulado corregidos.

En la tabla A3.1 (incluida también en el Anejo 3c) se sintetiza la localización de las superficies de deslizamiento detectadas en cada sondeo.

Algunos de los sondeos incluidos en la Tabla 1 (SCI-7, SCI-8, SCI-9, SCI-12 y SCI-17) son inclinómetros muy recientes que todavía no han sido procesados para la eliminación de errores sistemáticos. En estos casos, las superficies de deslizamiento en cada sondeo se han localizado analizando los perfiles de desplazamiento incremental. Queda también pendiente el análisis de lecturas más antiguas (mediados del 2012 y anteriores) de algunos inclinómetros (SCI-6, SZ-1A, SZ-2, SZ-3, SZ-5, SZ6, SZ-7, SZ-8 y SZ-11) que nos han sido aportadas muy recientemente. En cualquier caso, estas lecturas más antiguas también se



han analizado, mediante un estudio visual de los perfiles inclinométricos, para comprobar la consistencia con la localización de las superficies de deslizamiento indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Localización de las superficies de deslizamiento detectadas en los inclinómetros.

Sondeo	Profundidad sondeo (m)	Profundidad inclinómetro (m)	Profund. sup rotura (m) Sup. Princp. Rot: en rojo Sup. Inf. Rot.: en azul	Observaciones
SCI 2	101.1	100	37	
SCI 3	80.7	80	13	
			17	
			21	
			34	
			48	
			50	
SCI 6	101.2	95	30	
			34	
			39	
			68	
			90	
SCI 7	---	85	25	
			30	
			39	
			77	
SCI 8	---	65	12	
			16??	
			18	
			22	
			35	
SCI 9	---	150	44???	
			36	
			40	
			44	
				Superficie de cizalla lateral
SCI 10	135.2	134	25	
			31 y 32	
			35	
			39	
			58	
			64	
SCI 11	49.2	48.5	68	
			23.5	
			34.5 y 35	
SCI 12	---	80	44.5	
			17 y 18	
			28	
			43	
			51	
				108

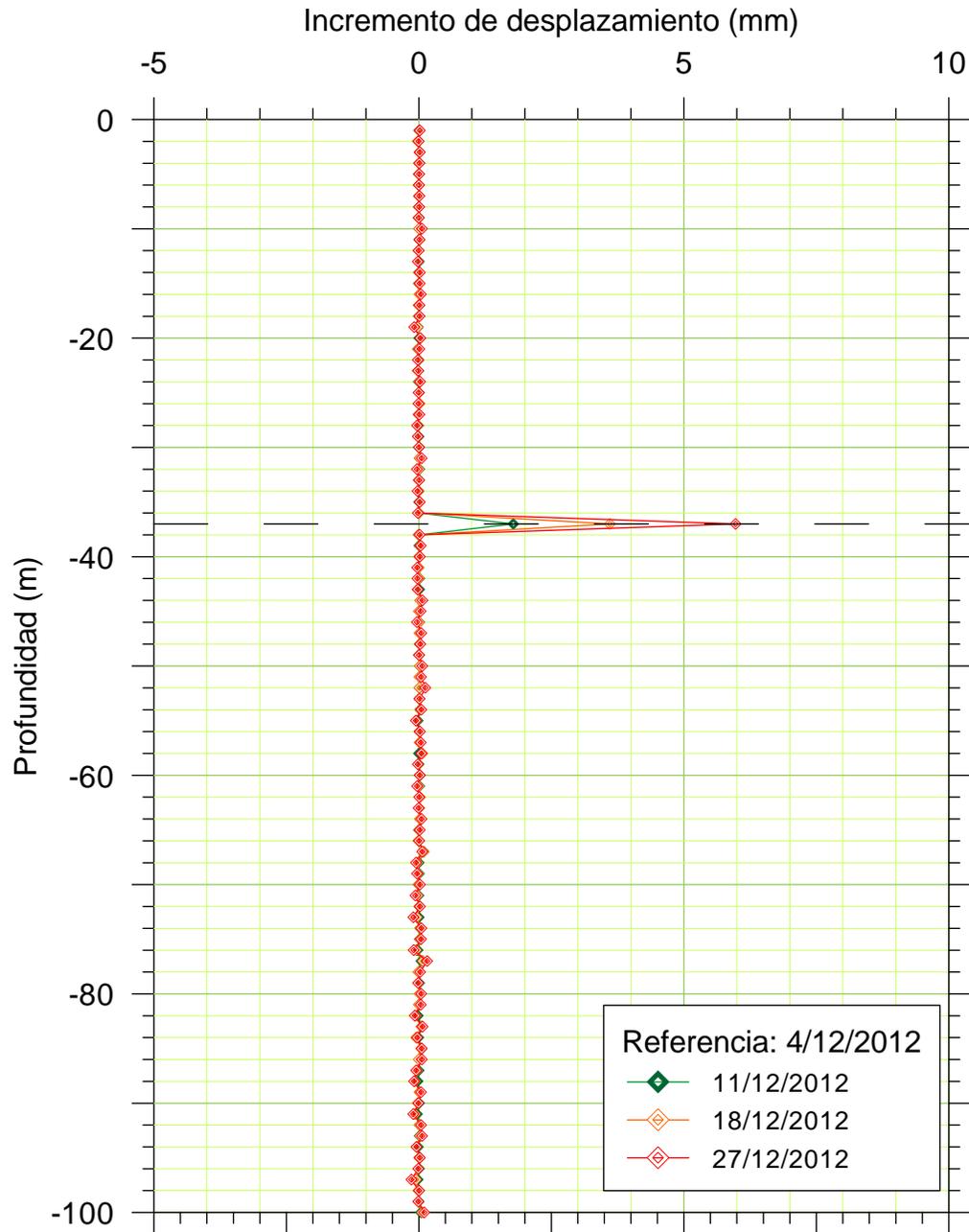


Tabla 1. Continuación

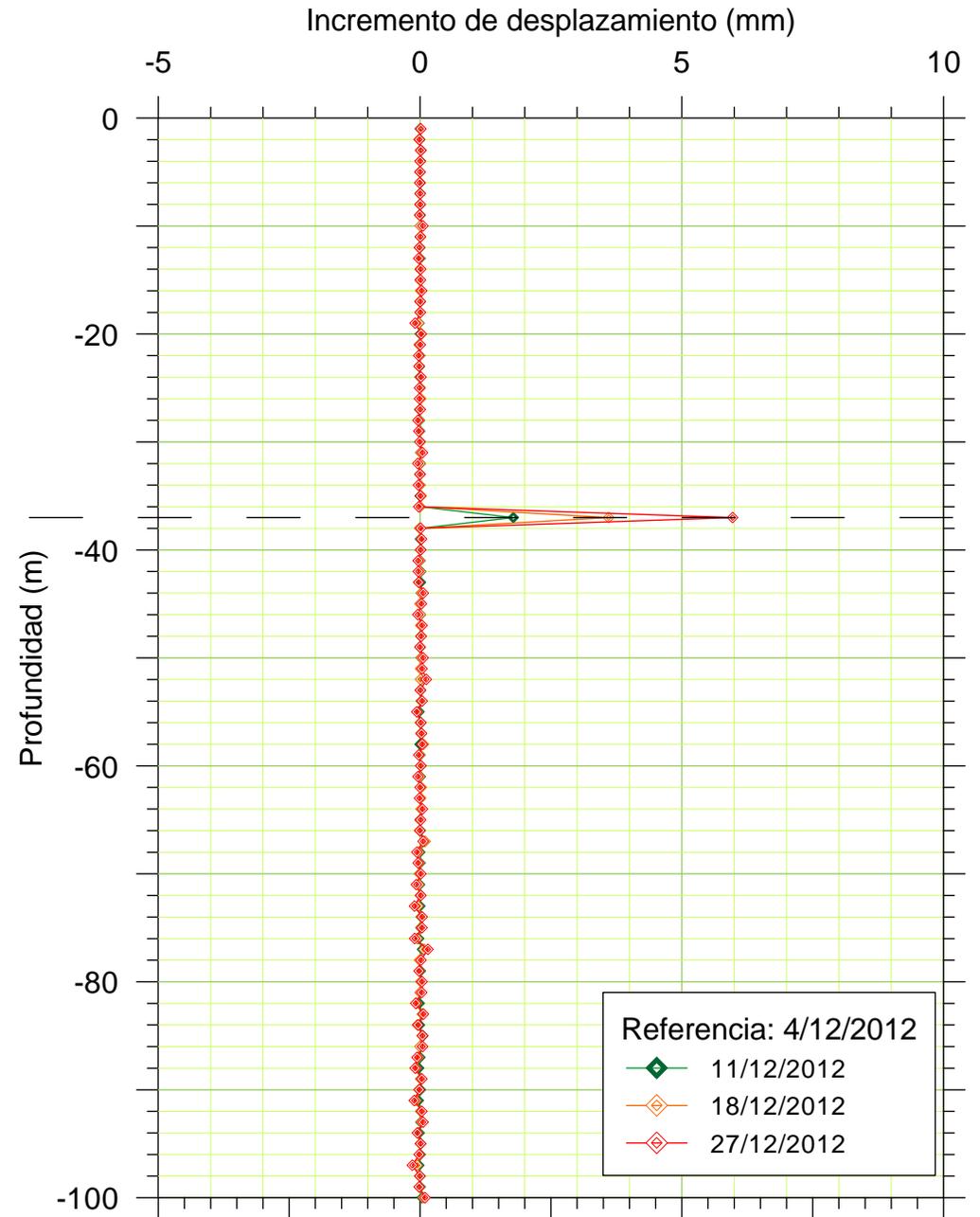
Sondeo	Profund sondeo (m)	Profundidad inclinómetro (m)	Profund. sup rotura (m) Sup. Princp. Rot: en rojo Sup. Inf. Rot.: en azul	Observaciones
SCI 13	83.5	80	13	
			17 y 18	
			66	
SCI 14	85.1	84	4	
			11.5	
SCI 15	102.5	102	10	
			18	
			35.5	
SCI 16	60	58	Zona de cizalla entre los 6 y los 13 m	
			6	
SCI 17	---	87	25	
			42-43	
SZ 1A	60	60	Sin superficie de deslizamiento clara. Superficie de rotura es más profunda que la base del inclinómetro. (1)	
SZ 2	127.1	55	Sin superficie de deslizamiento clara. Superficie de rotura es más profunda que la base del inclinómetro. (1)	
SZ 3A	85	85	12 y 13	Superficie de cizalla lateral
SZ 5	36.2	36	zona de cizalla entre 2.5 y 6.5 m de prof	Deslizamiento del Inglés
			zona de cizalla entre 10 y 13 m de prof	
			25.5	
SZ 6	24	23	9	Deslizamiento del Inglés
			14	
SZ 7	20	19.5	8	En principio situado fuera del deslizamiento pero el inclinómetro quedó cortado entre agosto y octubre del 2012.
SZ 8	26	25	Sin desplazamiento. Fuera del deslizamiento.	
SZ 11		33.5	17.5	Deslizamiento del Inglés
<p>(1) Según el informe de la CHE (2) este inclinómetro tenía 100 m originalmente (en 2009) y quedó cortado antes de julio del 2011. A partir de a esta última fecha se leía la parte superficial del inclinómetro. Más observaciones en el Anejo 3c.</p>				
<p>(2) Informe sobre el comportamiento de la cerrada de la presa de Yesa (Navarra). Informe del Área de Seguridad de Infraestructuras y Geotecnología, Confederación Hidrográfica del Ebro. Informe provisional del 17 de diciembre de 2012.</p>				

SCI-2

Dirección A

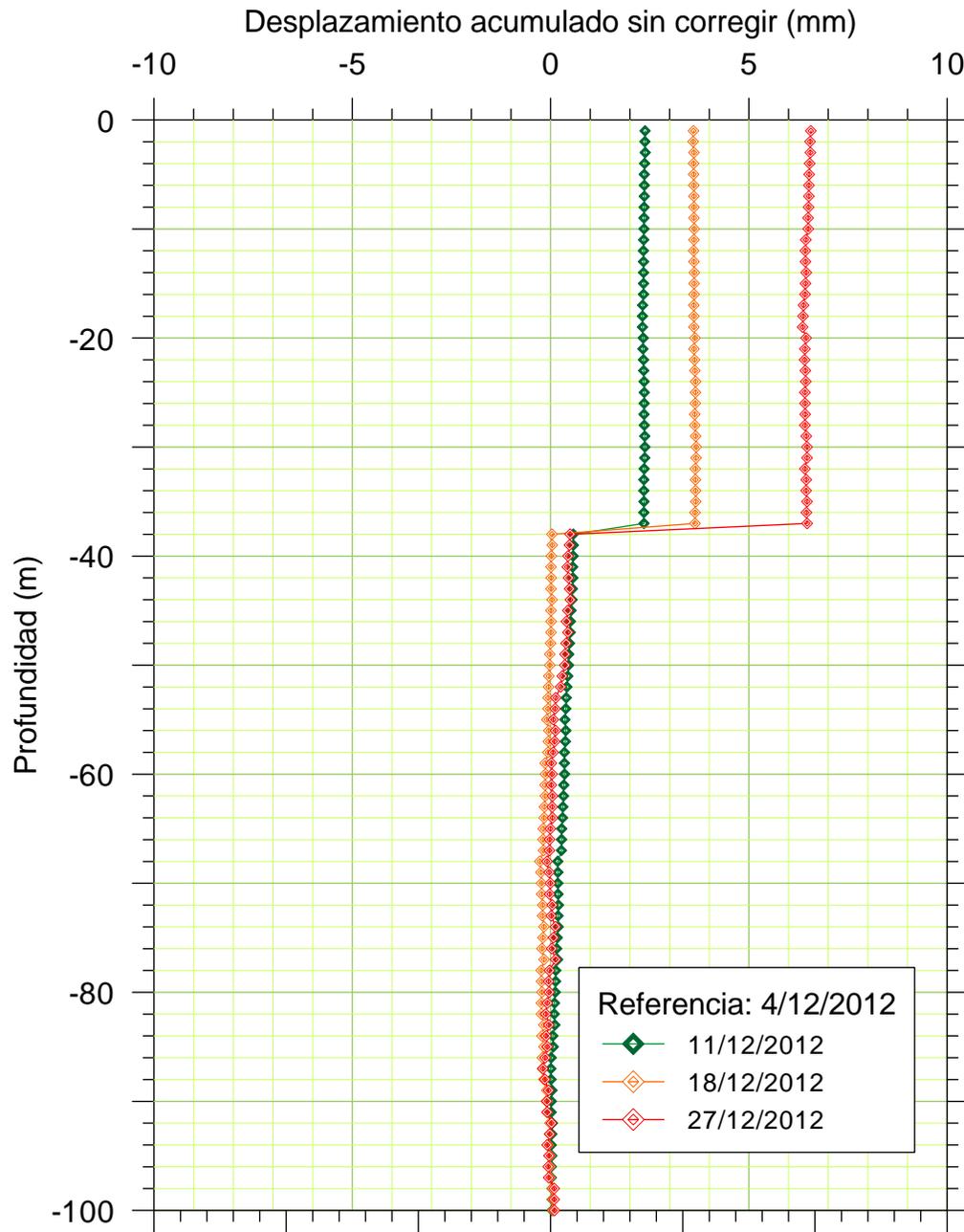


Dirección B

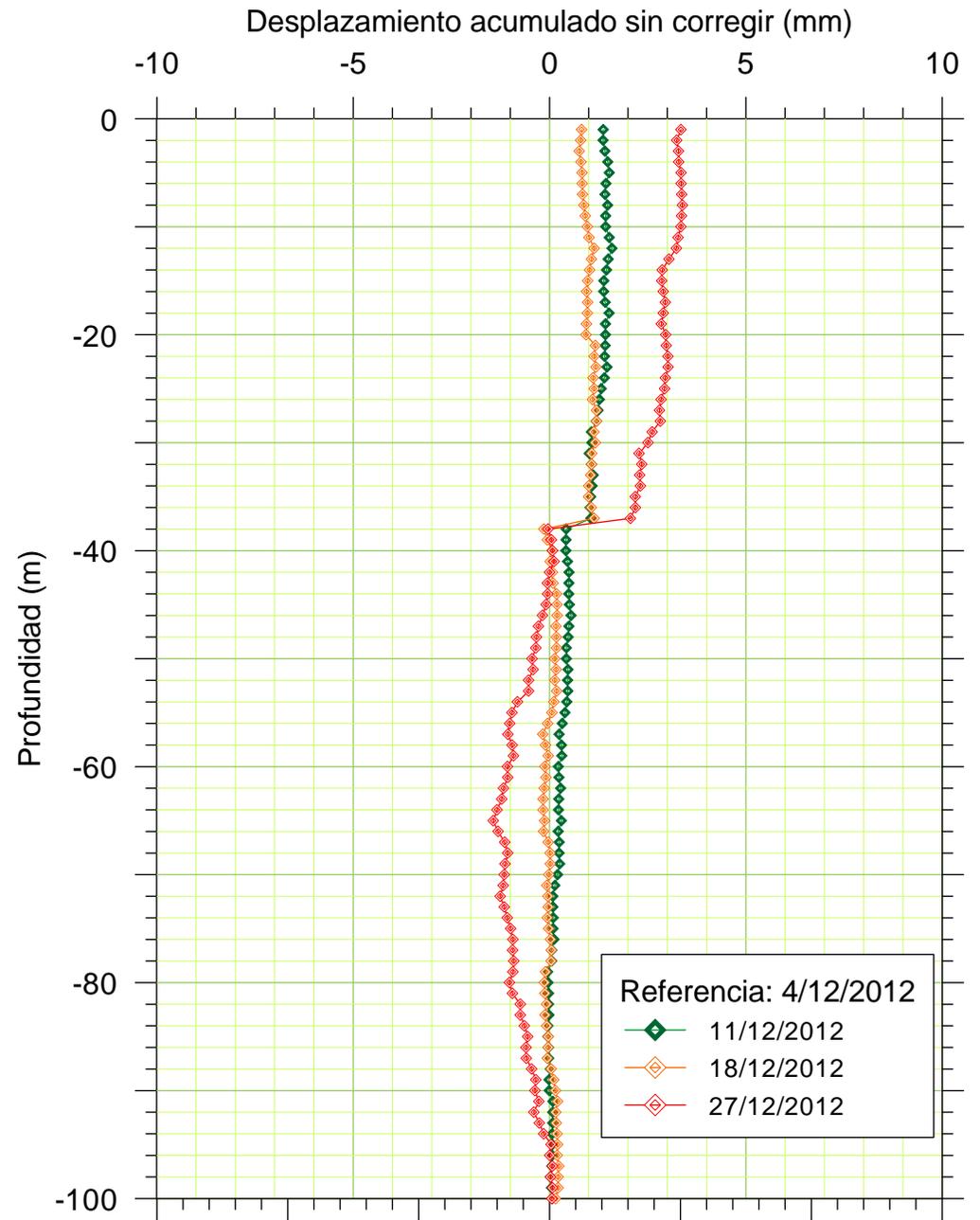


SCI-2

Dirección A

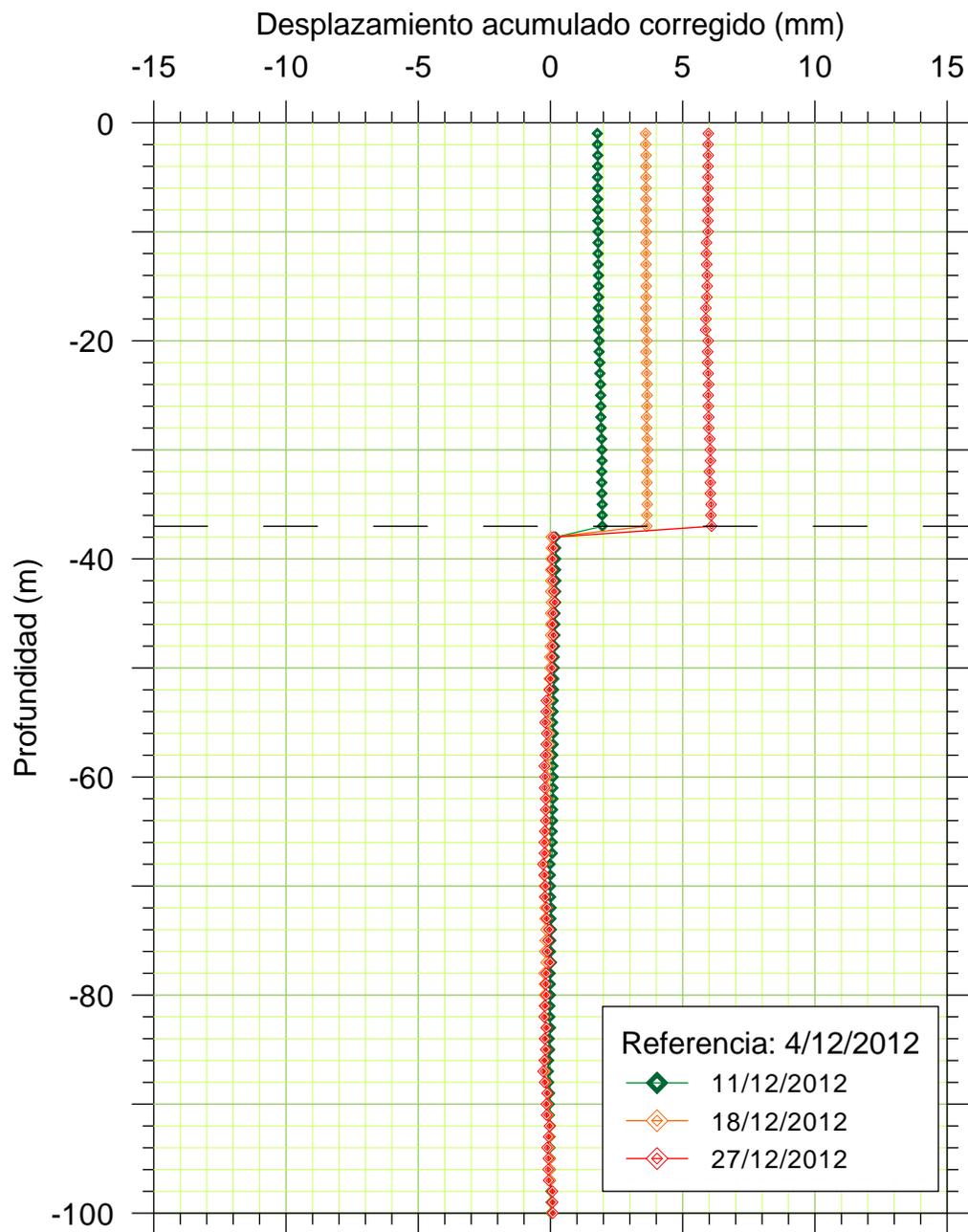


Dirección B

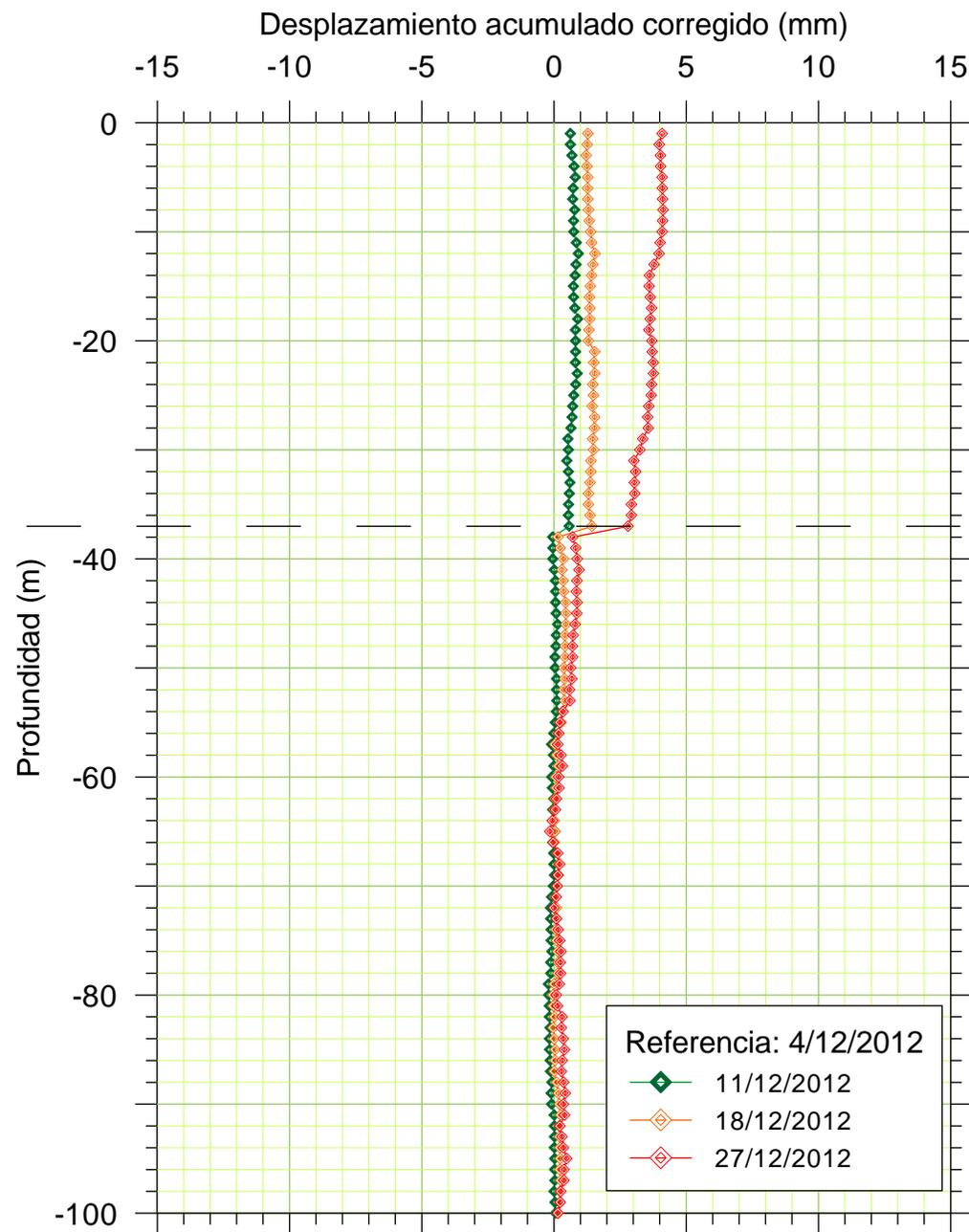


SCI-2

Dirección A

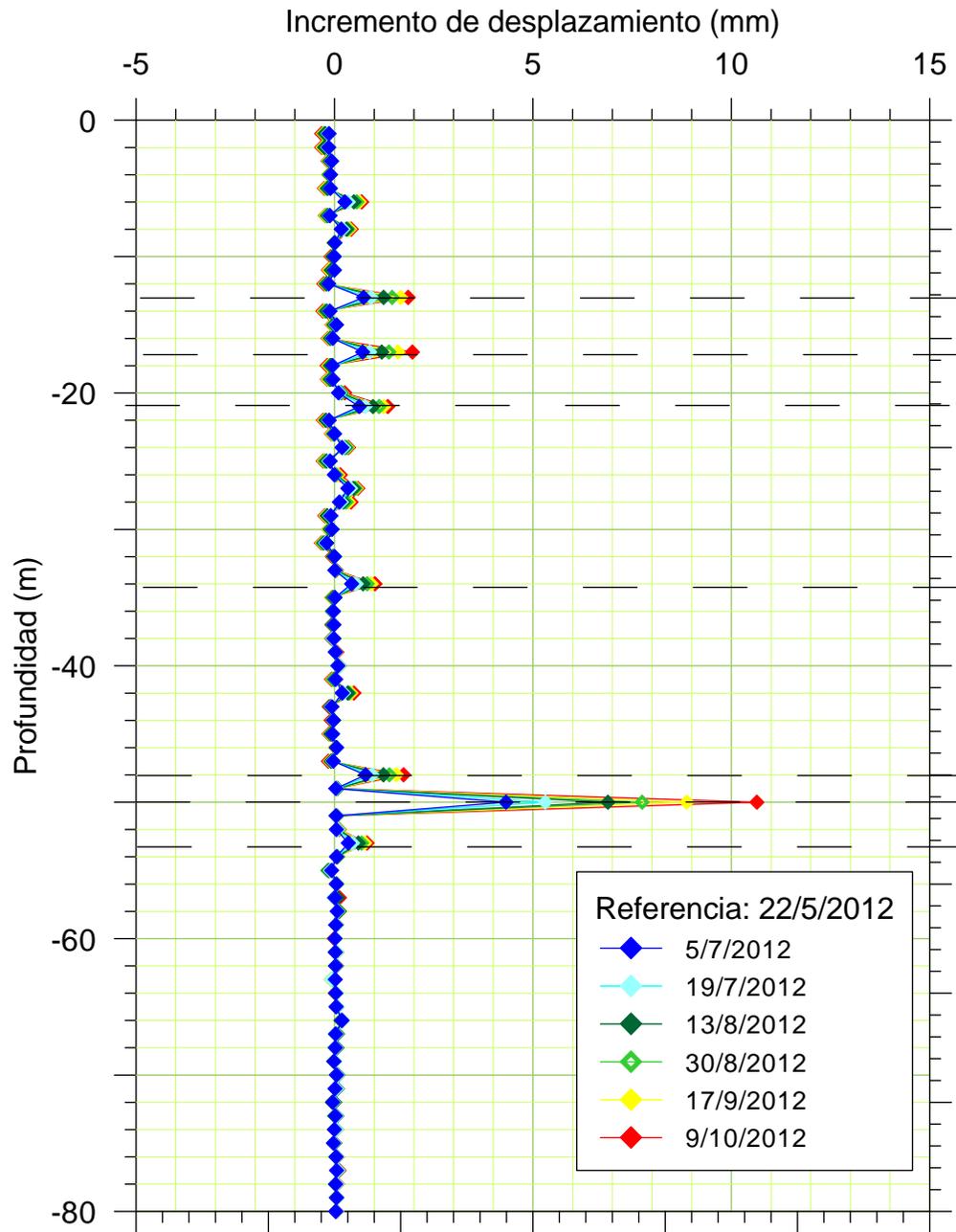


Dirección B

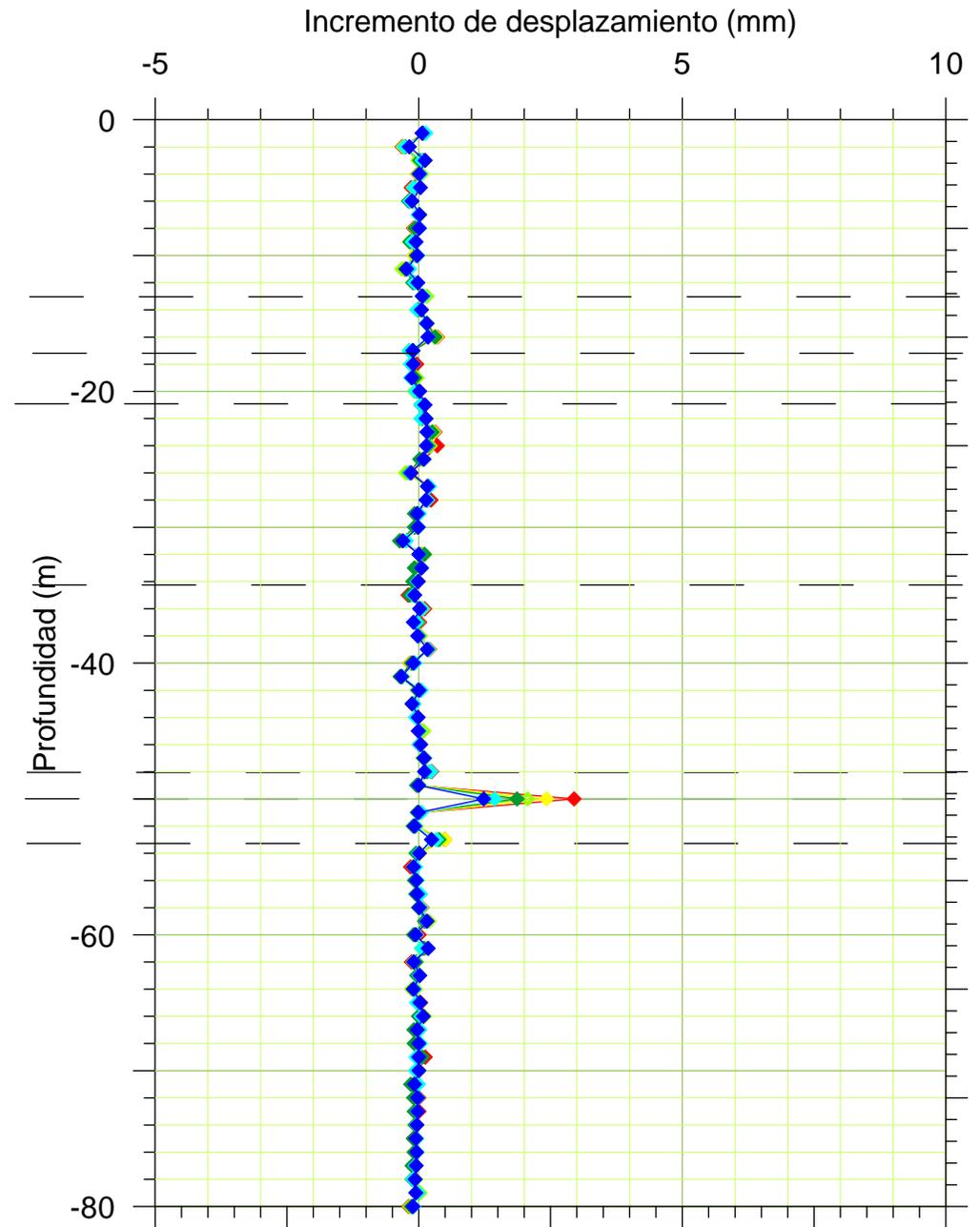


SCI-3

Dirección A

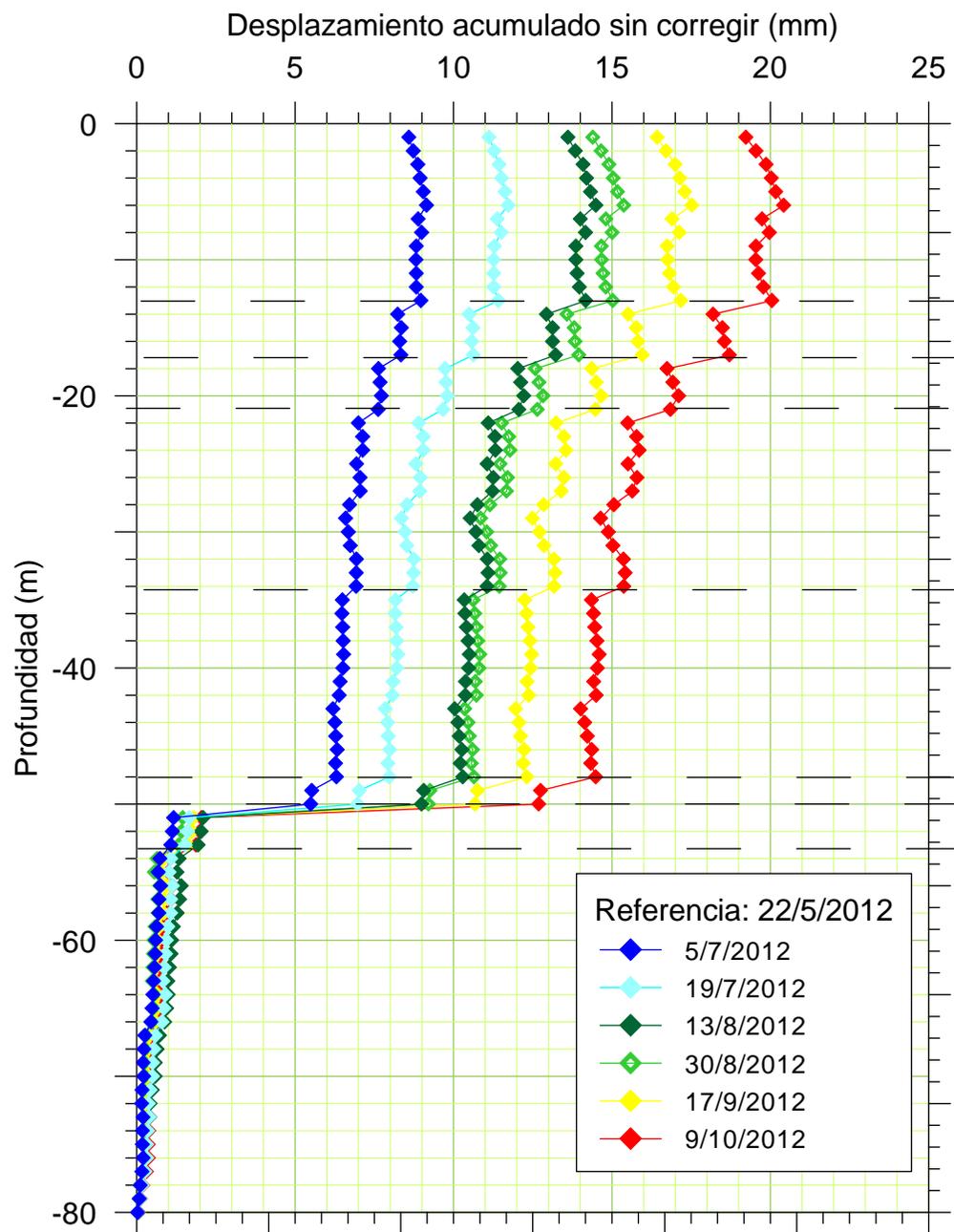


Dirección B

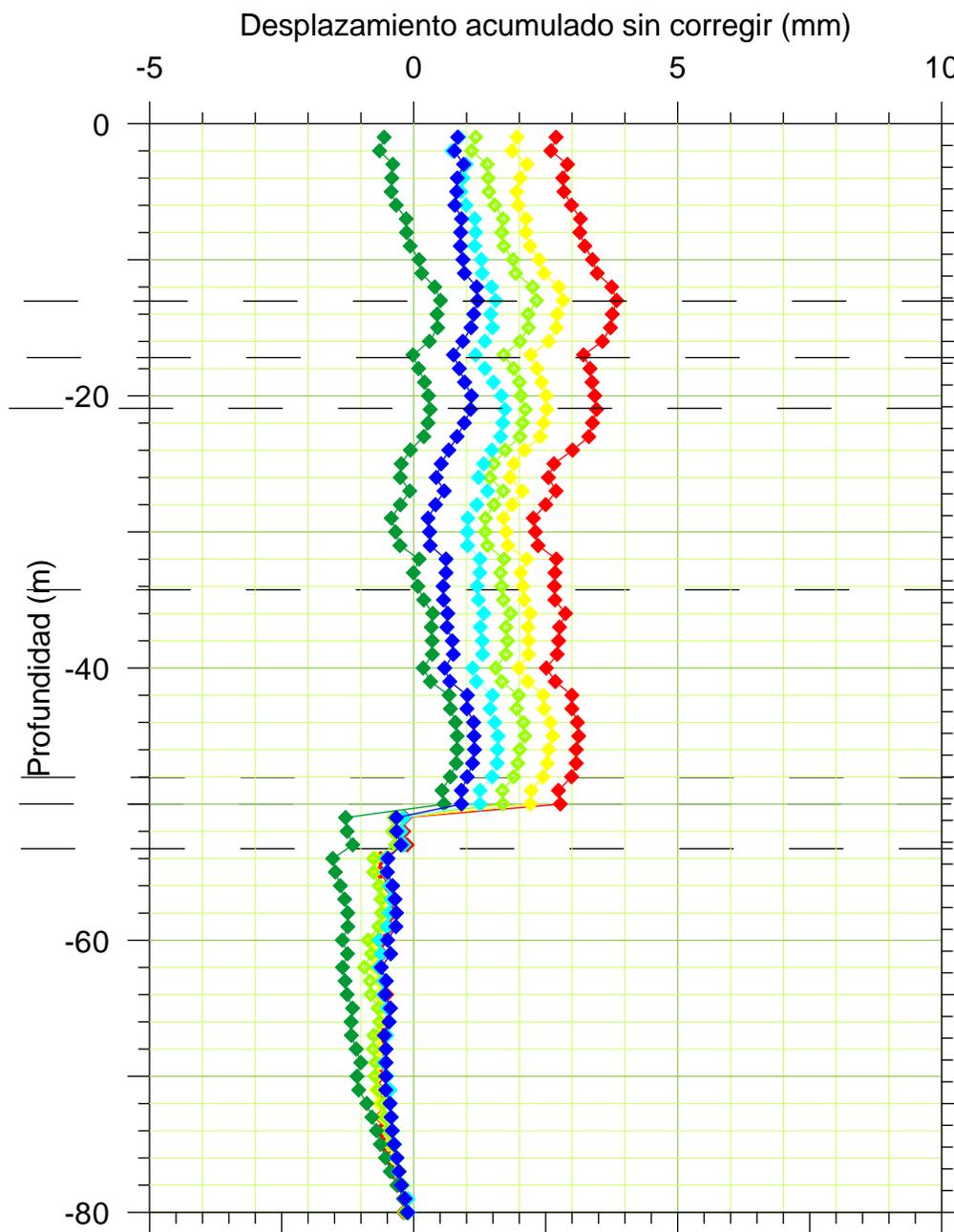


SCI-3

Dirección A

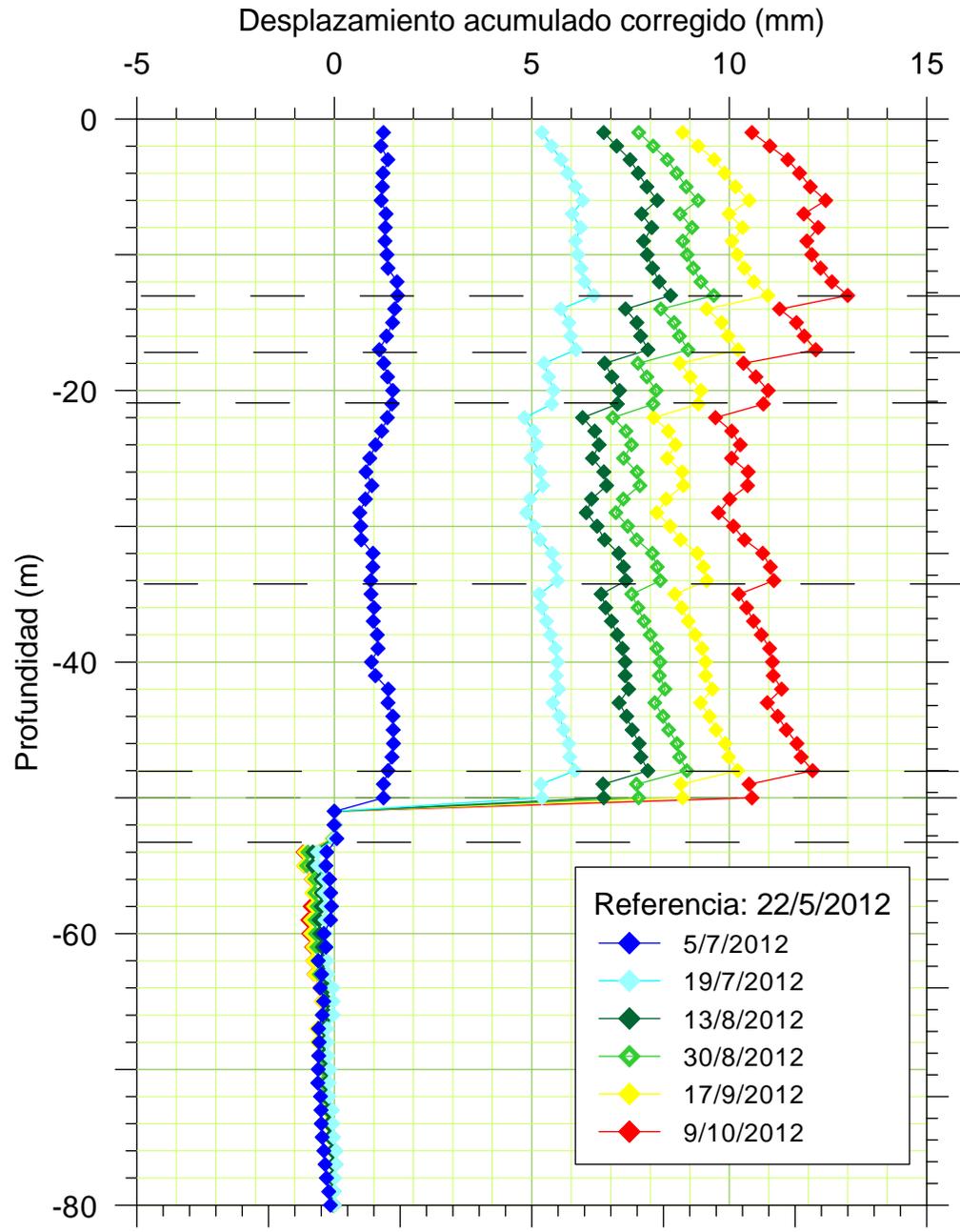


Dirección B

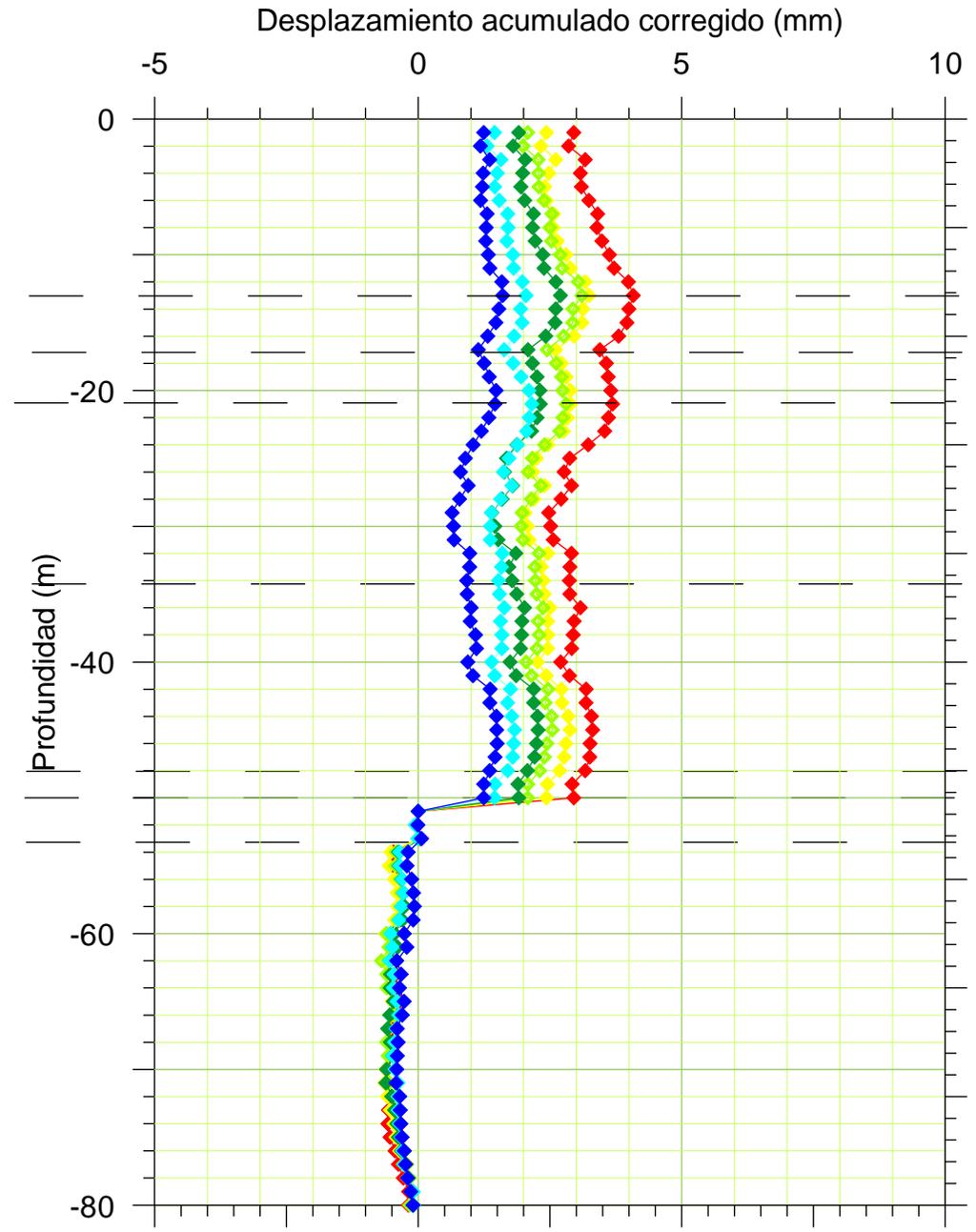


SCI-3

Dirección A

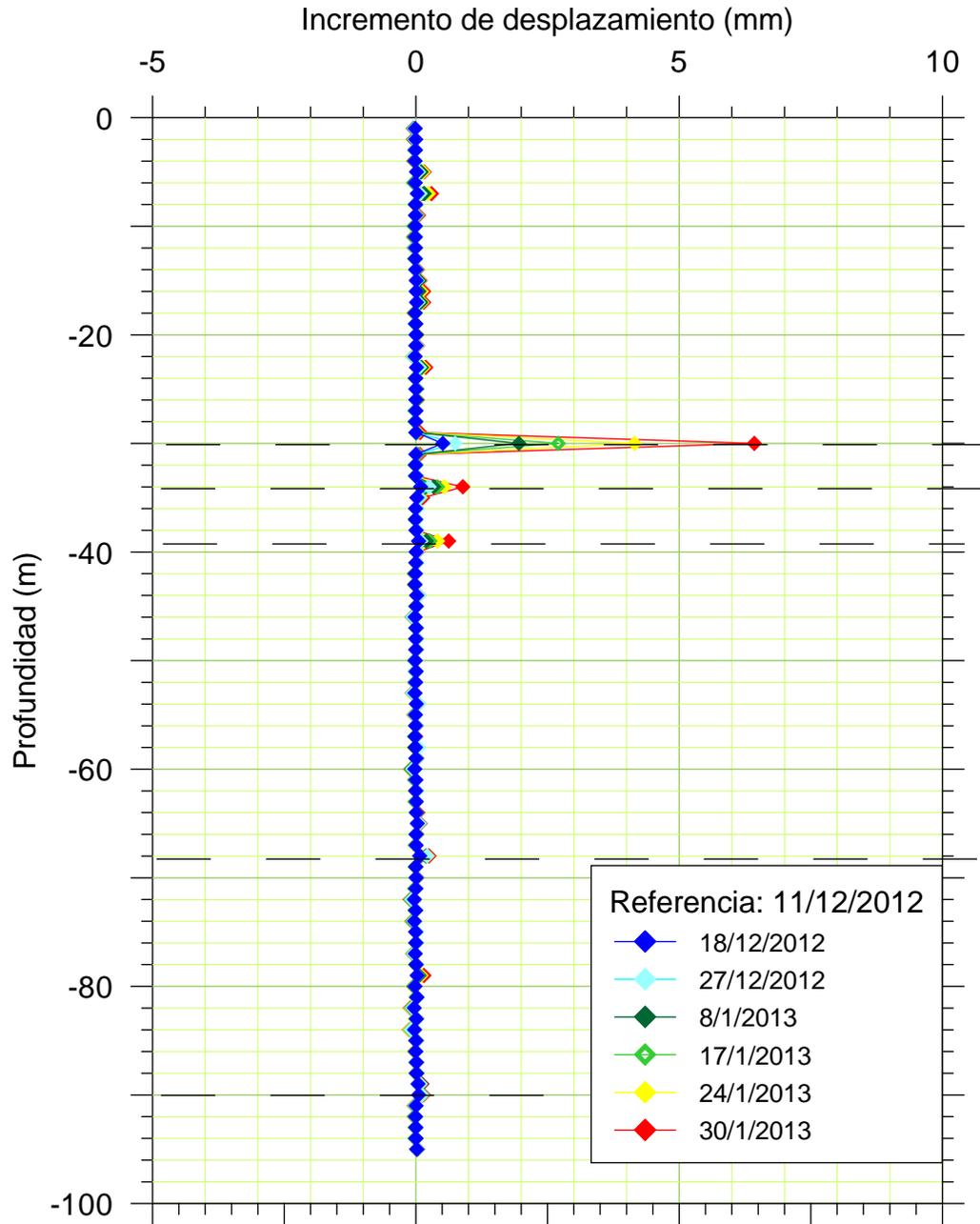


Dirección B

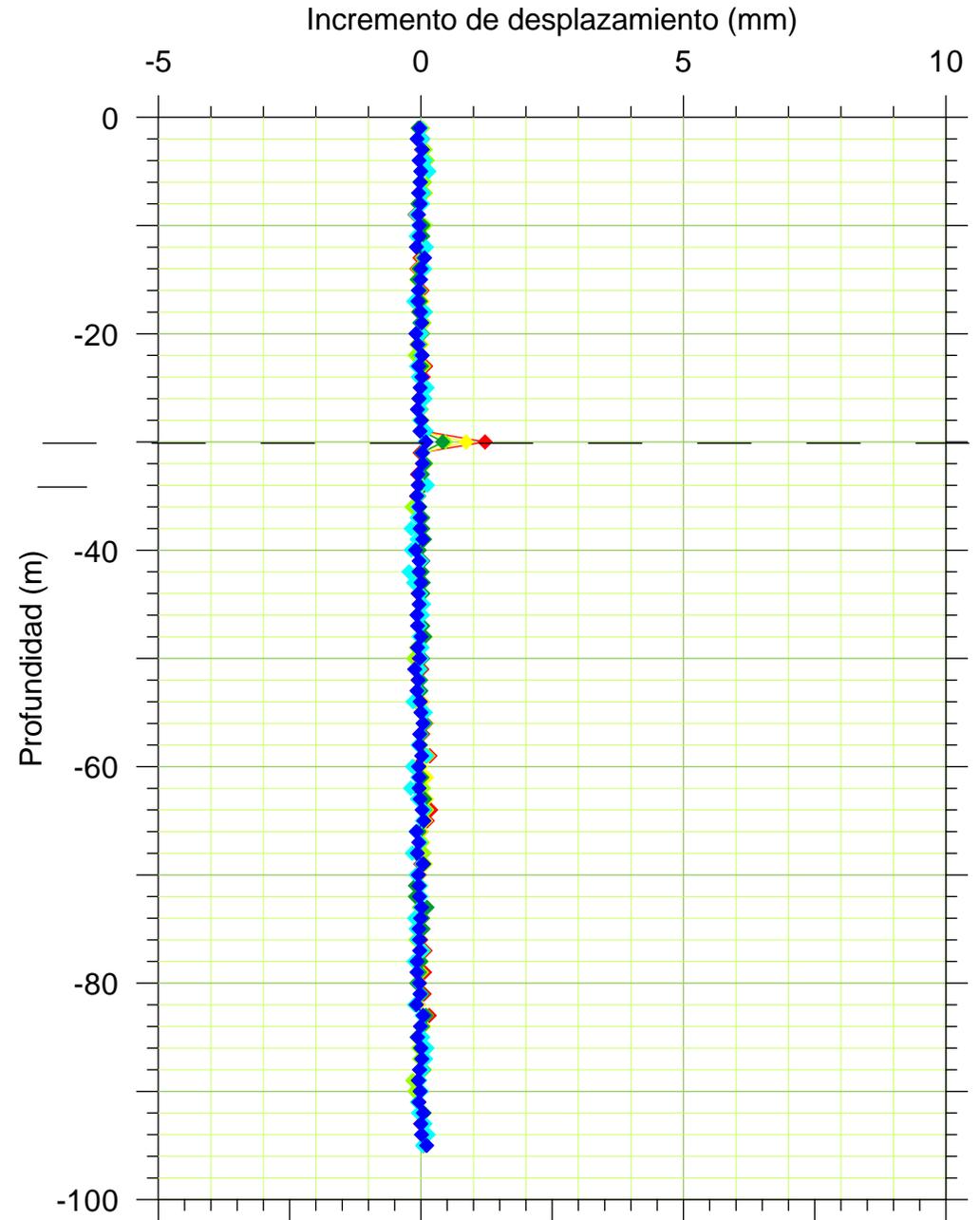


SCI-6

Dirección A

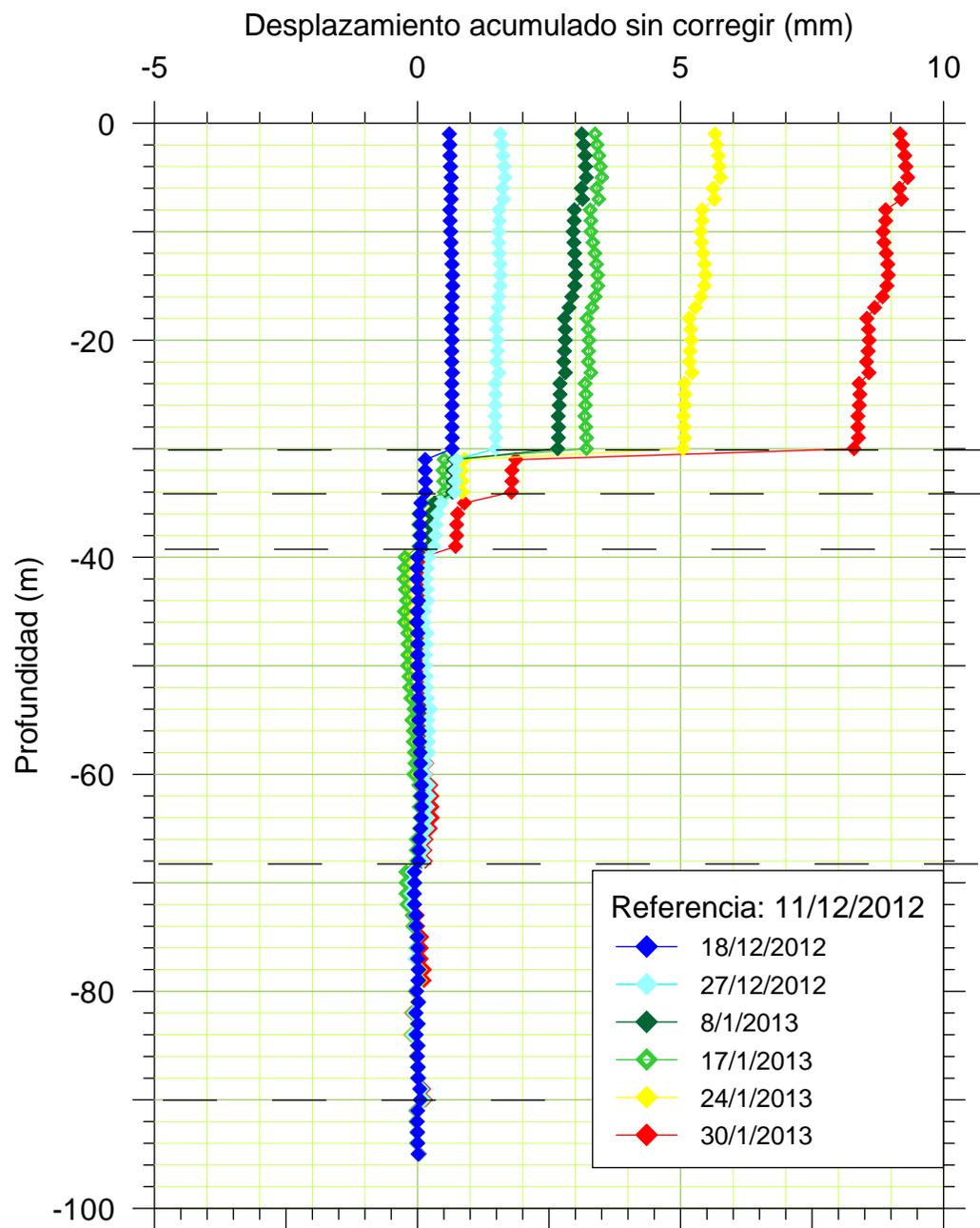


Dirección B

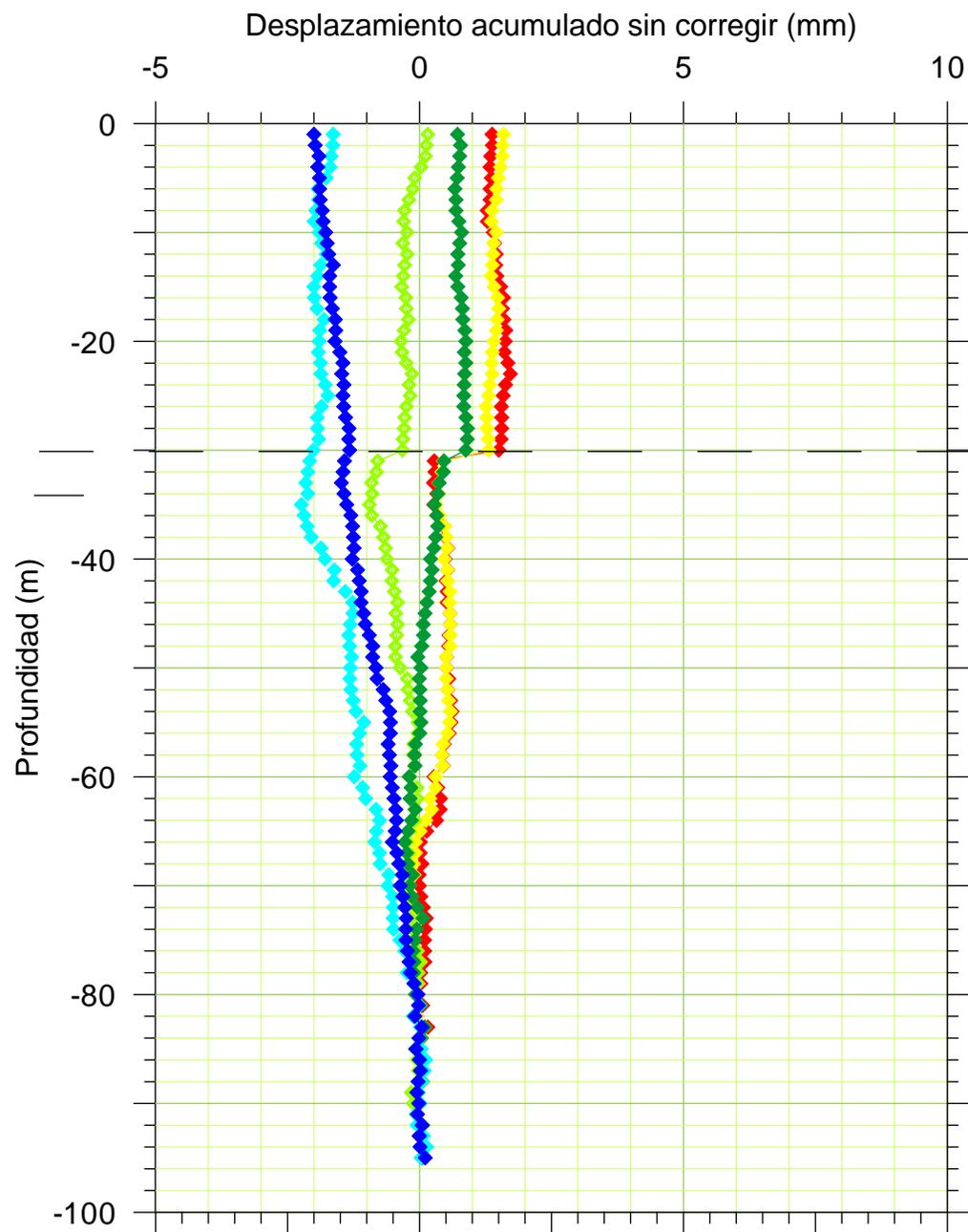


SCI-6

Dirección A

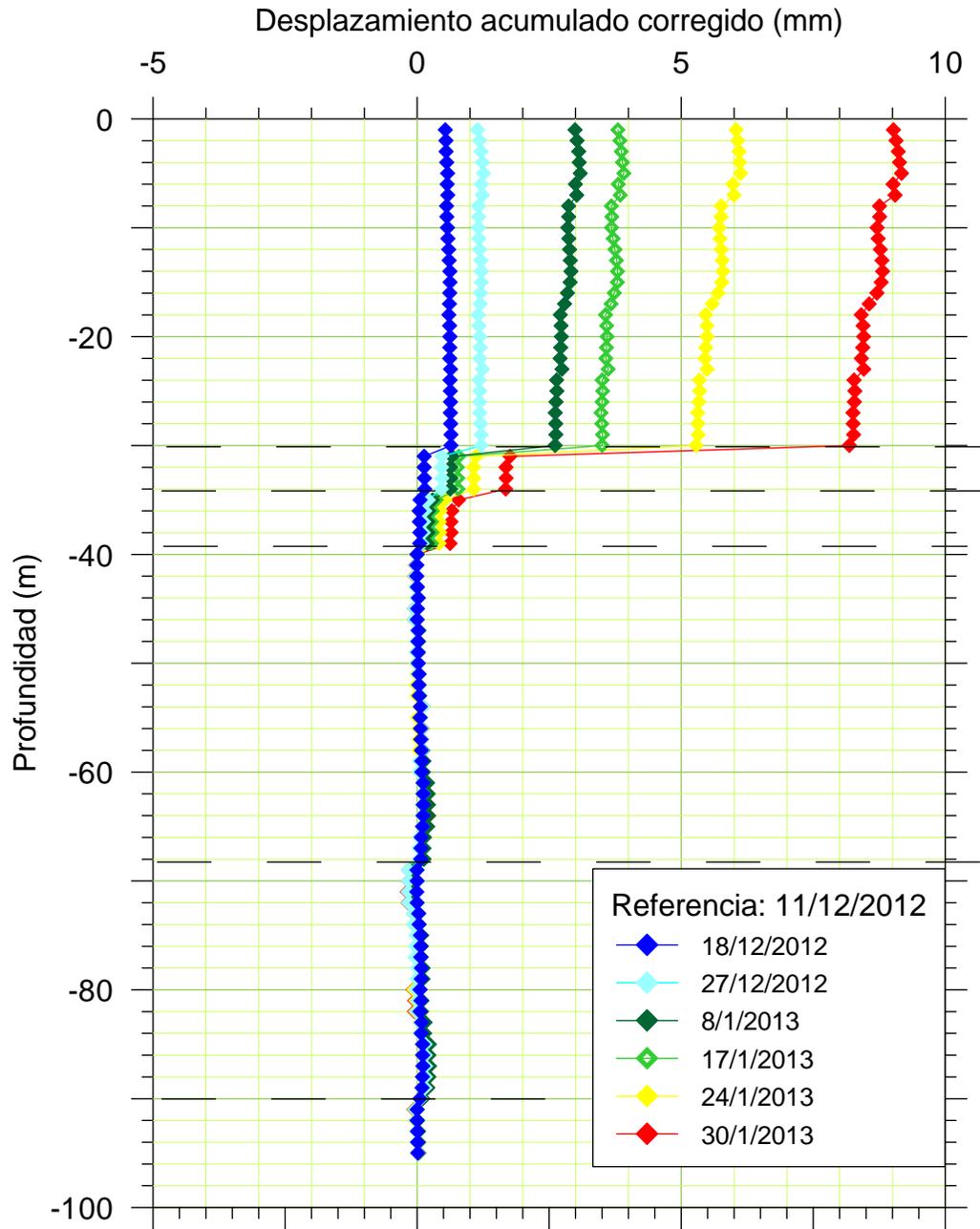


Dirección B

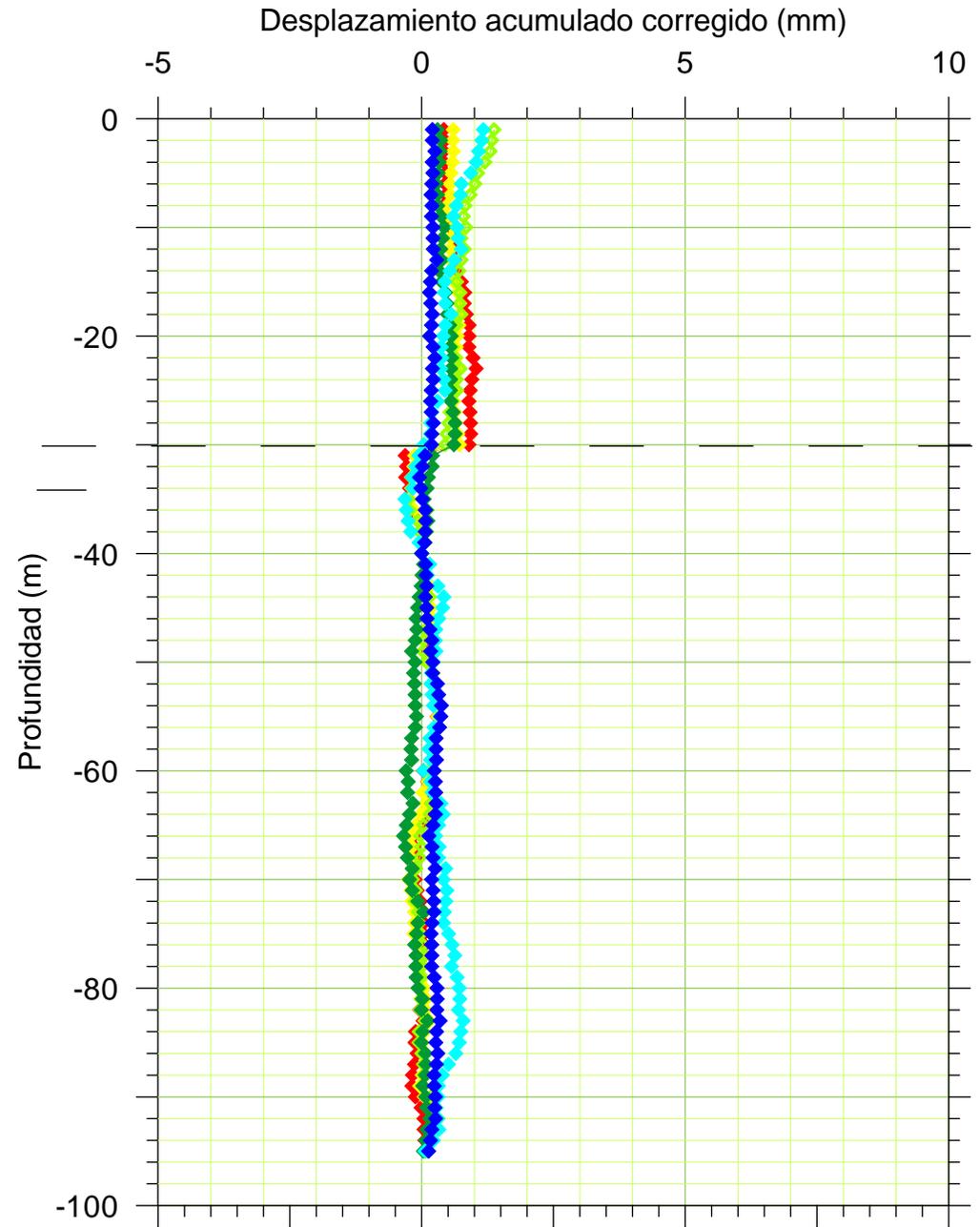


SCI-6

Dirección A

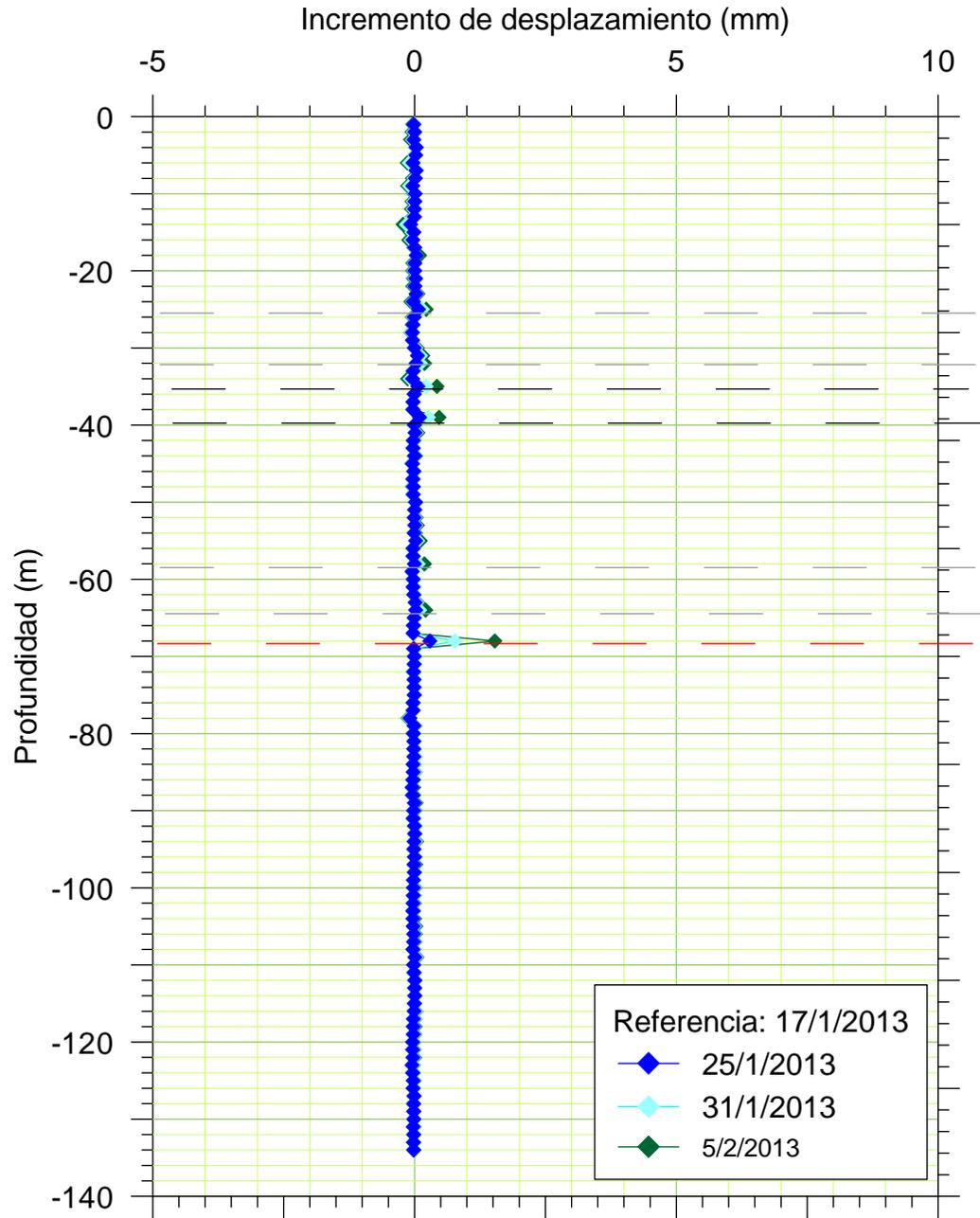


Dirección B

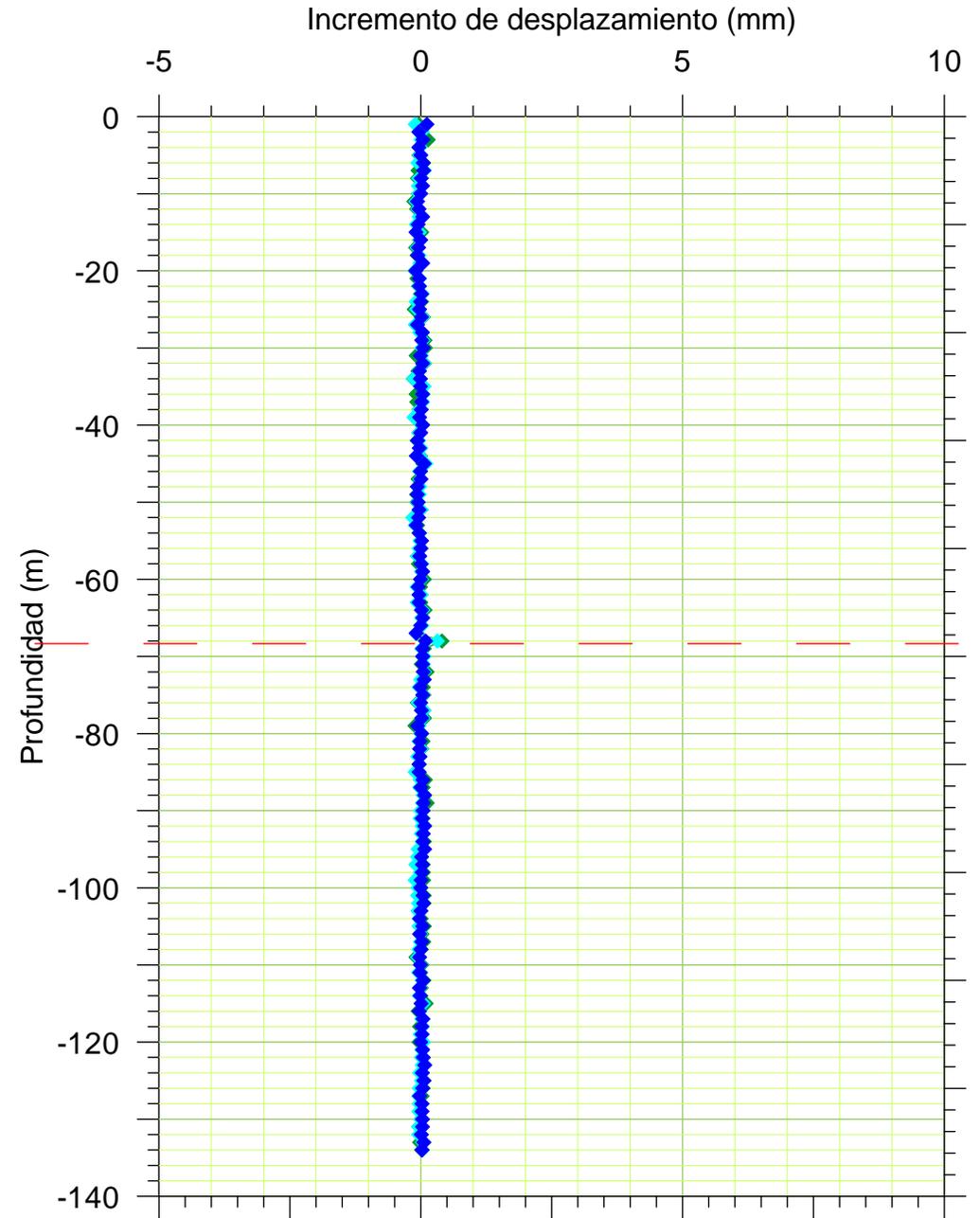


SCI-10

Dirección A

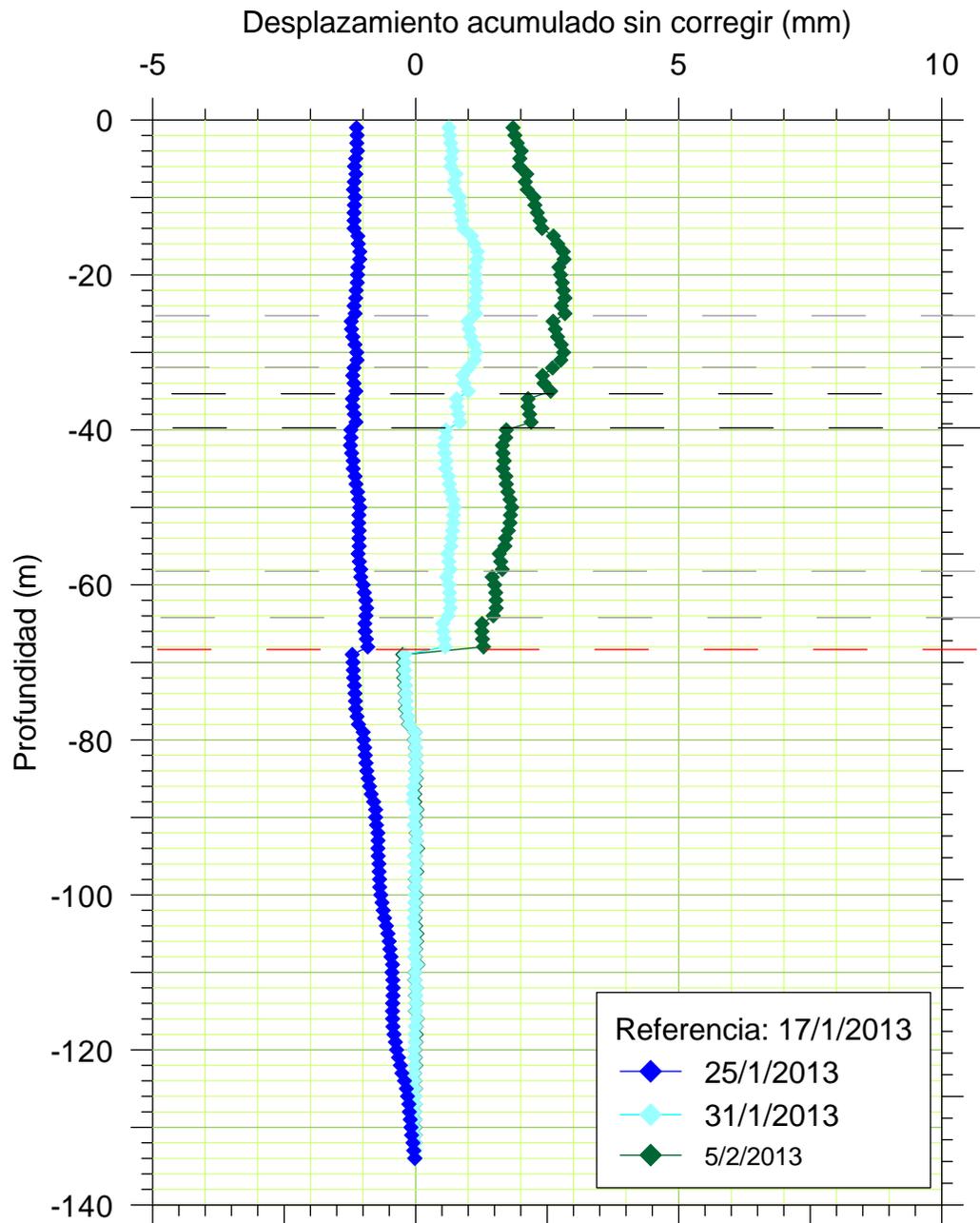


Dirección B

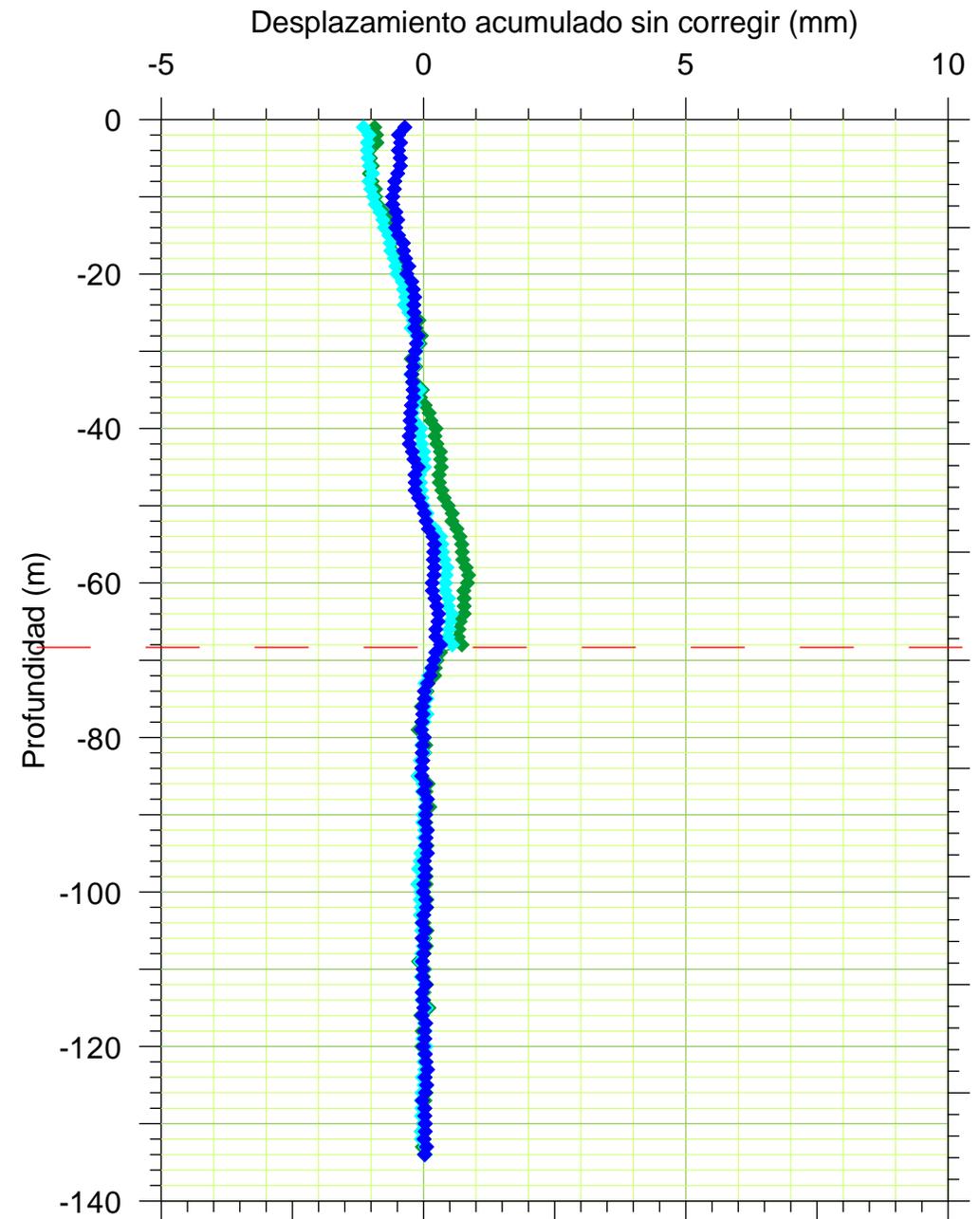


SCI-10

Dirección A

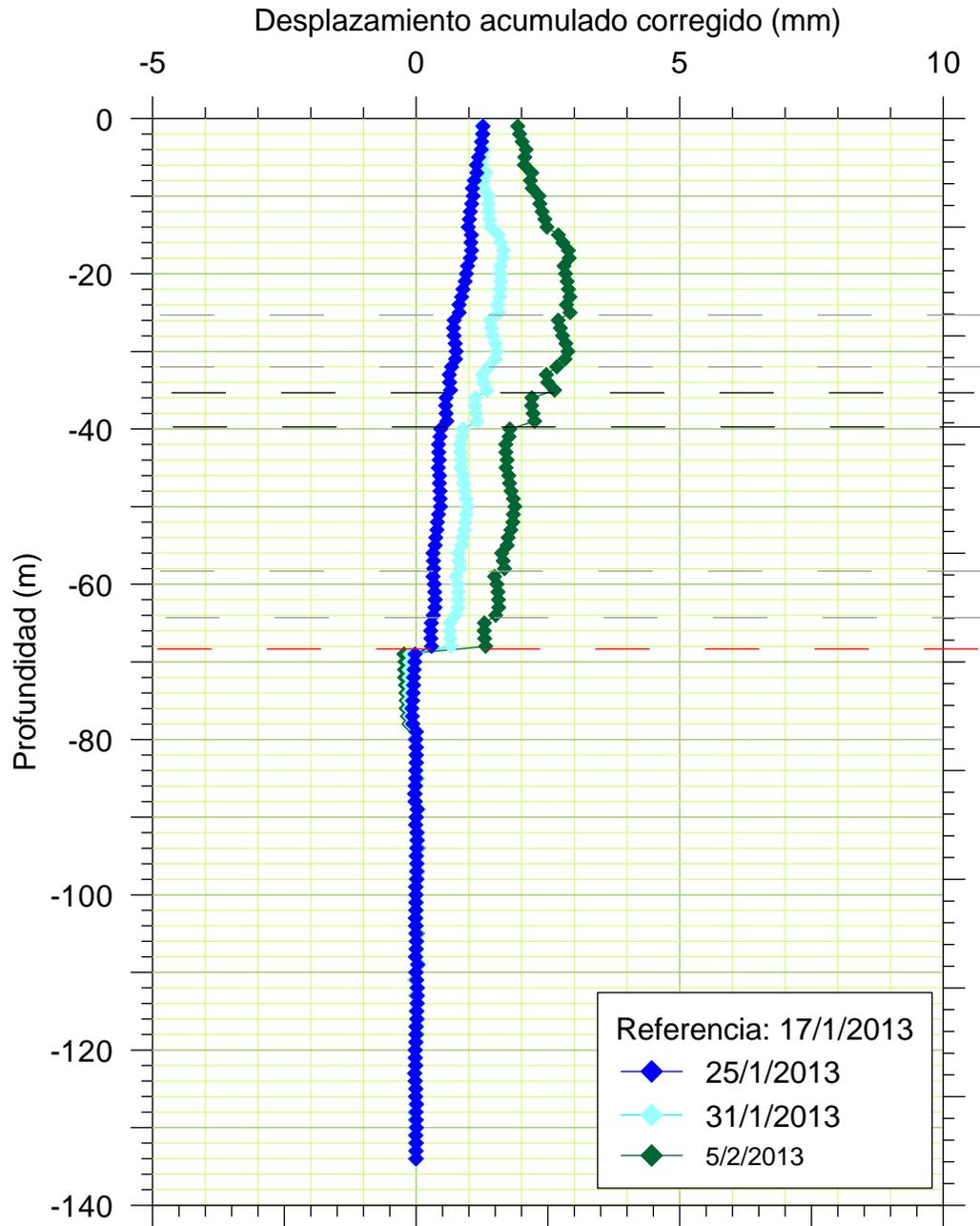


Dirección B

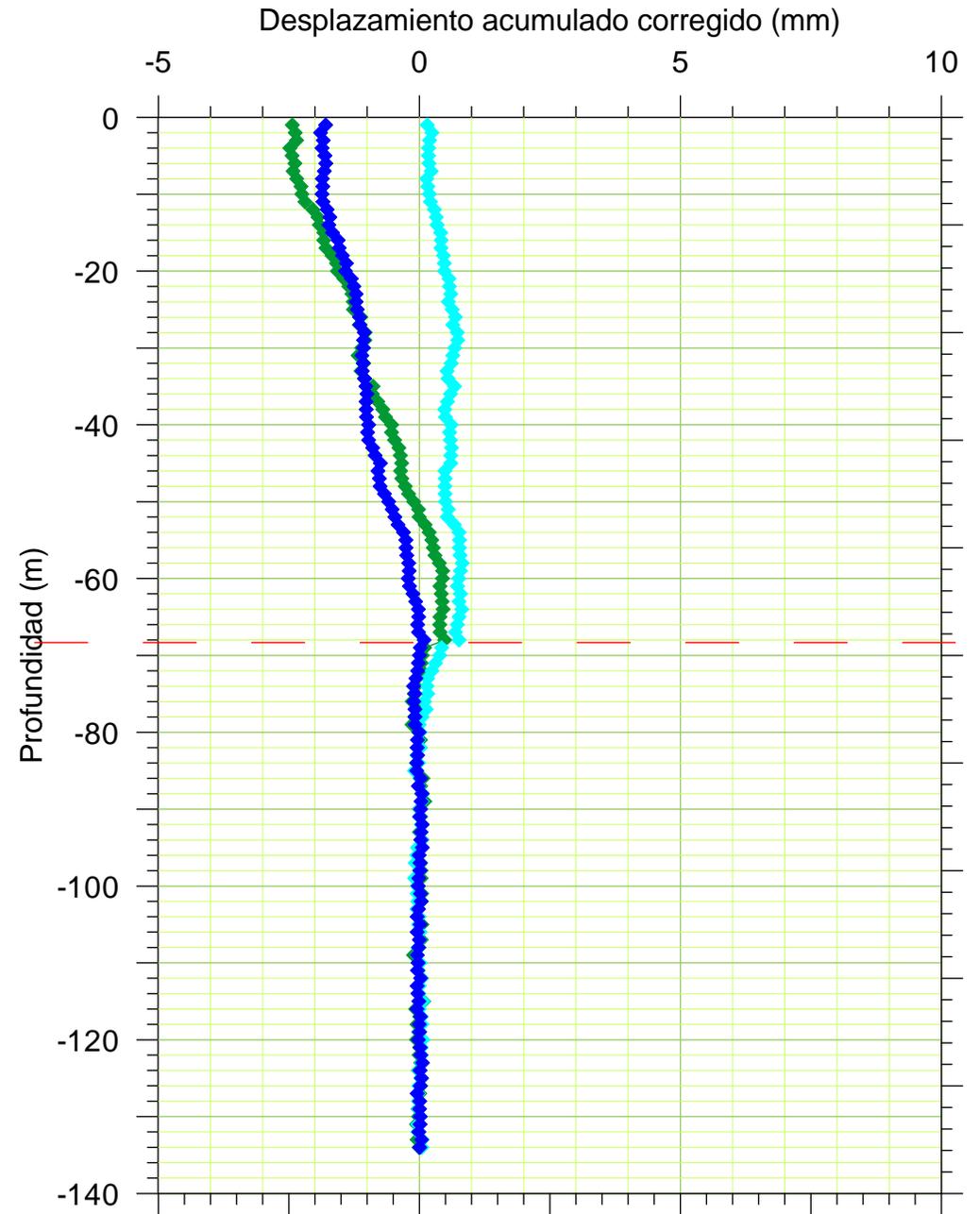


SCI-10

Dirección A



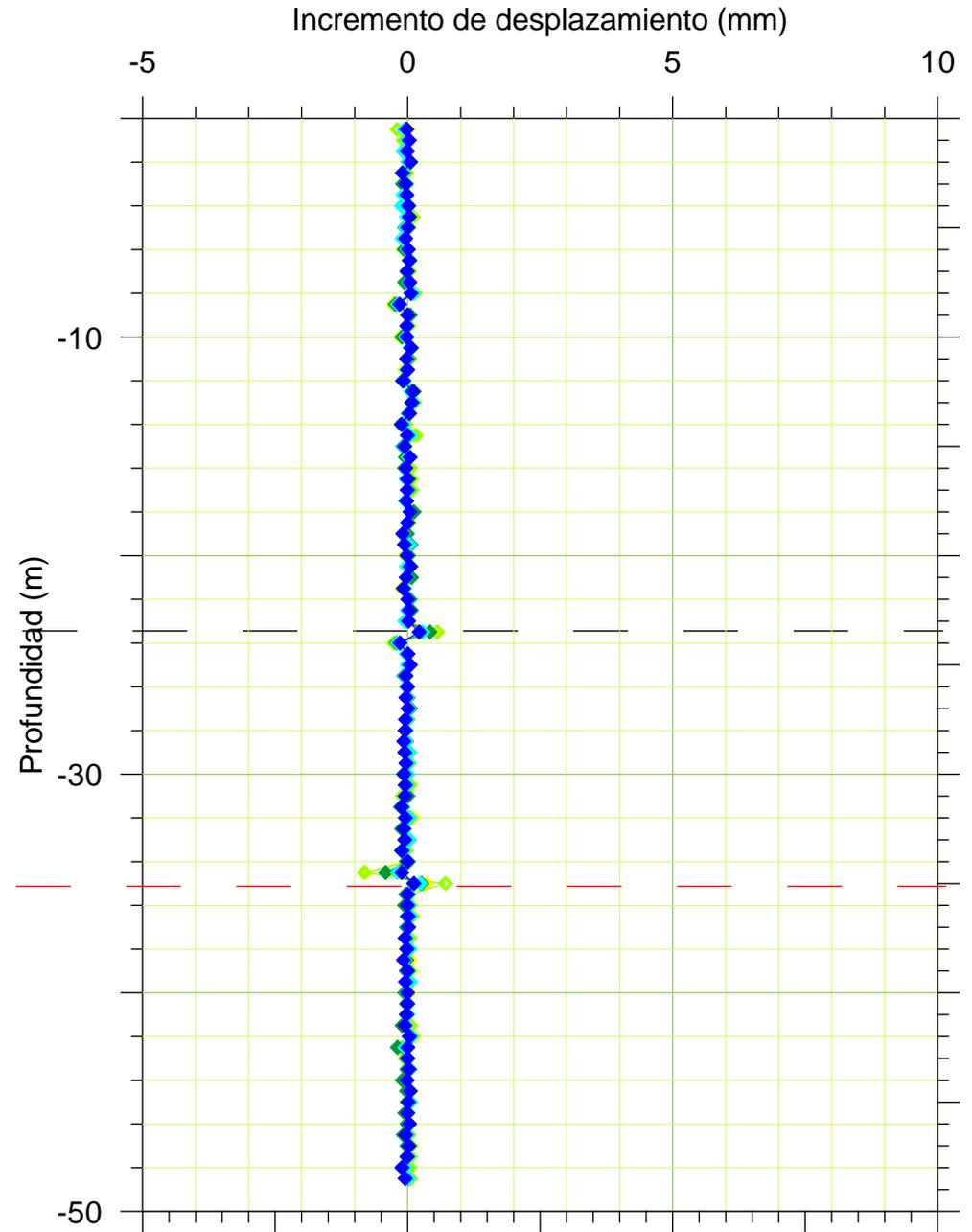
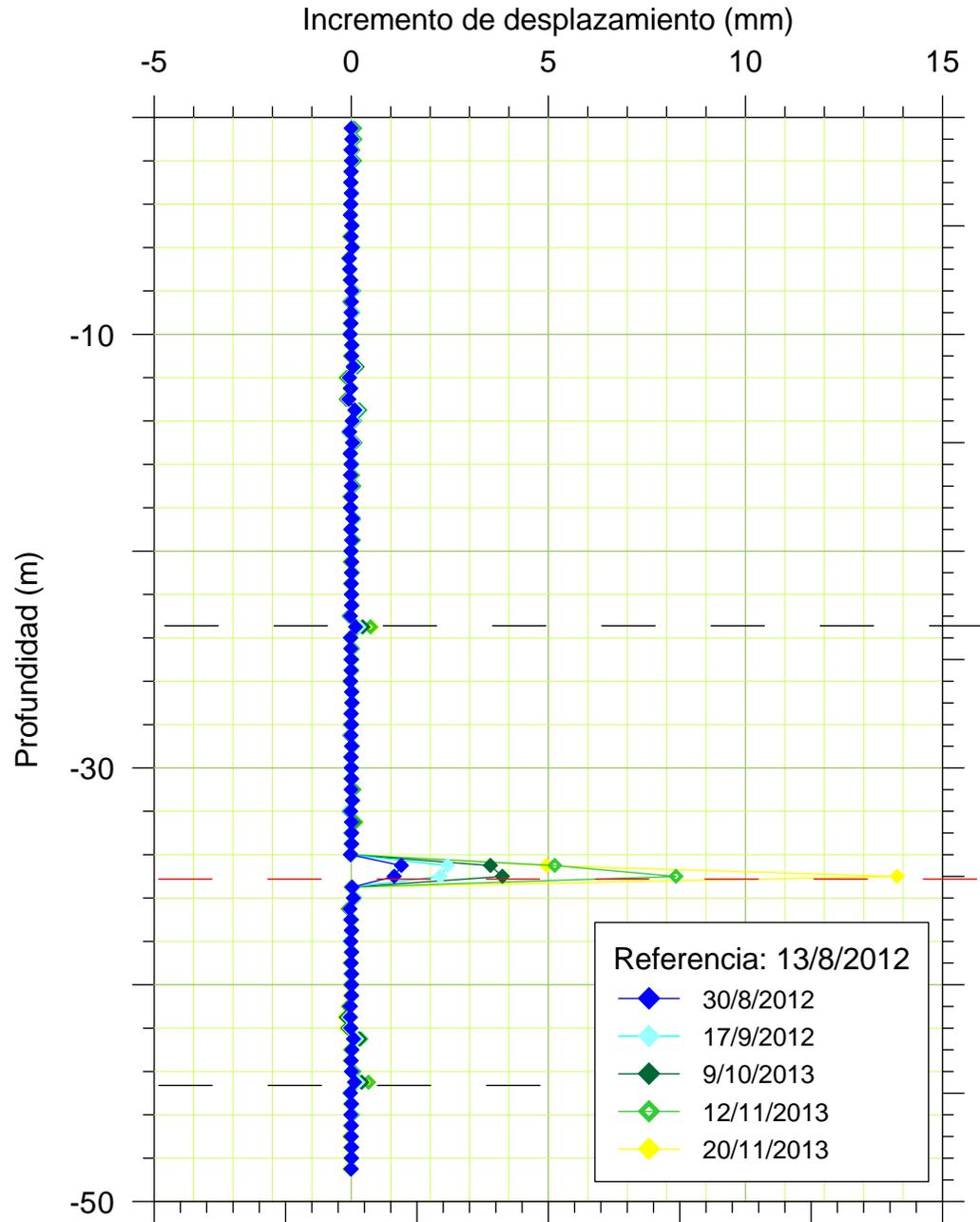
Dirección B



SCI-11

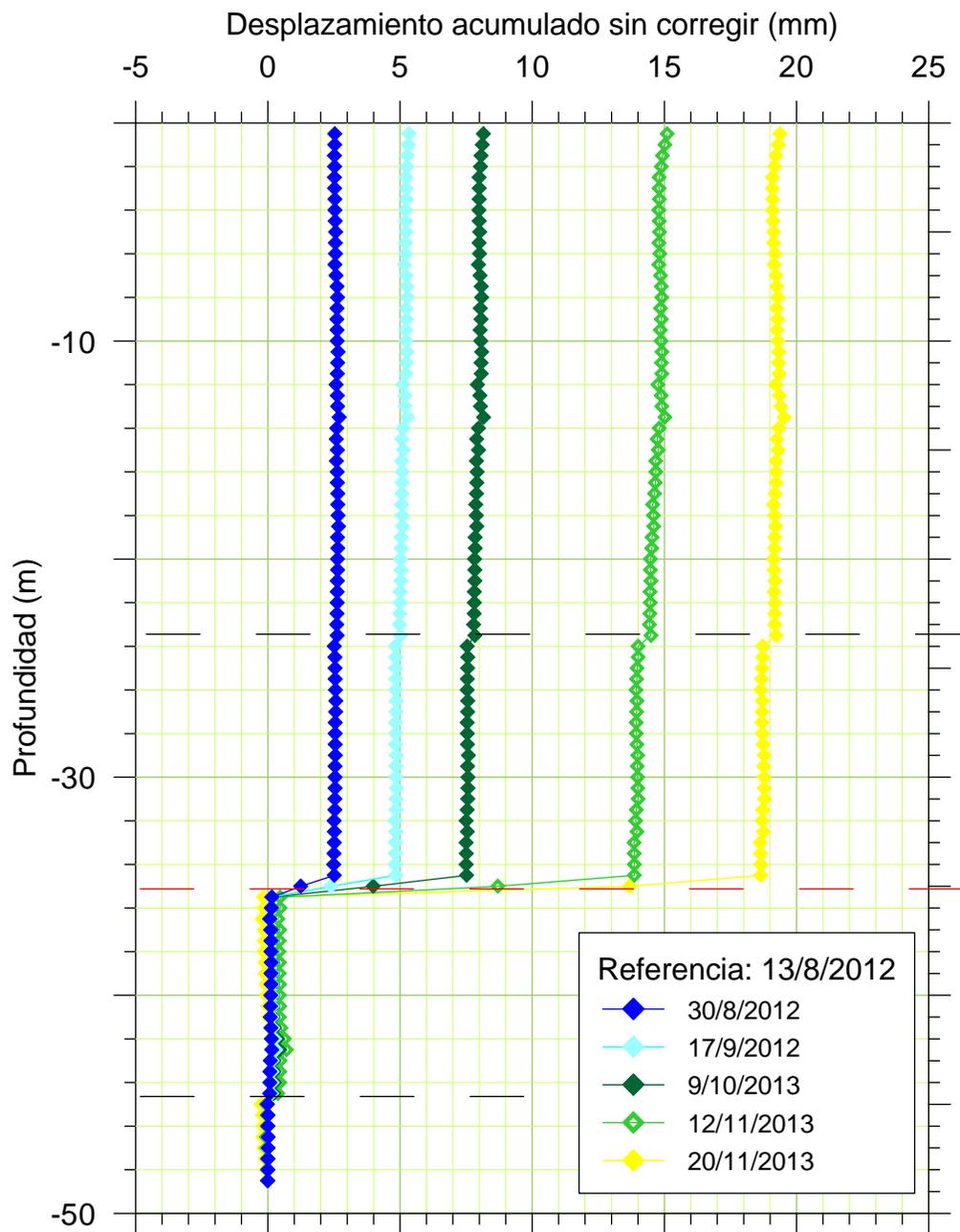
Dirección A

Dirección B

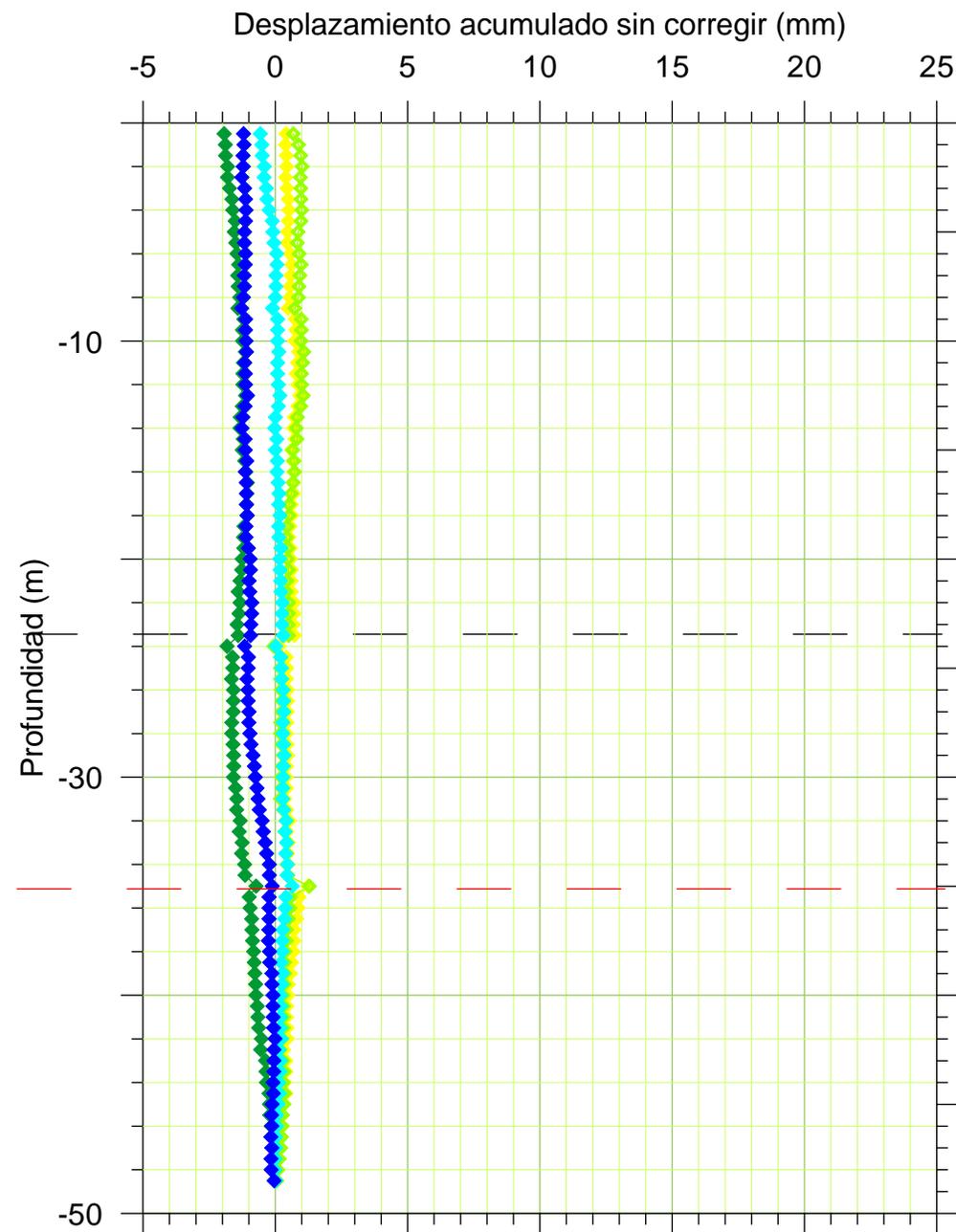


SCI-11

Dirección A

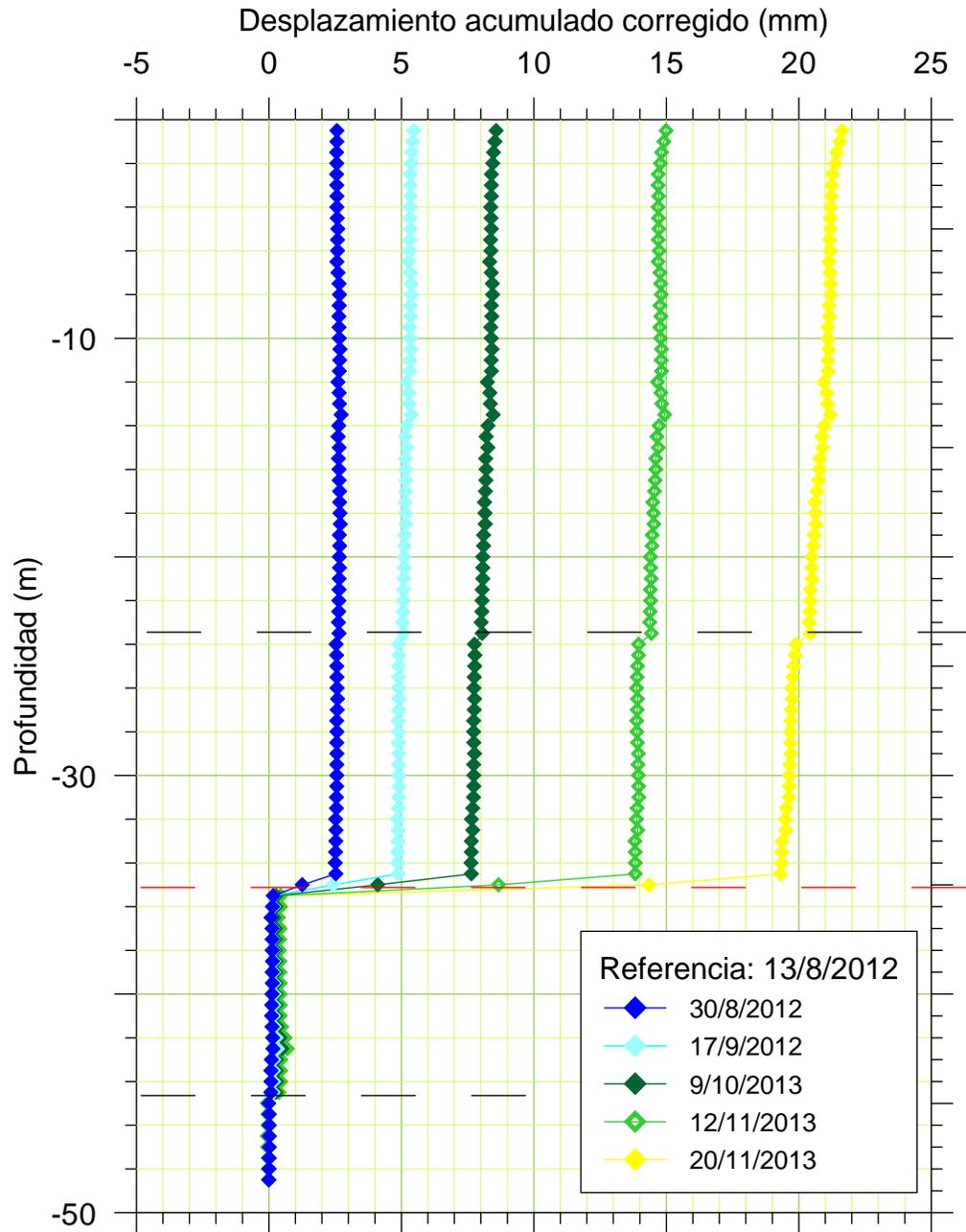


Dirección B

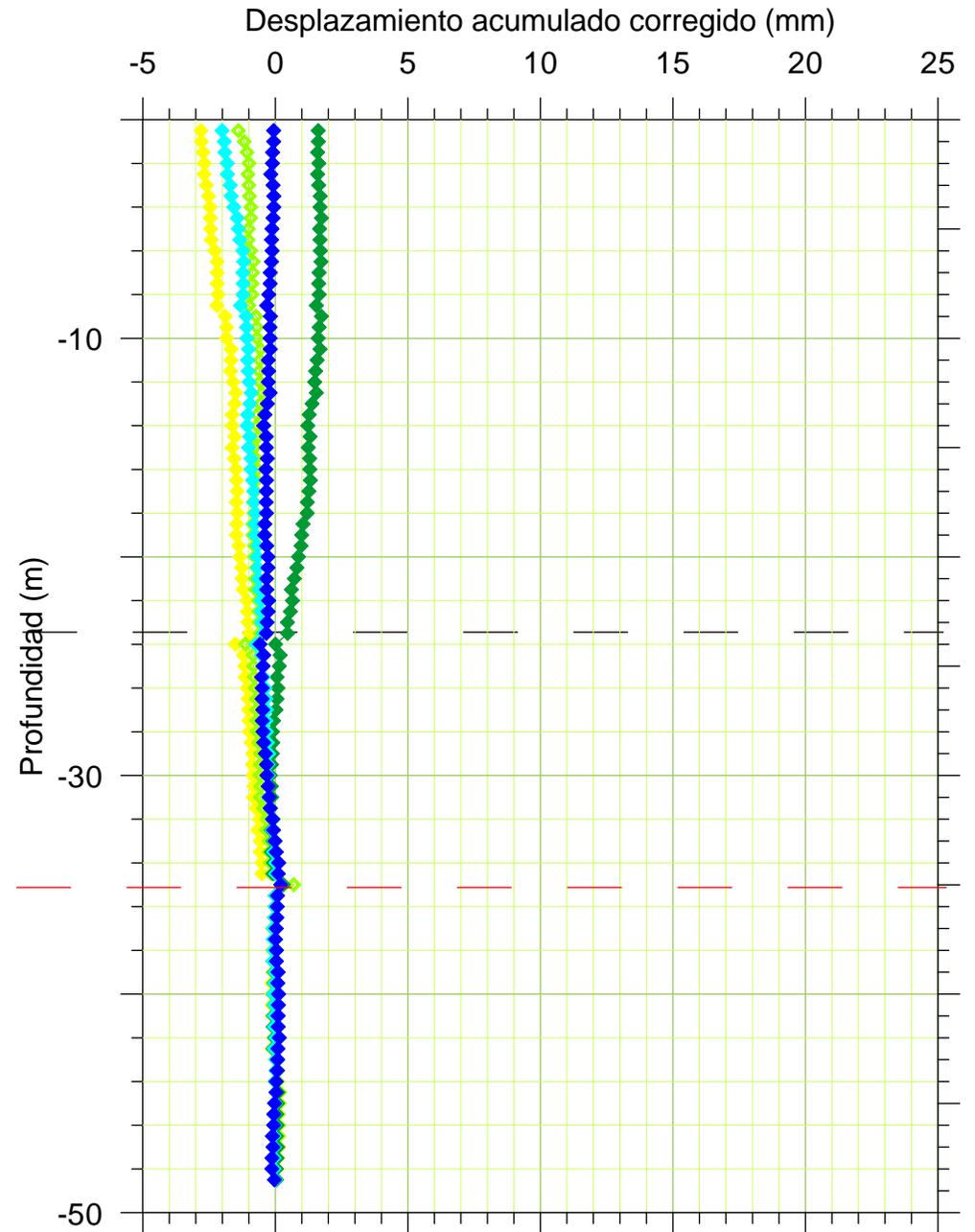


SCI-11

Dirección A

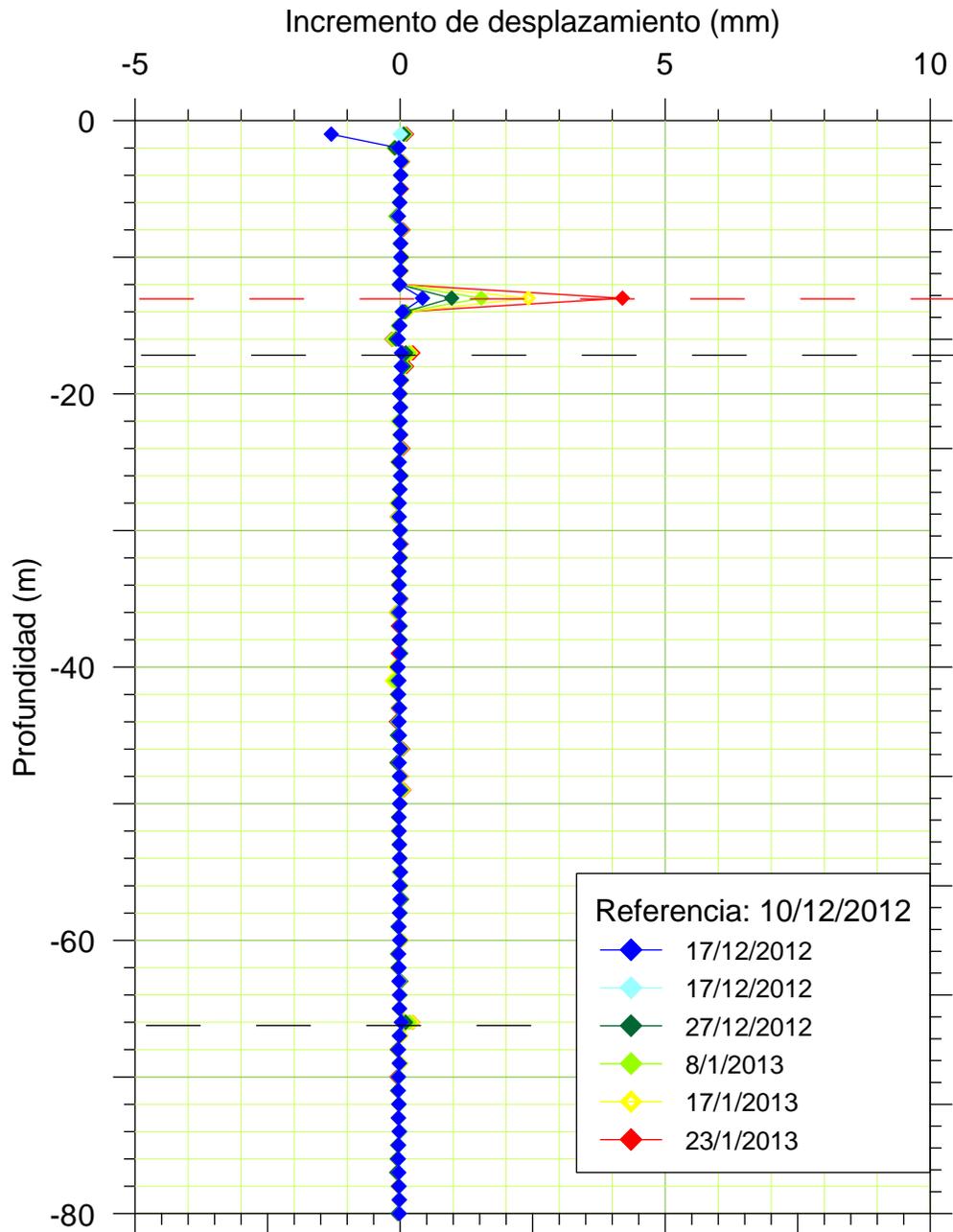


Dirección B

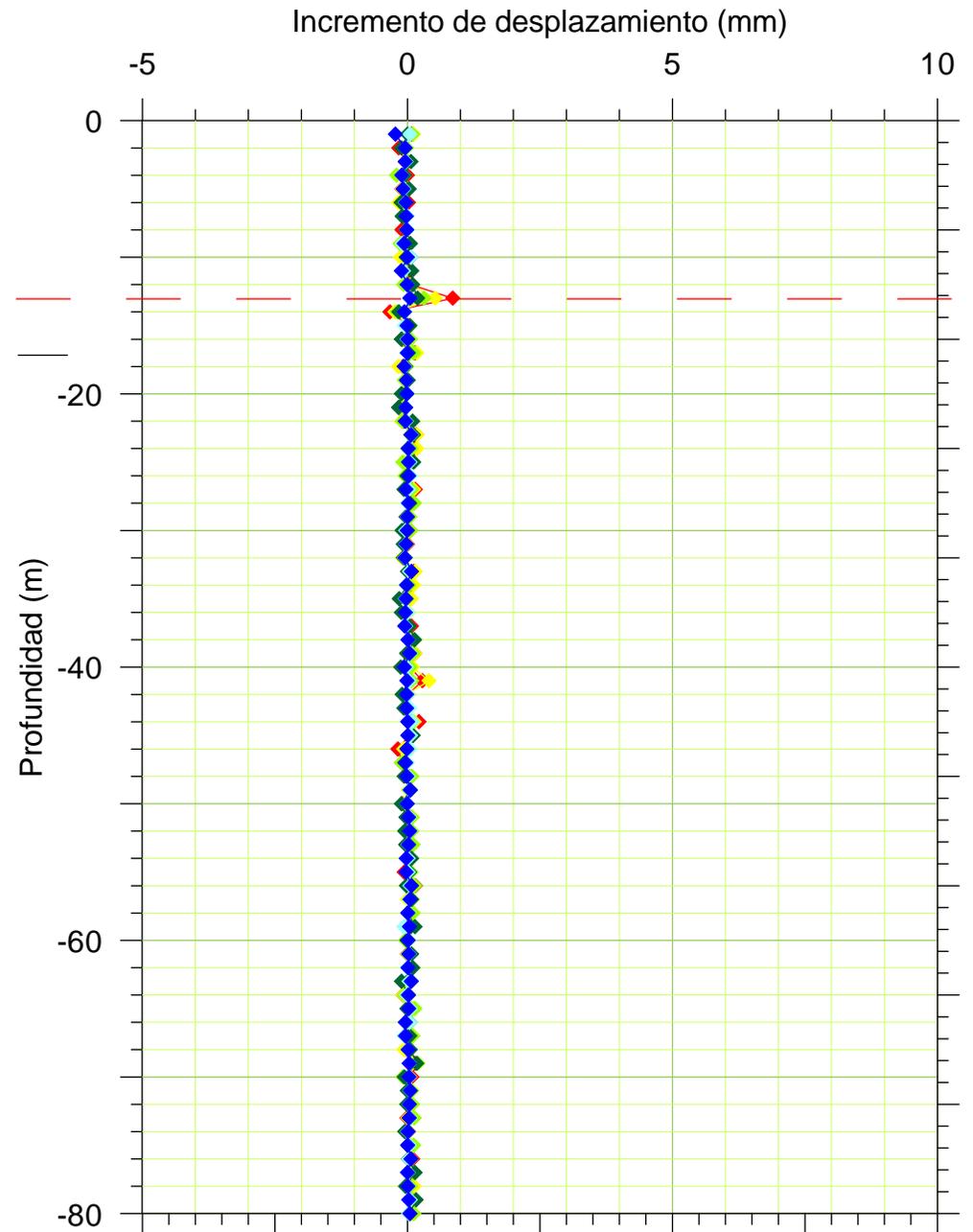


SCI-13

Dirección A

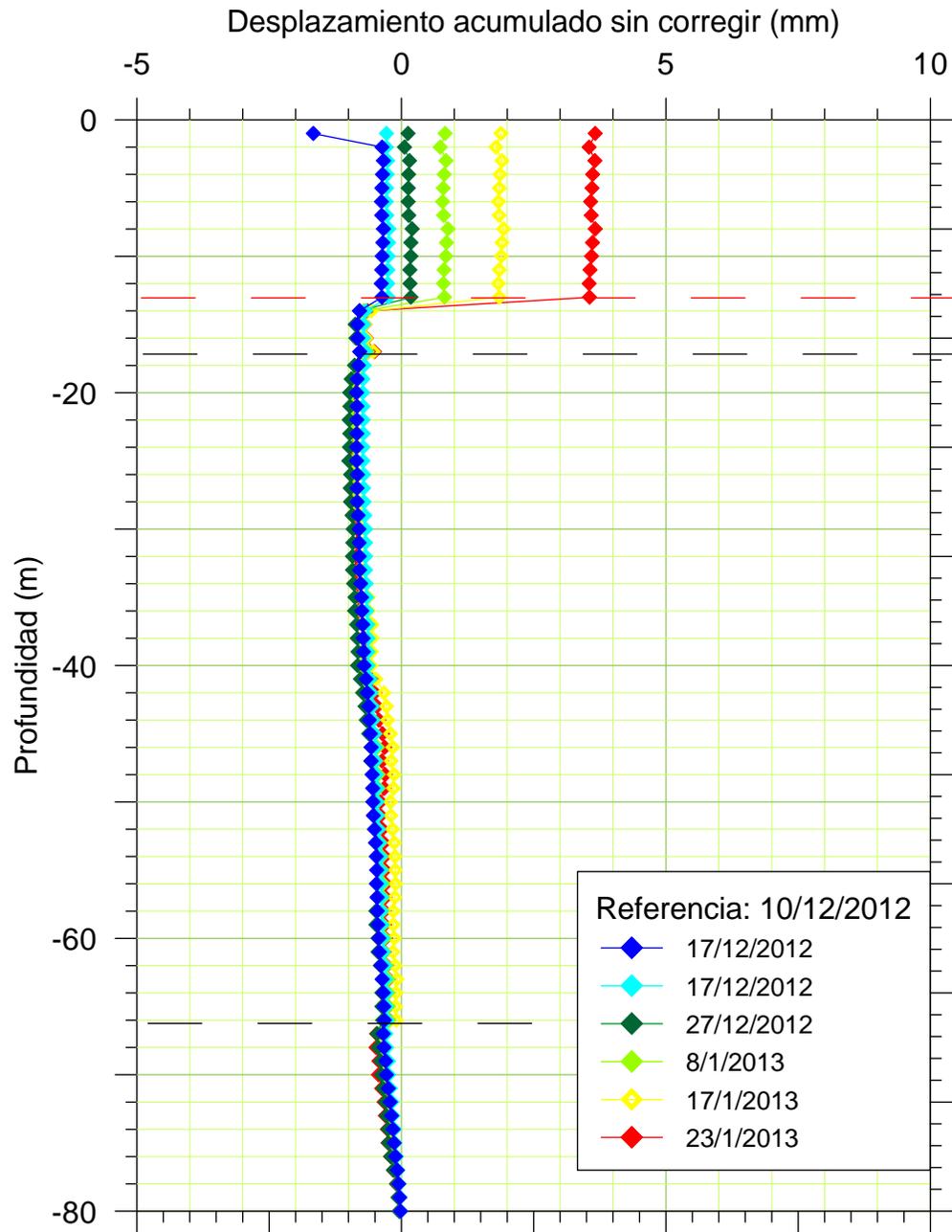


Dirección B

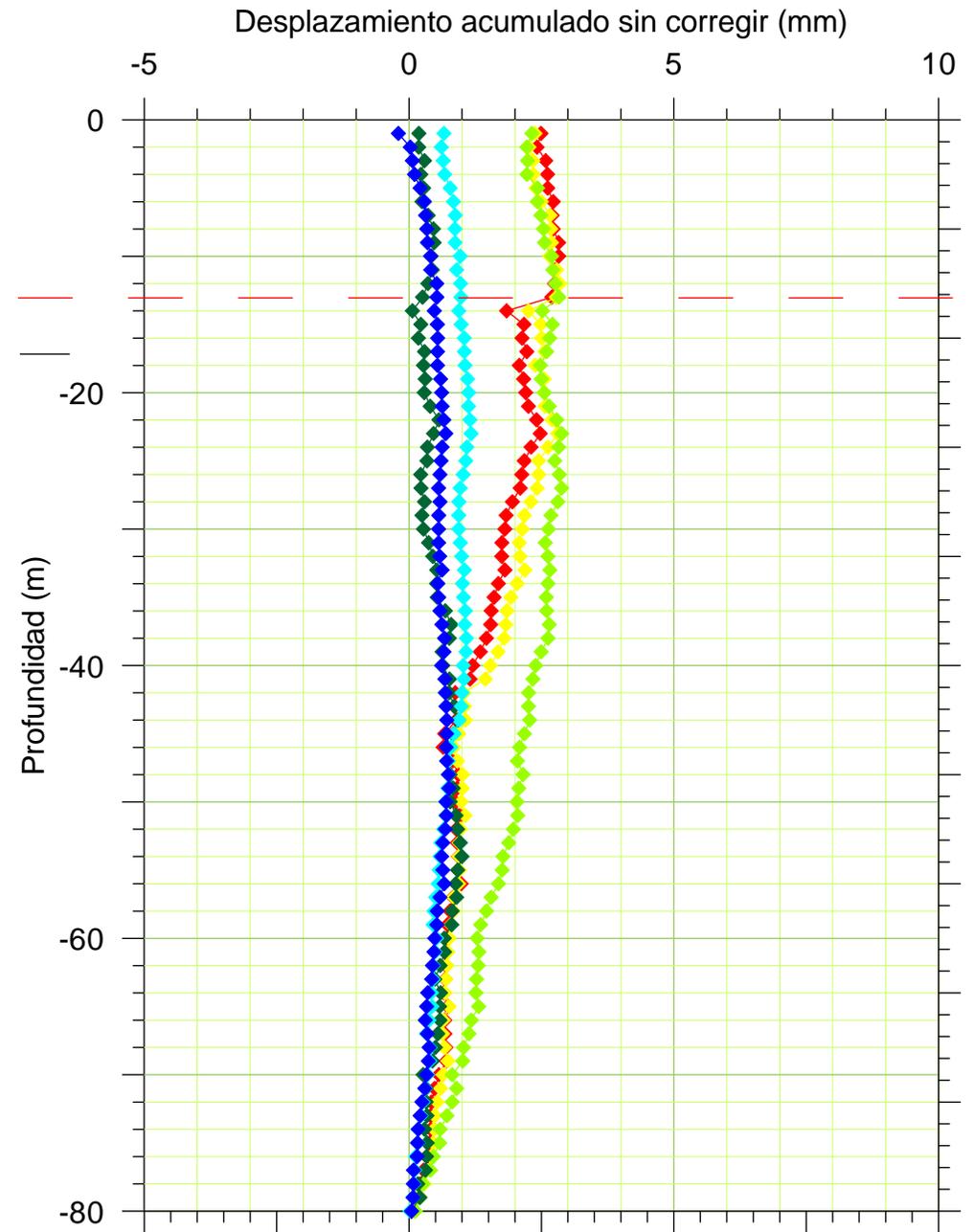


SCI-13

Dirección A

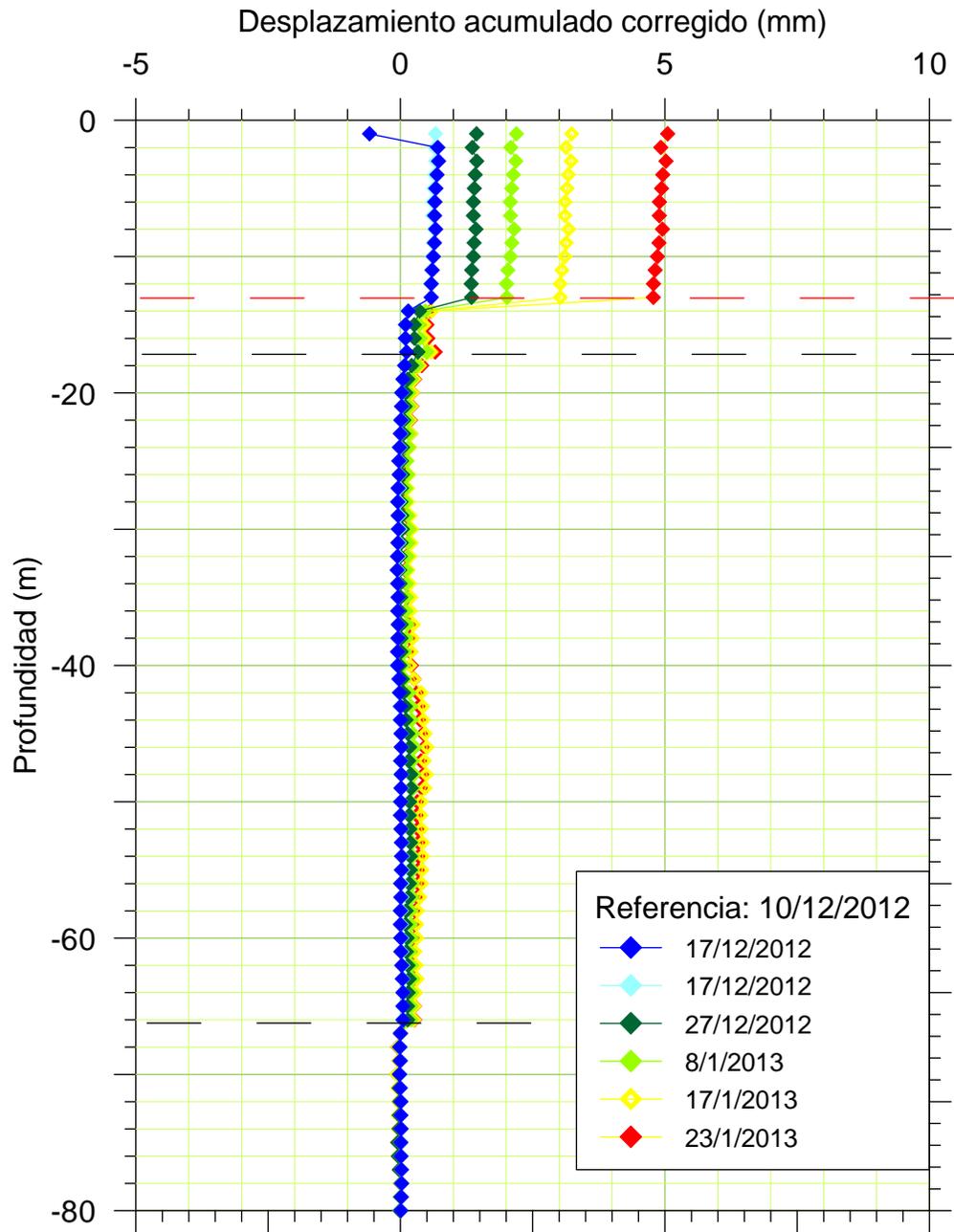


Dirección B

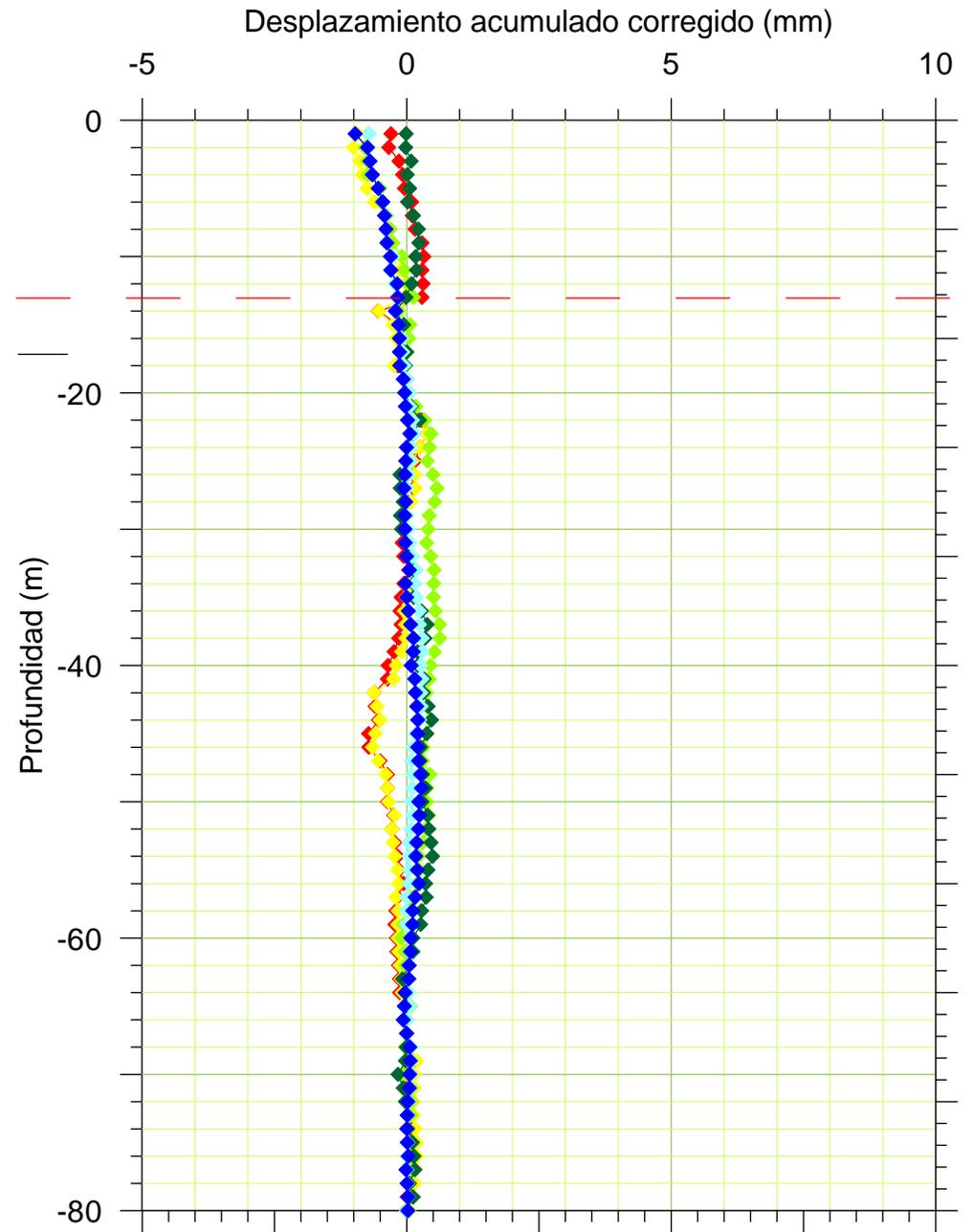


SCI-13

Dirección A

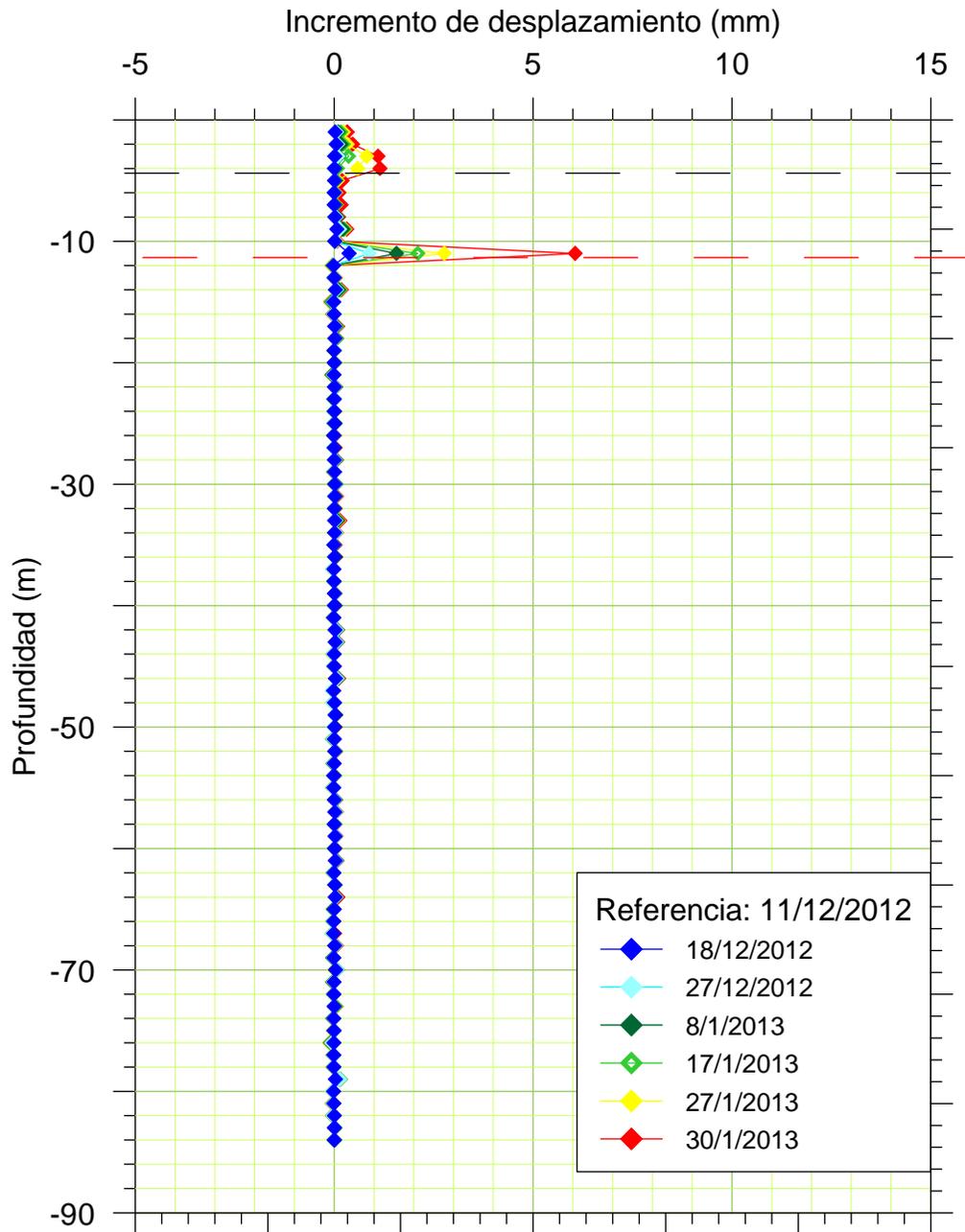


Dirección B

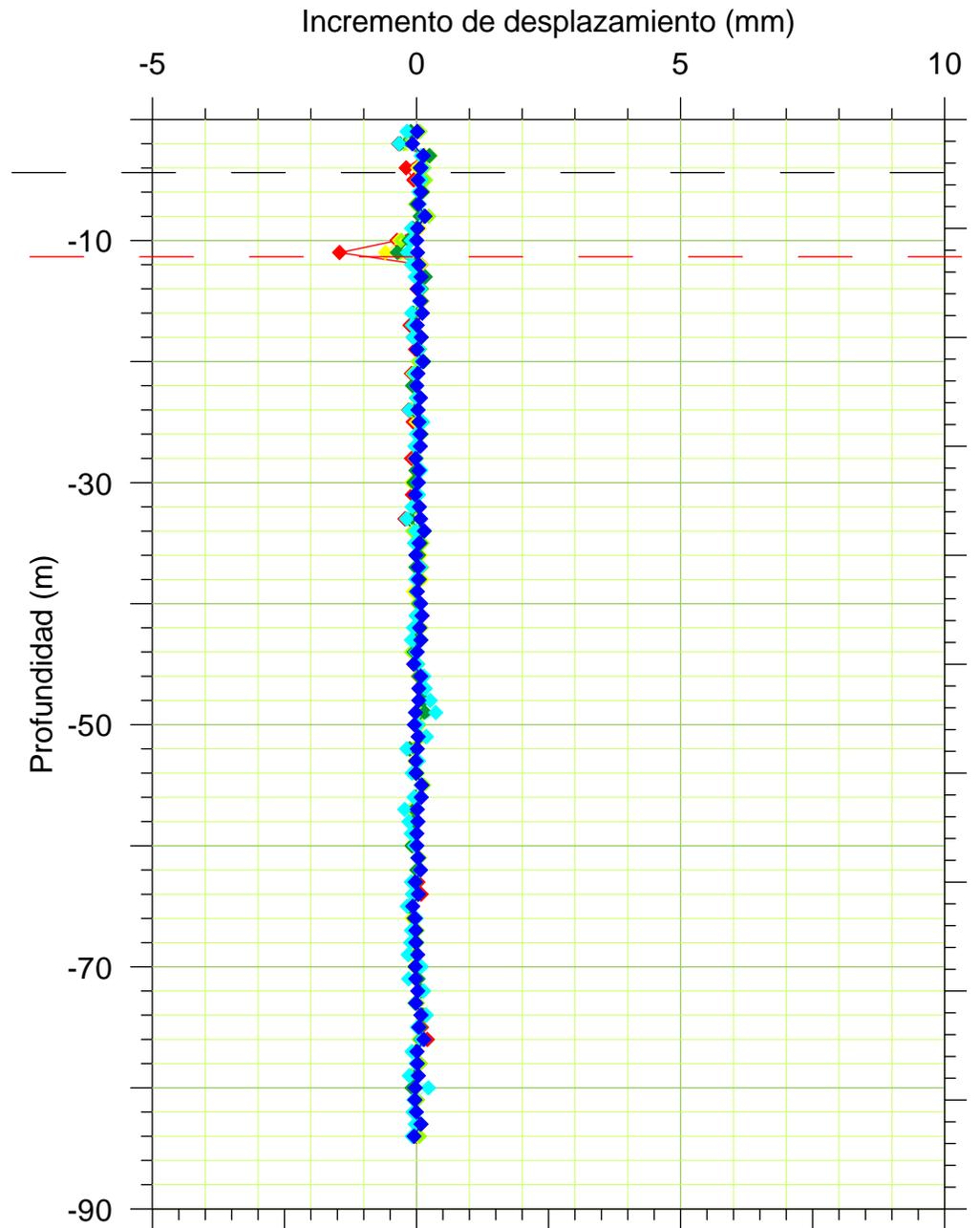


SCI-14

Dirección A

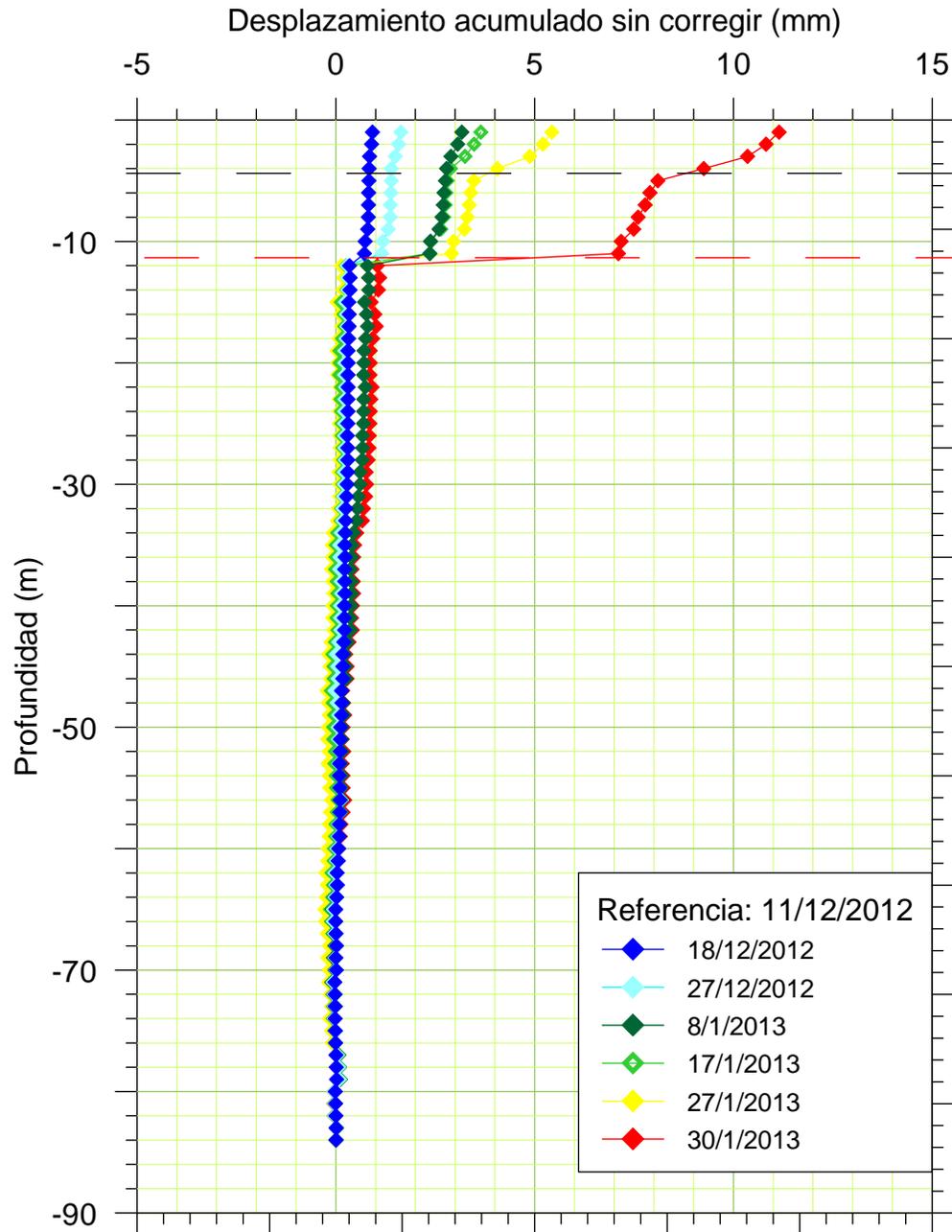


Dirección B

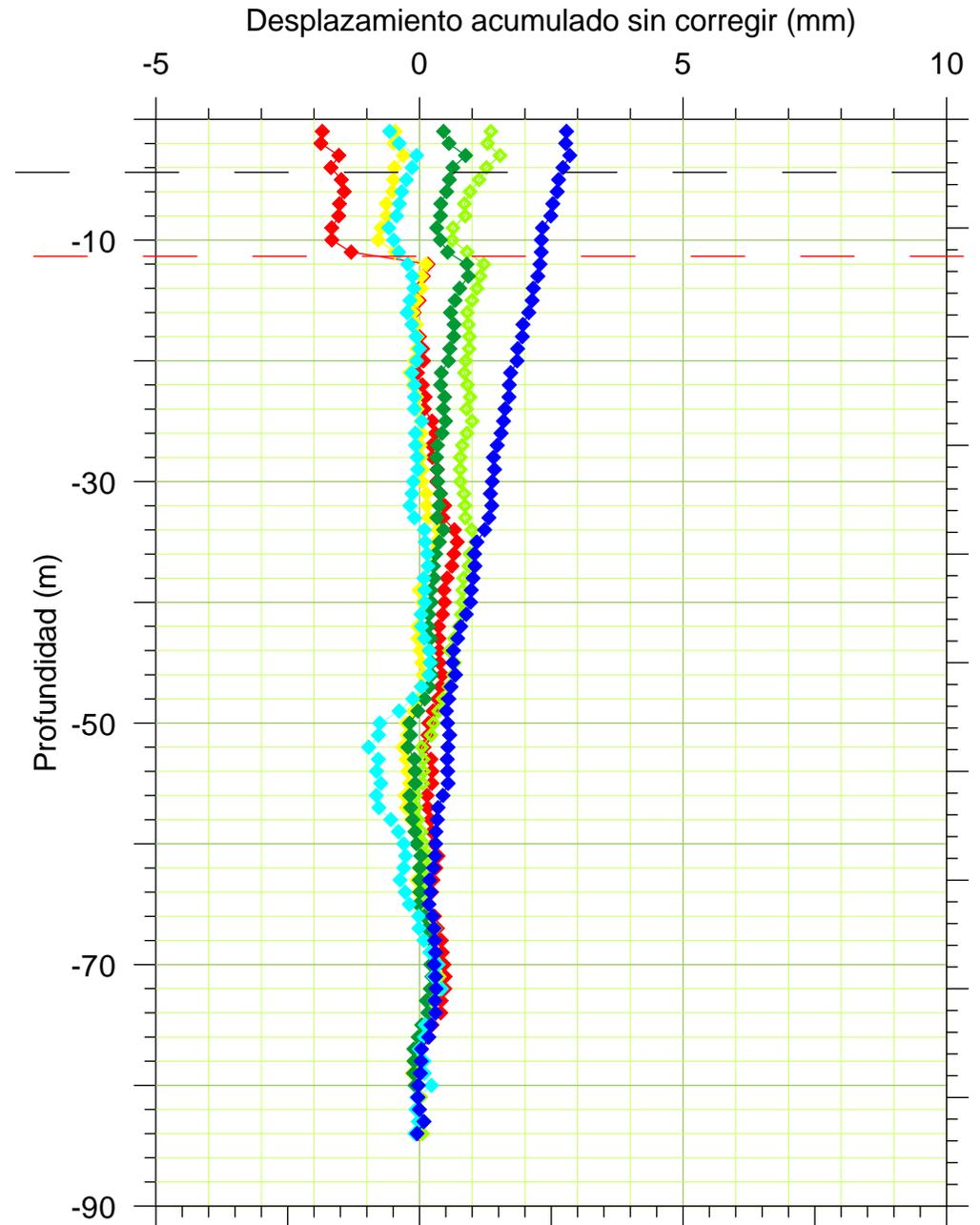


SCI-14

Dirección A

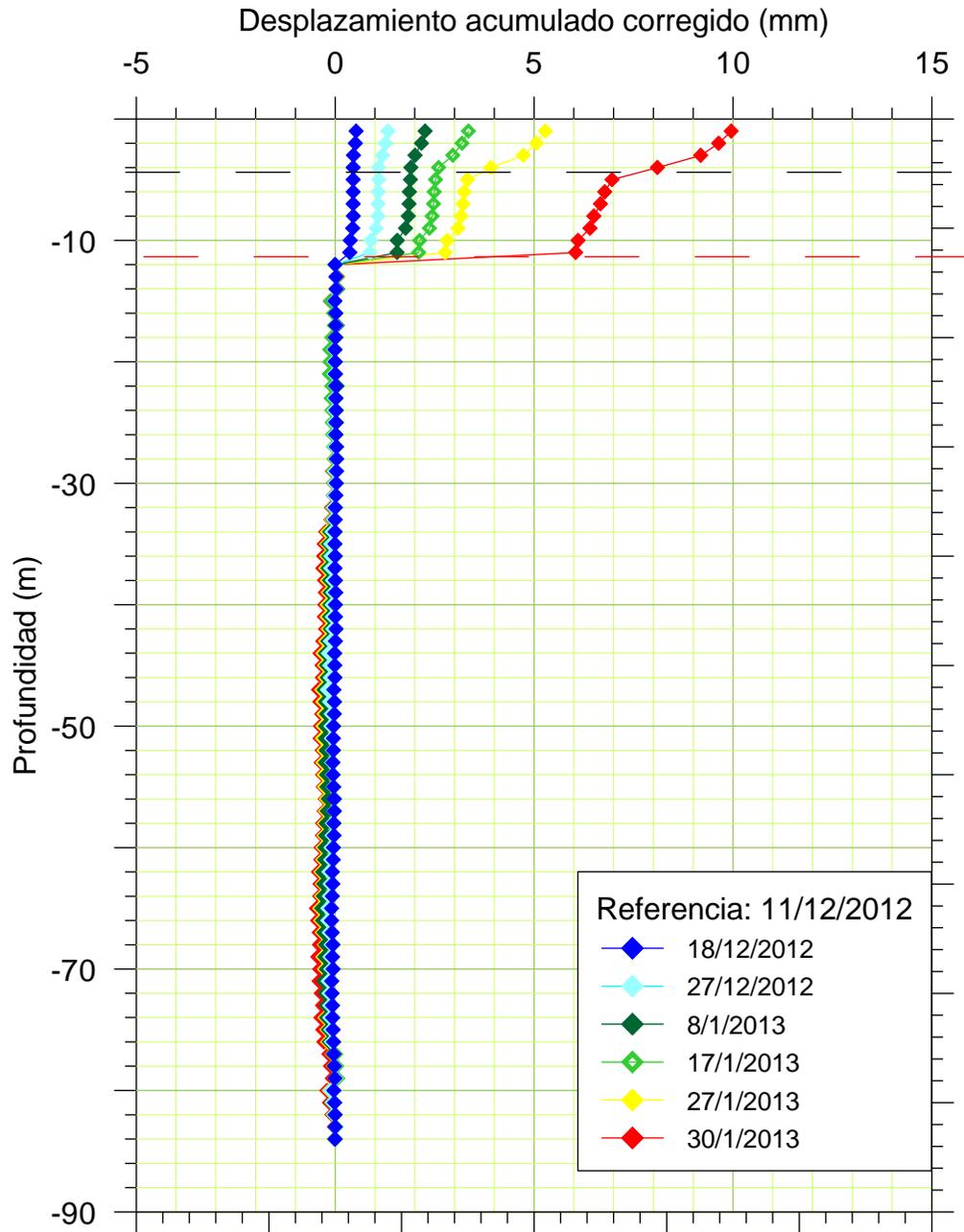


Dirección B

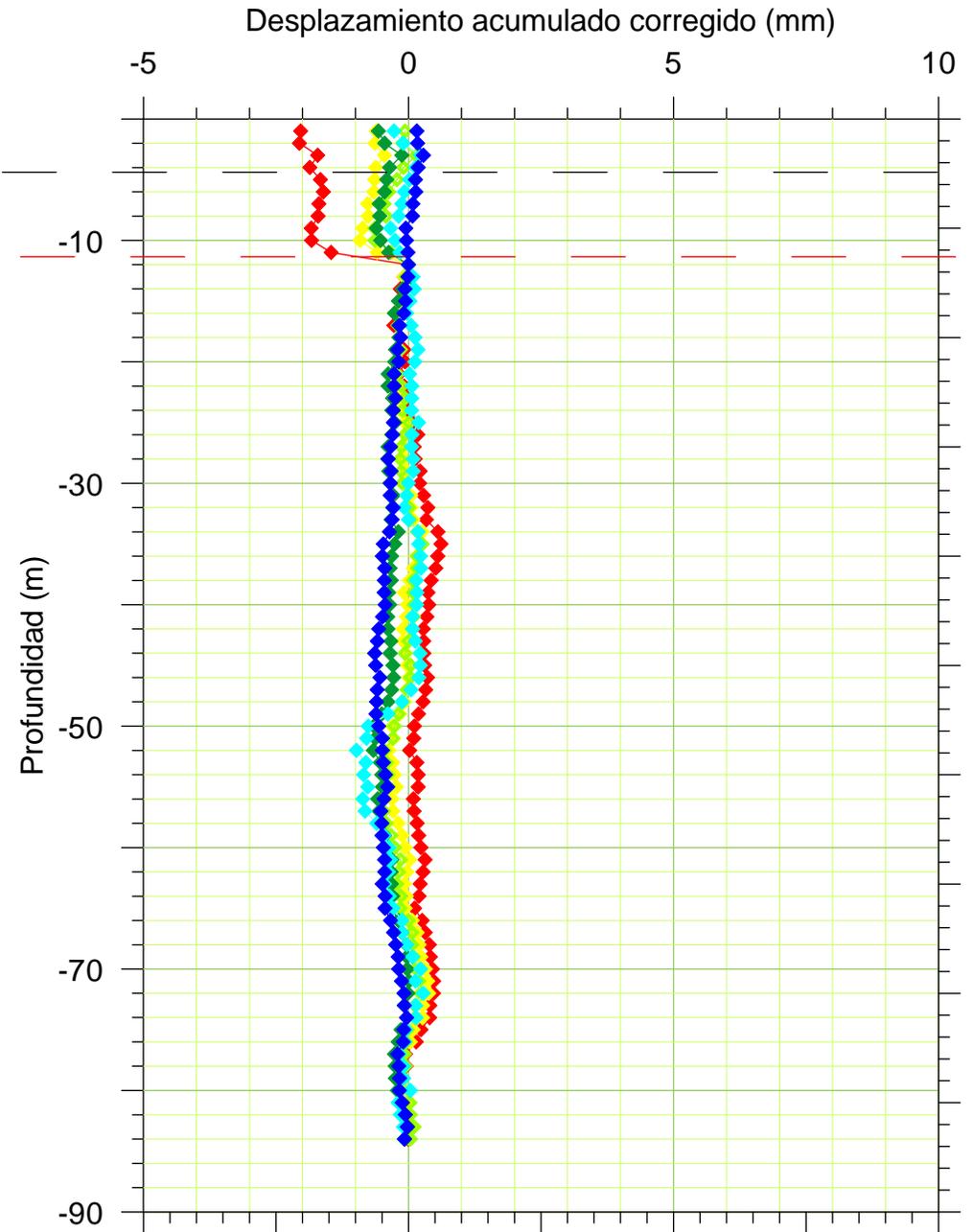


SCI-14

Dirección A

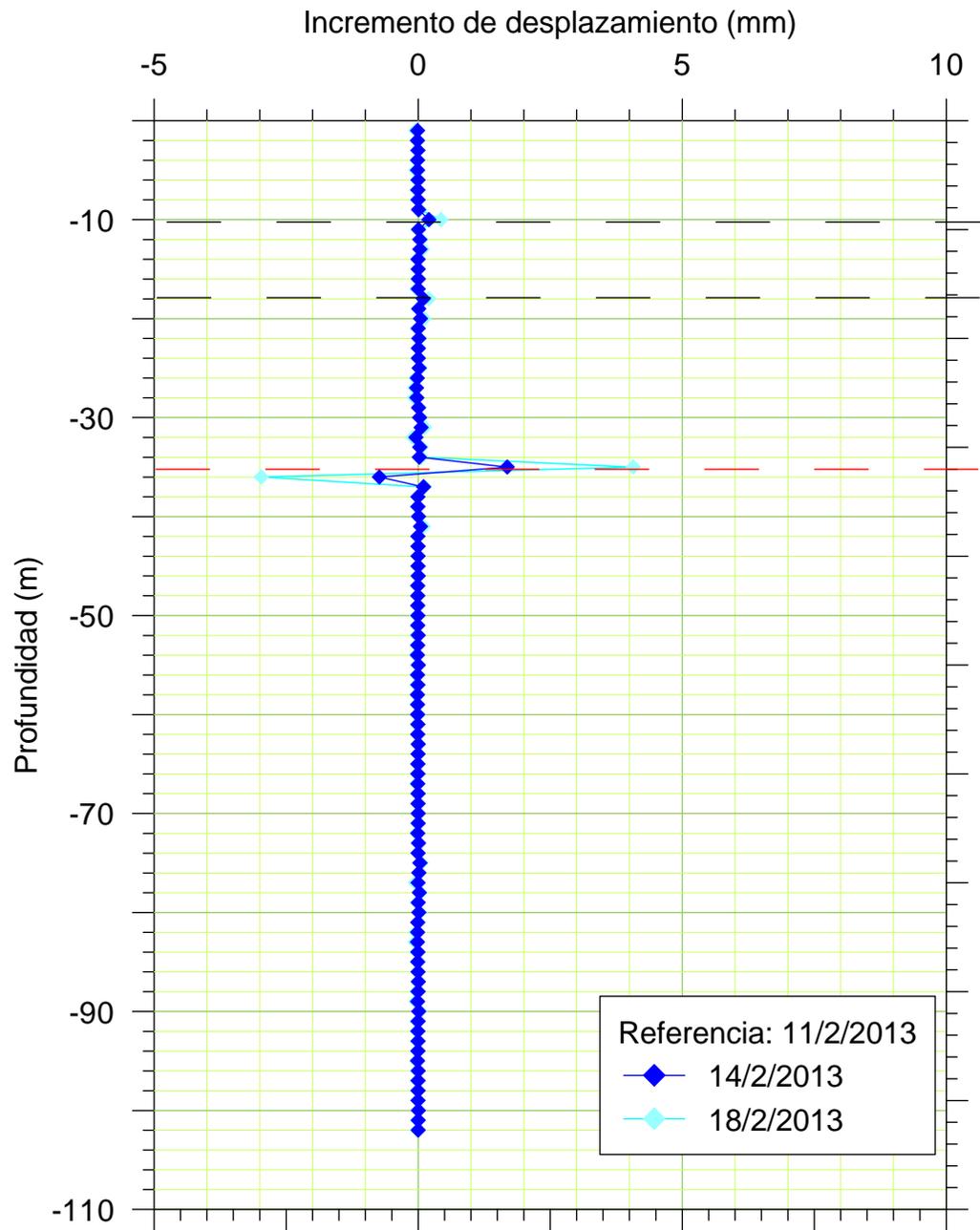


Dirección B

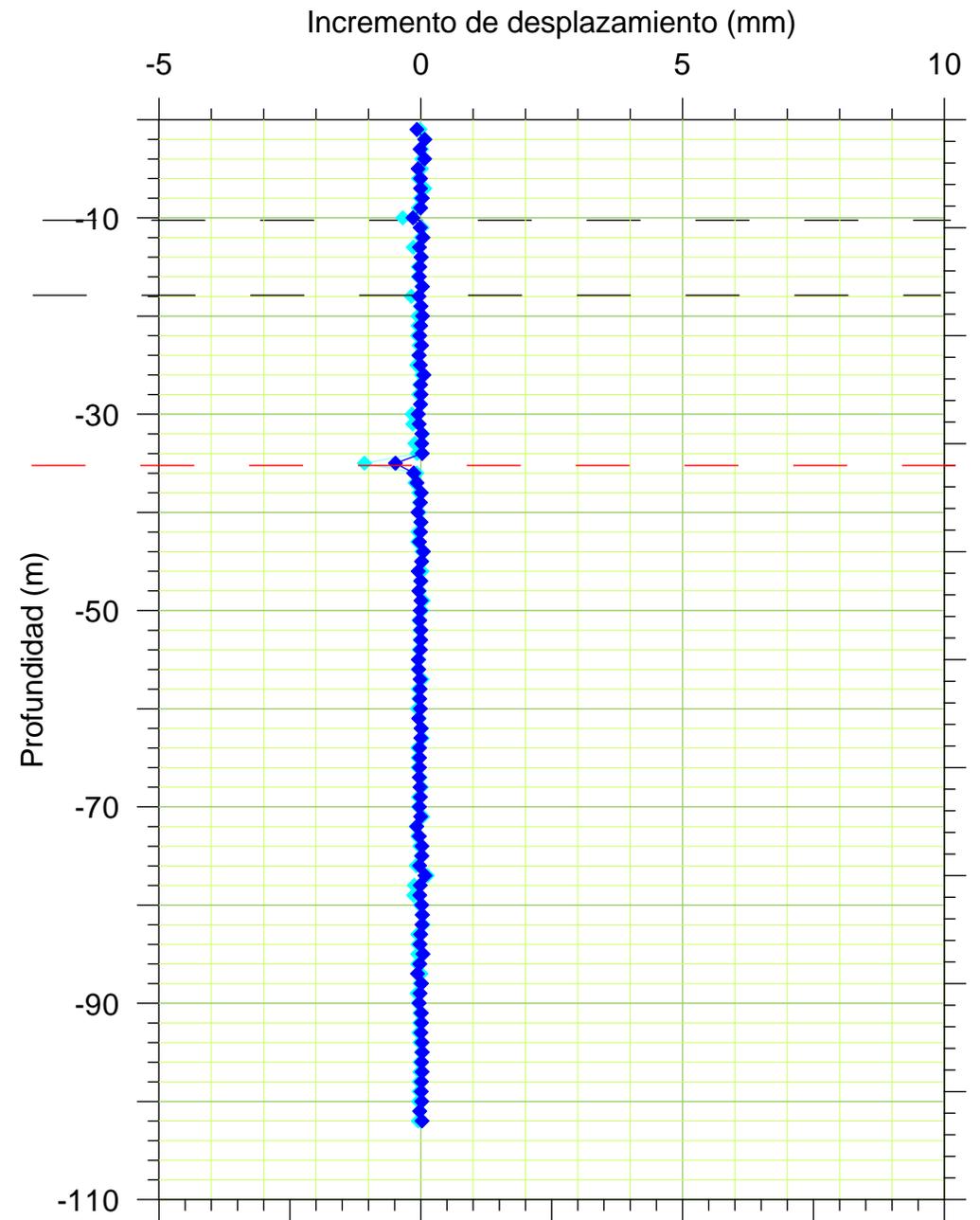


SCI-15

Dirección A

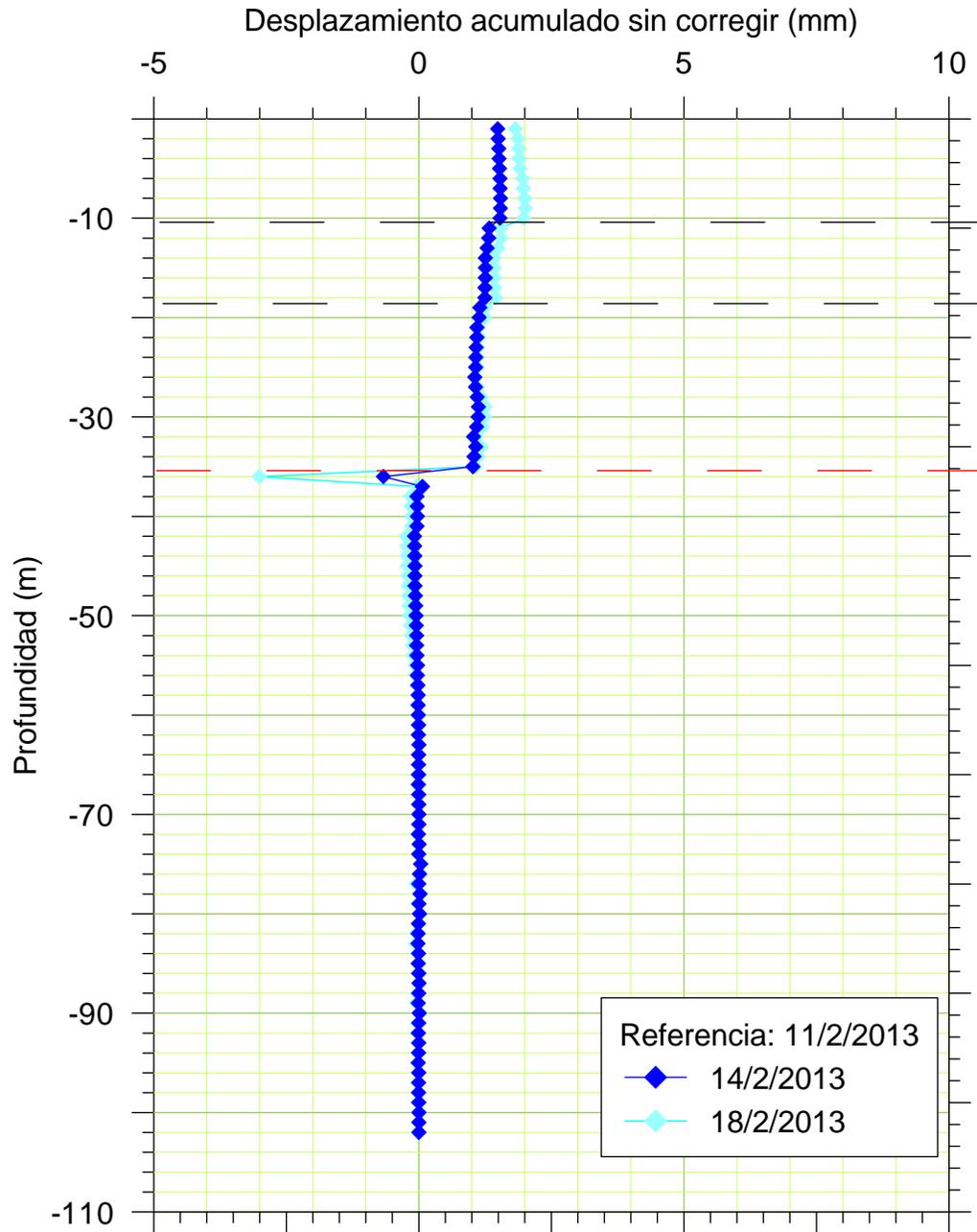


Dirección B

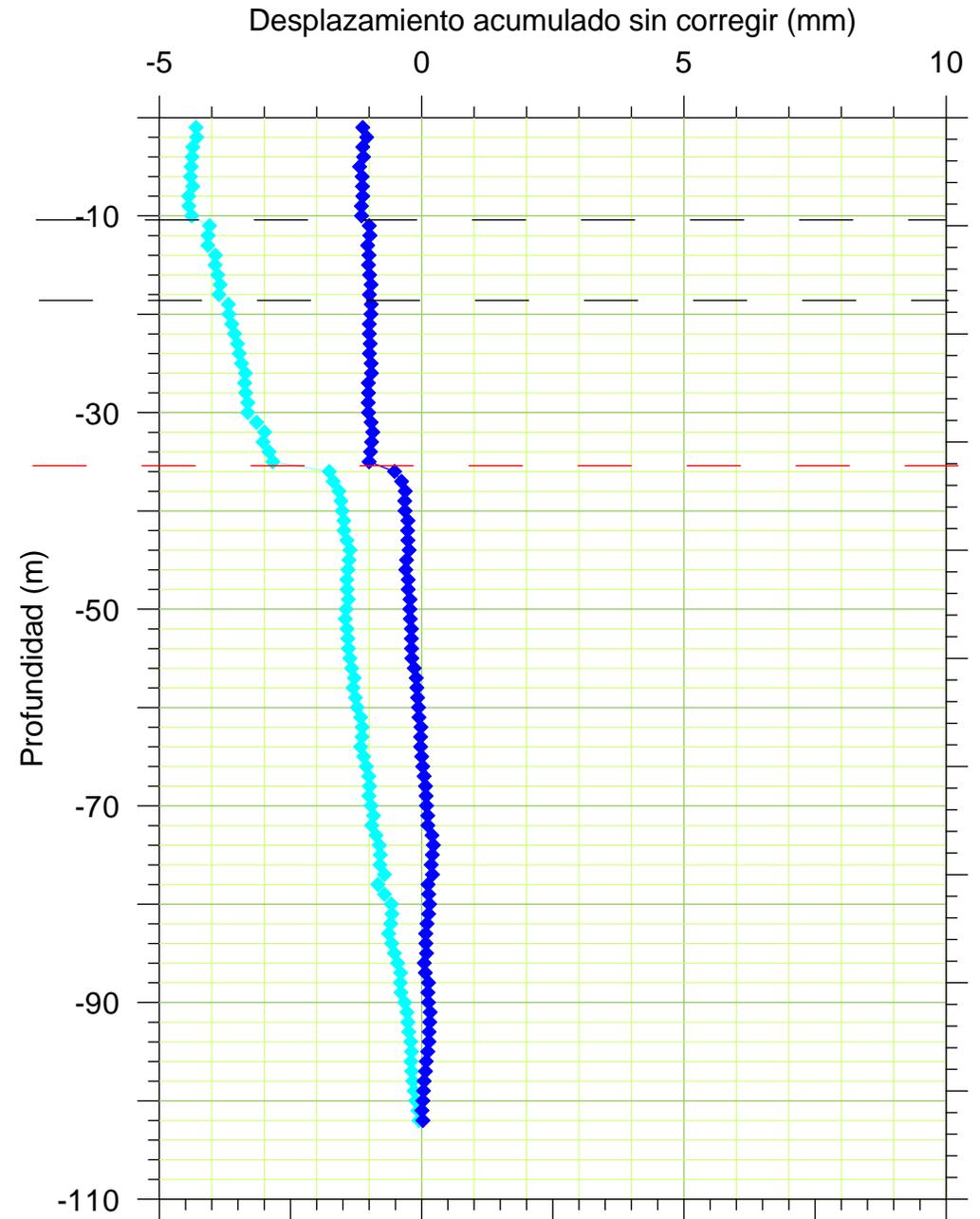


SCI-15

Dirección A

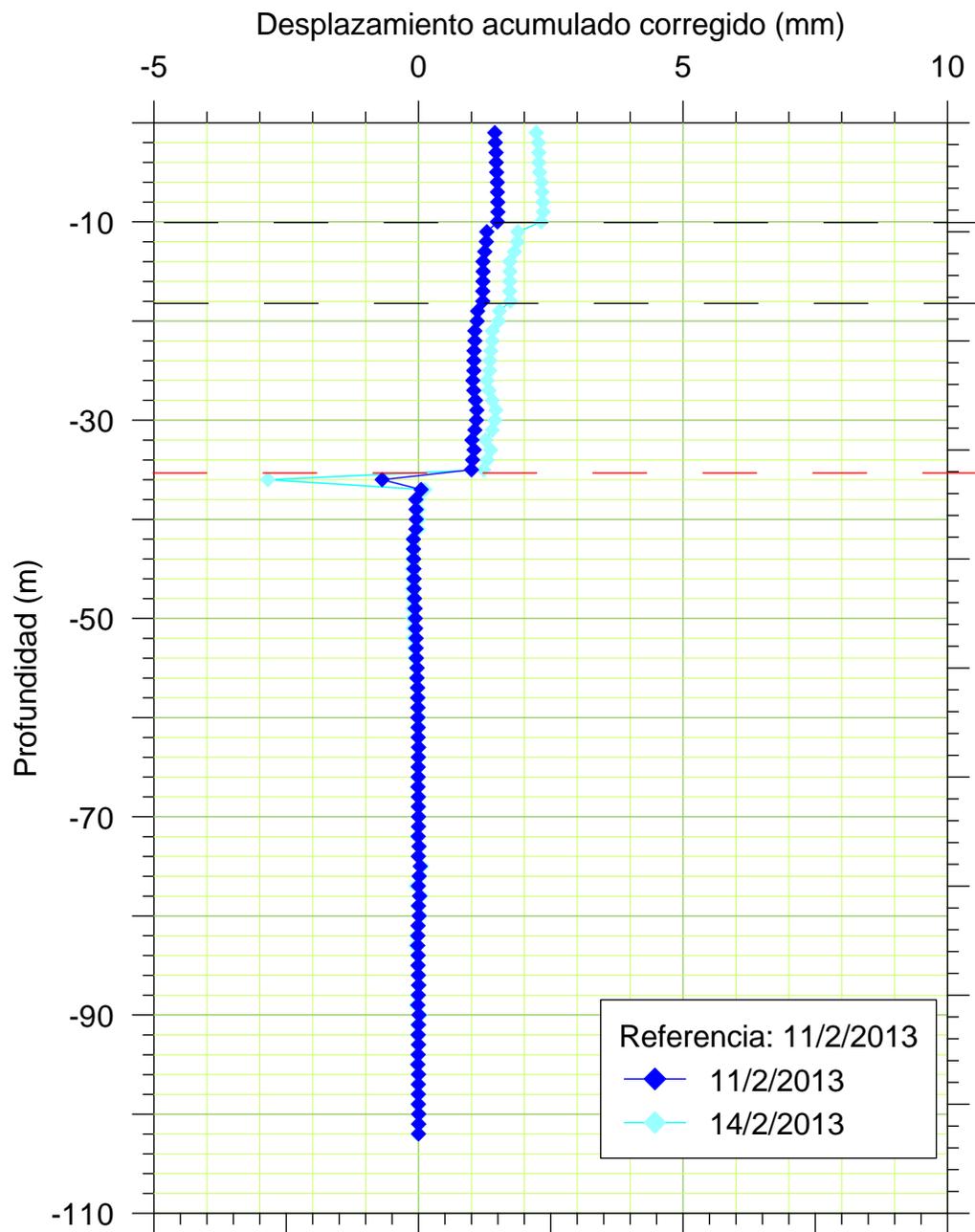


Dirección B

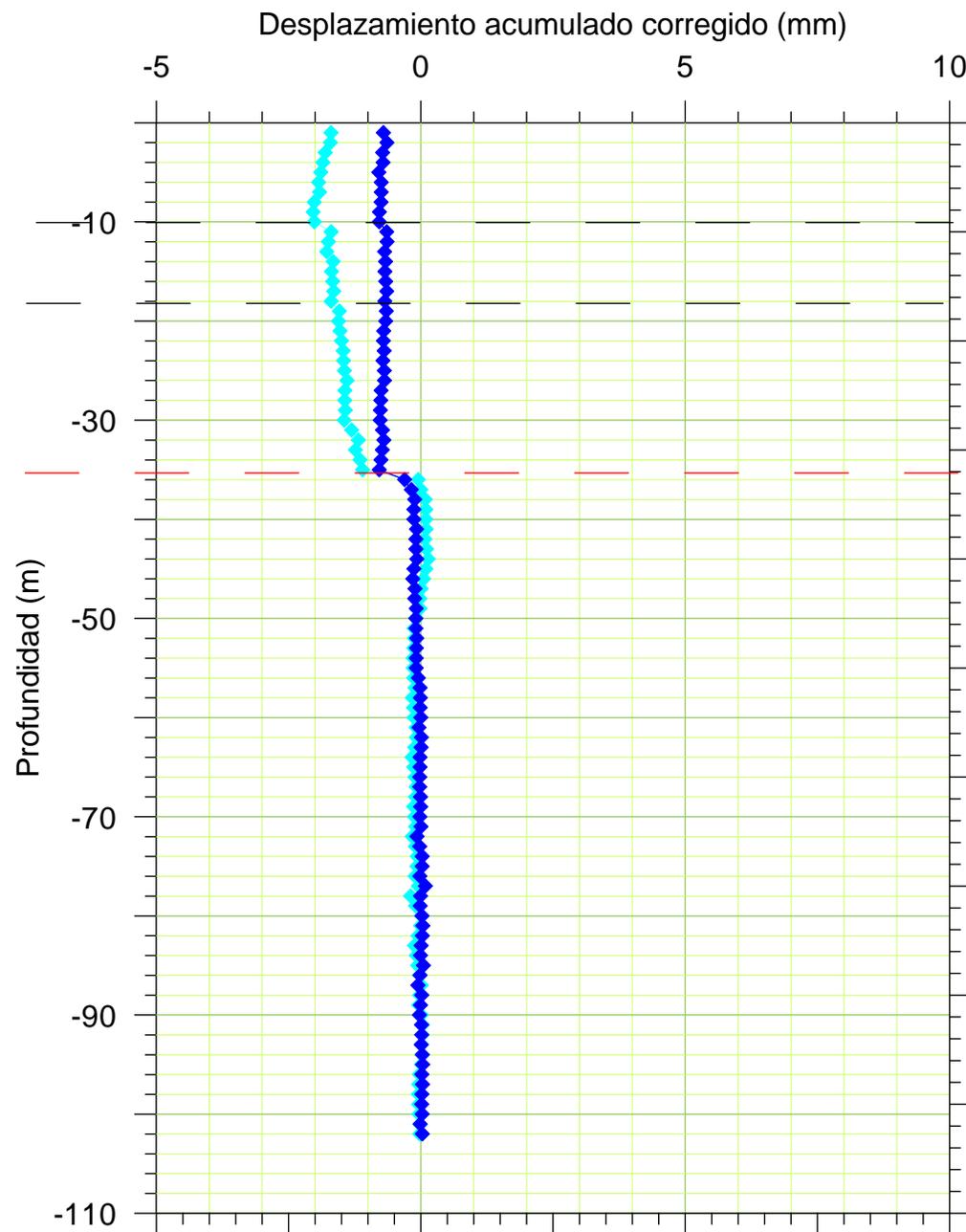


SCI-15

Dirección A

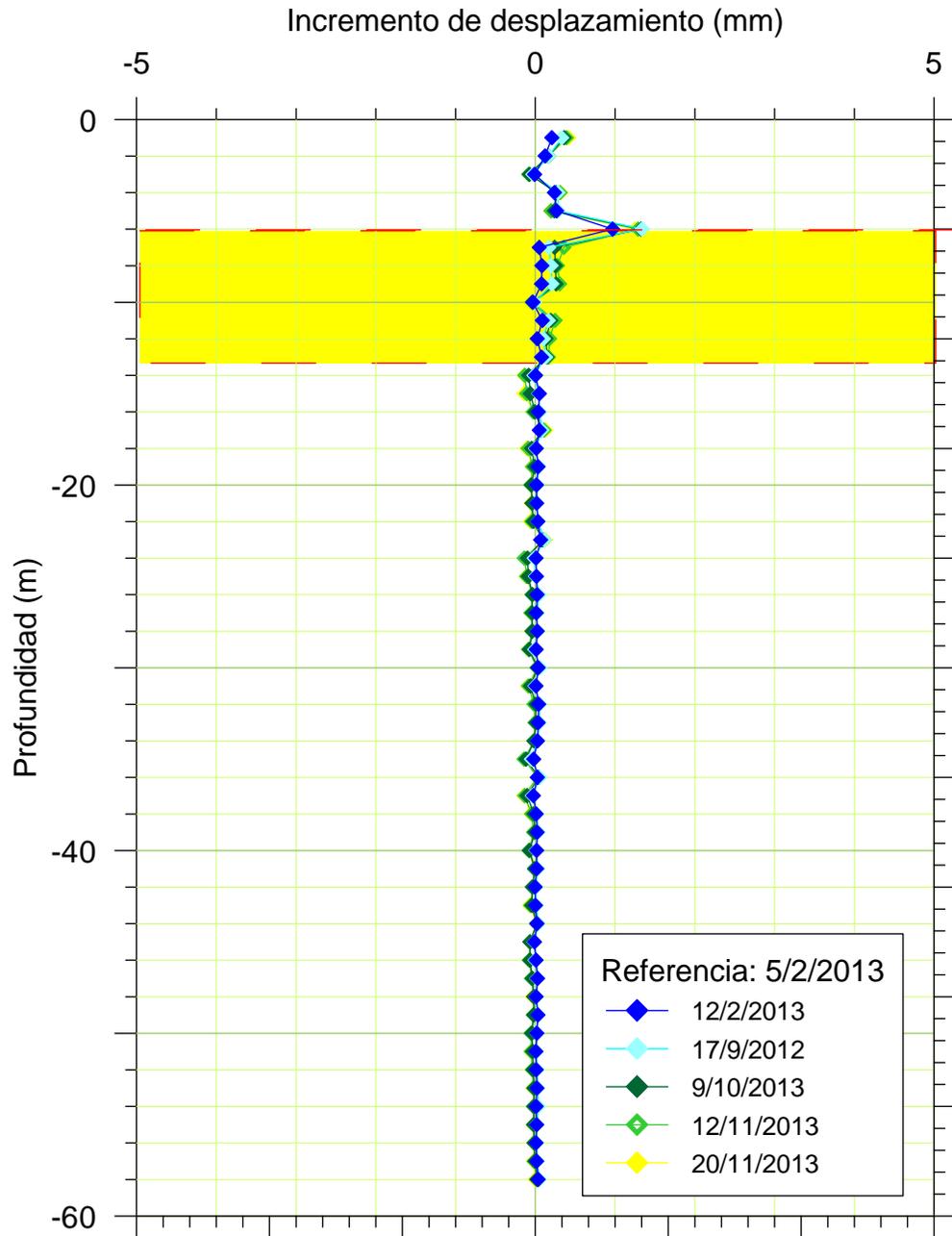


Dirección B

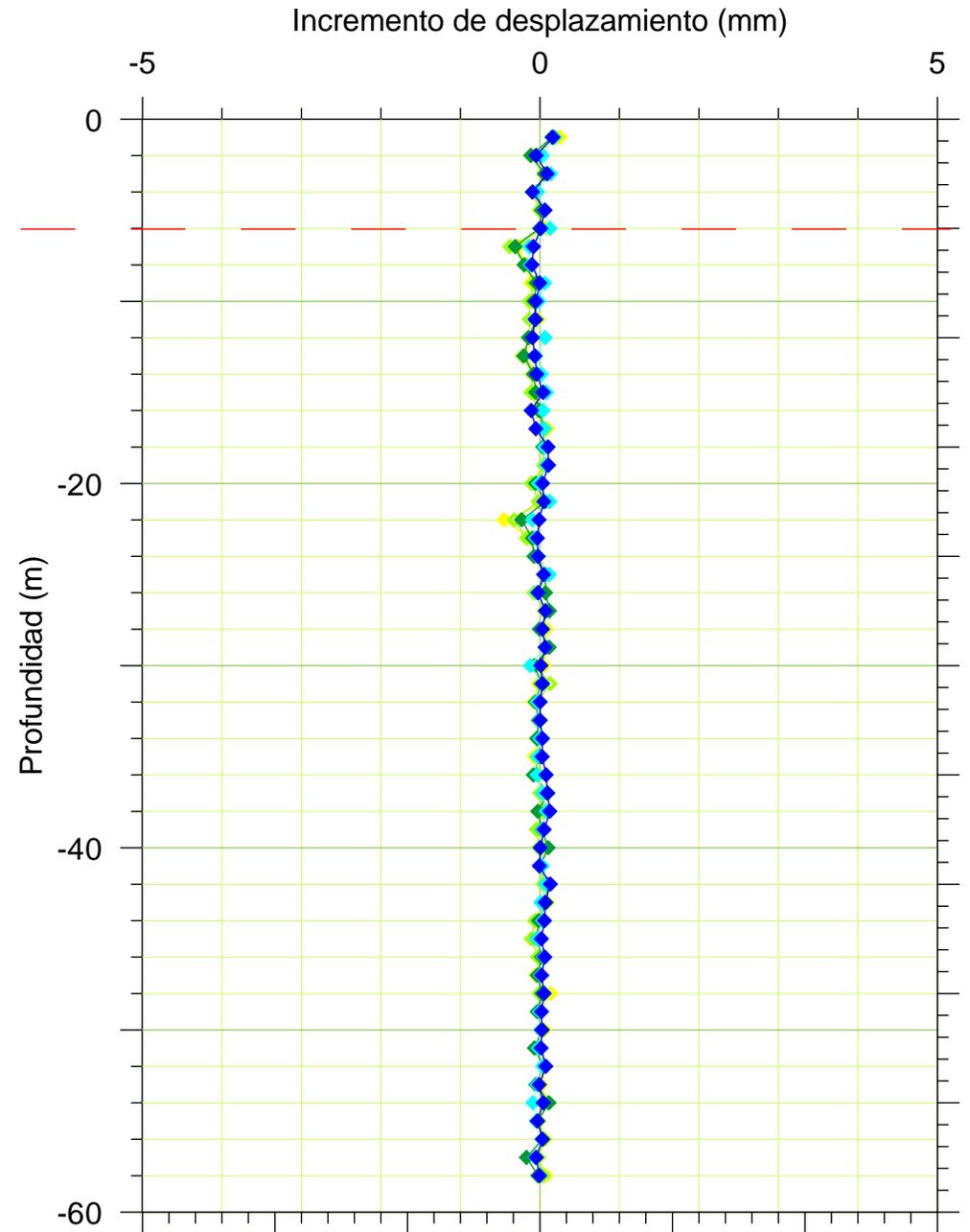


SCI-16

Dirección A



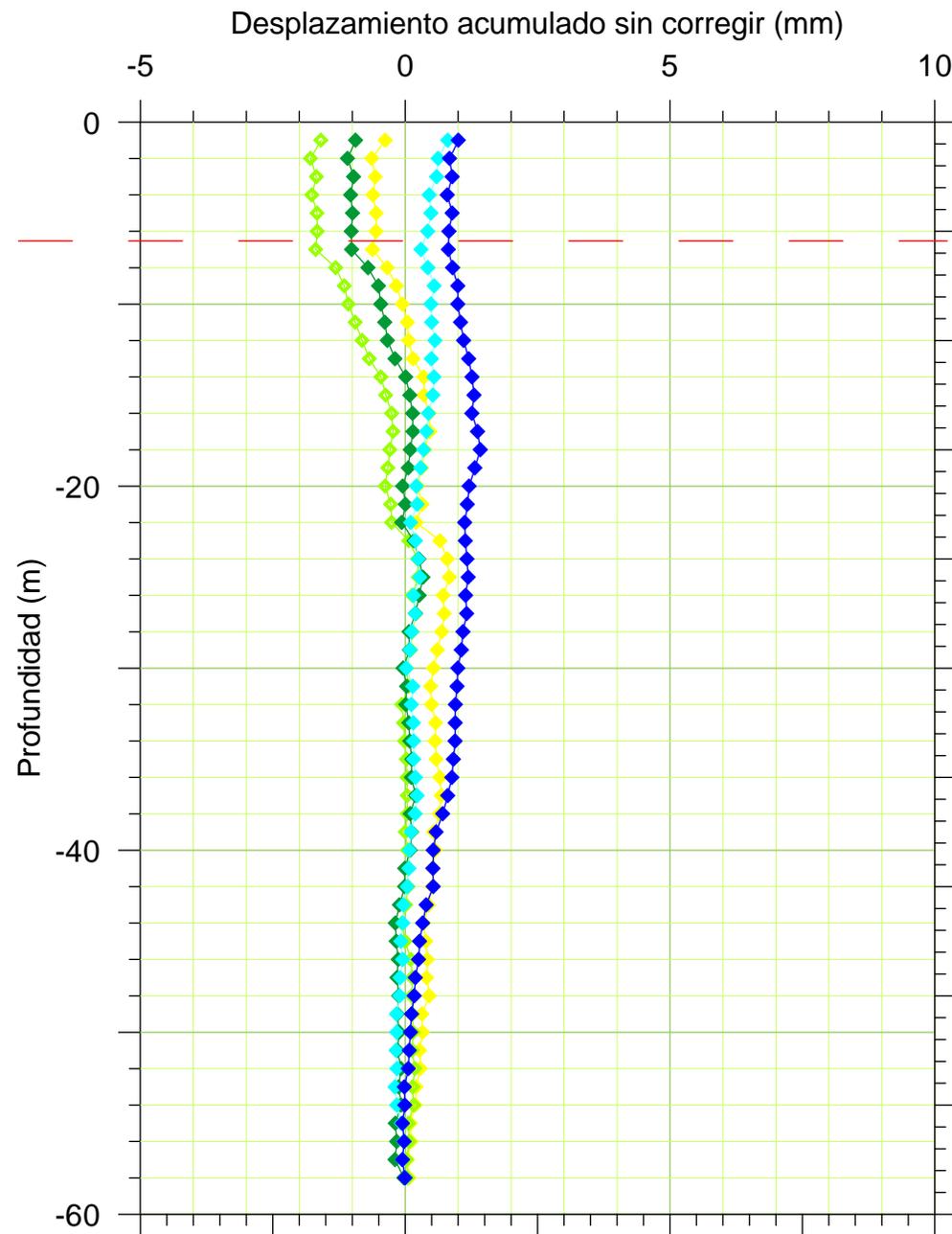
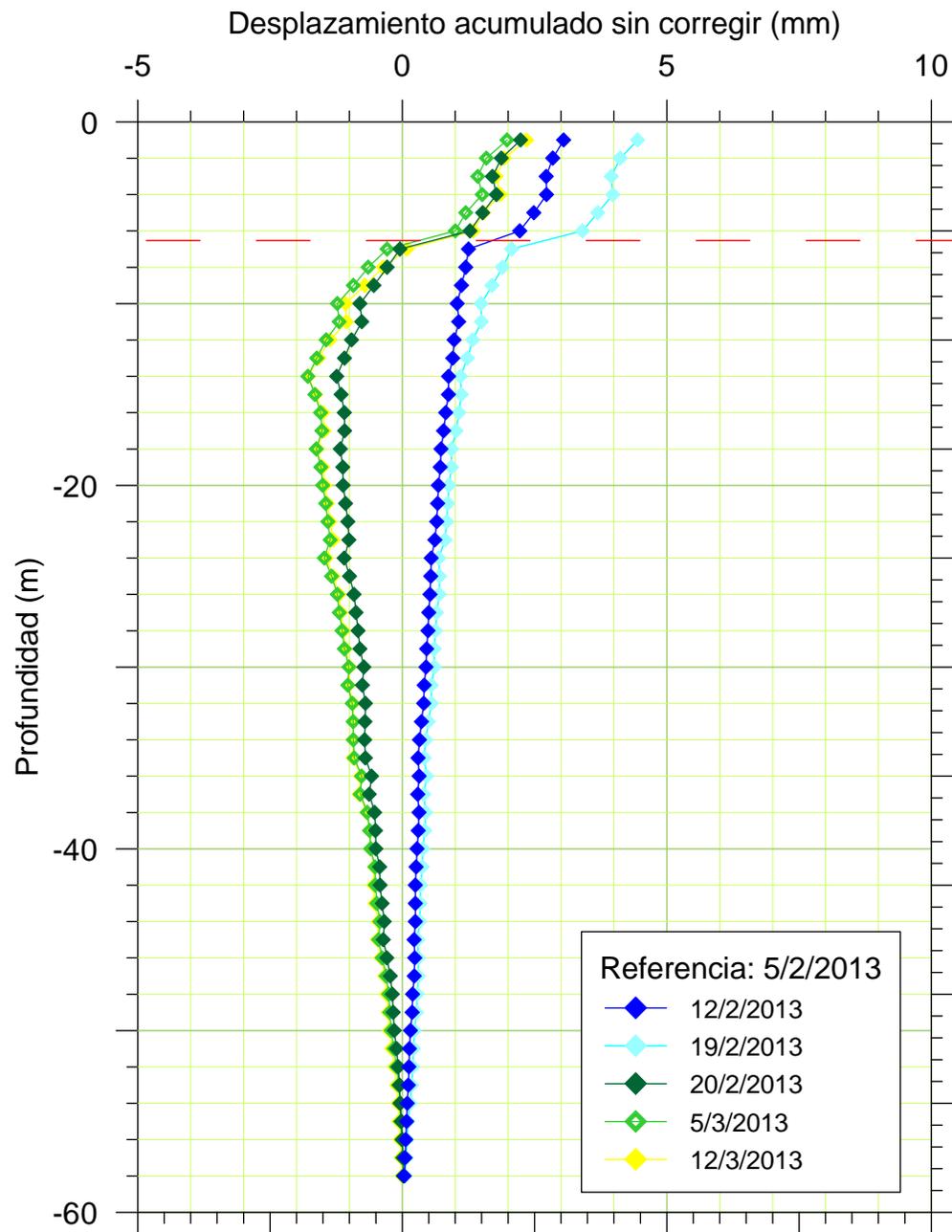
Dirección B



SCI-16

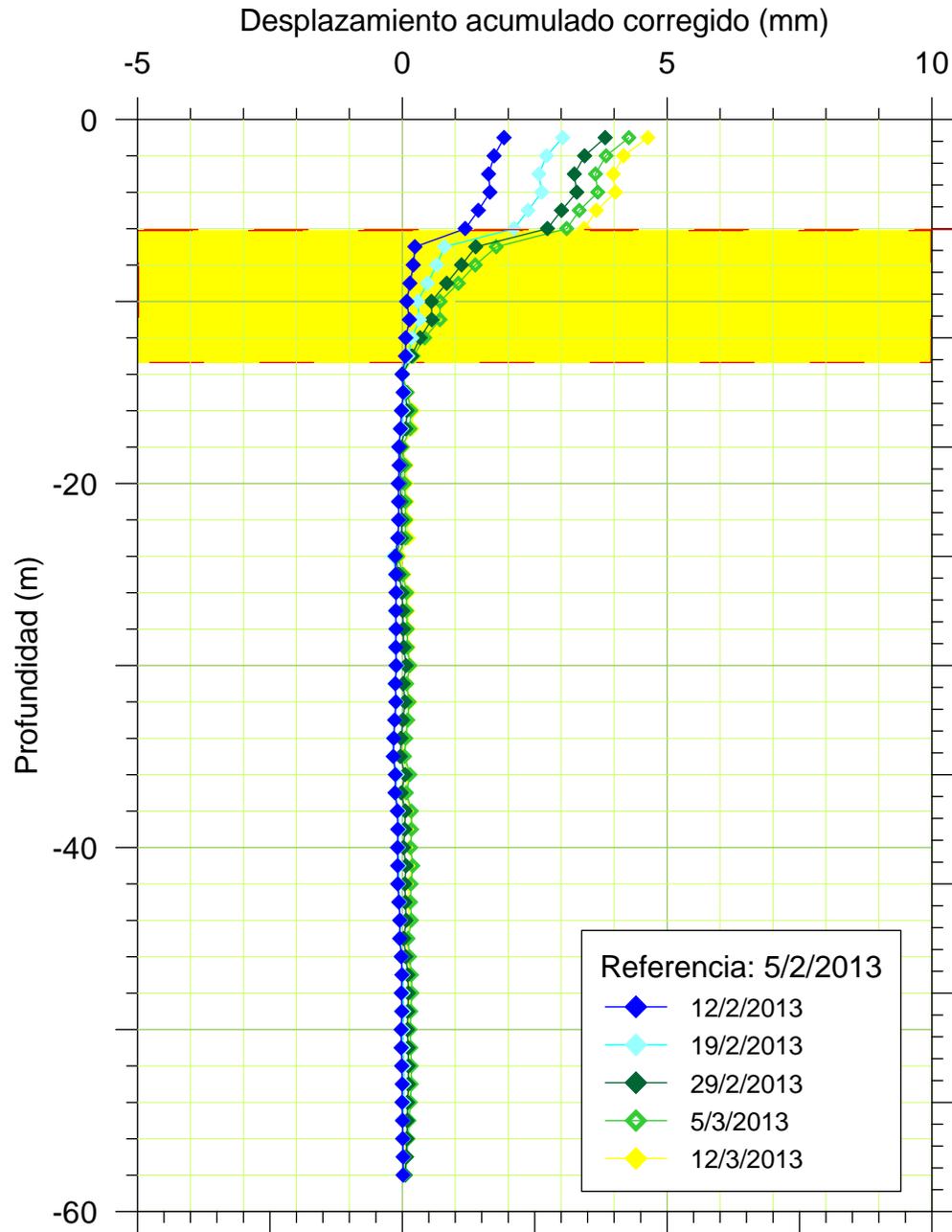
Dirección A

Dirección B

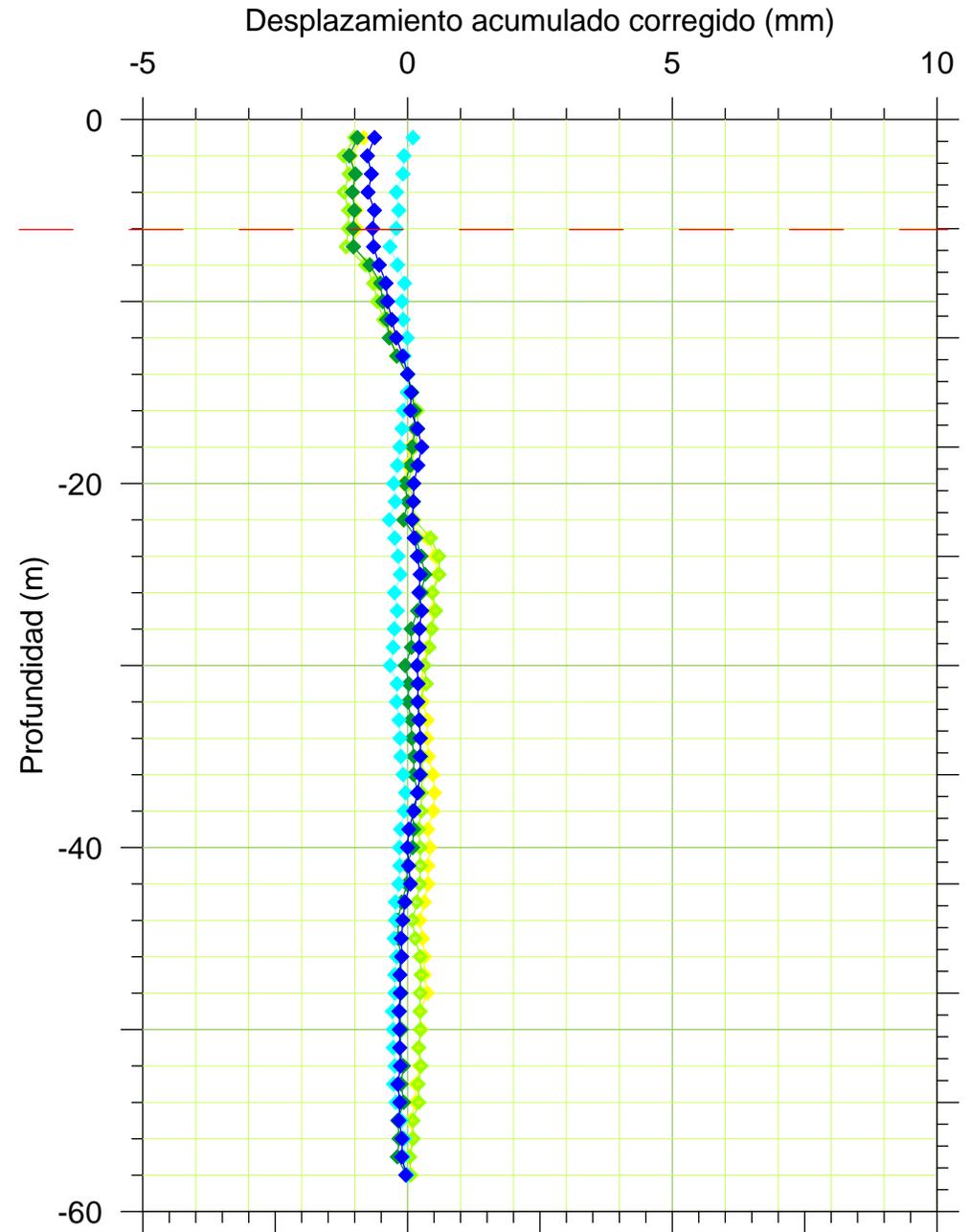


SCI-16

Dirección A



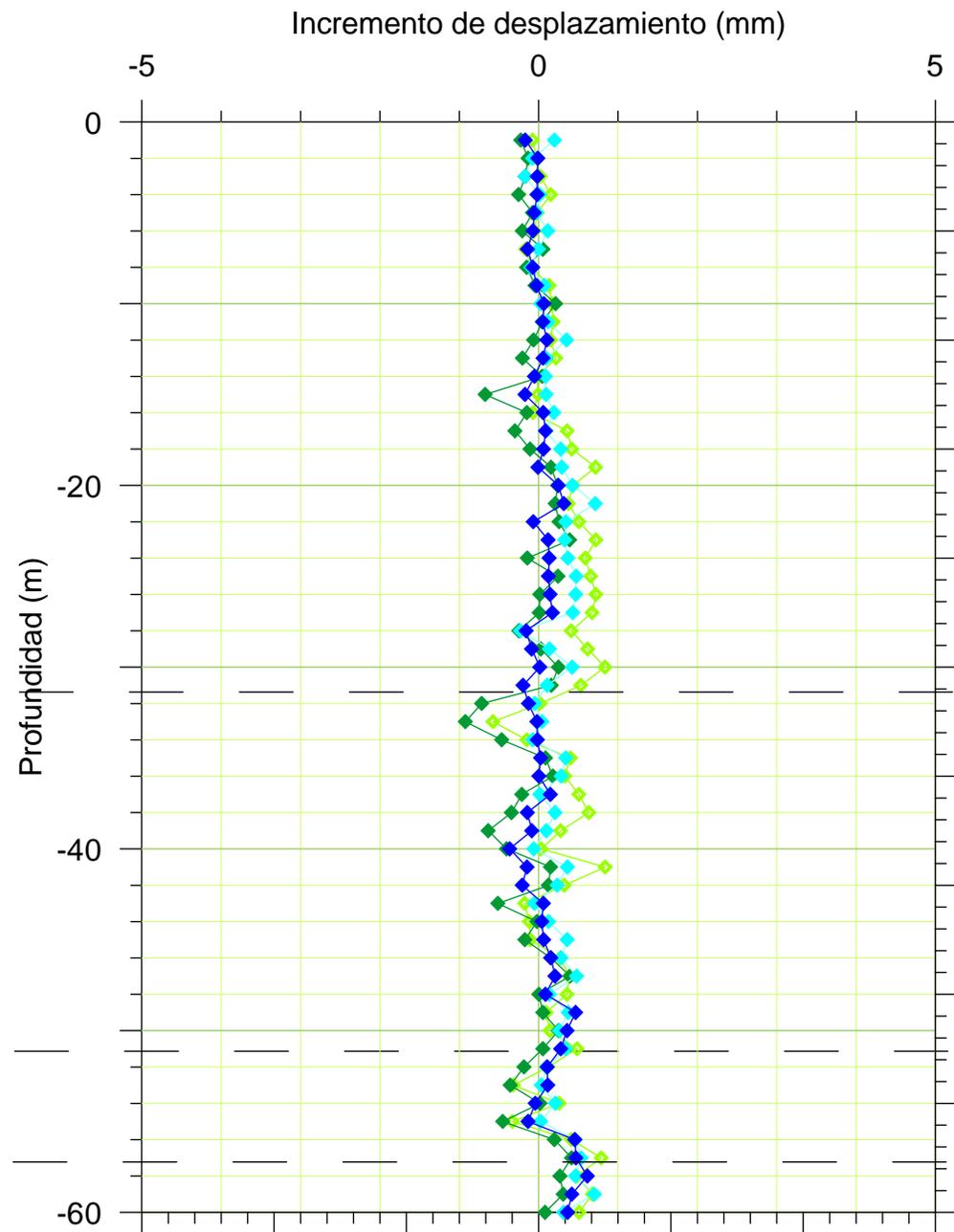
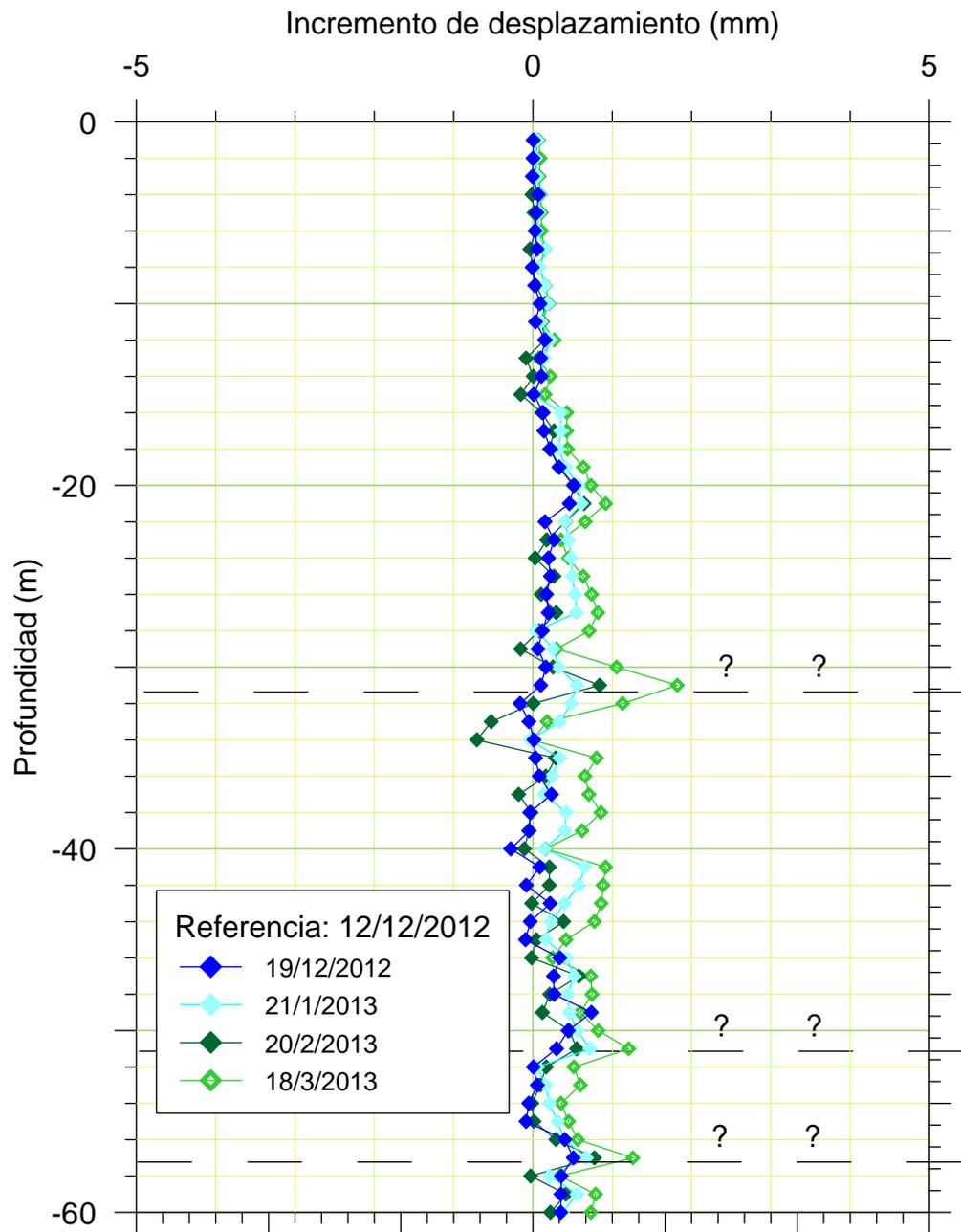
Dirección B



SZ-1A

Dirección A

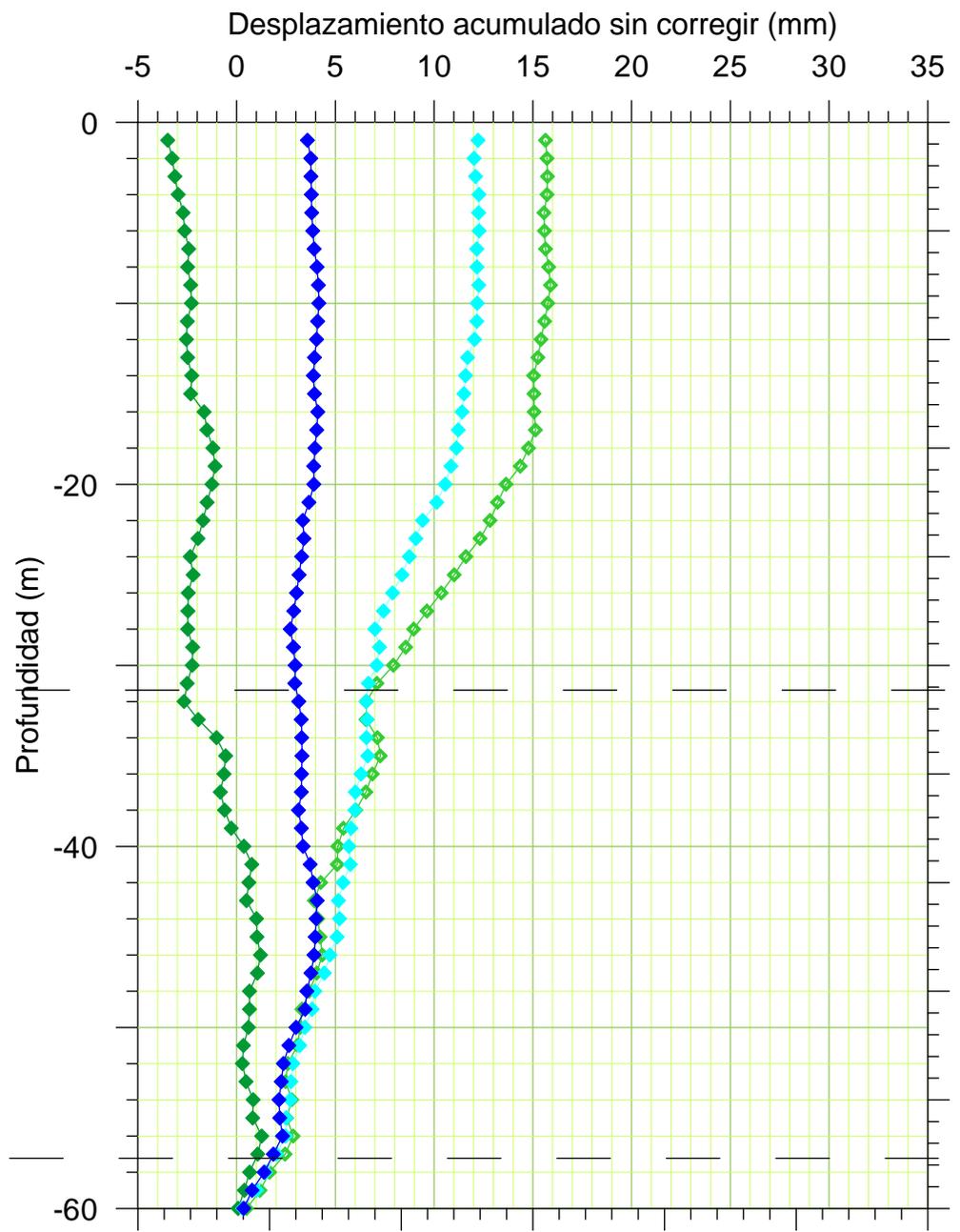
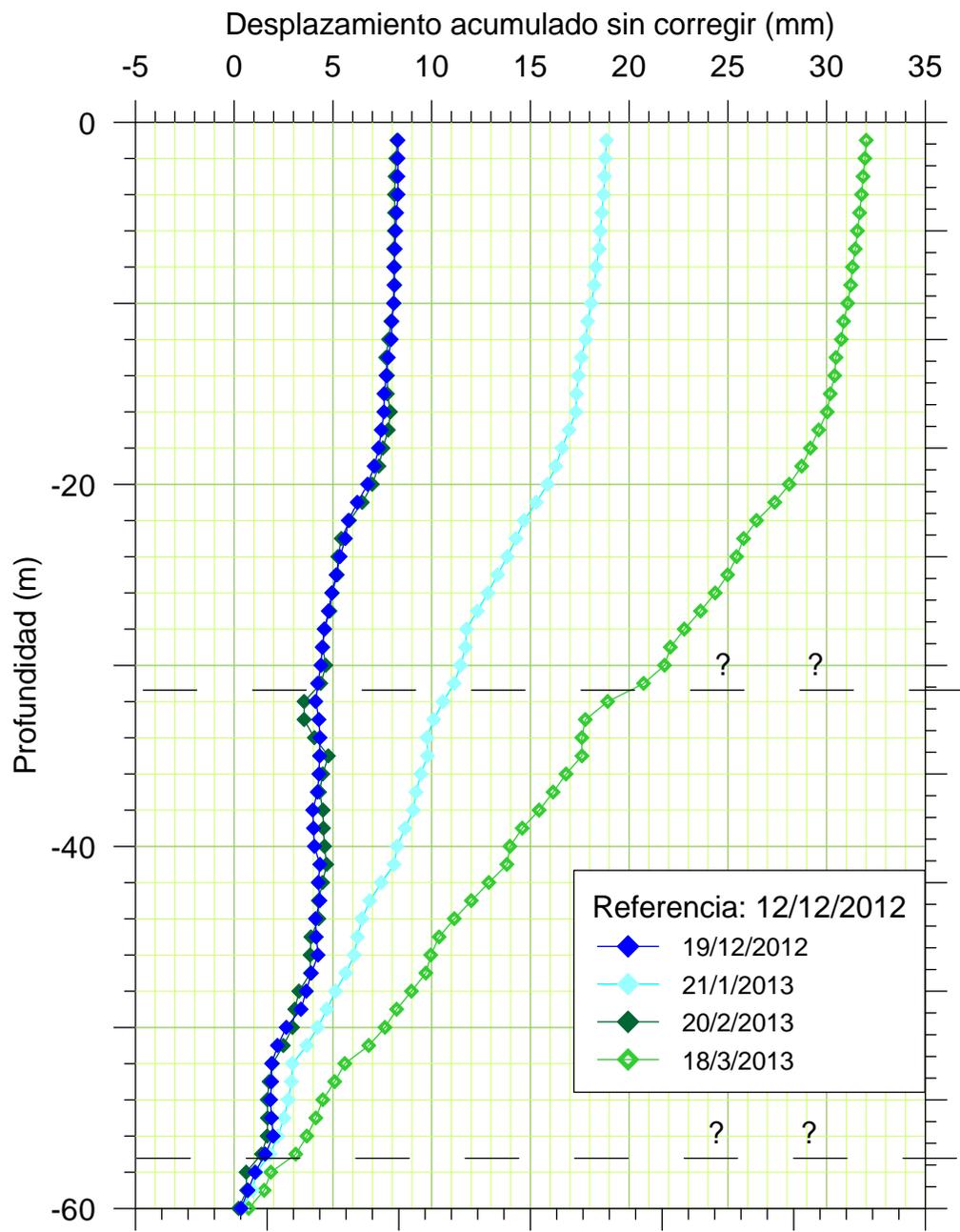
Dirección B



SZ-1A

Dirección A

Dirección B

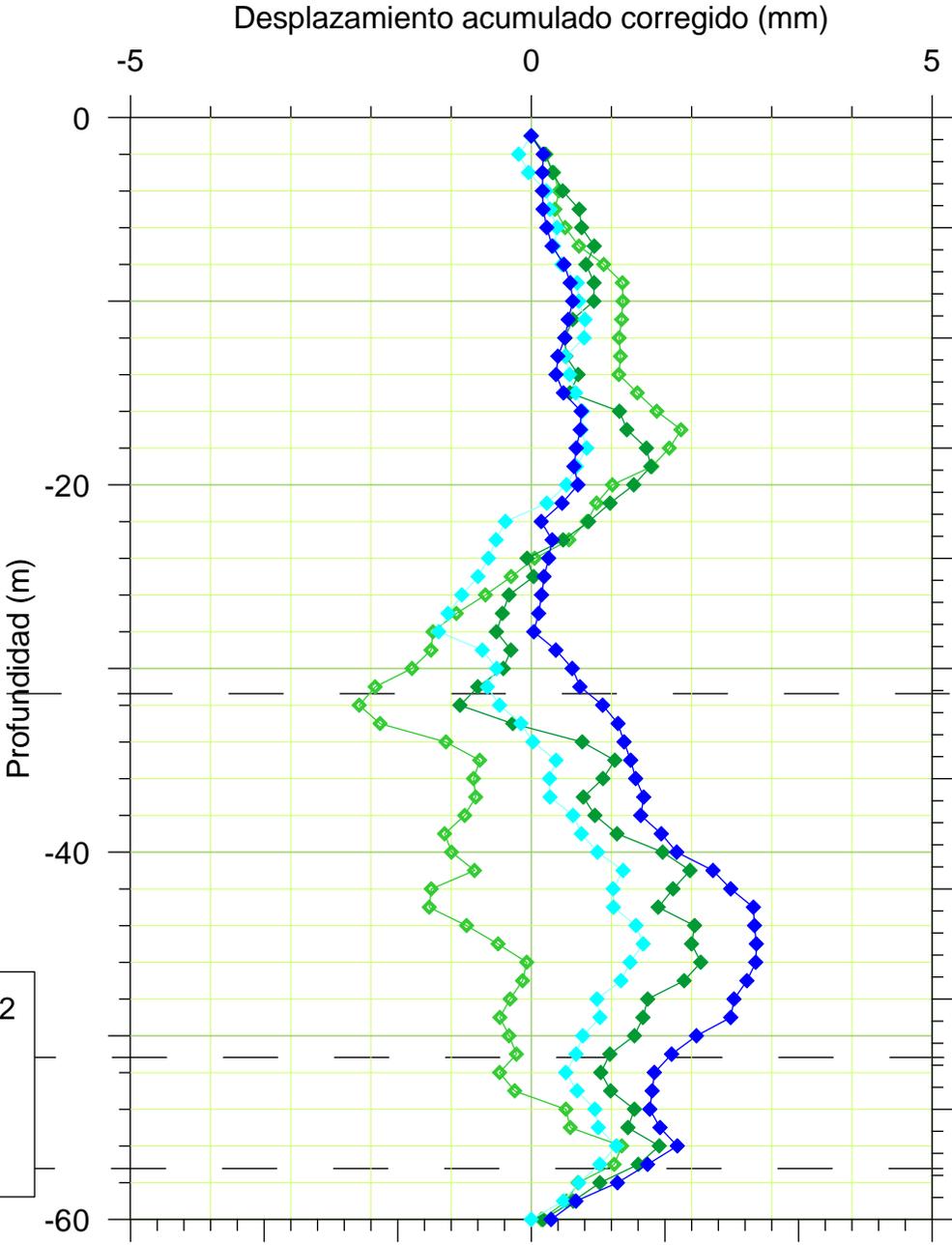
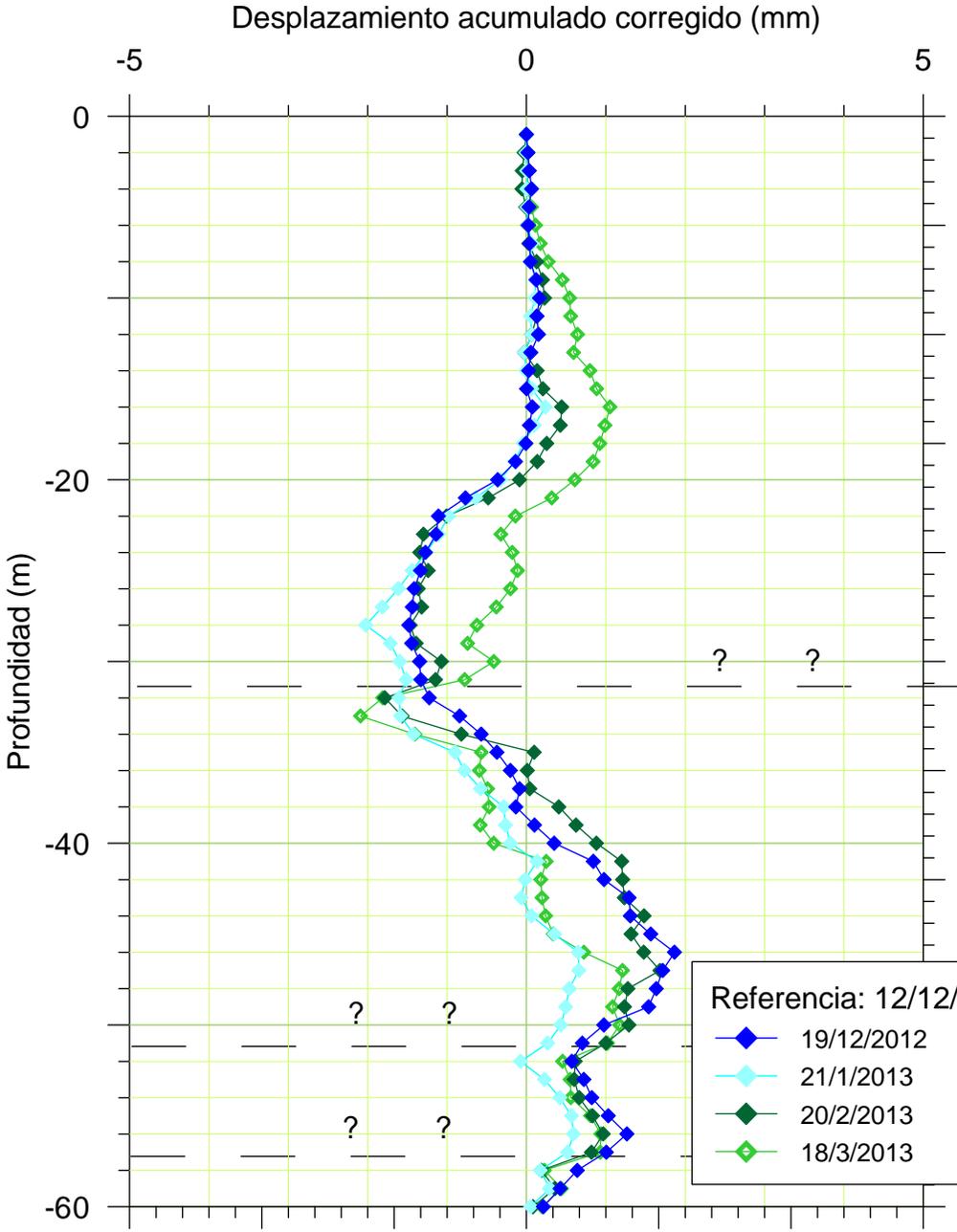


? ↓ ?

SZ-1A

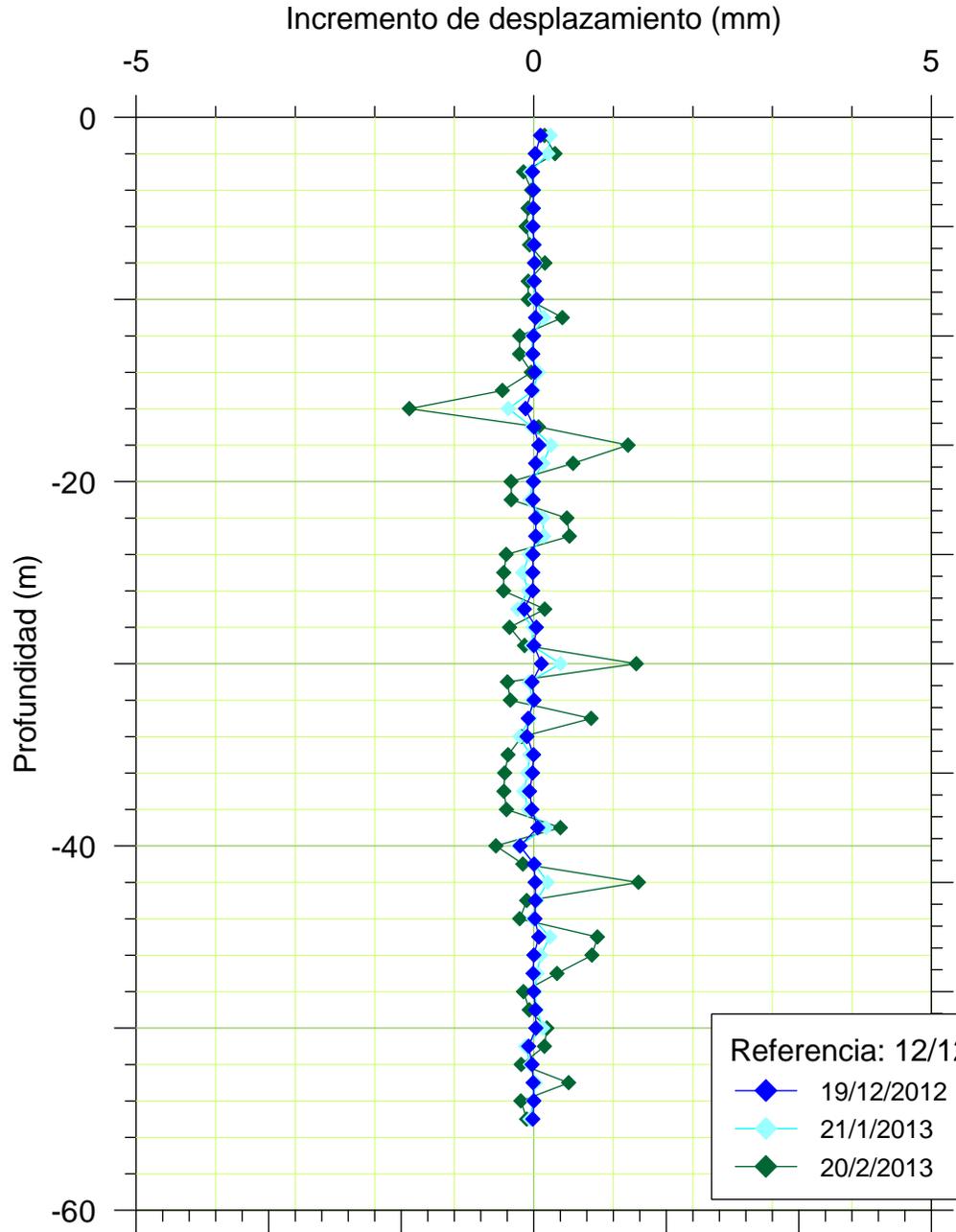
Dirección A

Dirección B

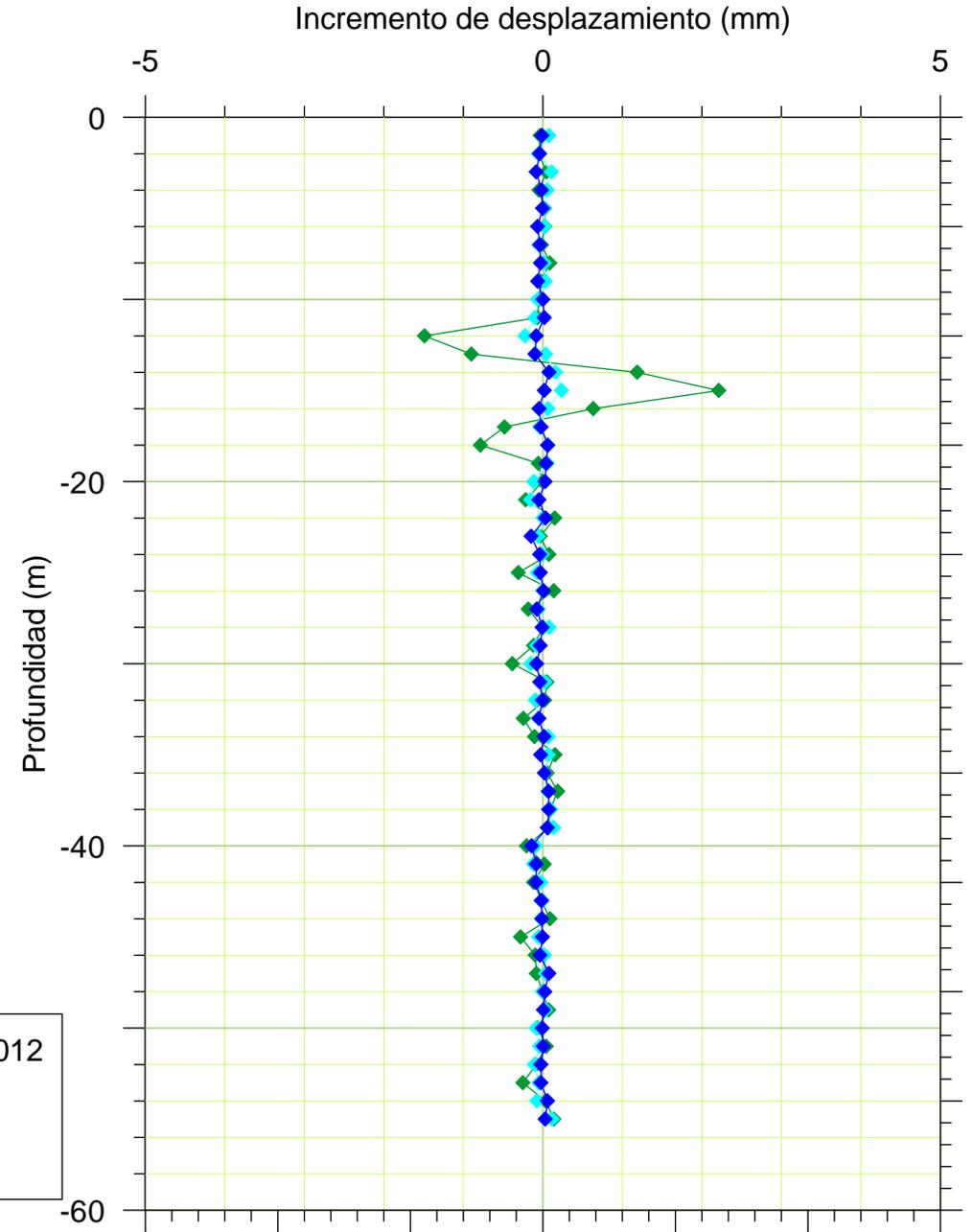


SZ-2

Dirección A

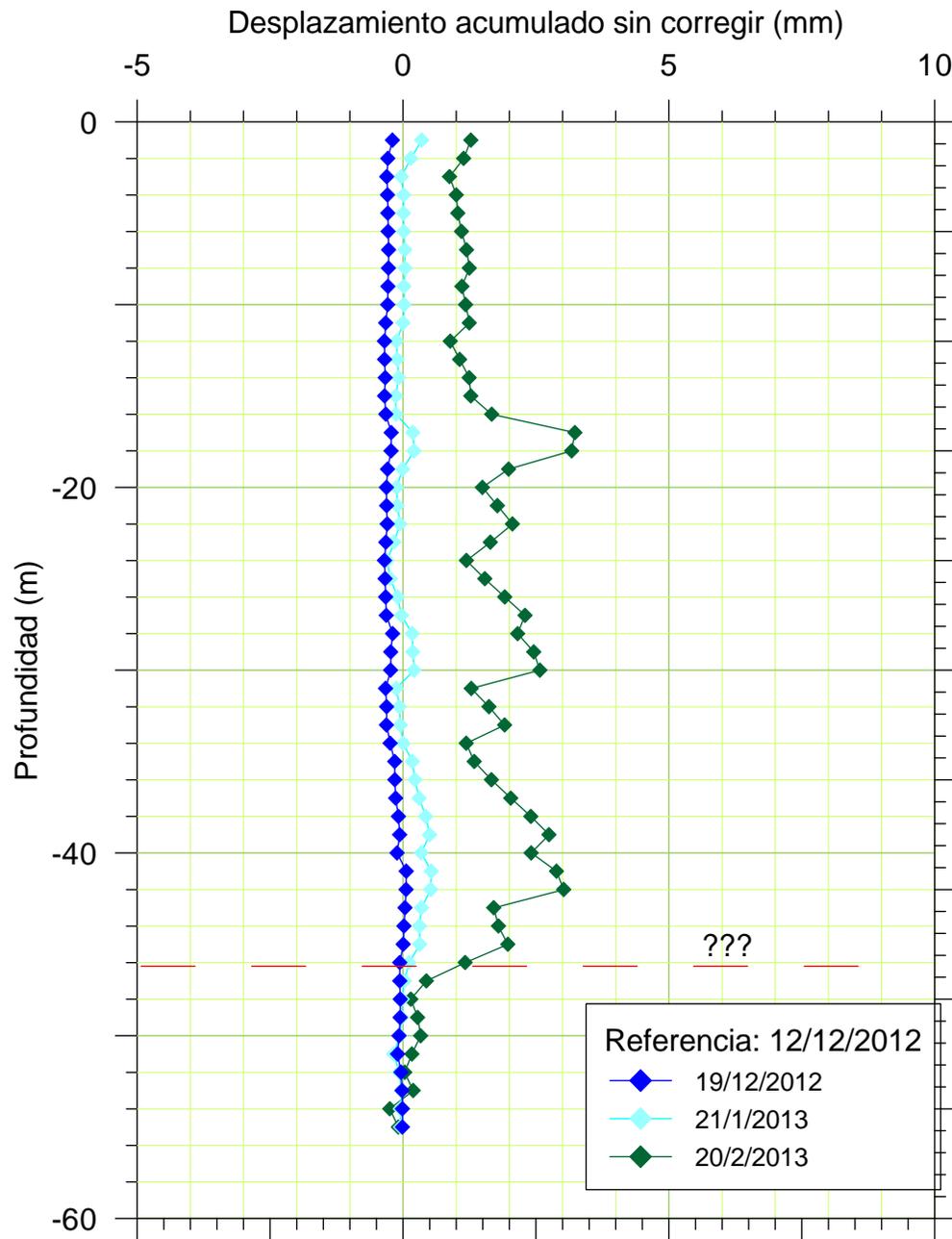


Dirección B

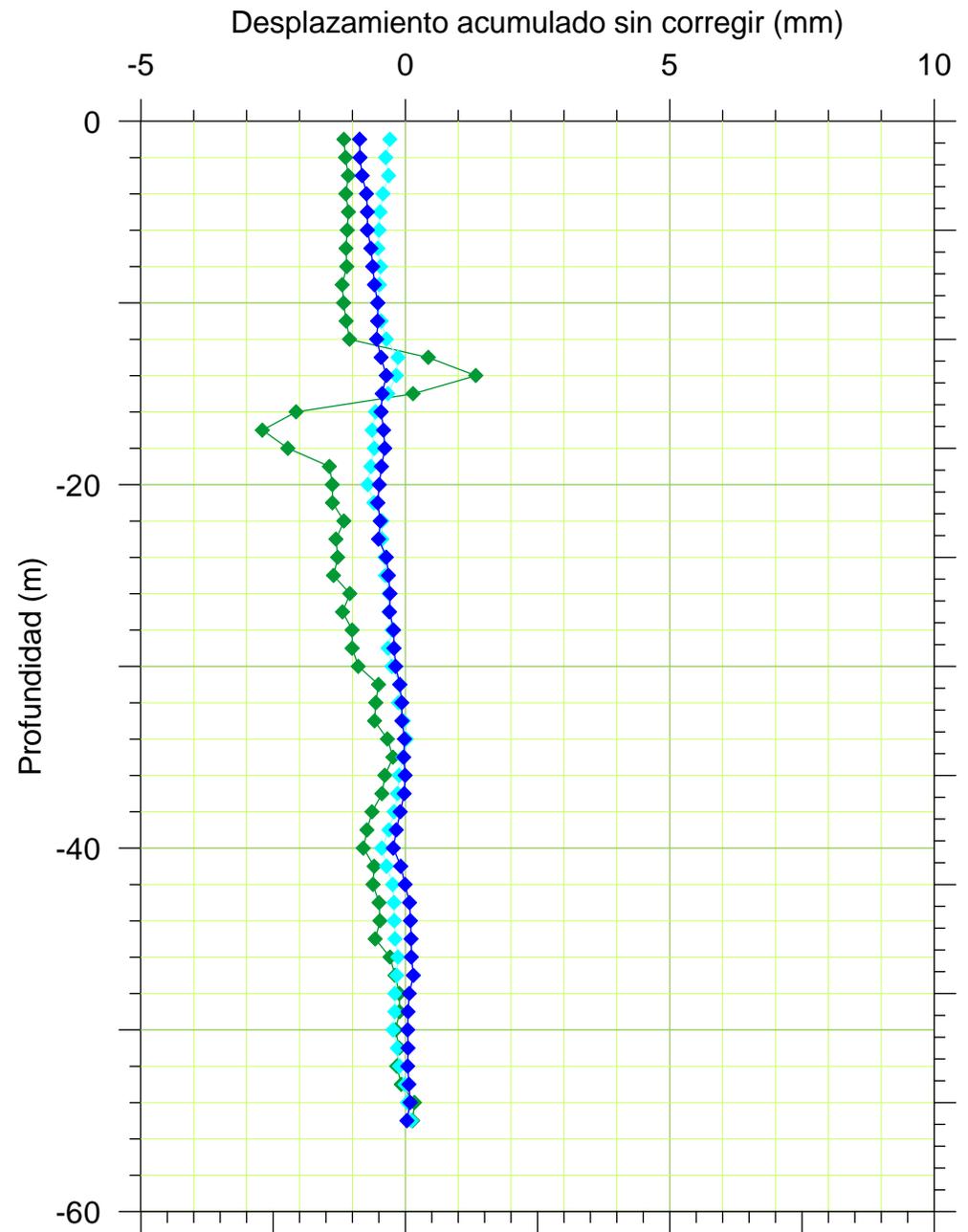


SZ-2

Dirección A

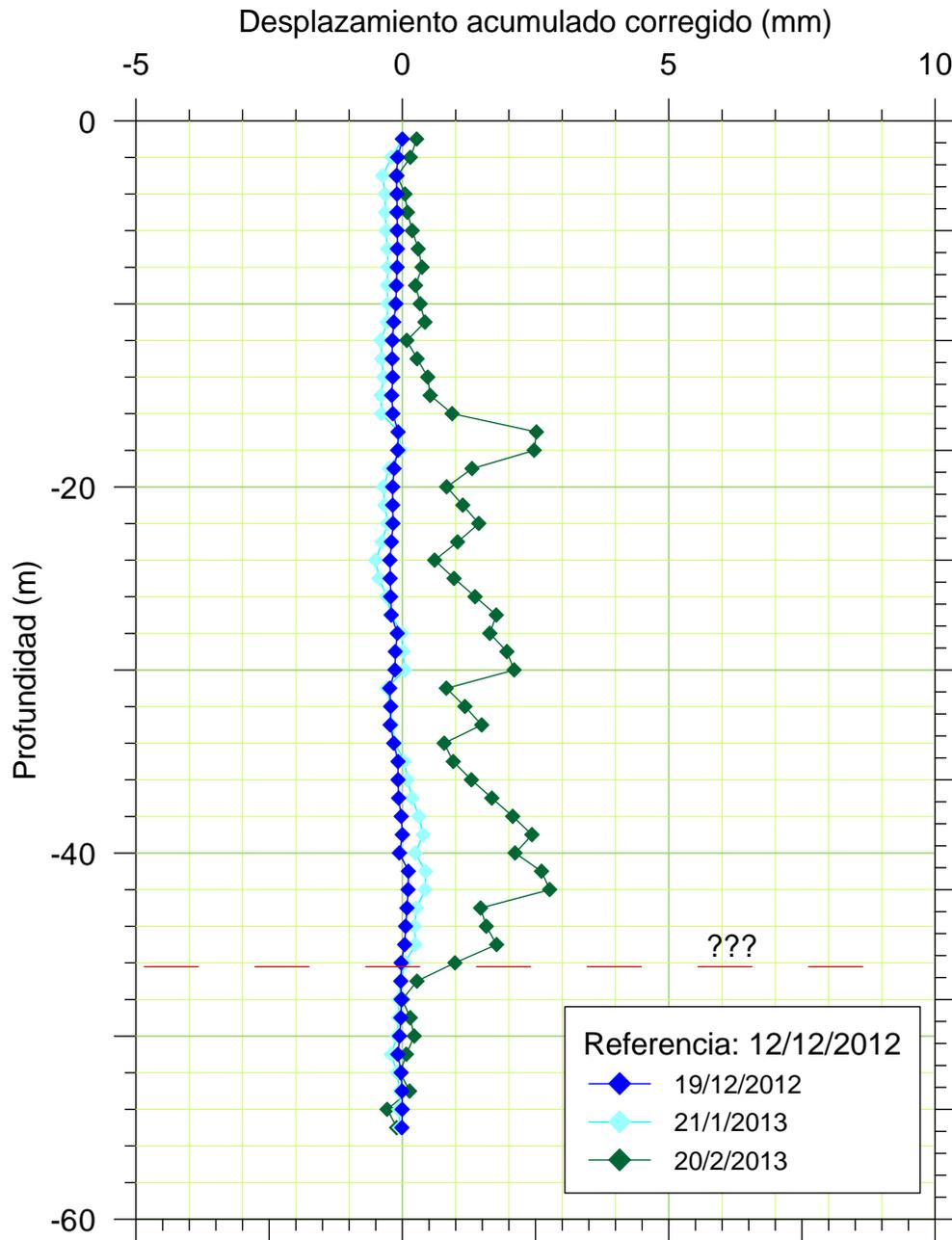


Dirección B

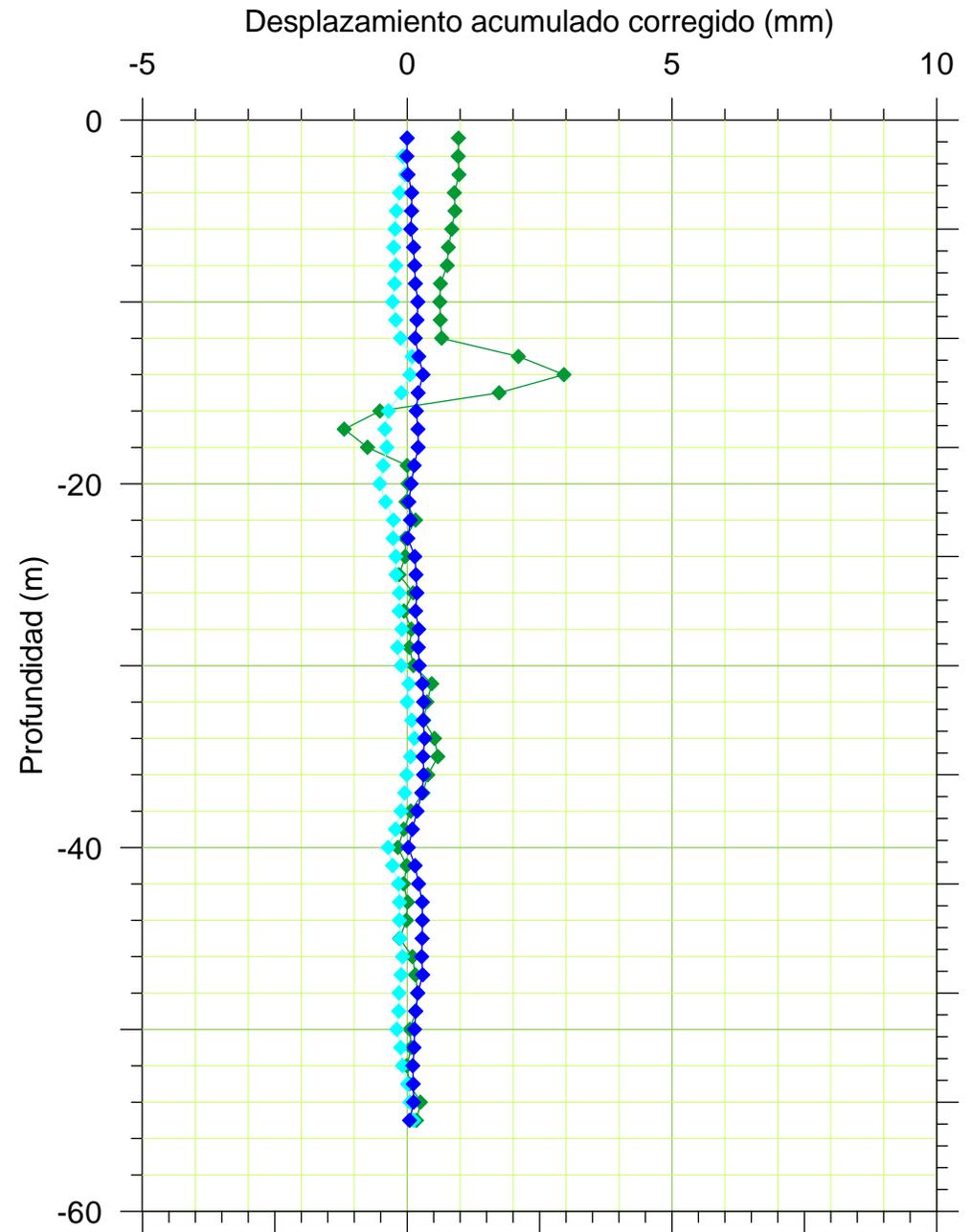


SZ-2

Dirección A

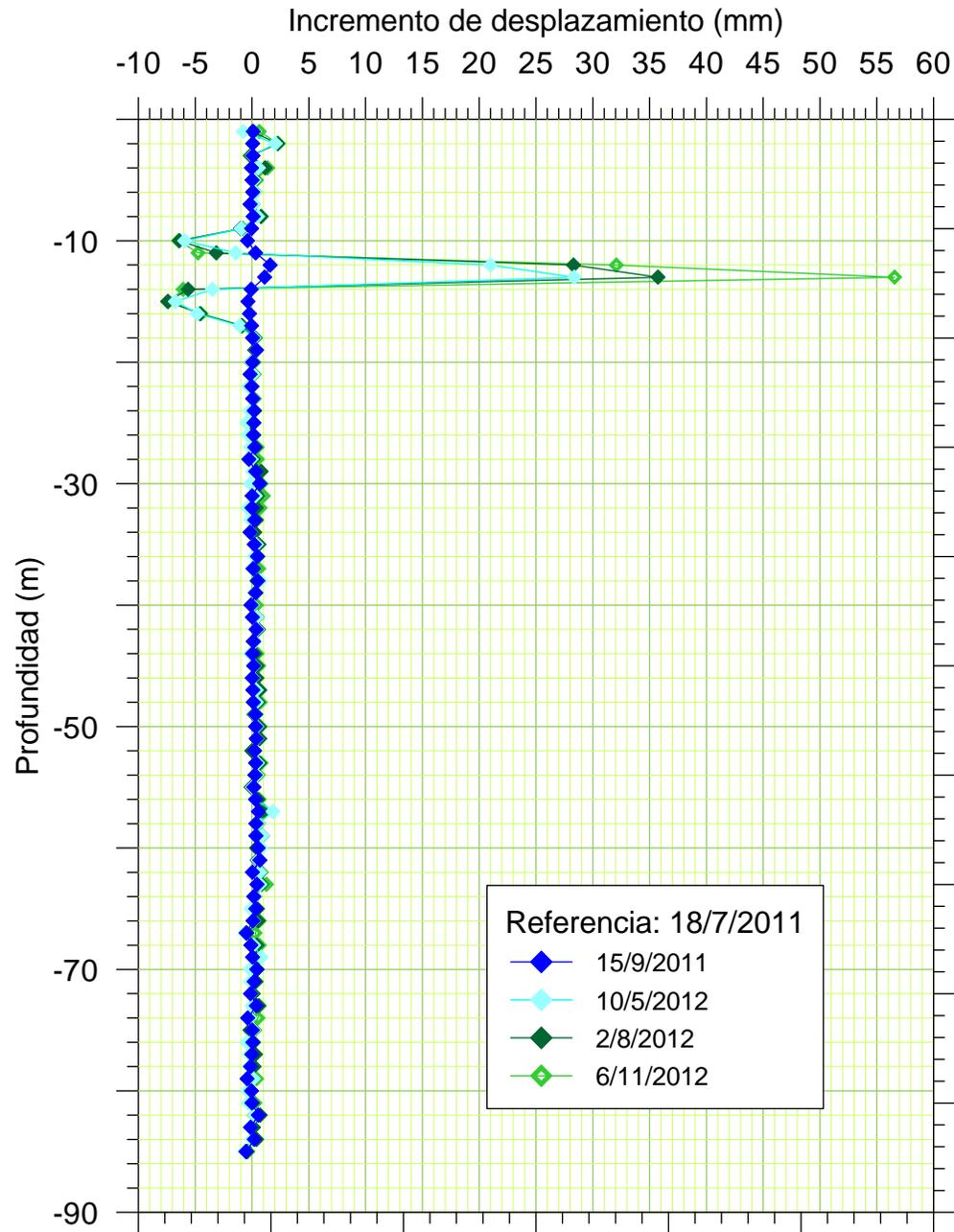


Dirección B

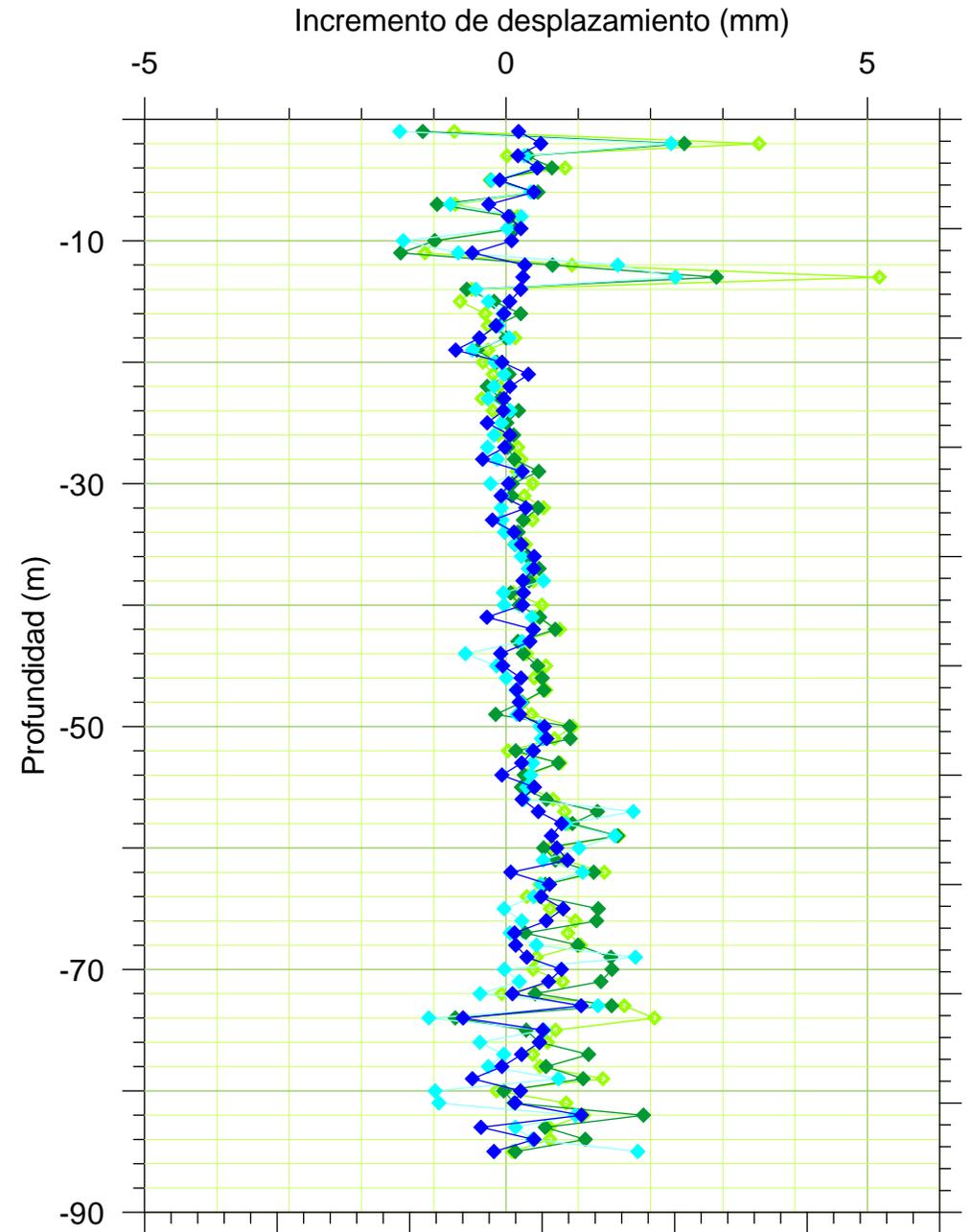


SZ-3A

Dirección A

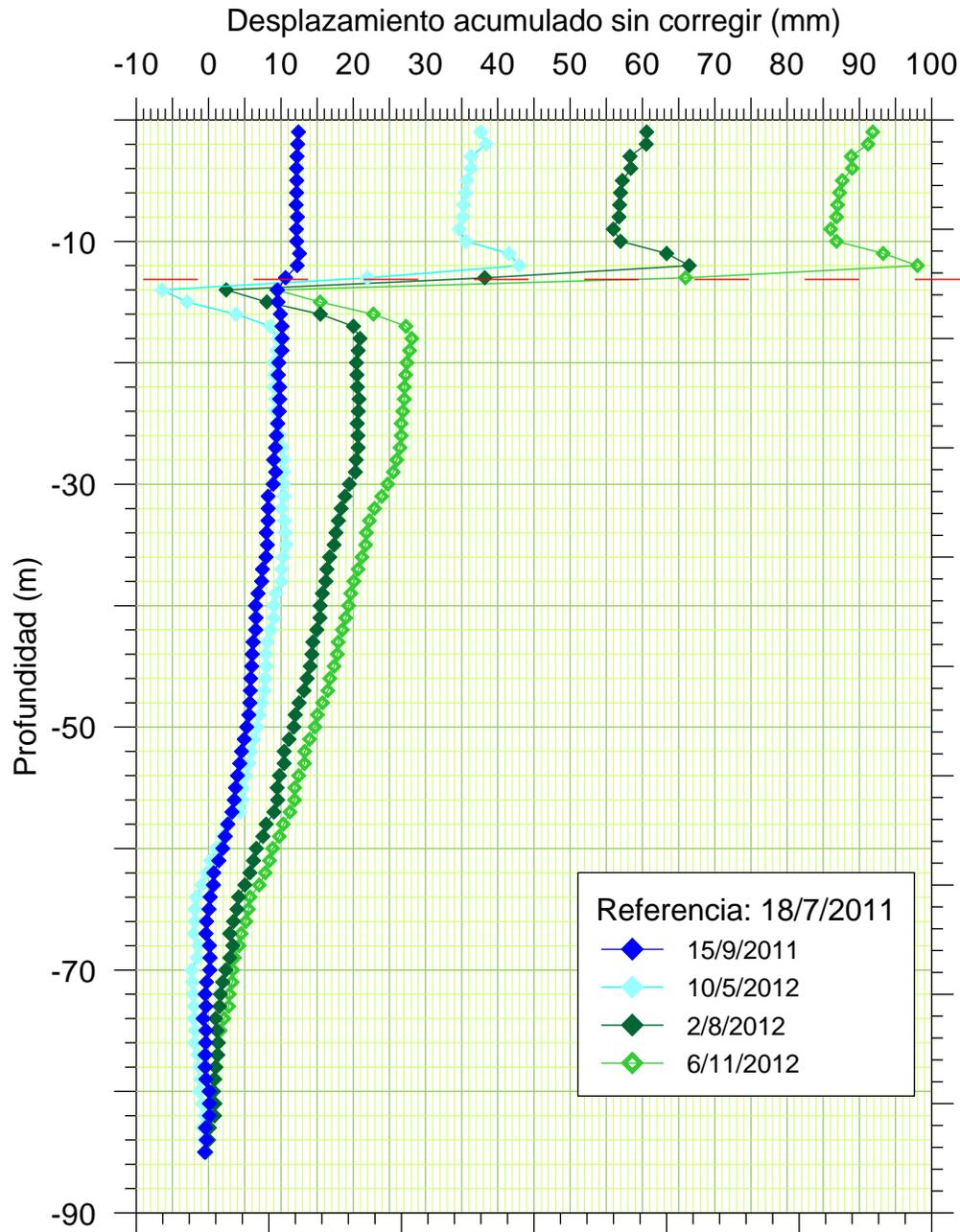


Dirección B

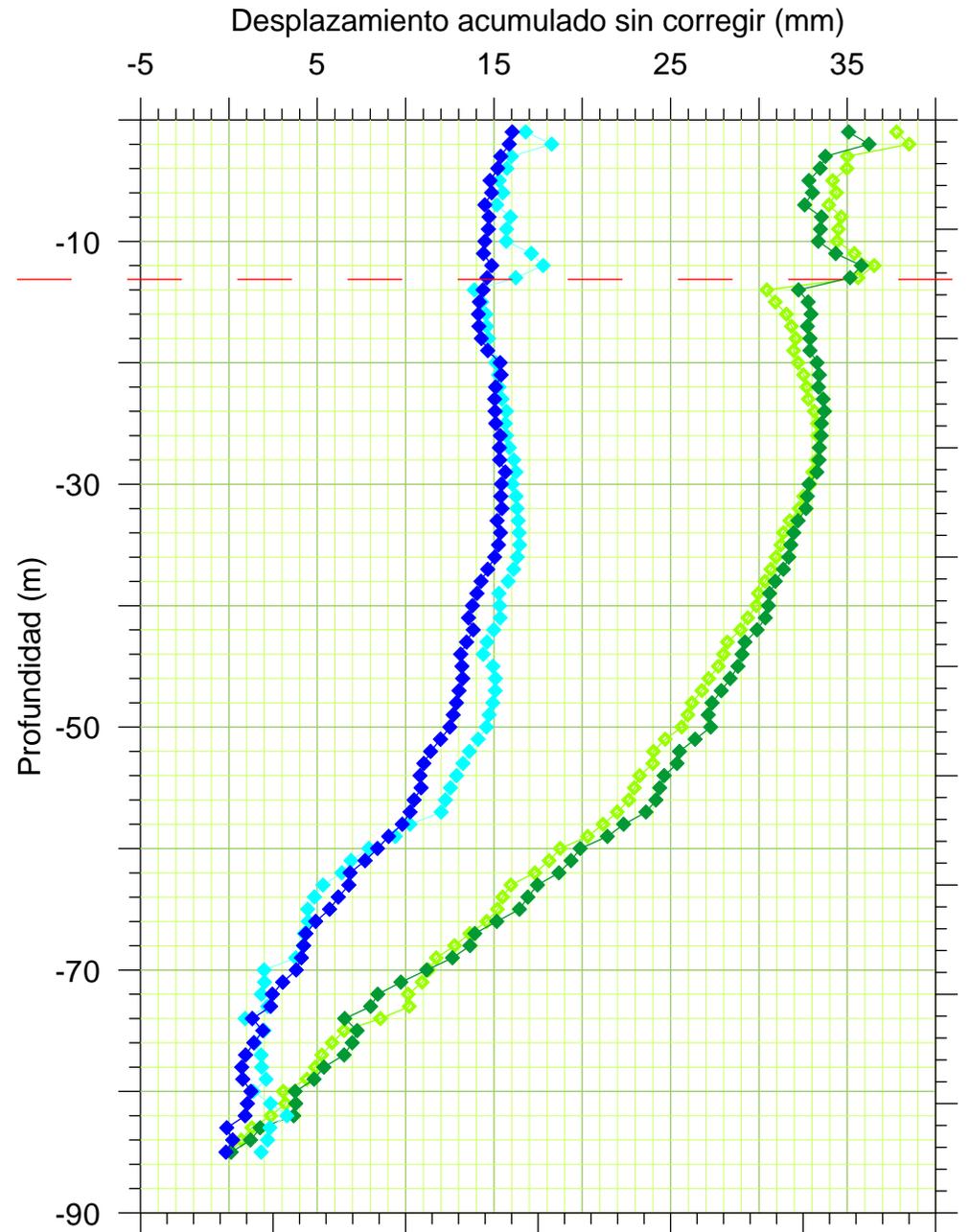


SZ-3A

Dirección A

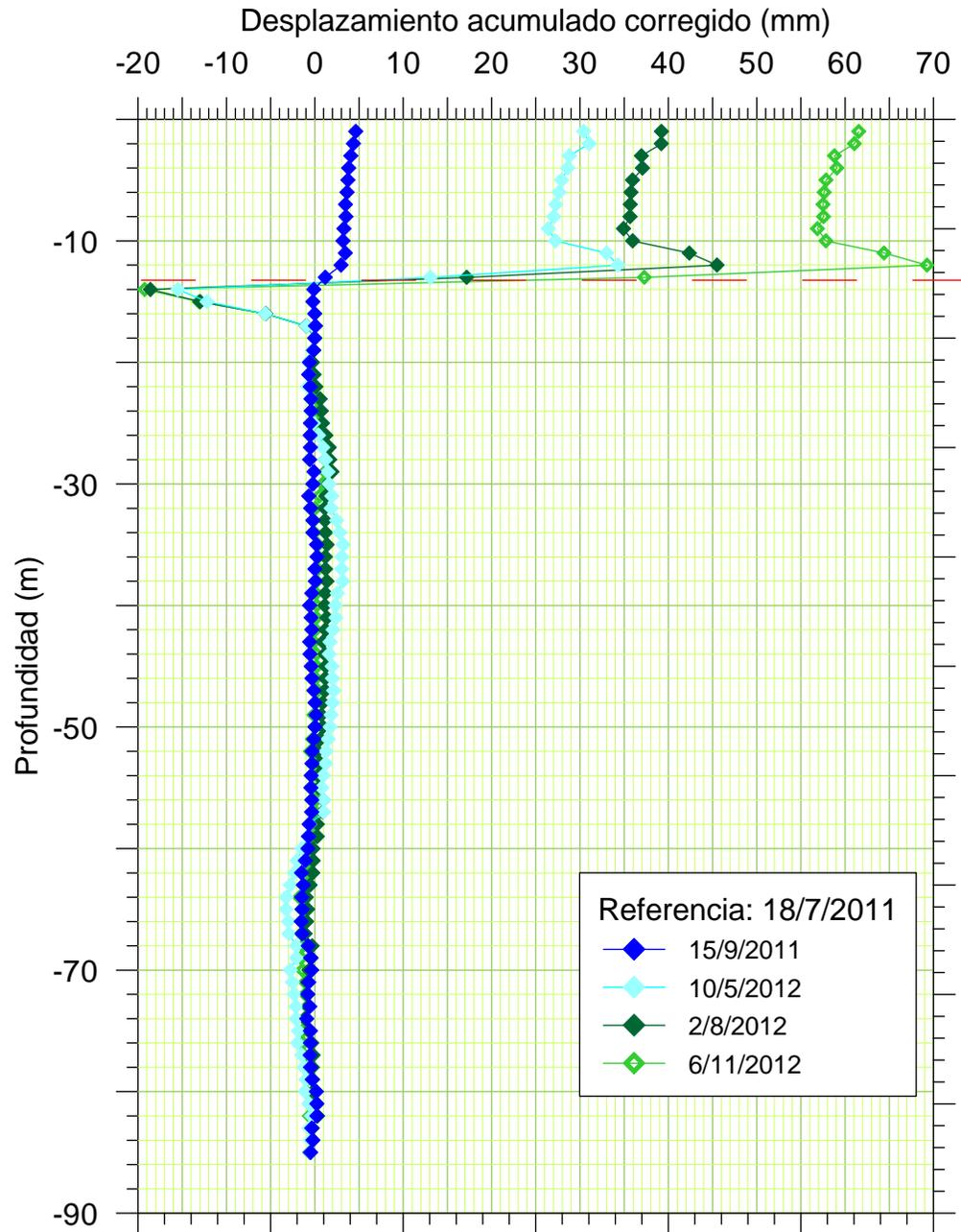


Dirección B

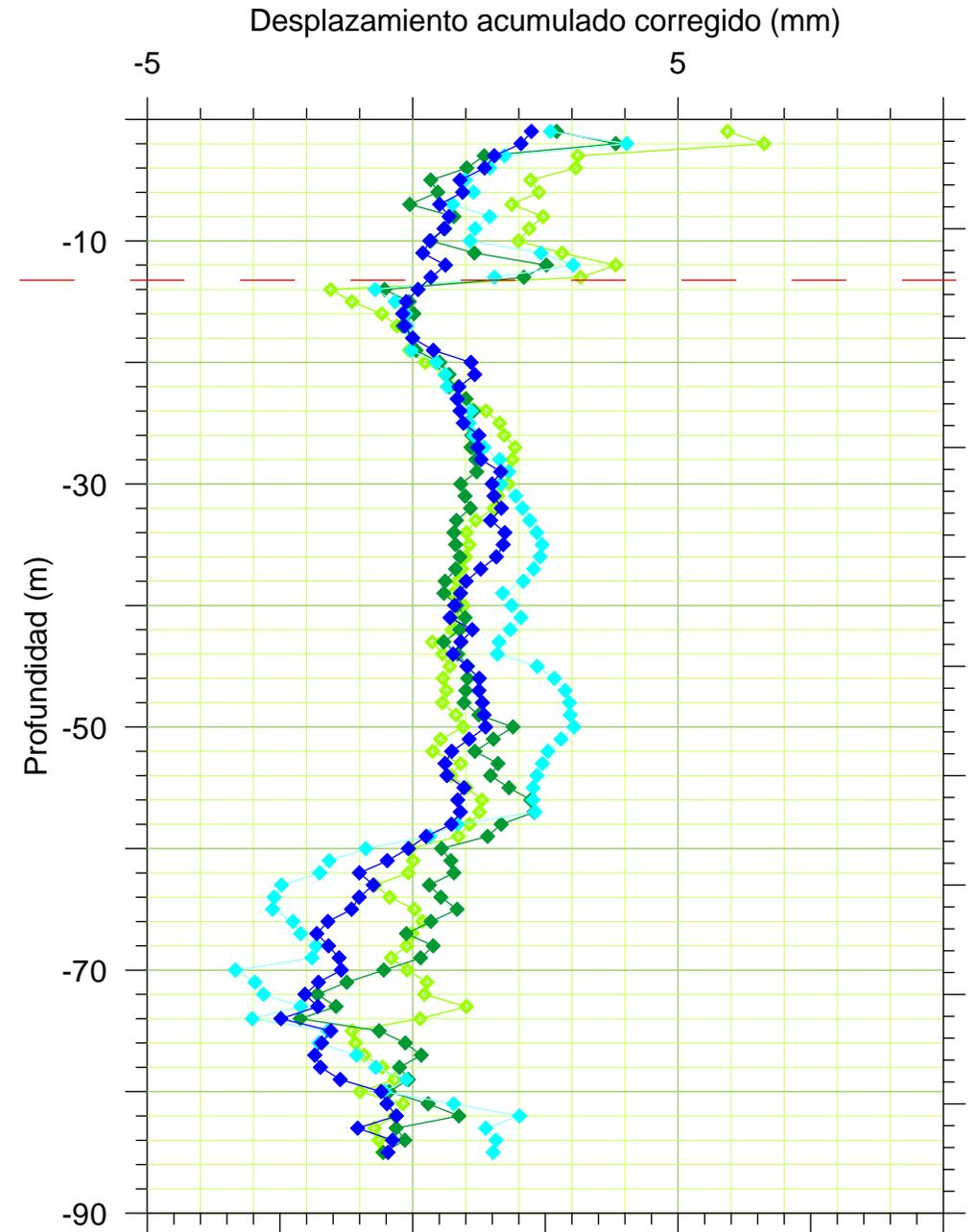


SZ-3A

Dirección A

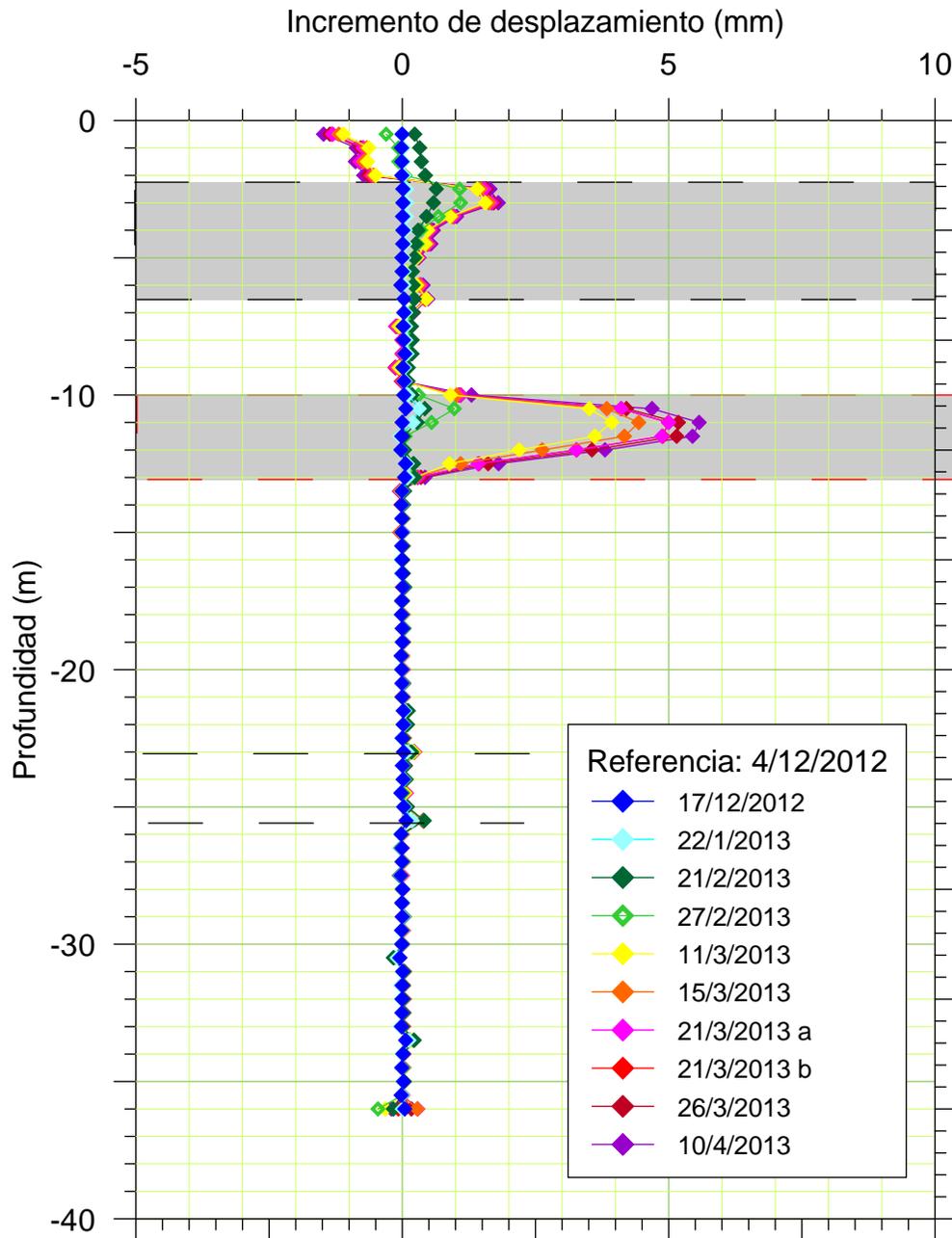


Dirección B

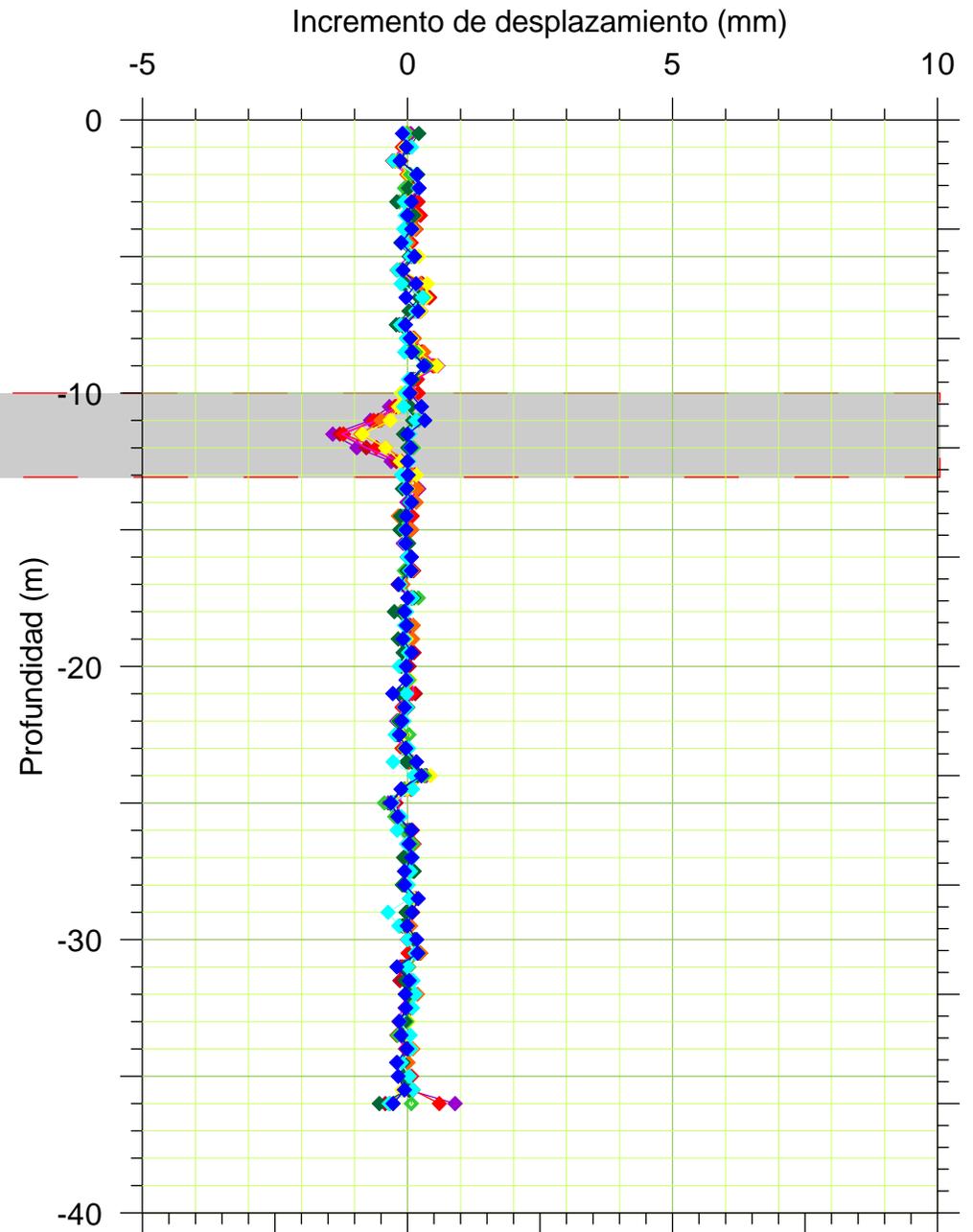


SZ-5

Dirección A

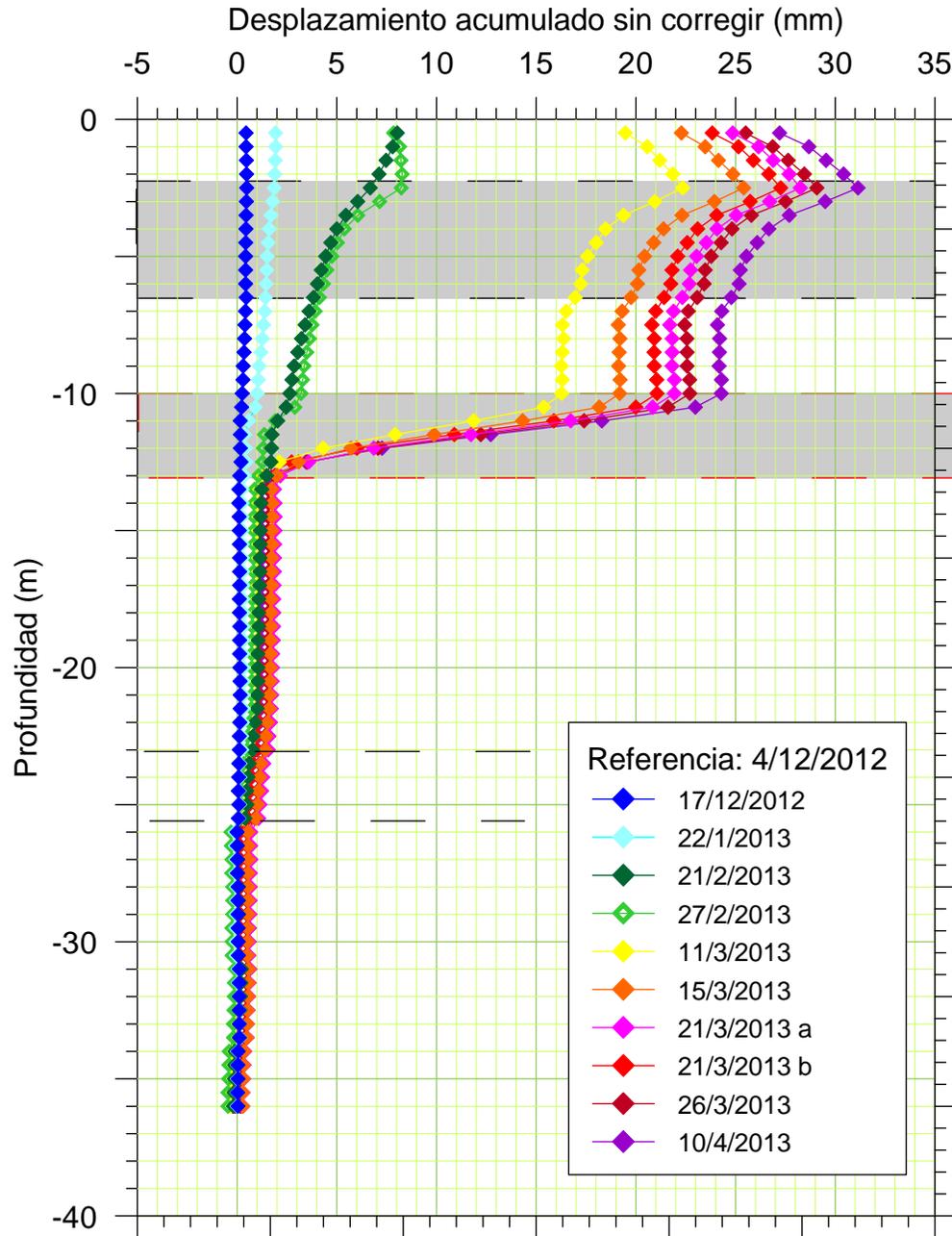


Dirección B

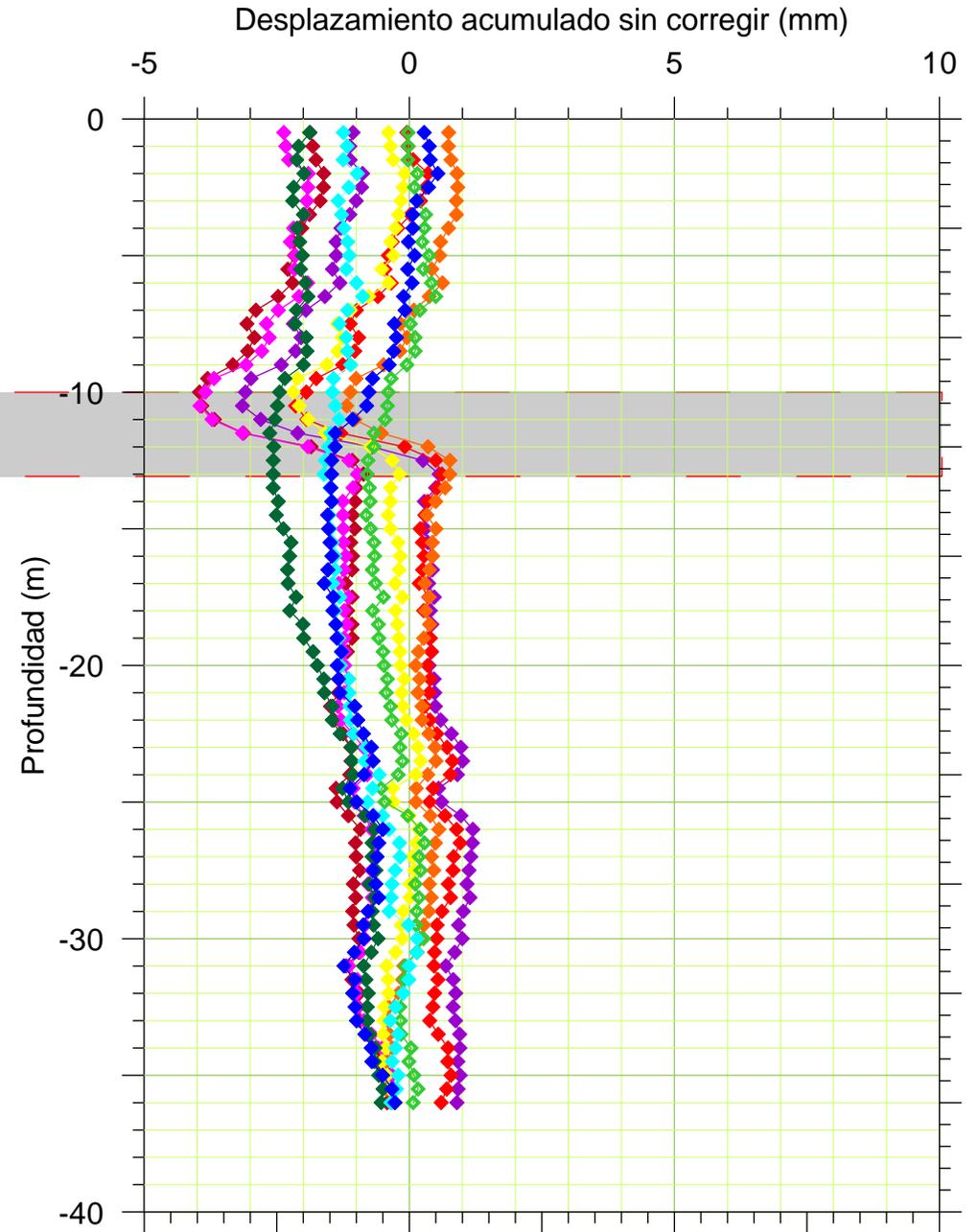


SZ-5

Dirección A

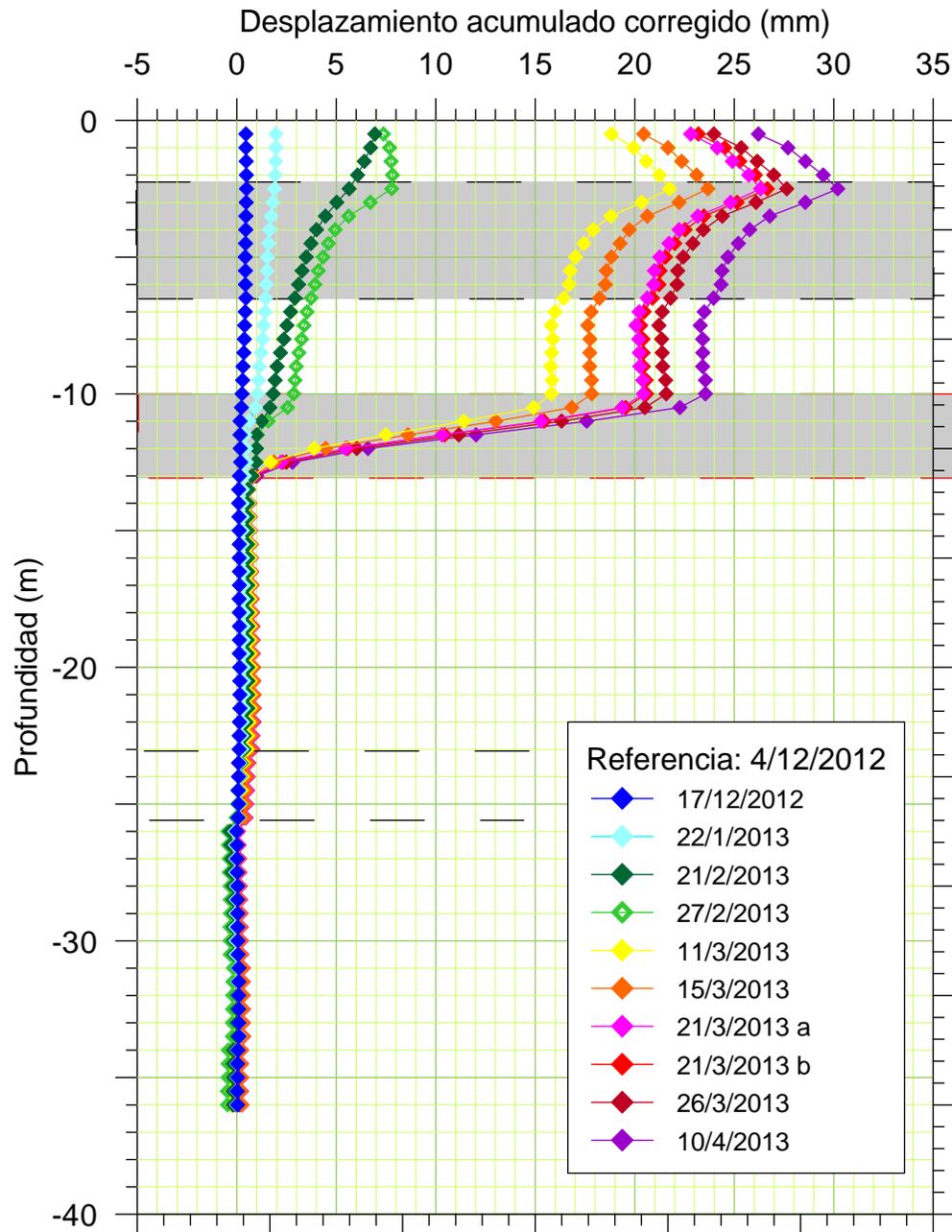


Dirección B

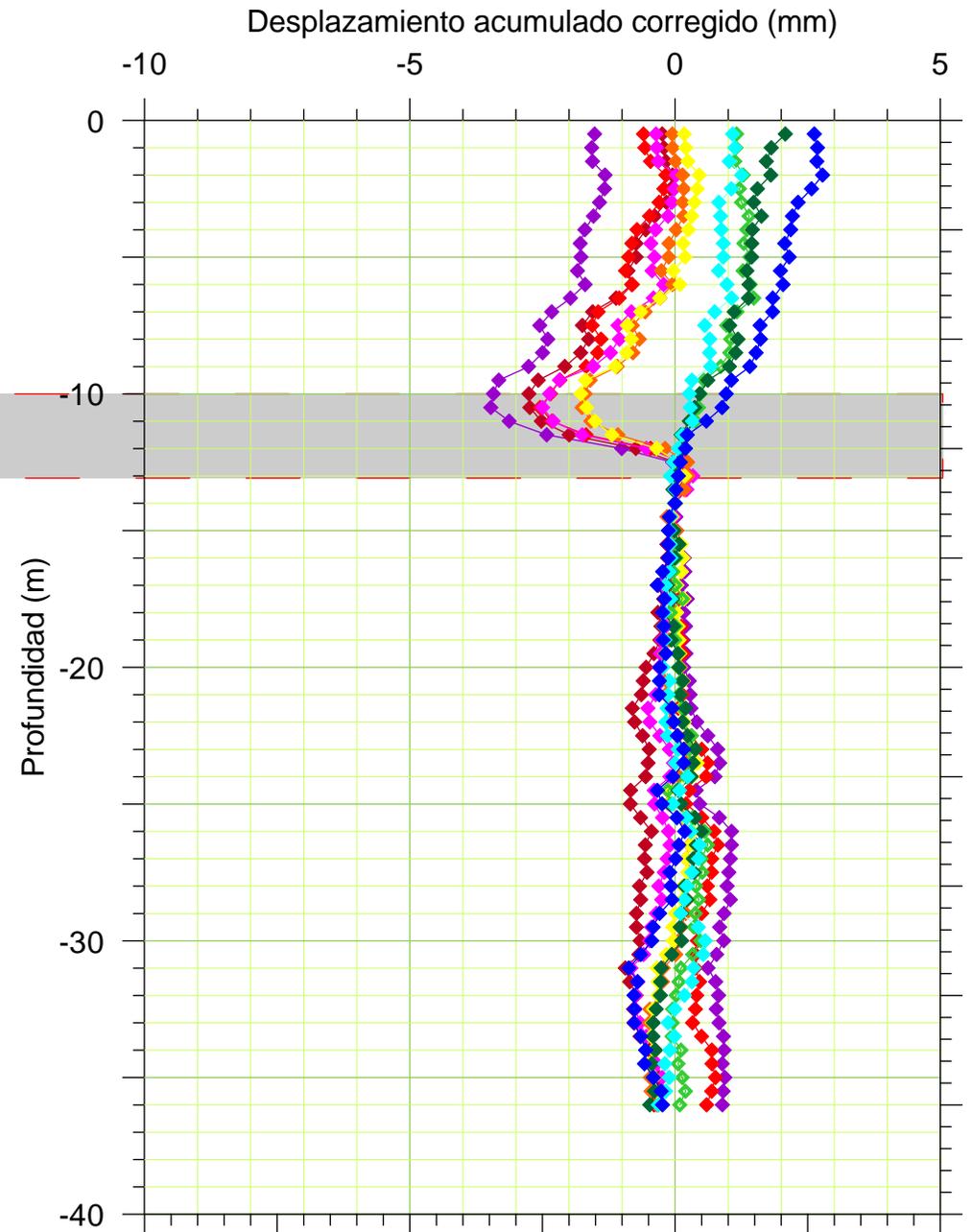


SZ-5

Dirección A



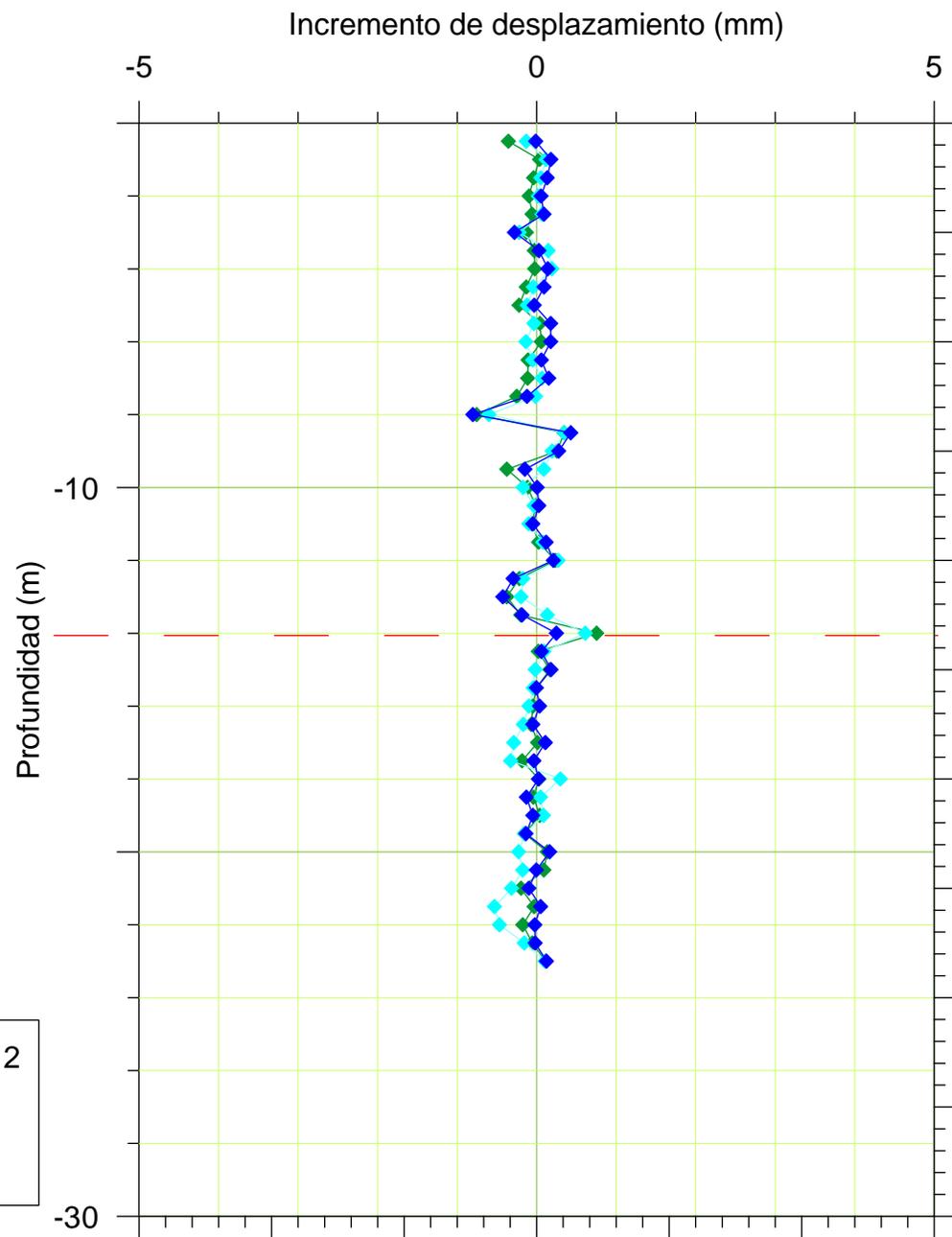
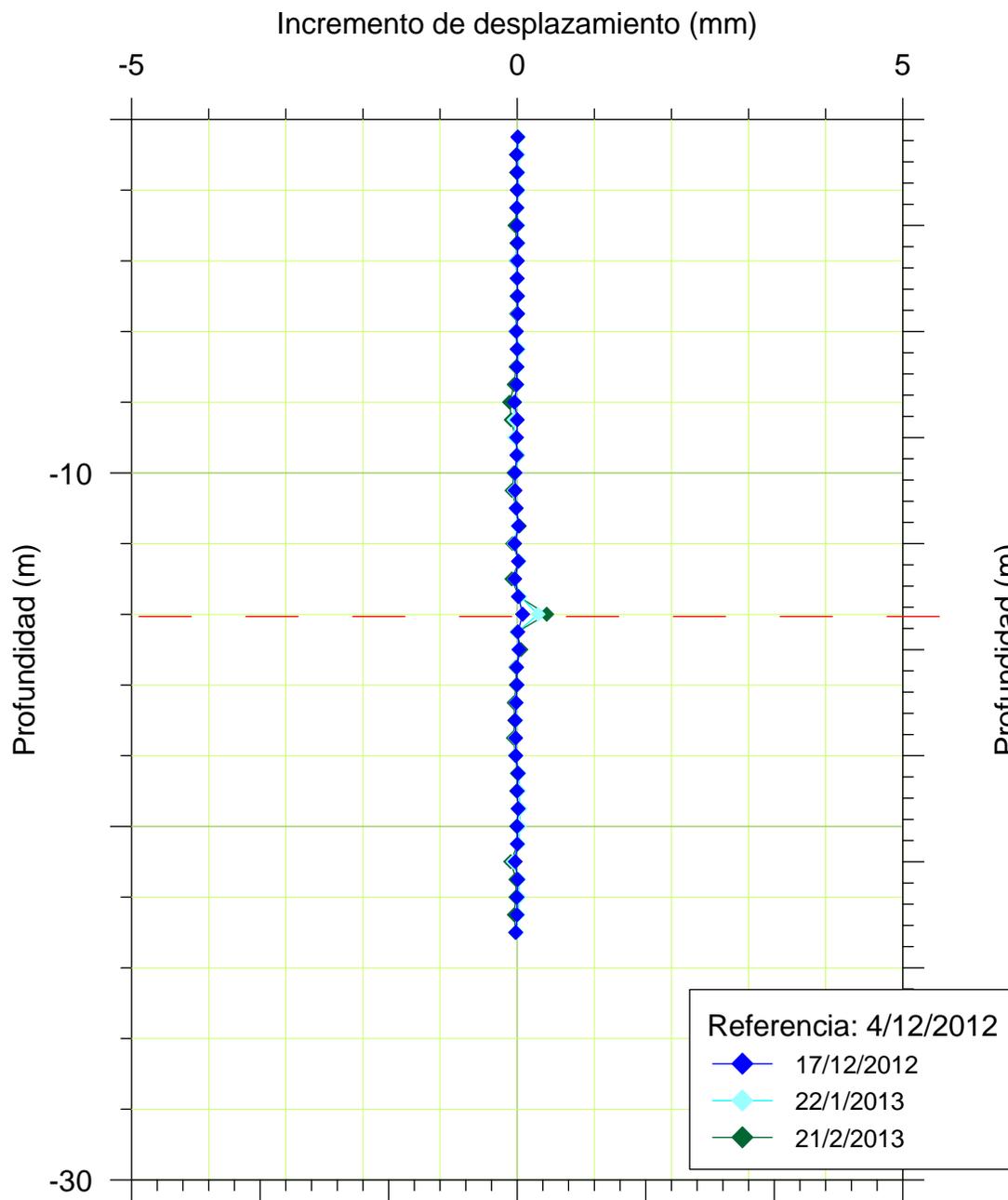
Dirección B



SZ-6

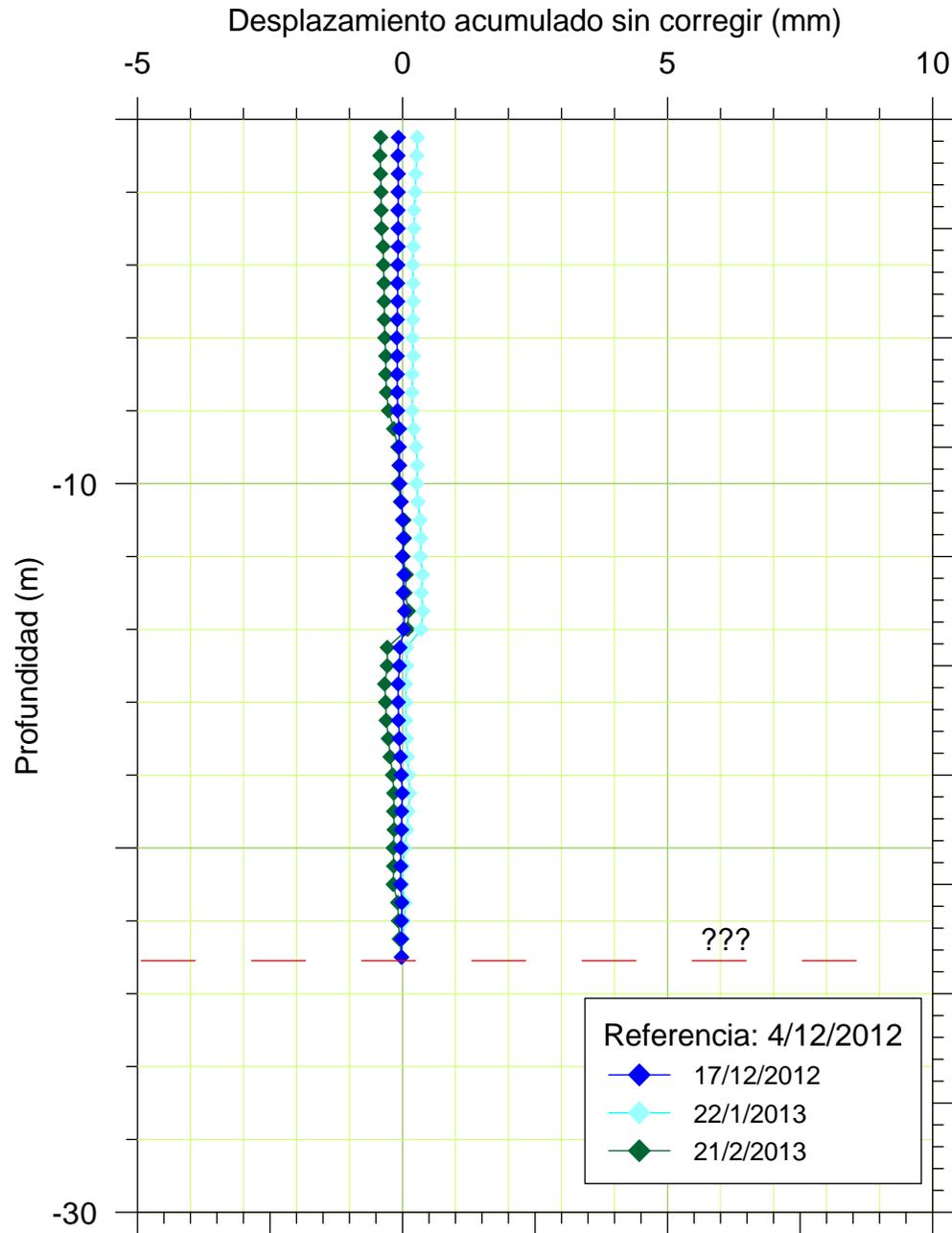
Dirección A

Dirección B

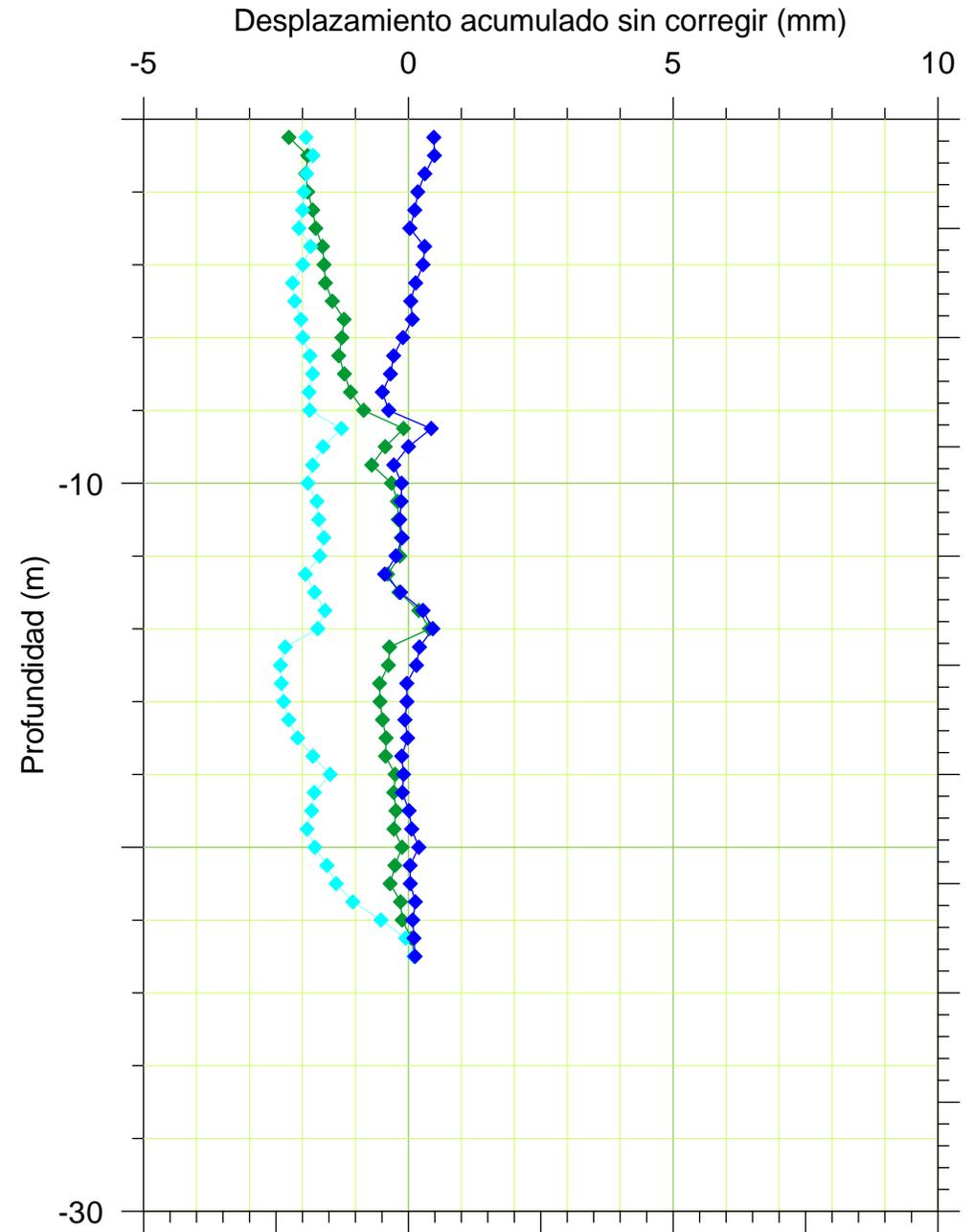


SZ-6

Dirección A

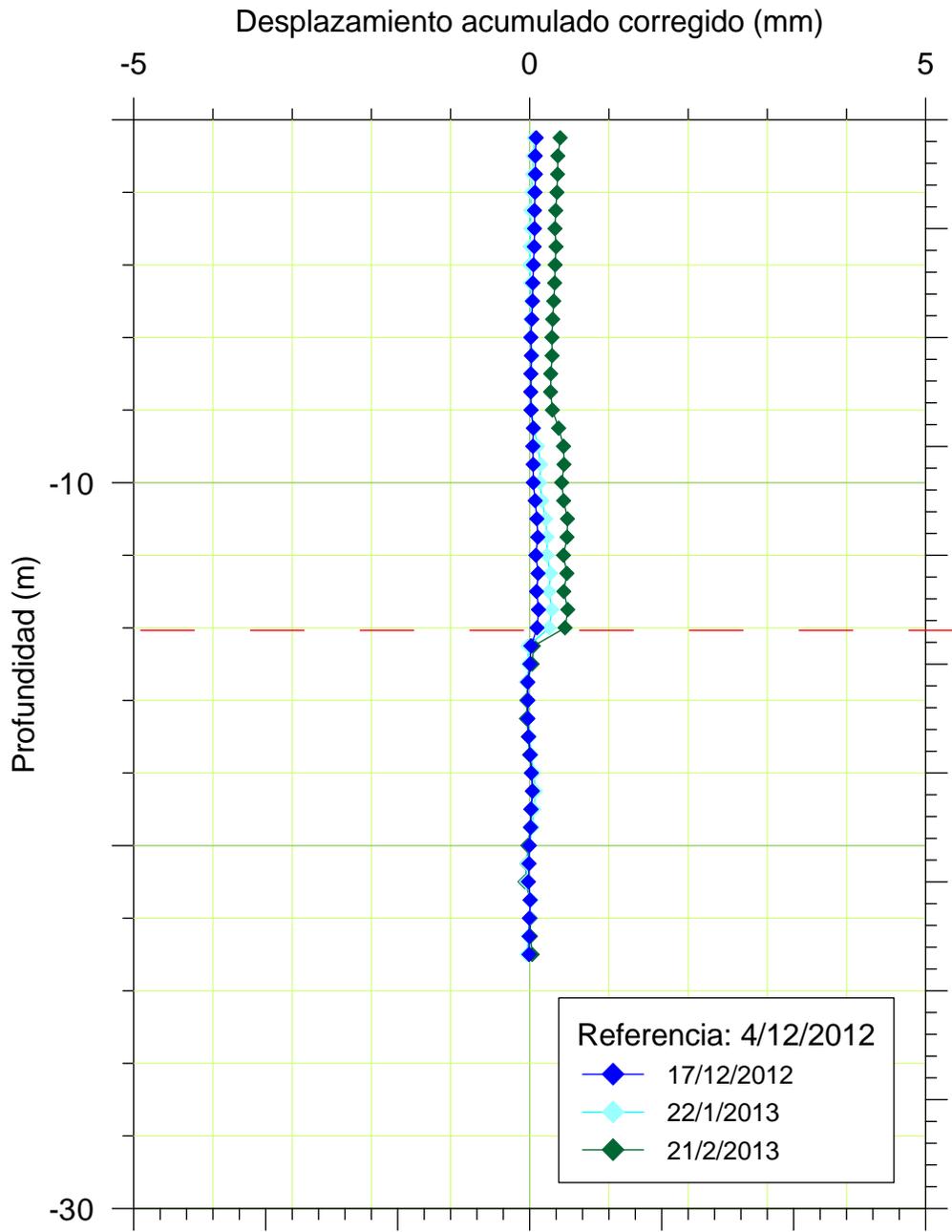


Dirección B

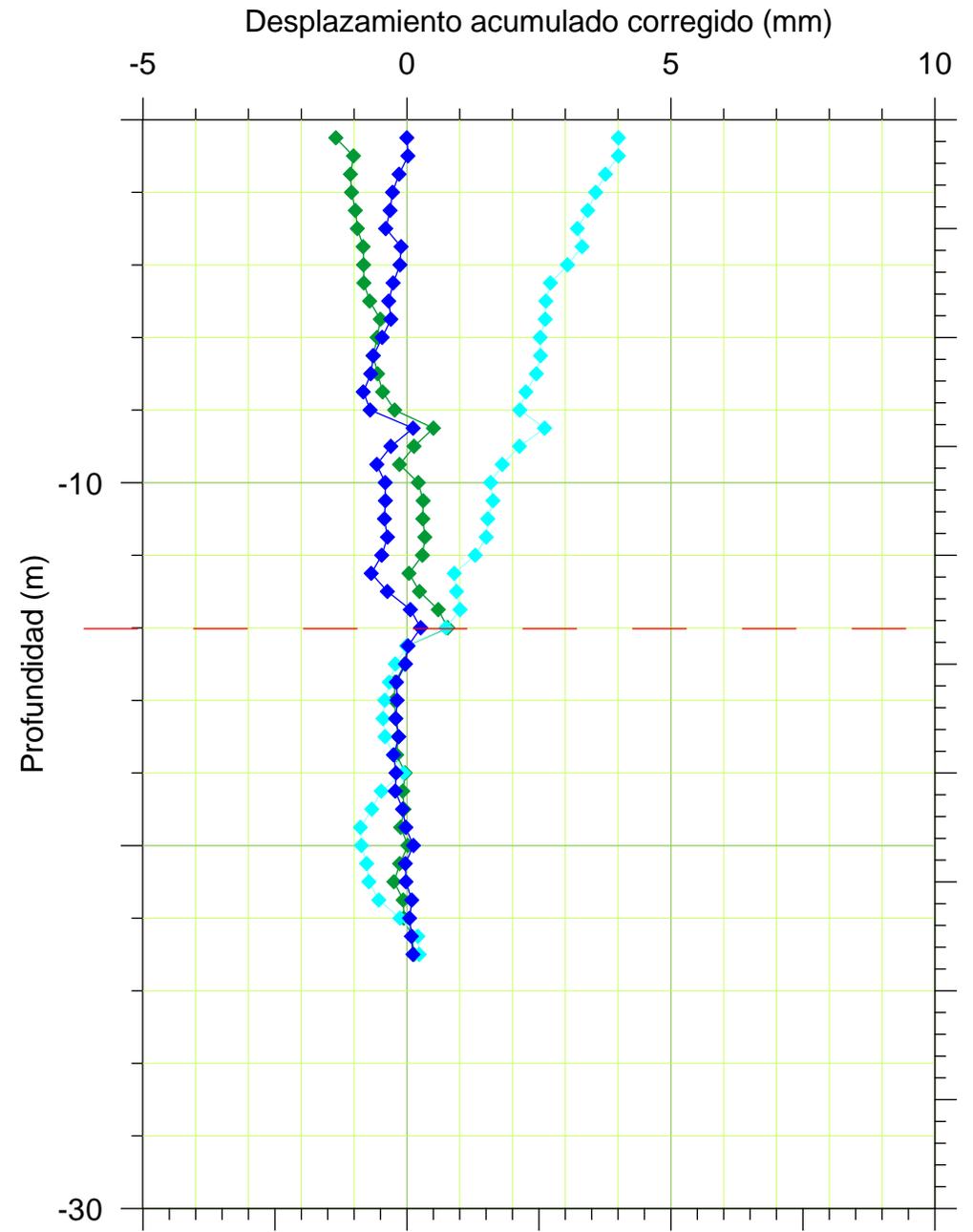


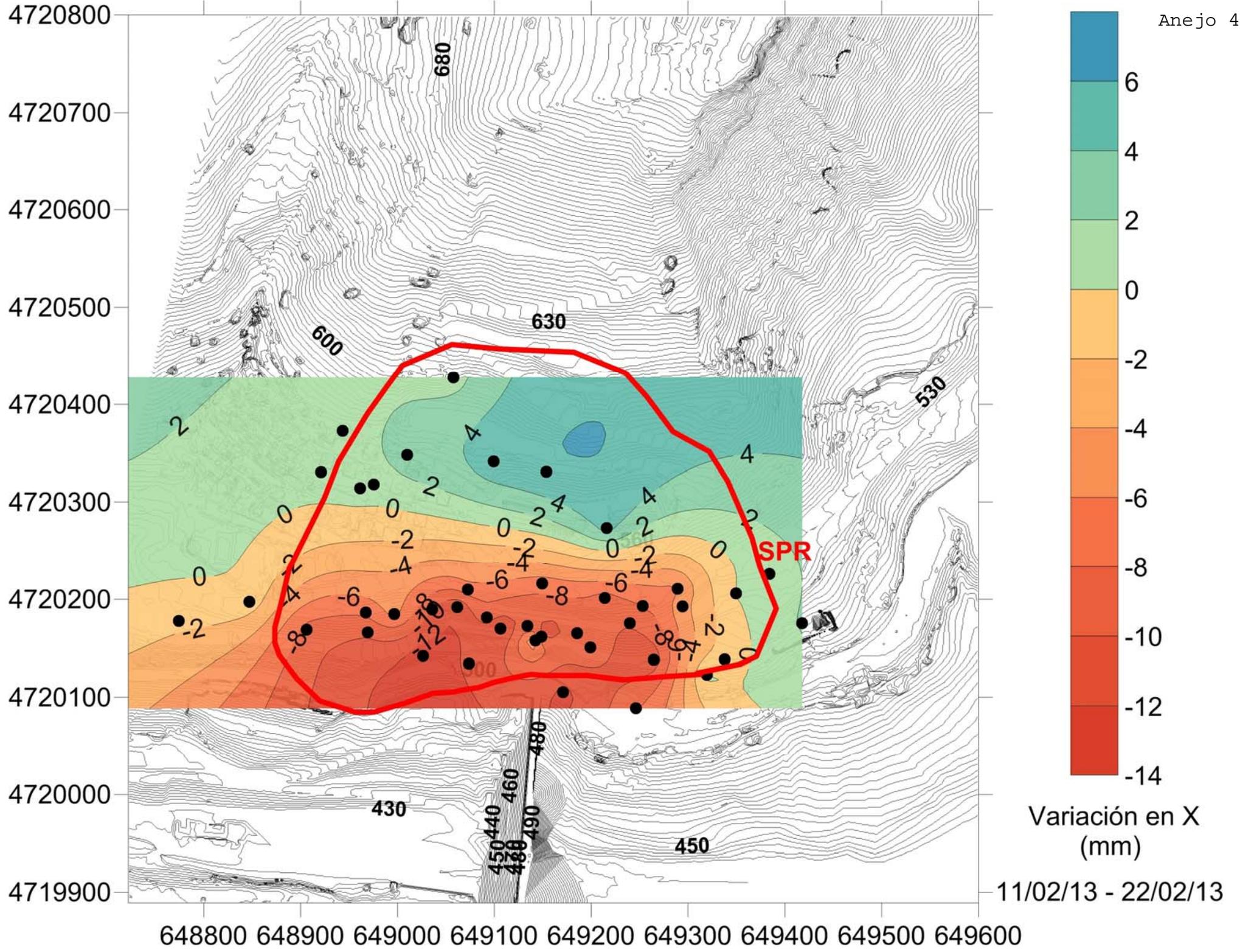
SZ-6

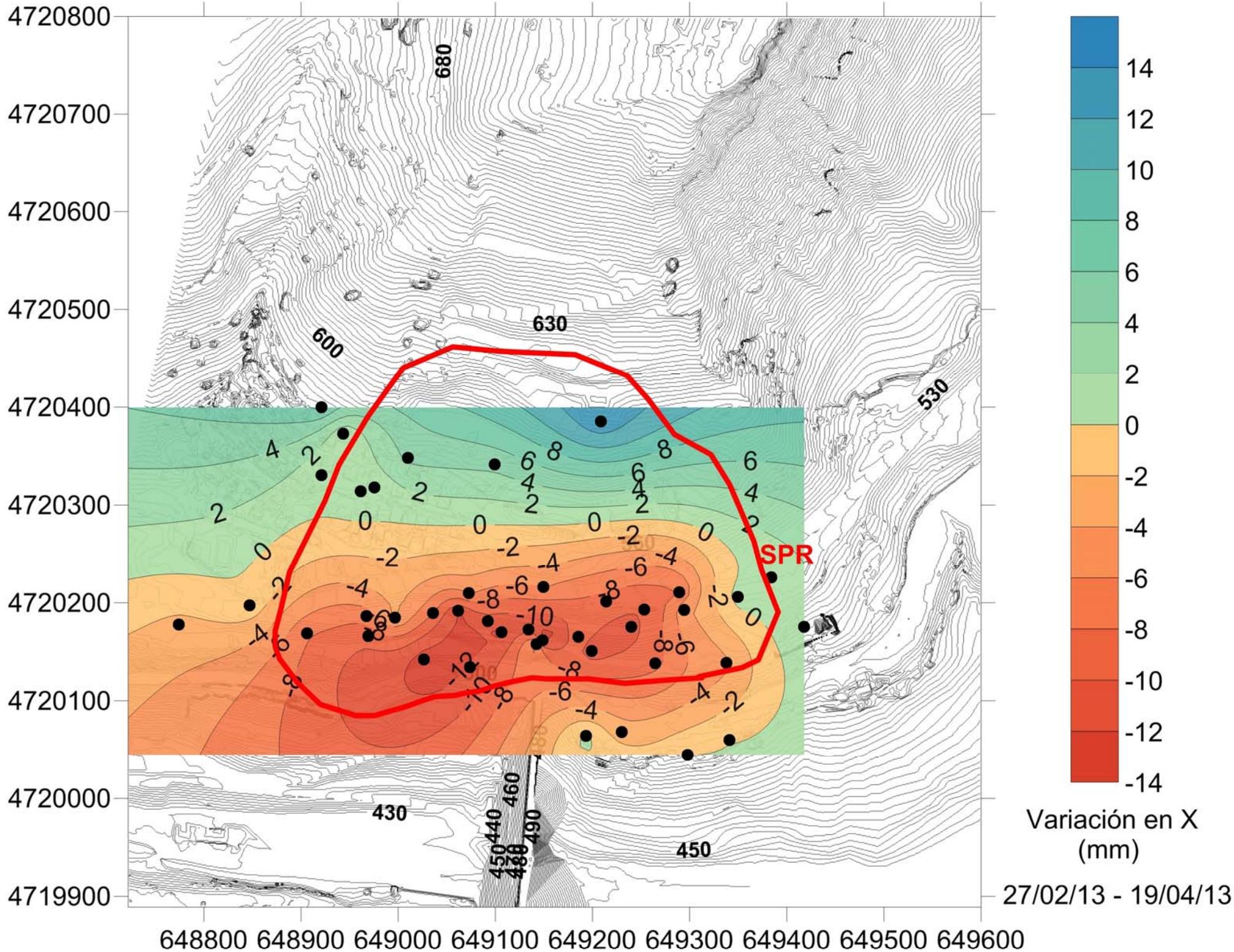
Dirección A

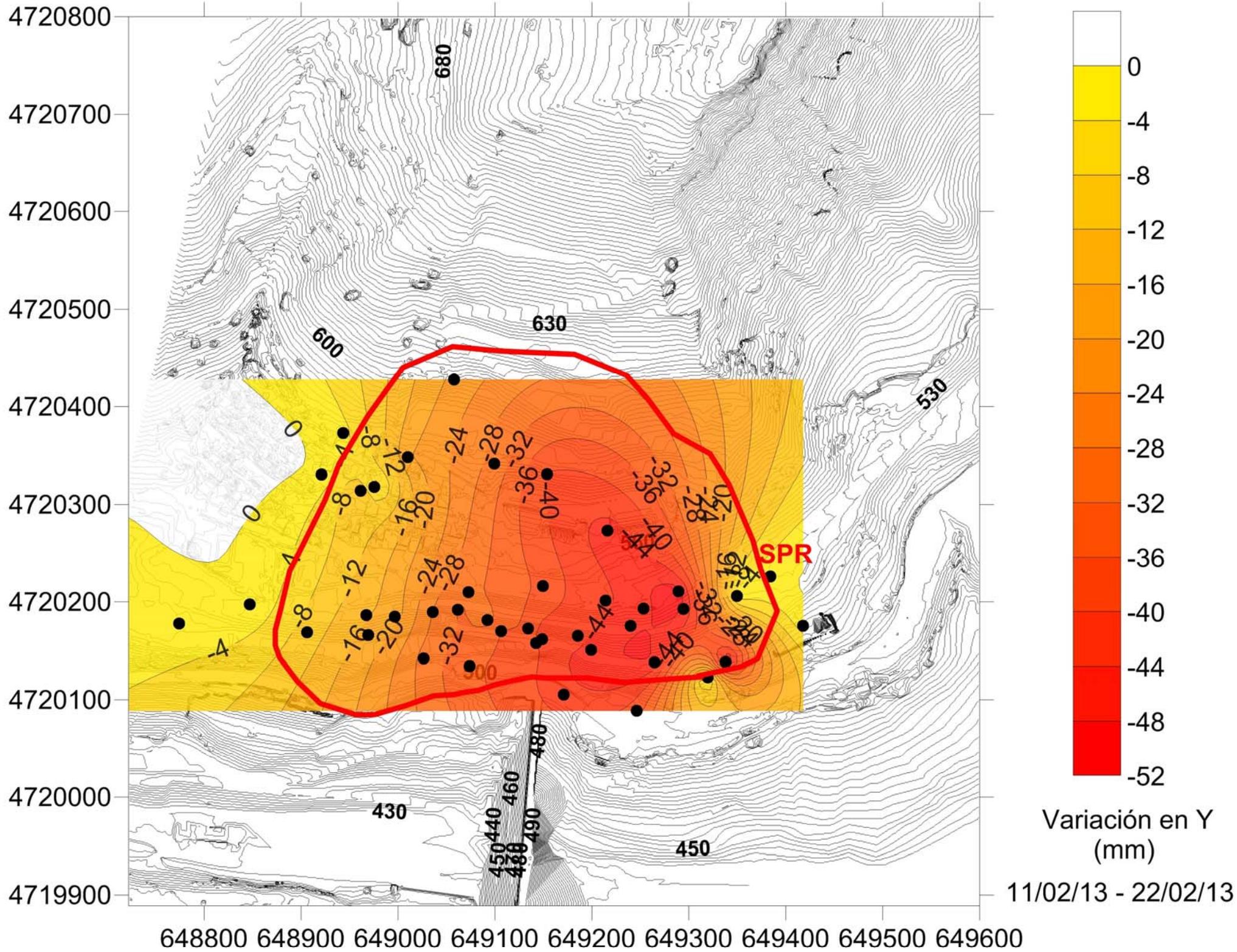


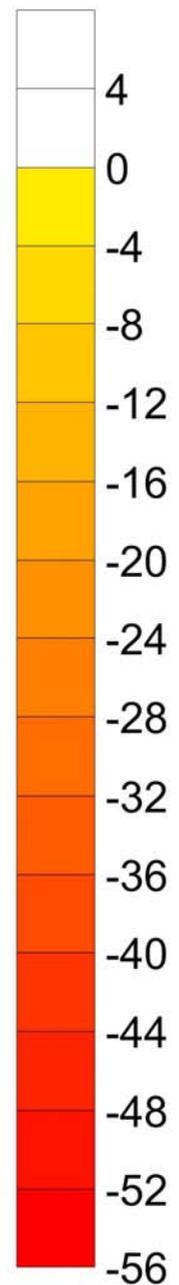
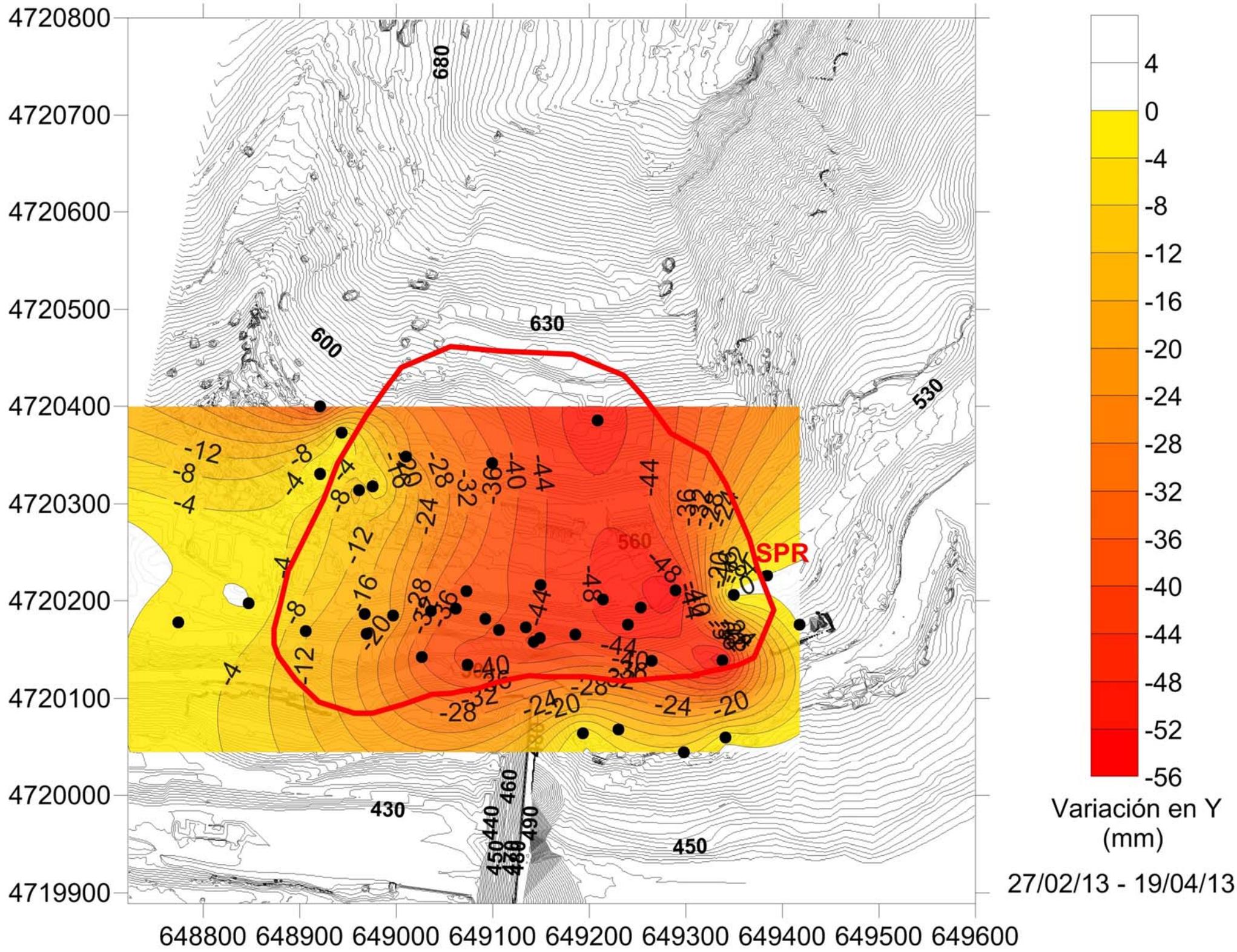
Dirección B





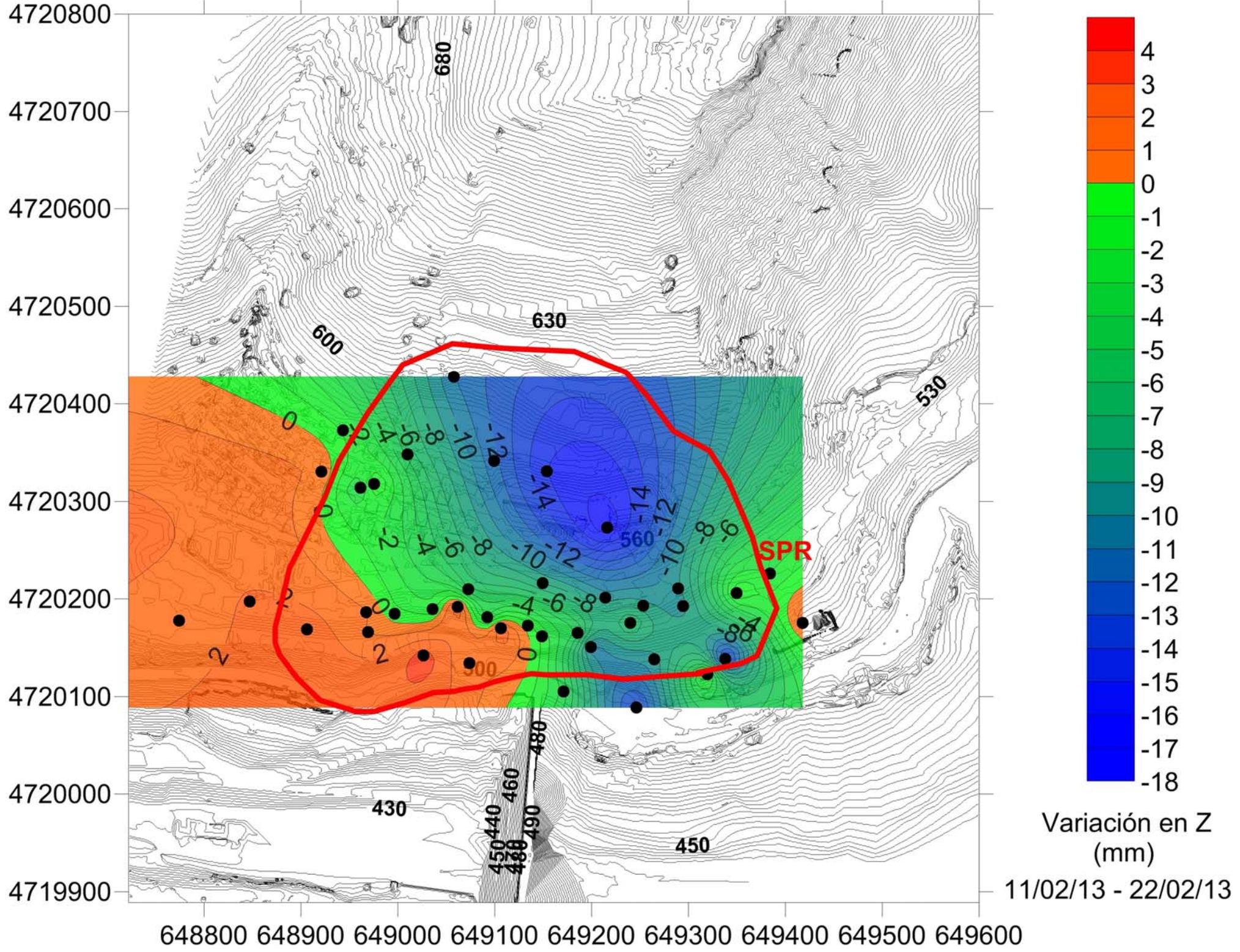


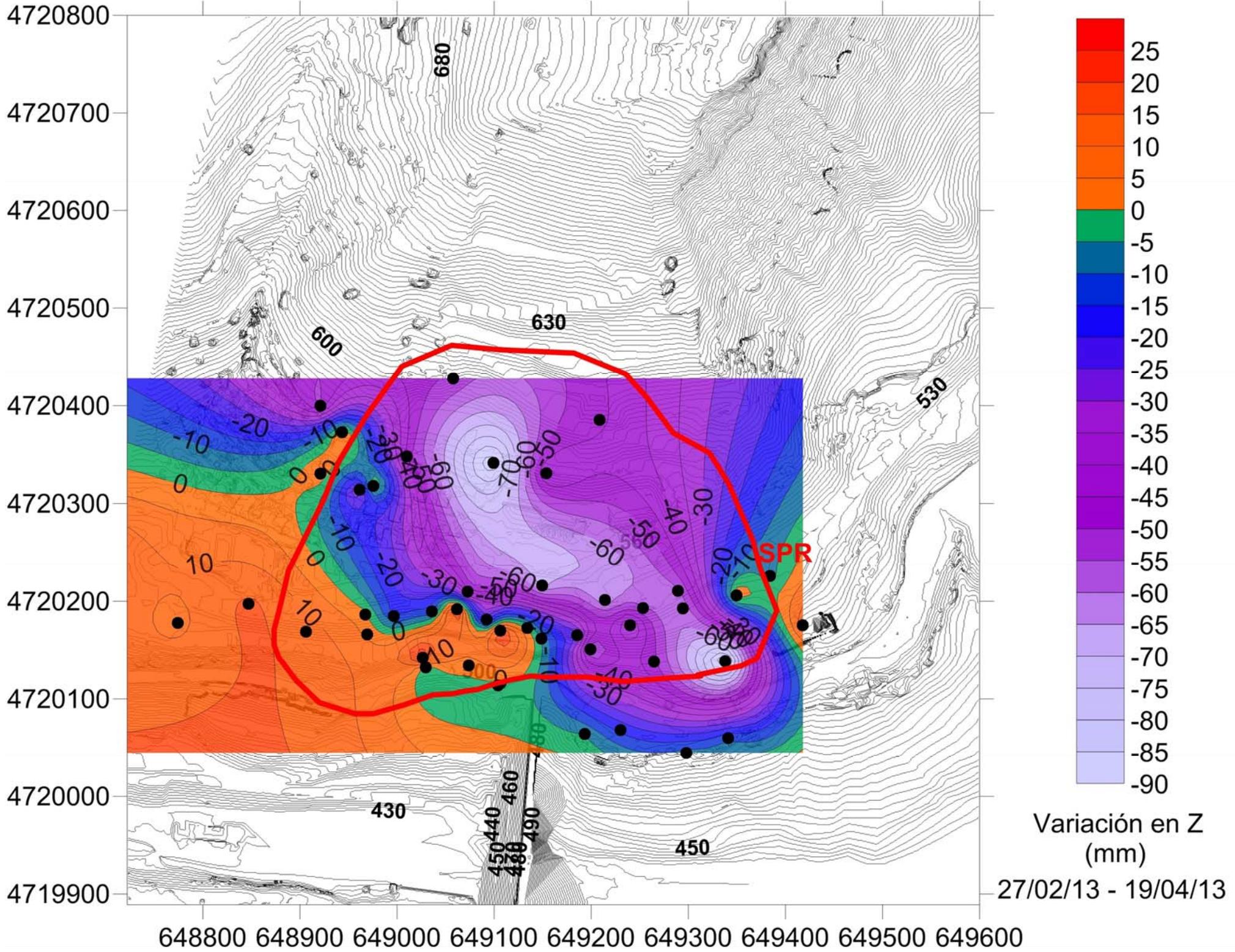


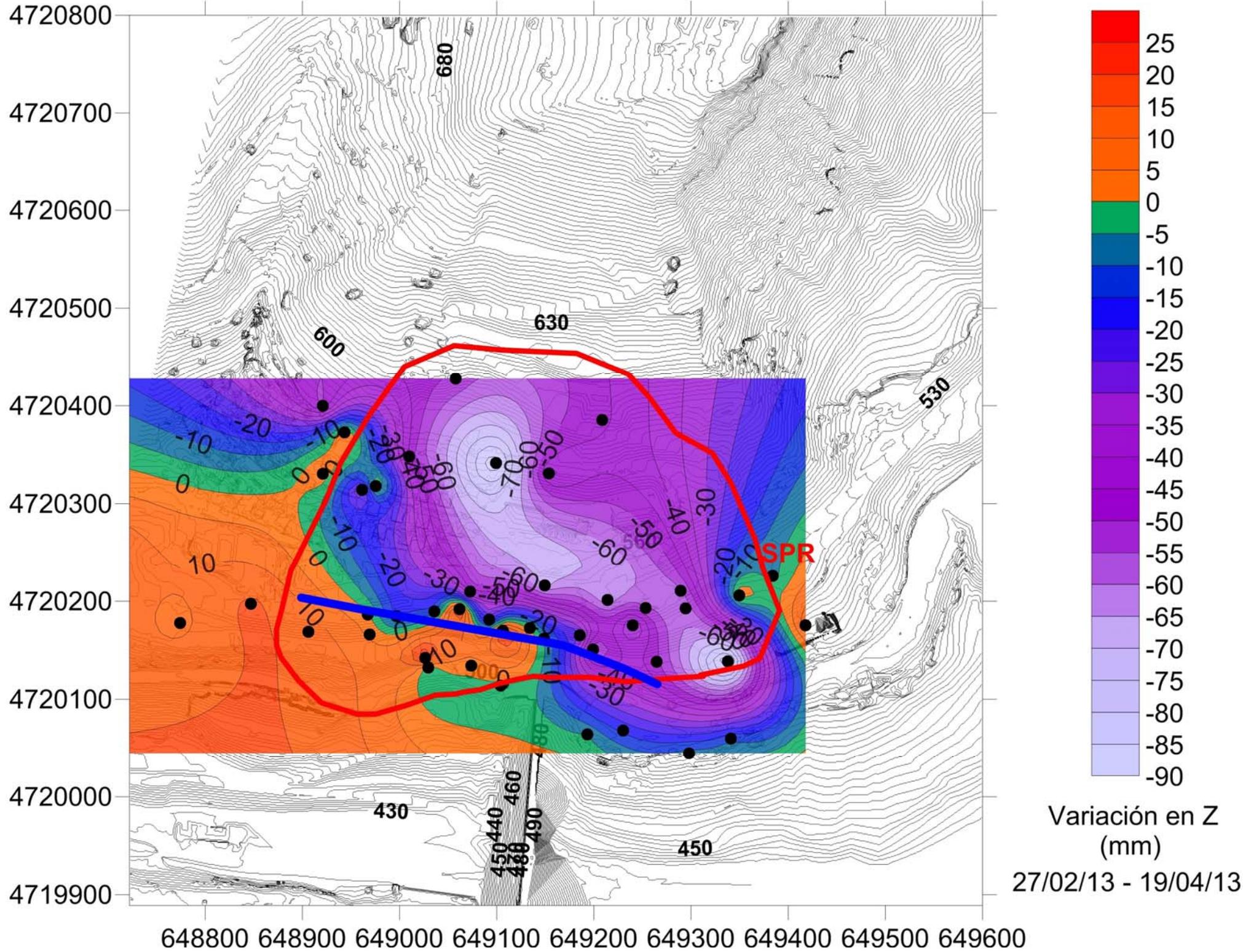


Variación en Y
(mm)

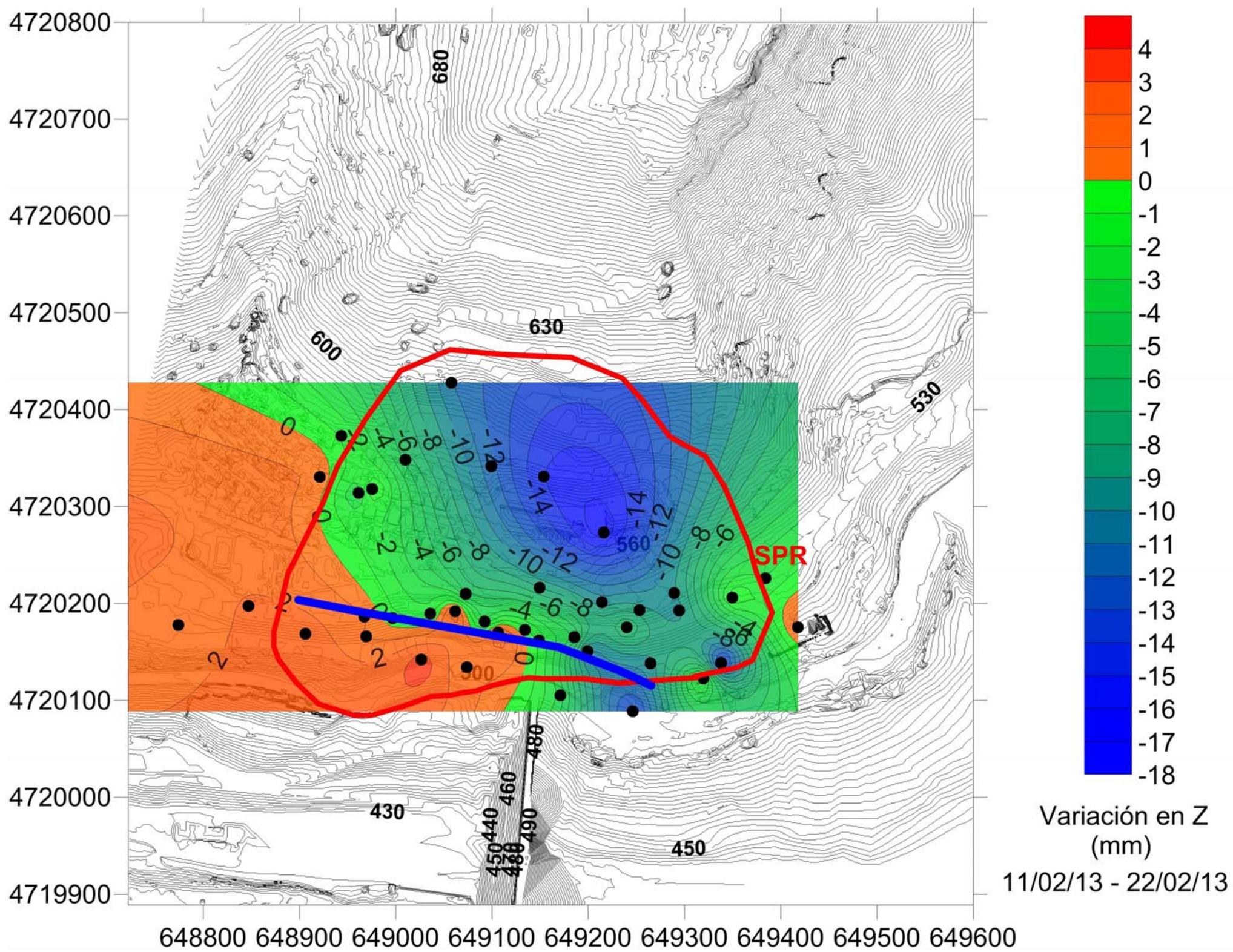
27/02/13 - 19/04/13

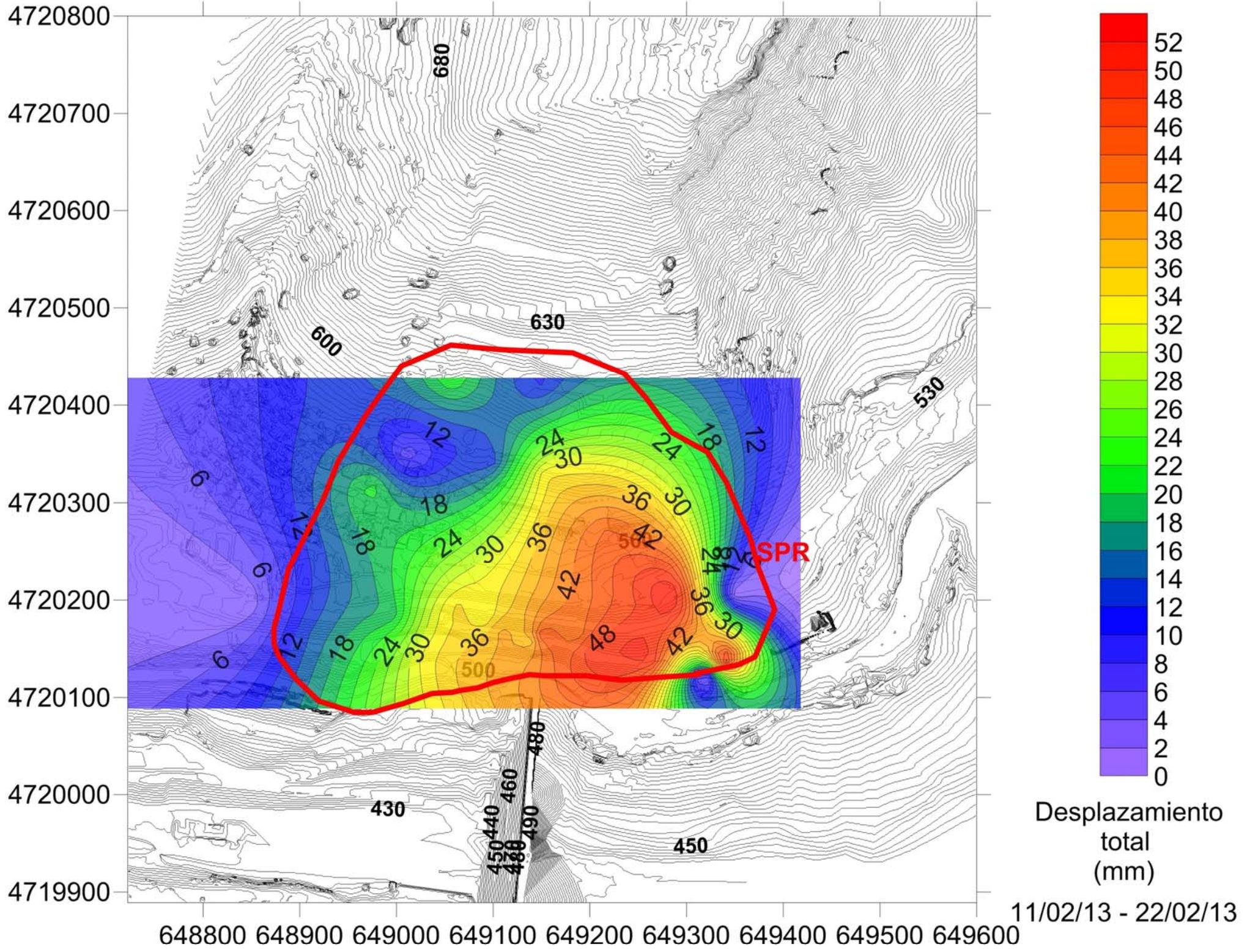


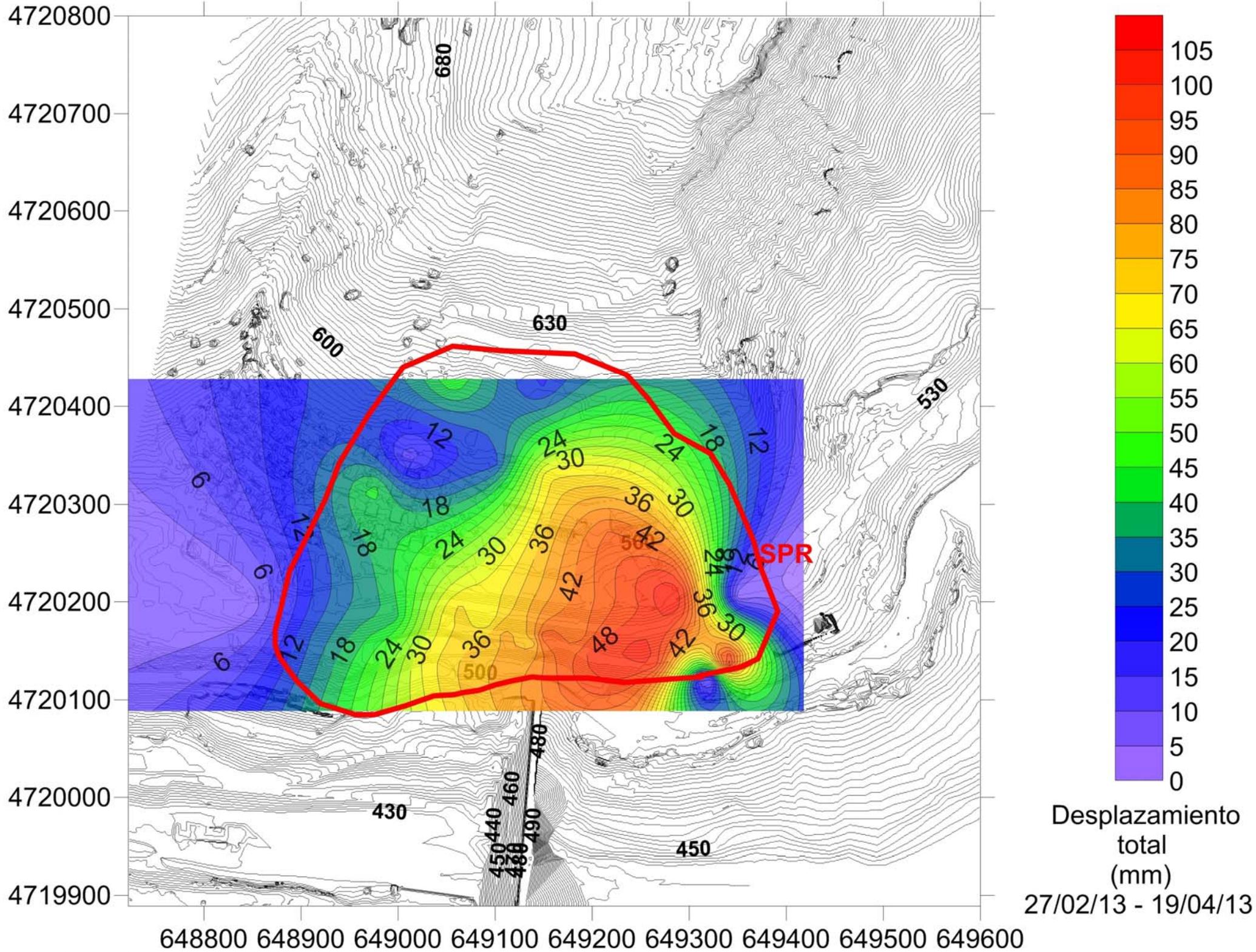




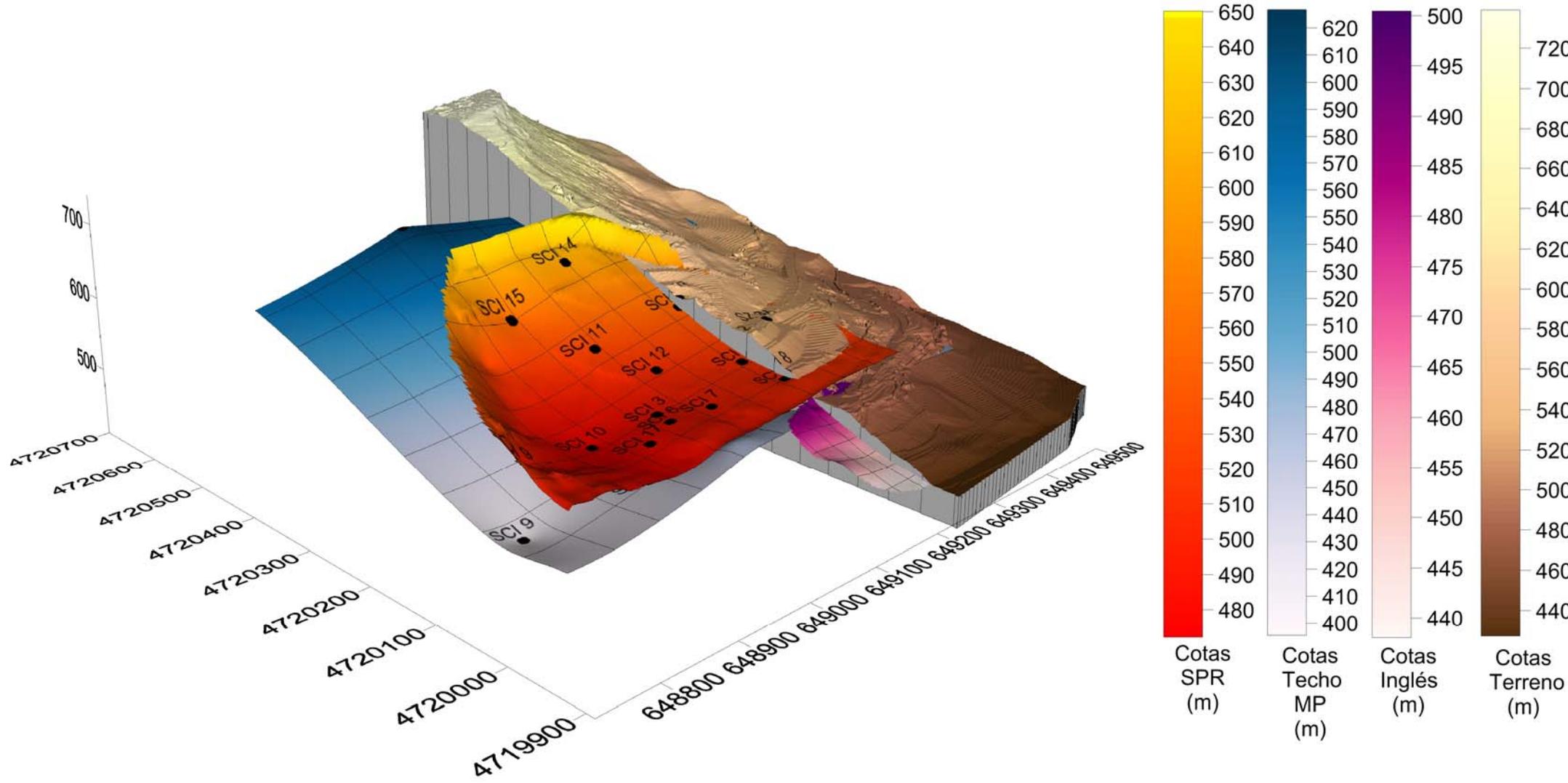
Variación en Z
(mm)
27/02/13 - 19/04/13

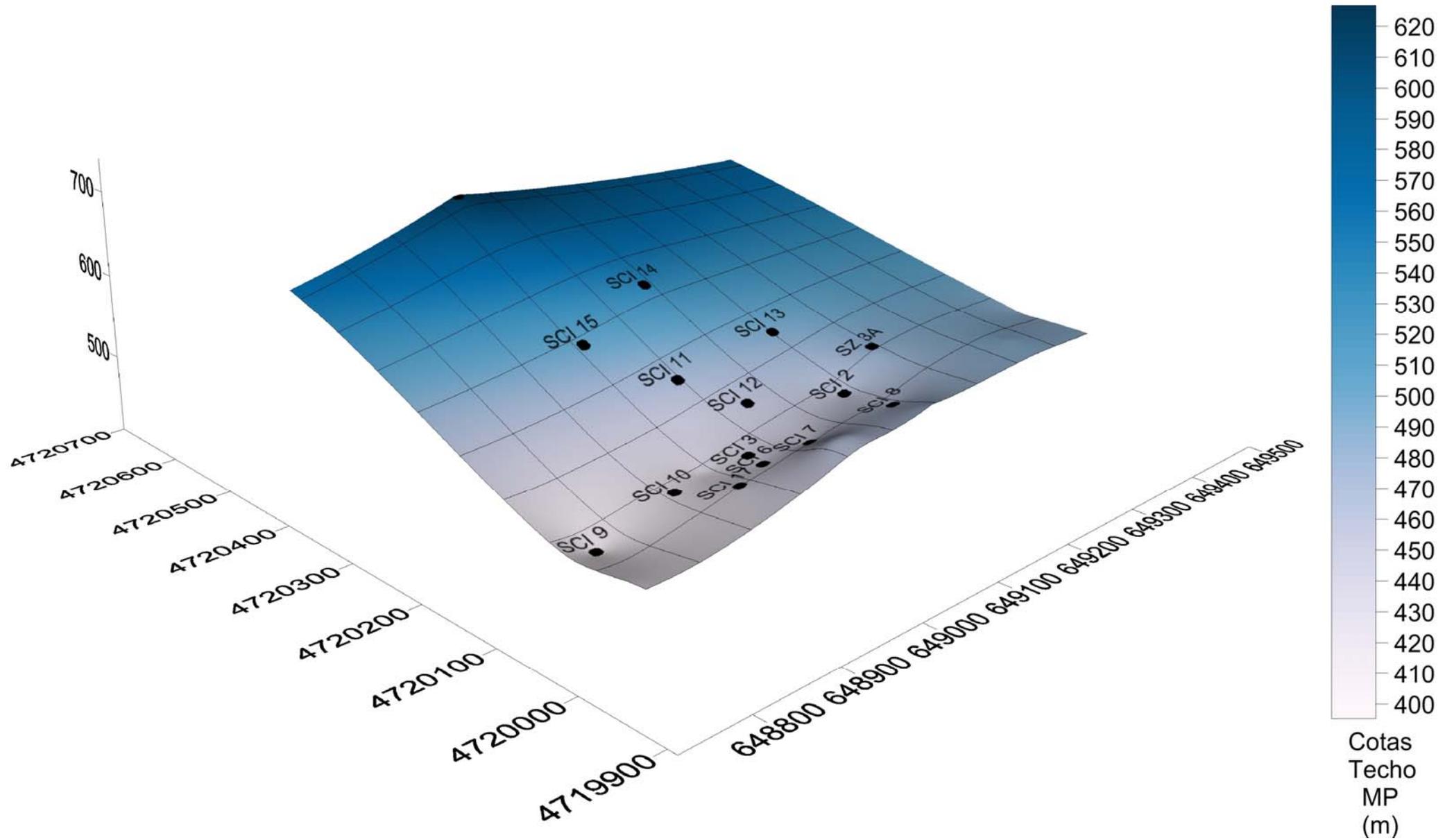


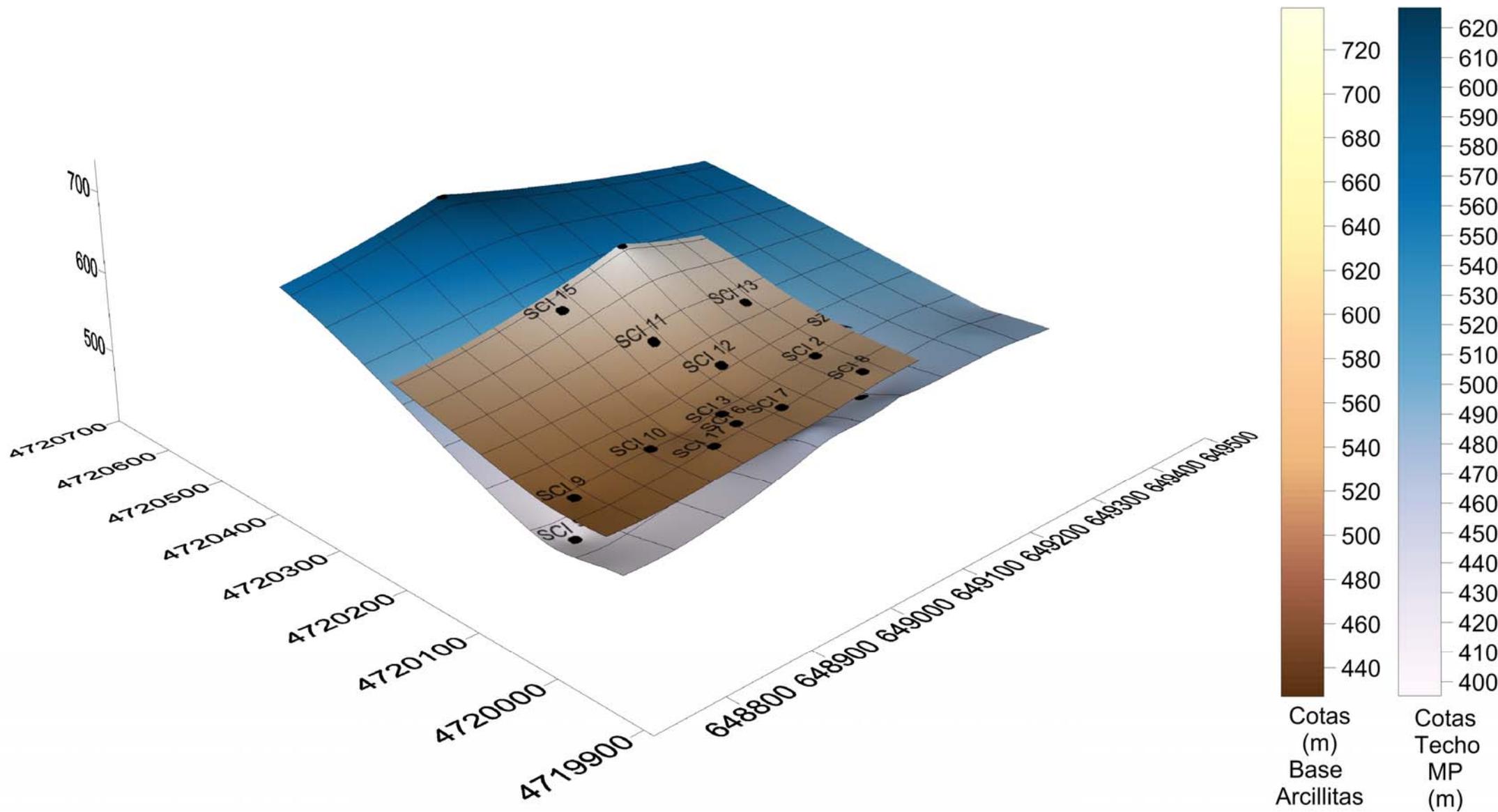


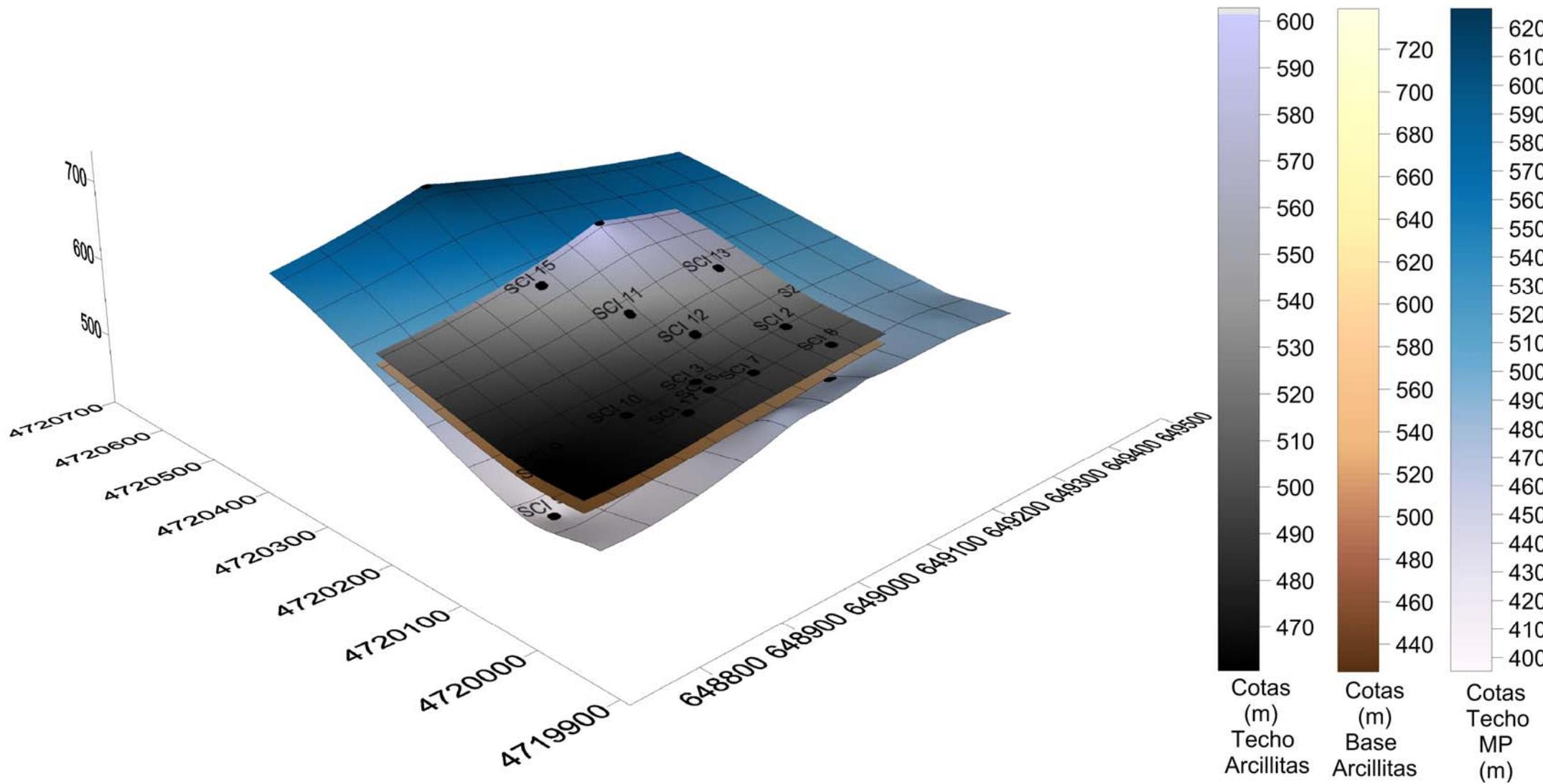


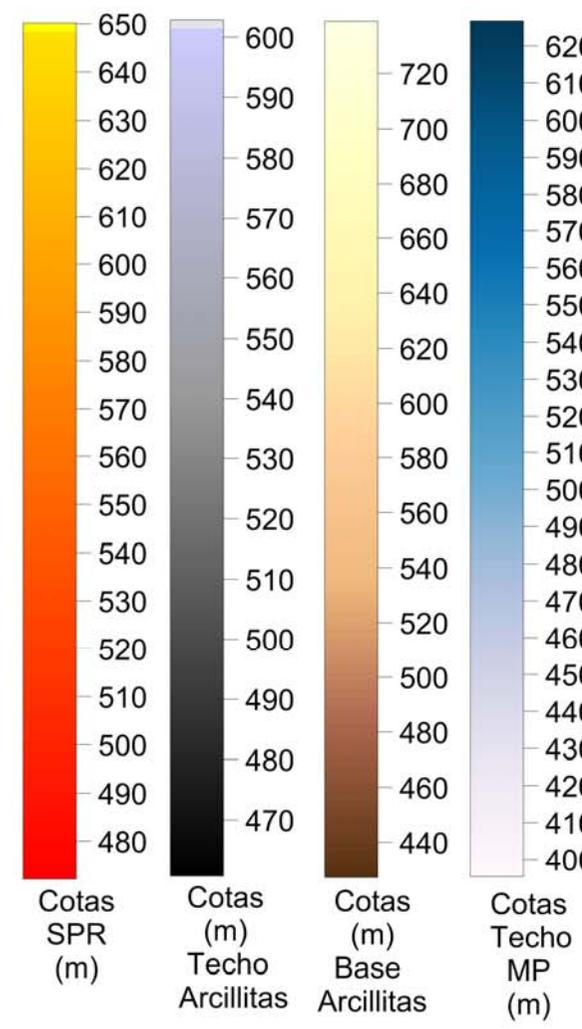
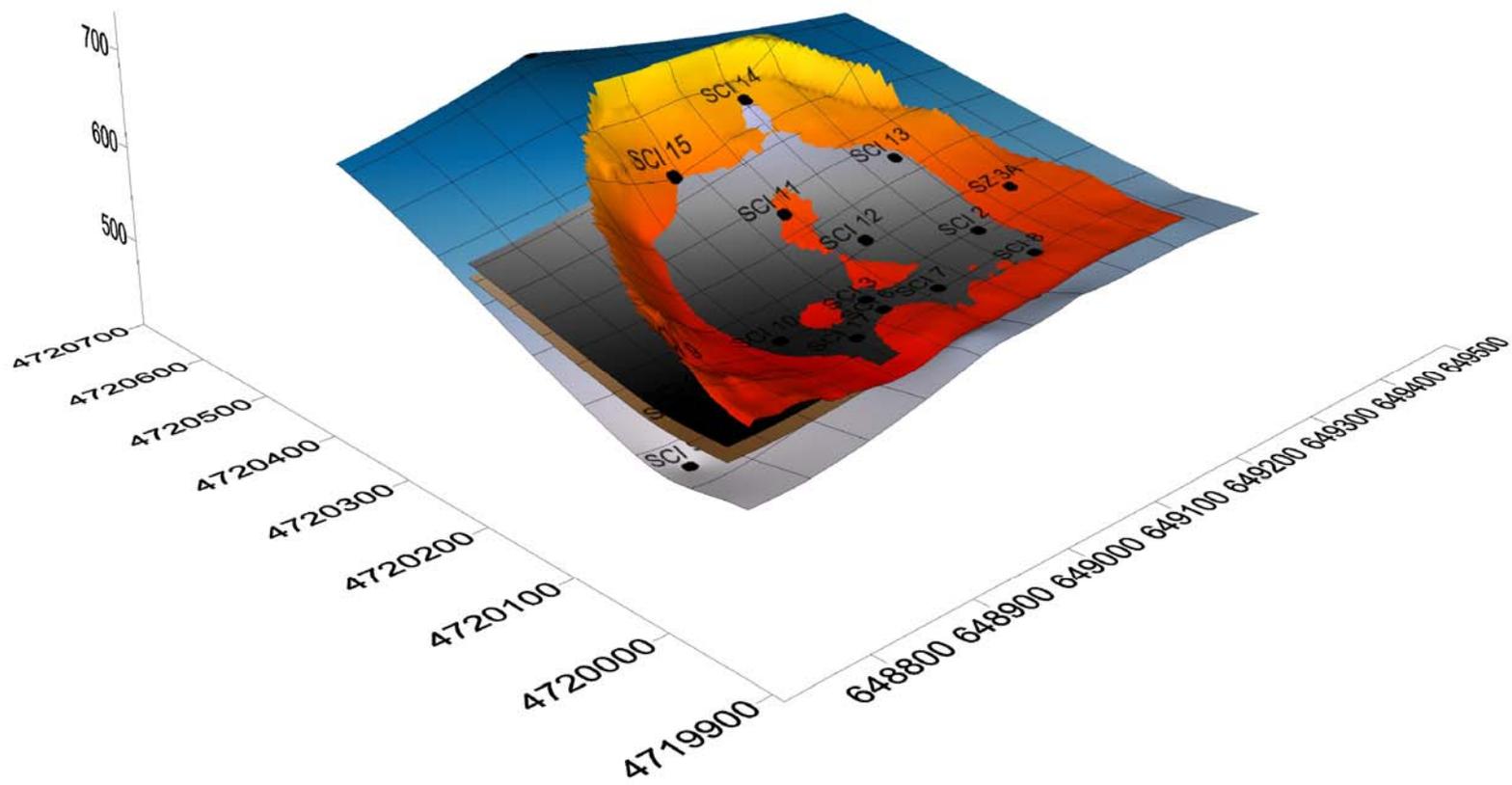
Anejo 5. Bloques diagrama 3D

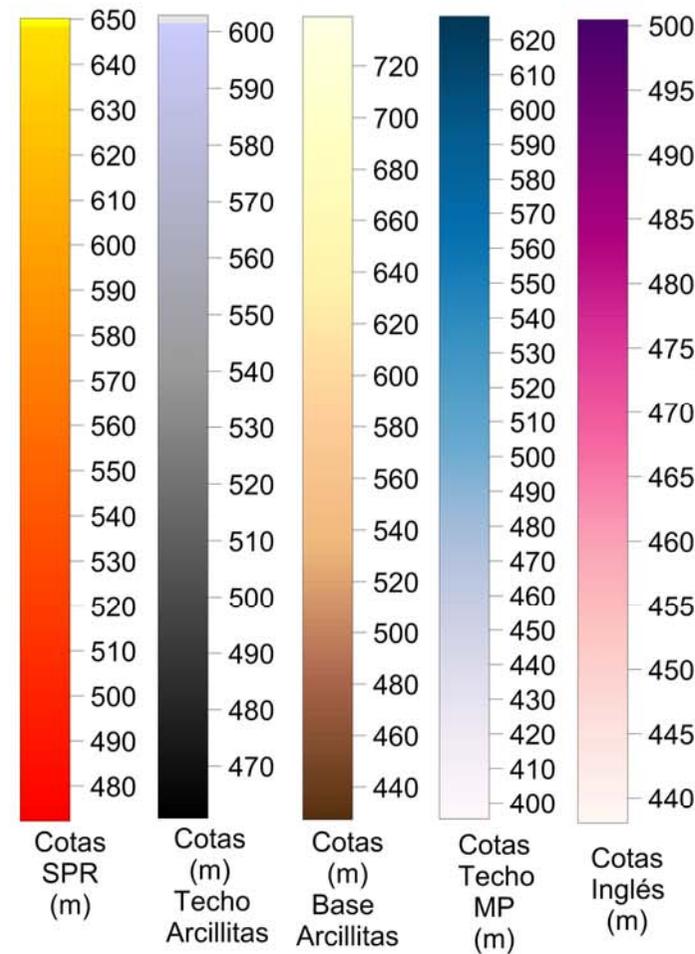
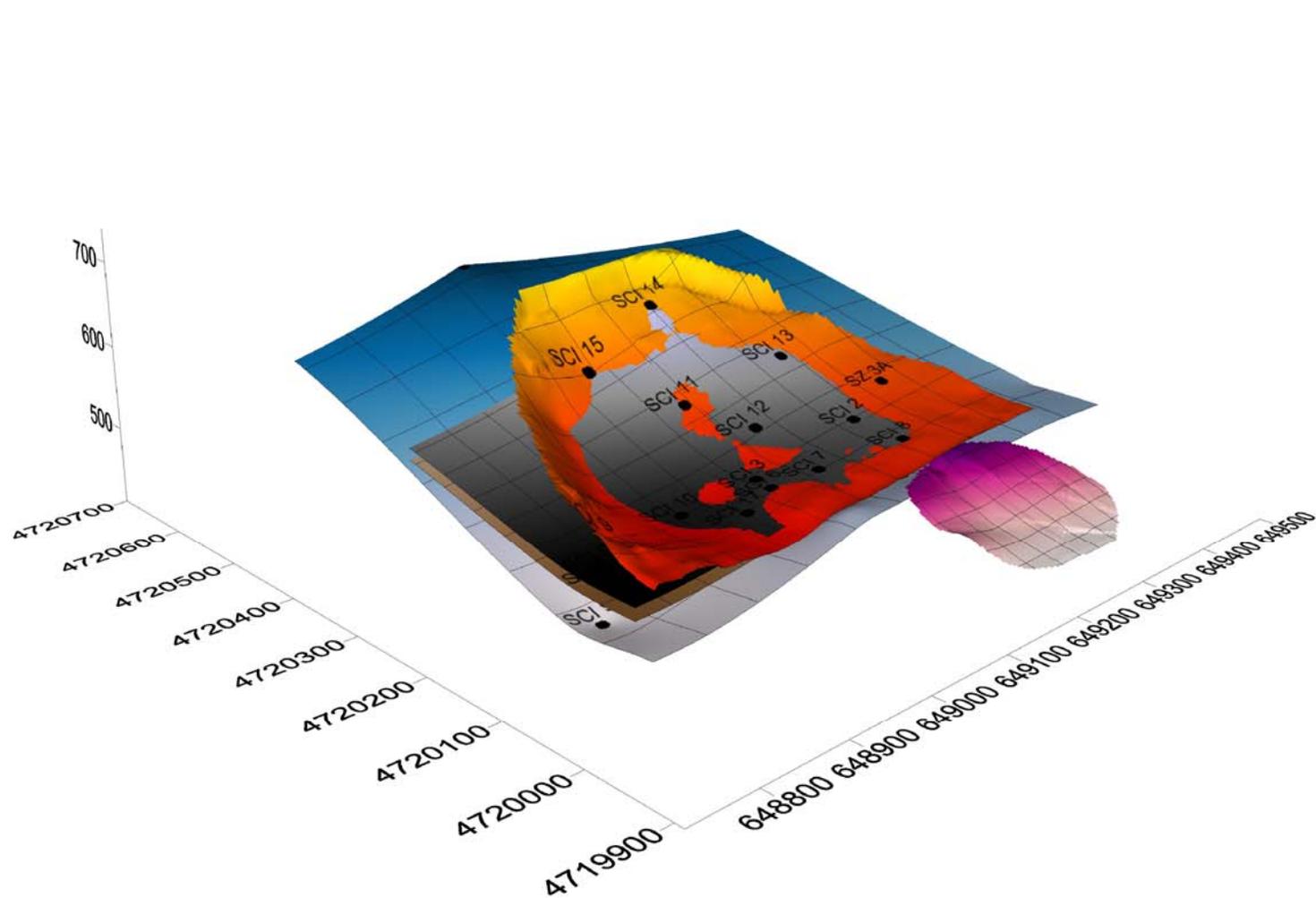


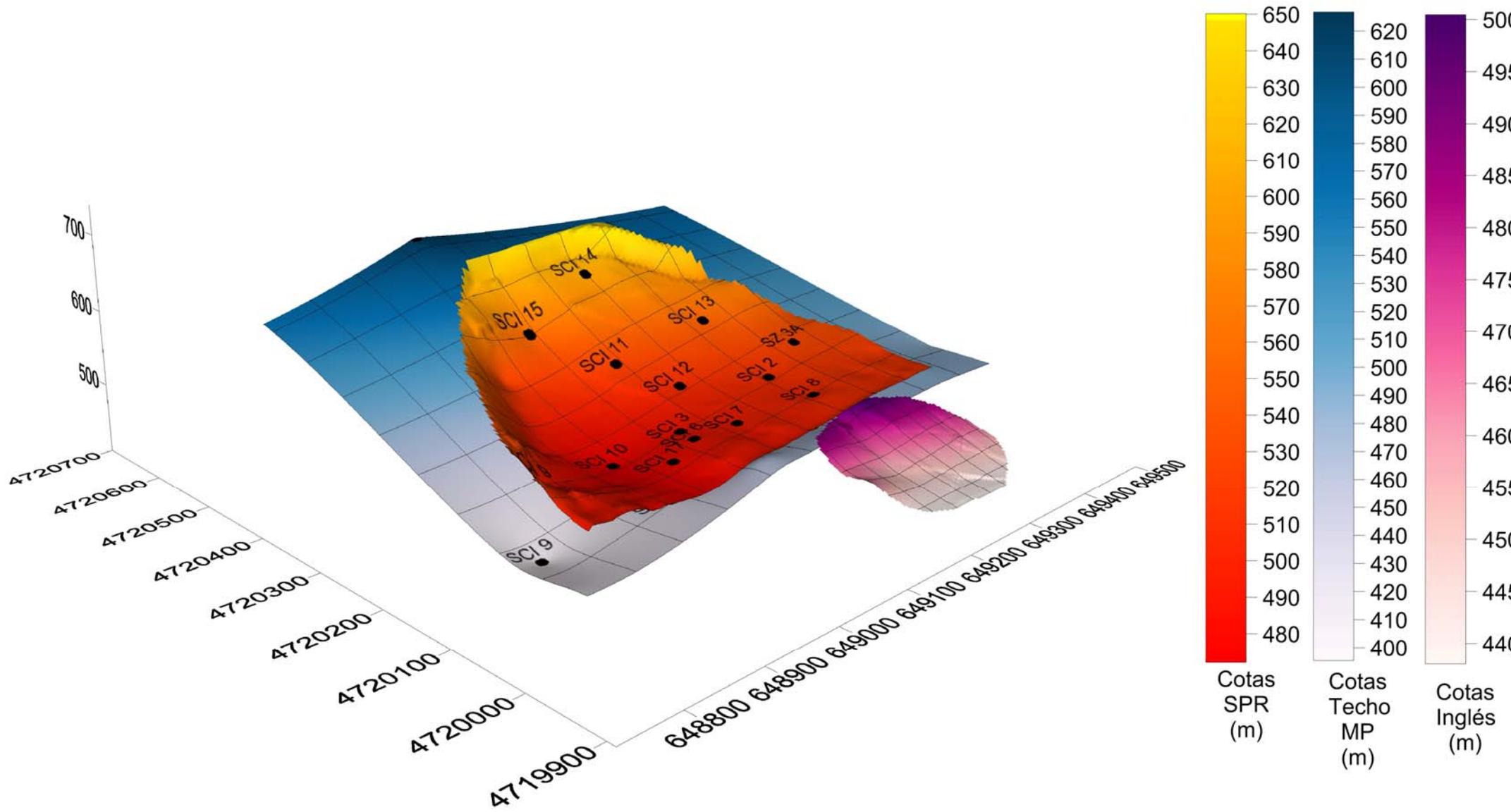


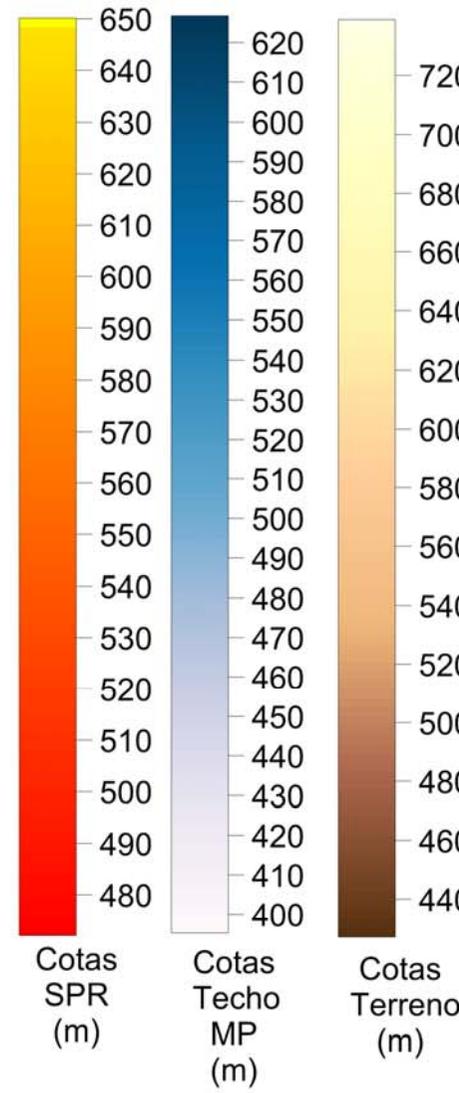
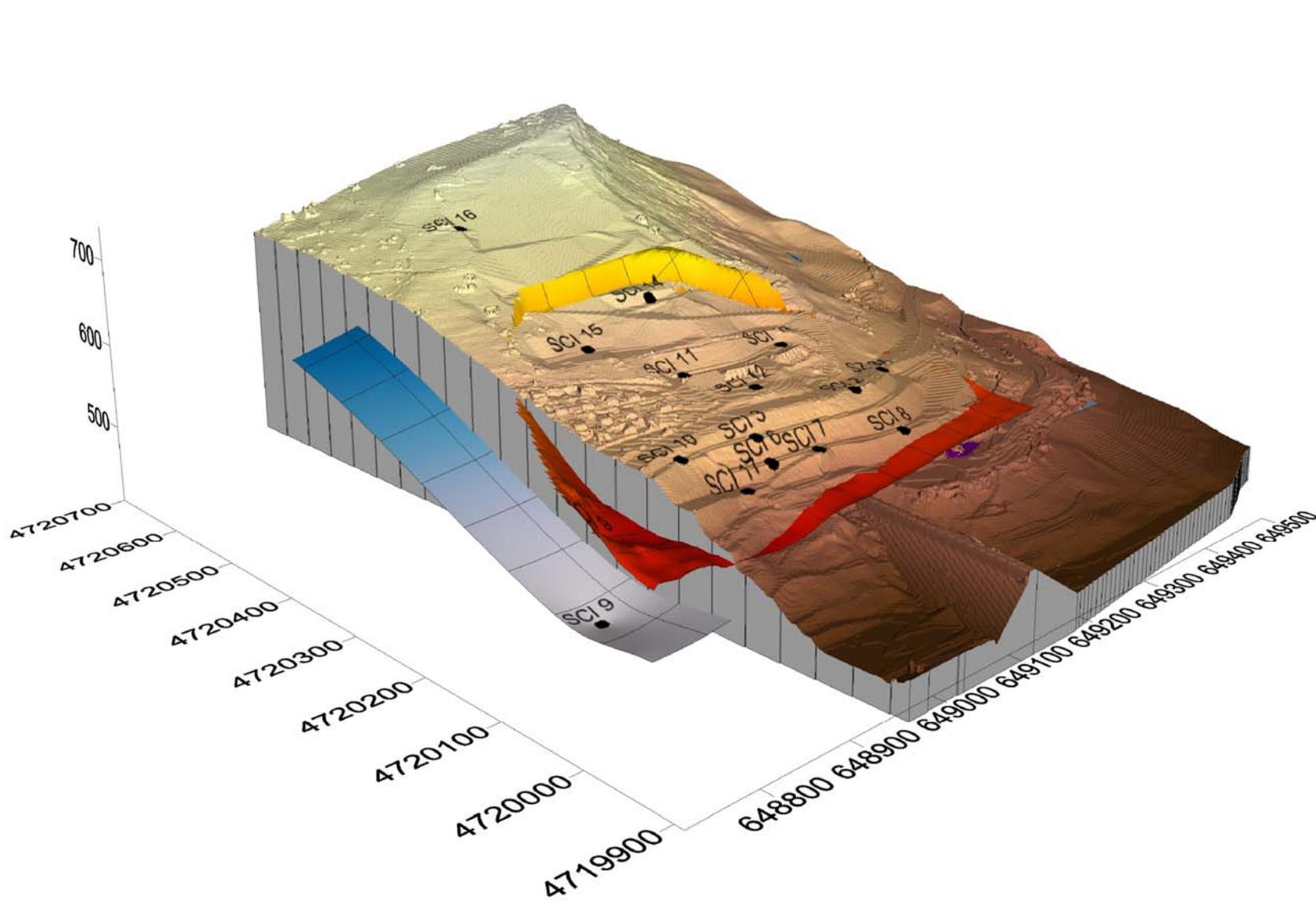


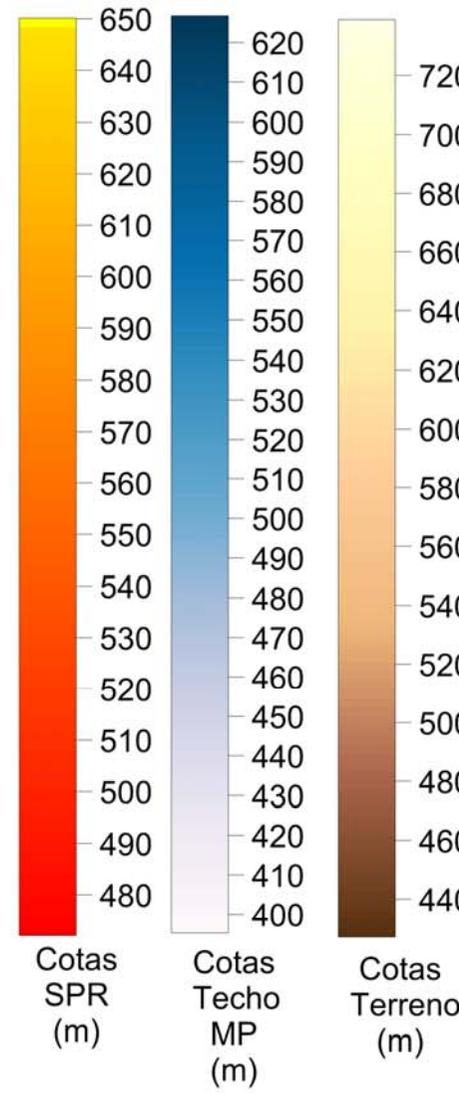
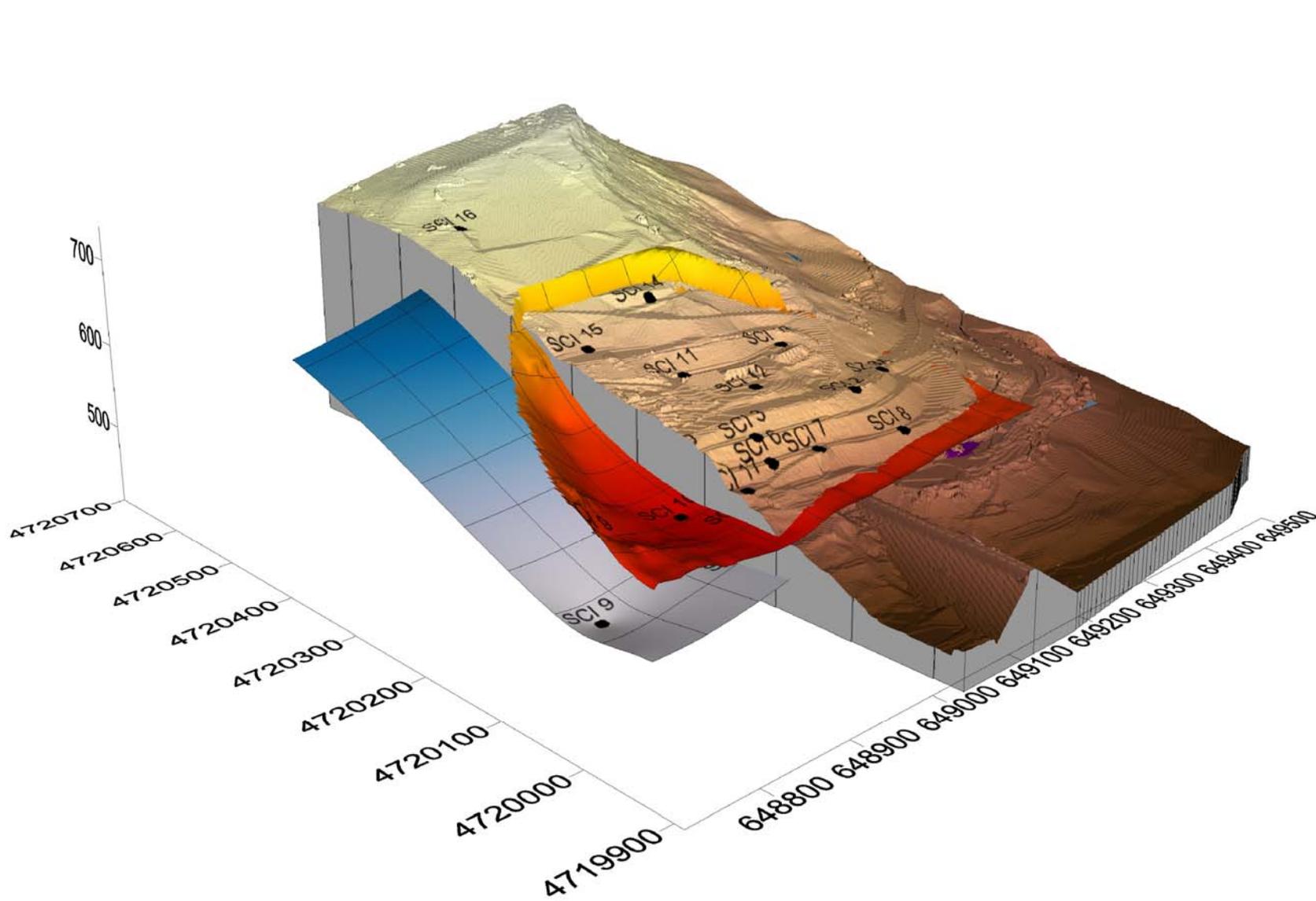


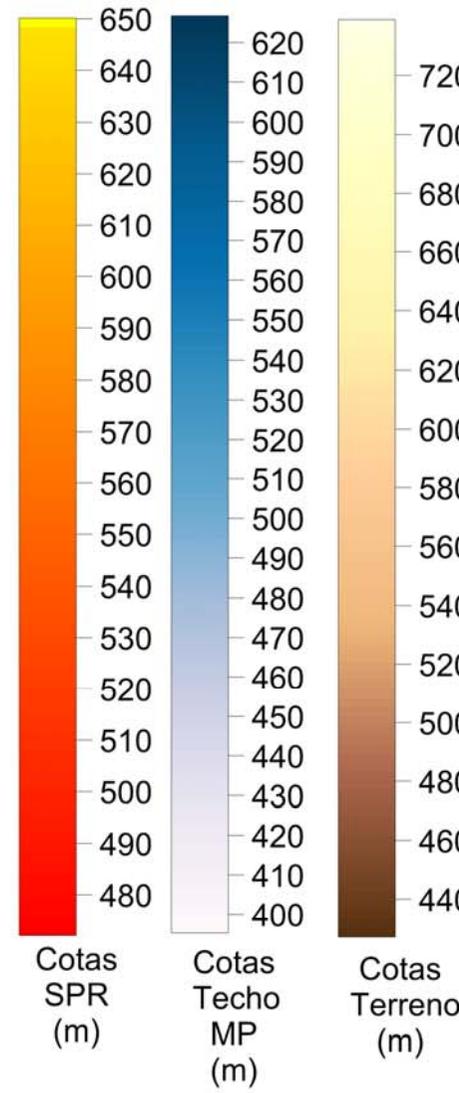
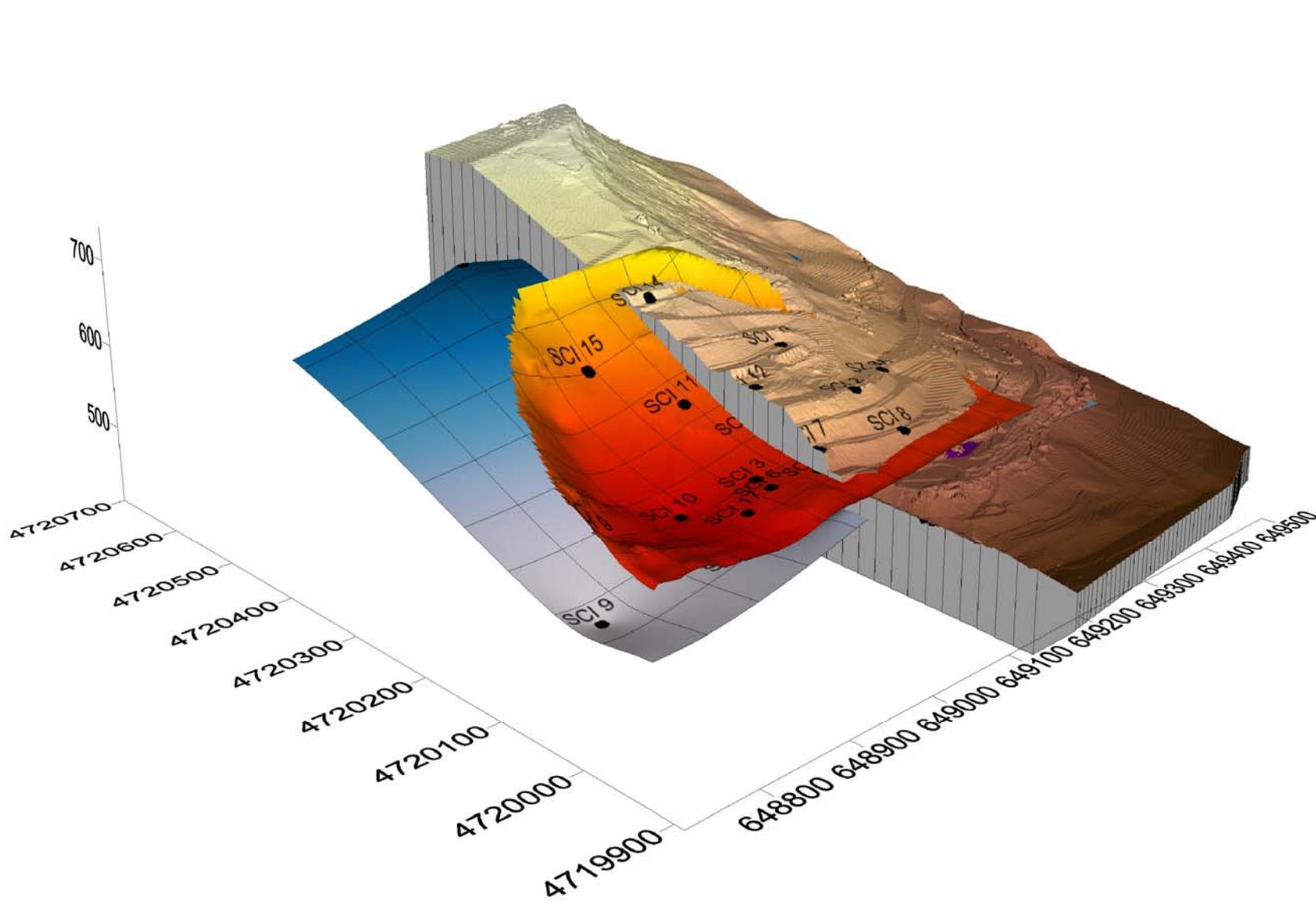


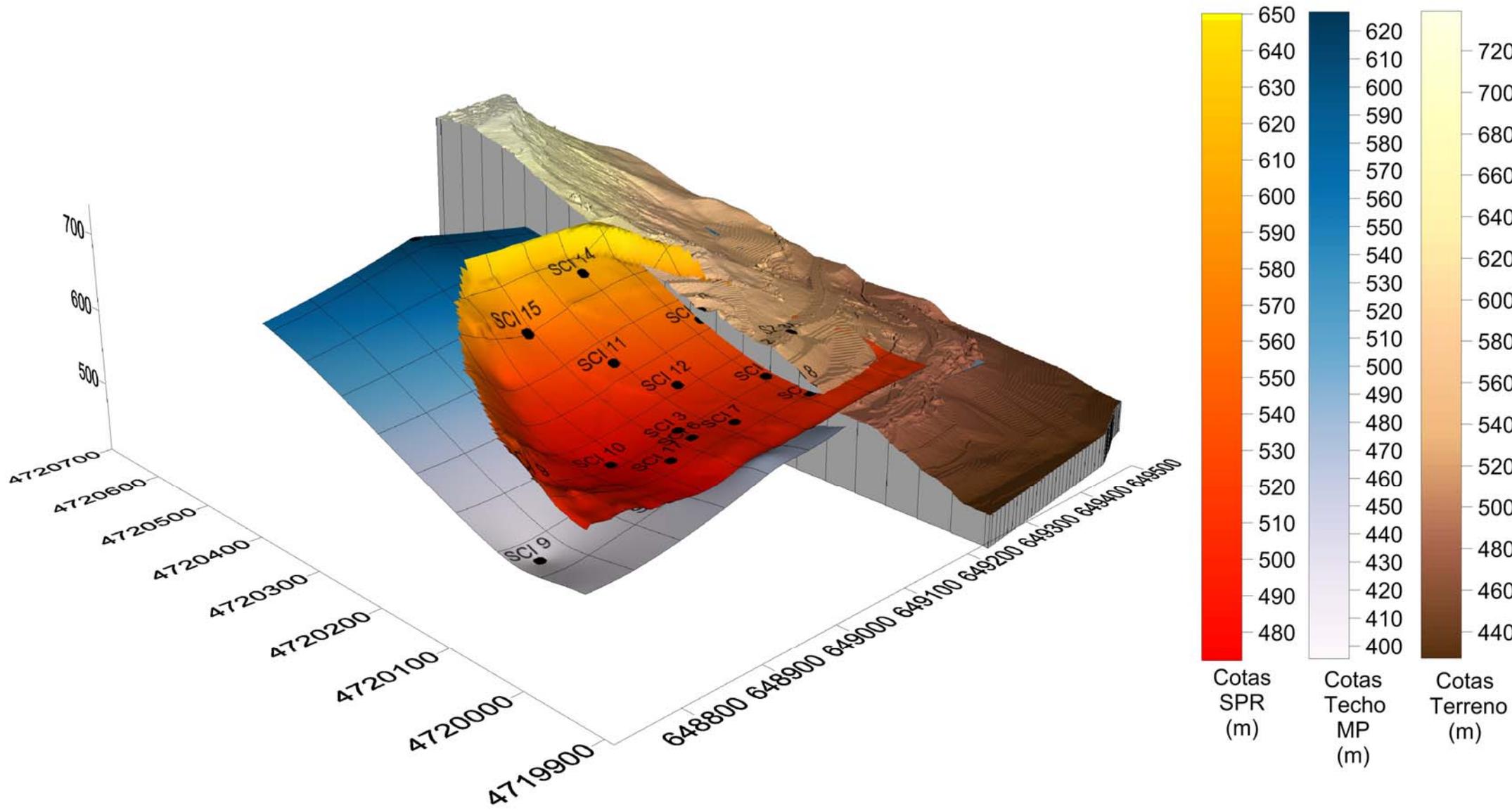


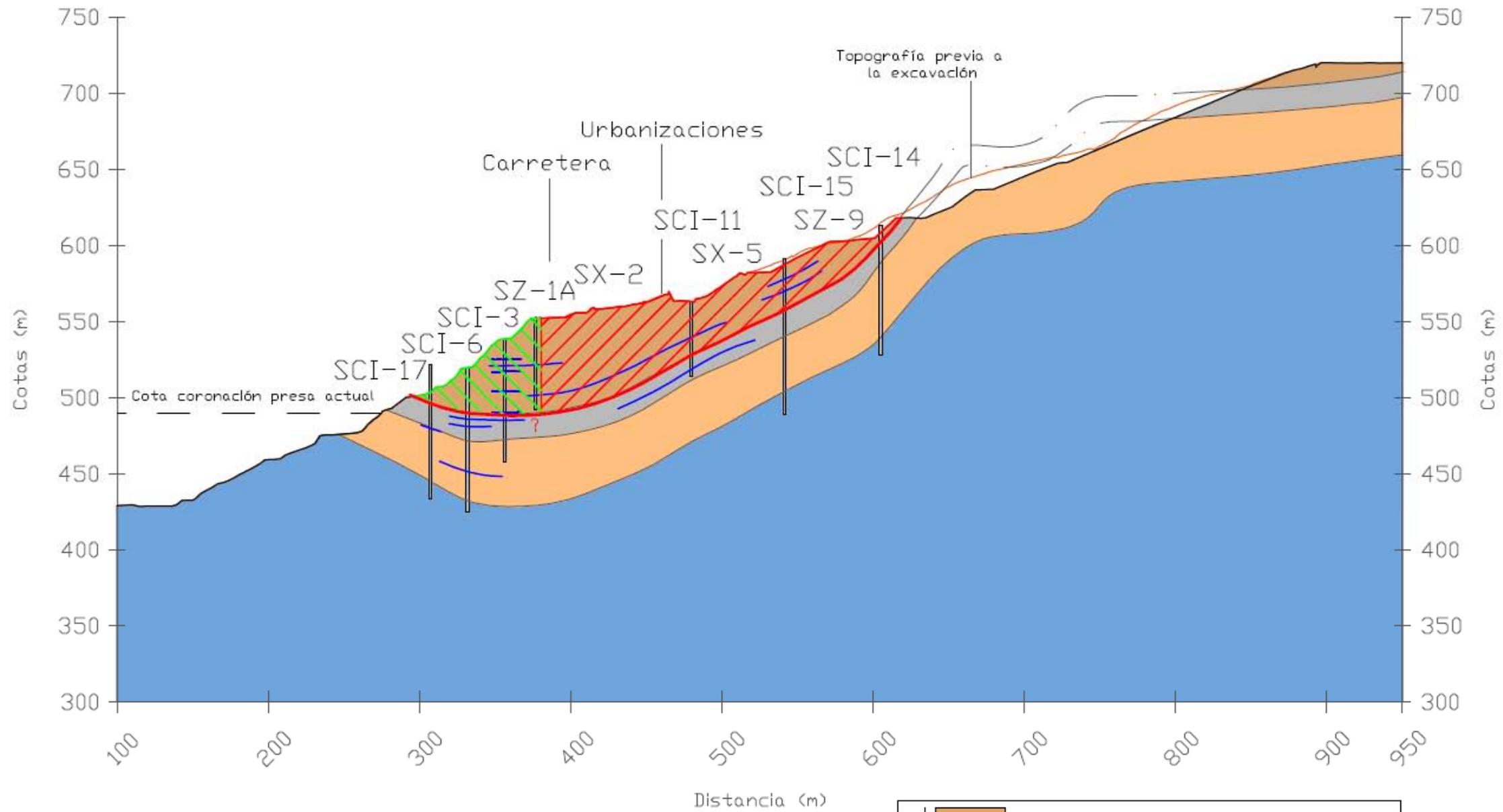










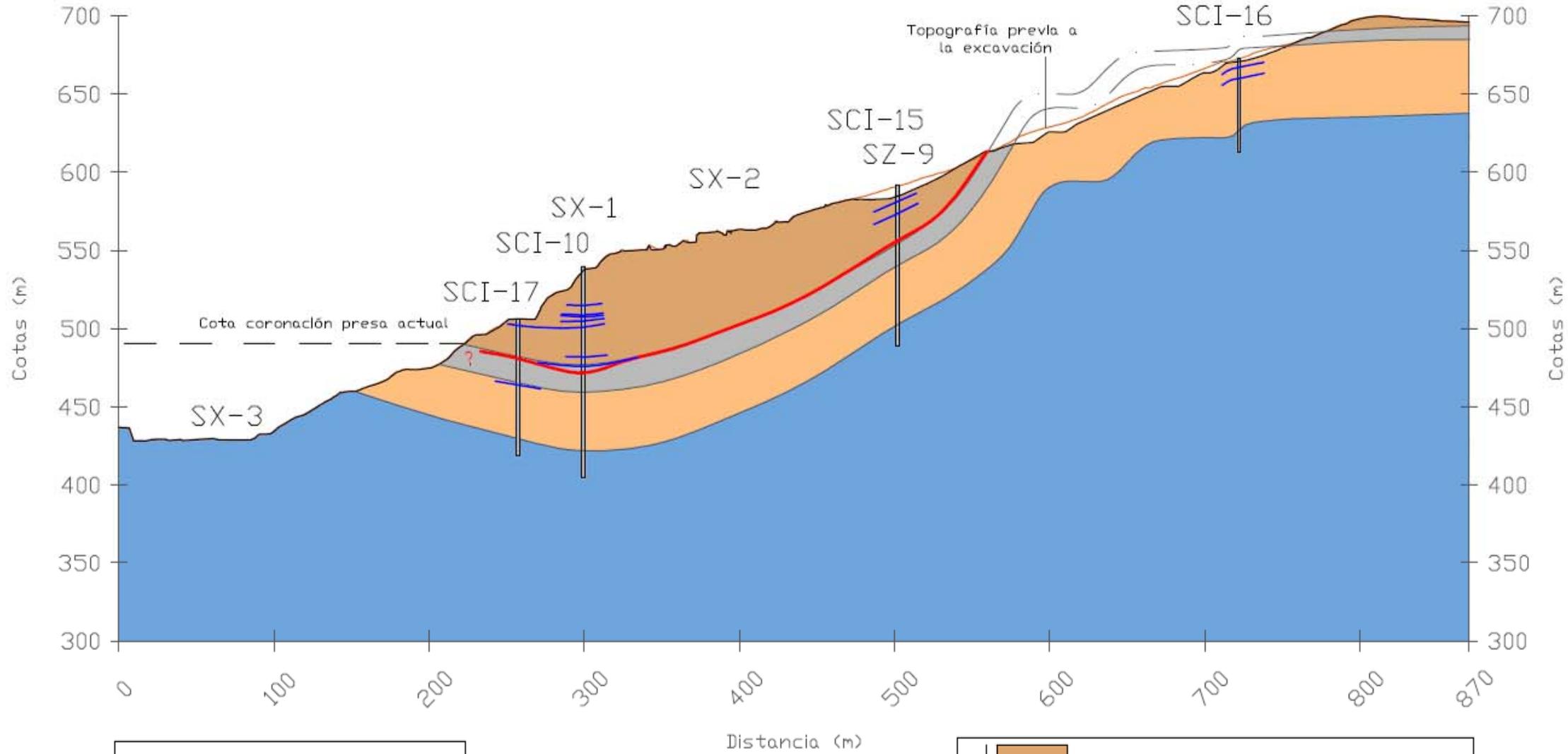


— Sup. Principal de Rot.
— Otras superficies
 Inclinómetro

Cuña activa
 Cuña pasiva

FLYSCH
 F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
 F2: Arcillitas
 F1: Arcillitas con Intercalaciones de areniscas
 Margas de Pamplona

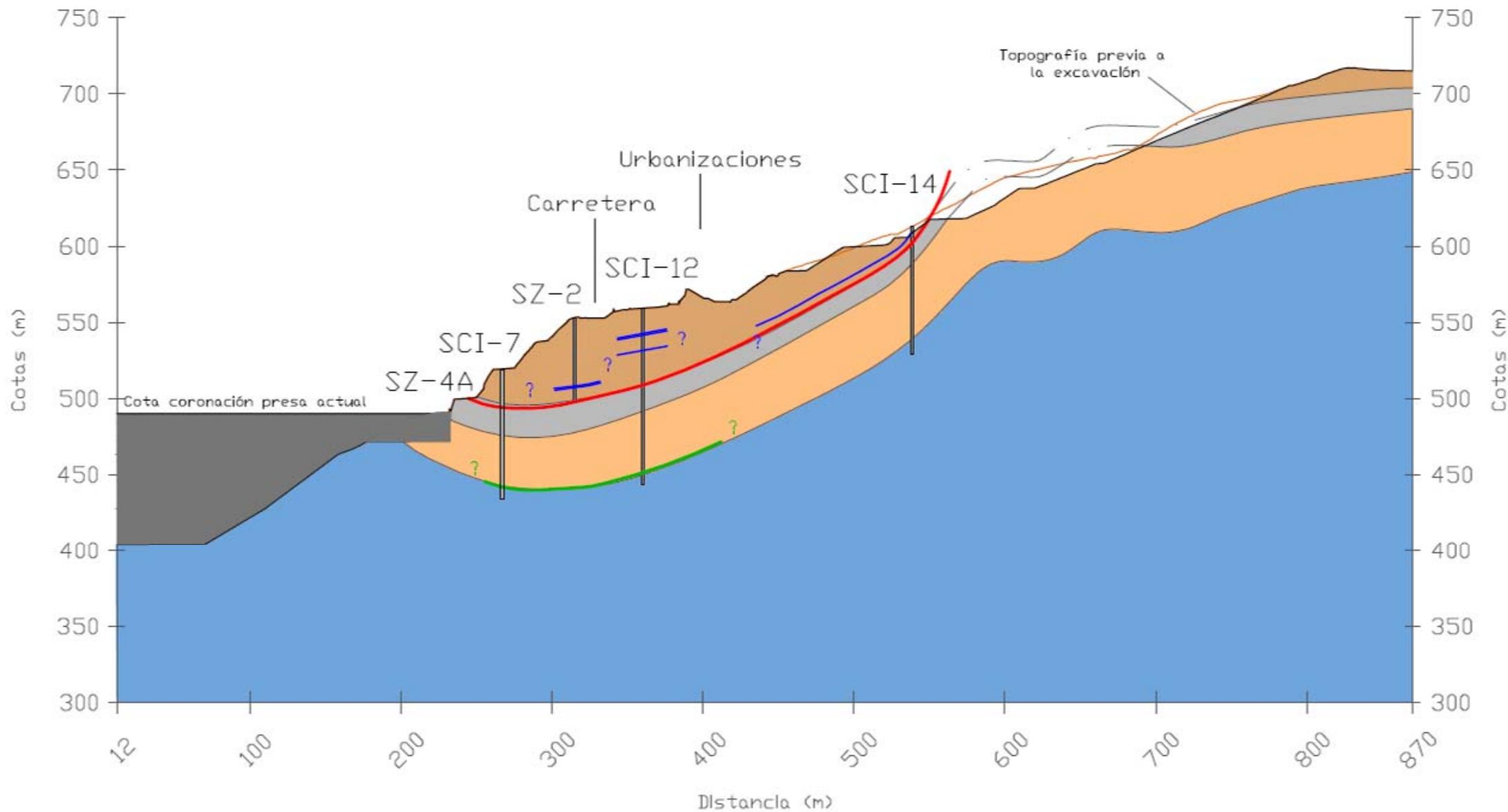
Corte 1 (S-N)



— Sup. Principal de Rot.
— Otras superficies
 Inclinómetro

FLYSCH
 F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
 F2: Arcillitas
 F1: Arcillitas con intercalaciones de areniscas
 Margas de Pamplona

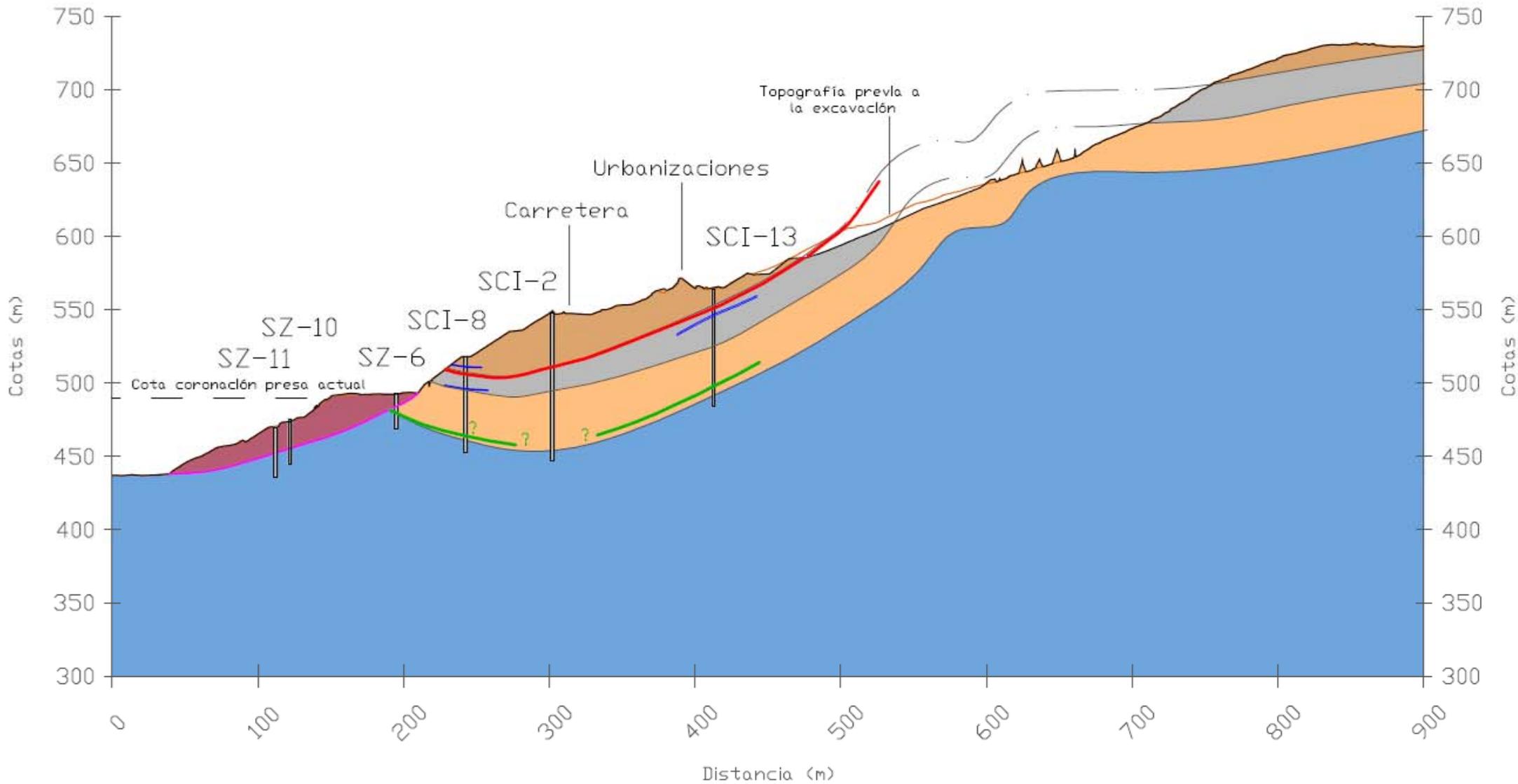
Corte 3 (S-N)



- Sup. Principal de Rot.
- Sup. Inferior de Rot.
- Otras superficies
- Inclinómetro

- | | |
|--------|---|
| FLYSCH | F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas |
| | F2: Arcillitas |
| | F1: Arcillitas con intercalaciones de areniscas |
| | Margas de Pamplona |

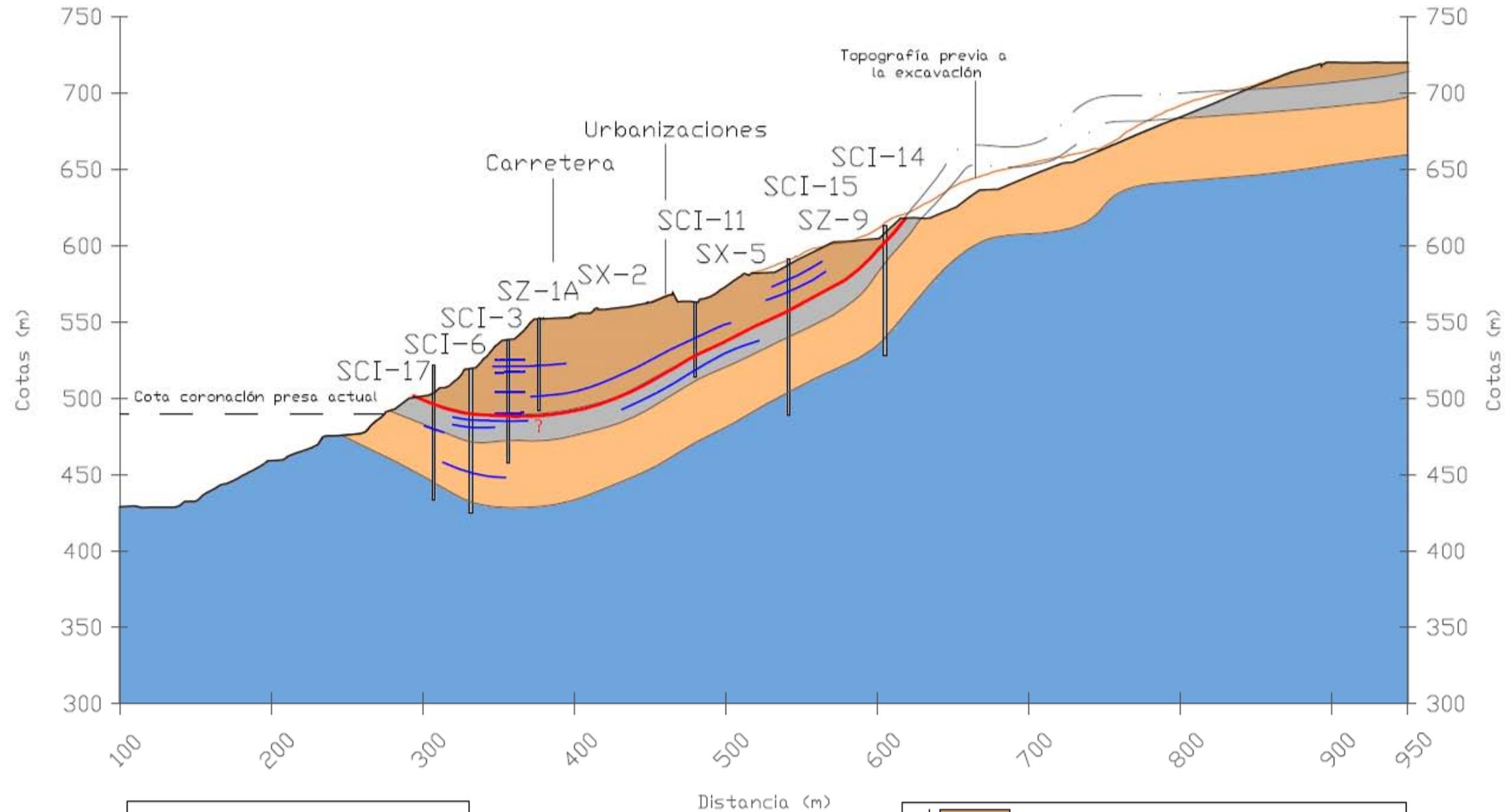
Corte 5 (S-N)



- Sup. Principal de Rot.
- Sup. Inferior de Rot.
- Sup. Rot. el Inglés
- Otras superficies
- ▮ Inclinómetro

- Deslizamiento del Inglés
- FLYSCH**
 - F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
 - F2: Arcillitas
 - F1: Arcillitas con intercalaciones de areniscas
- Margas de Pamplona

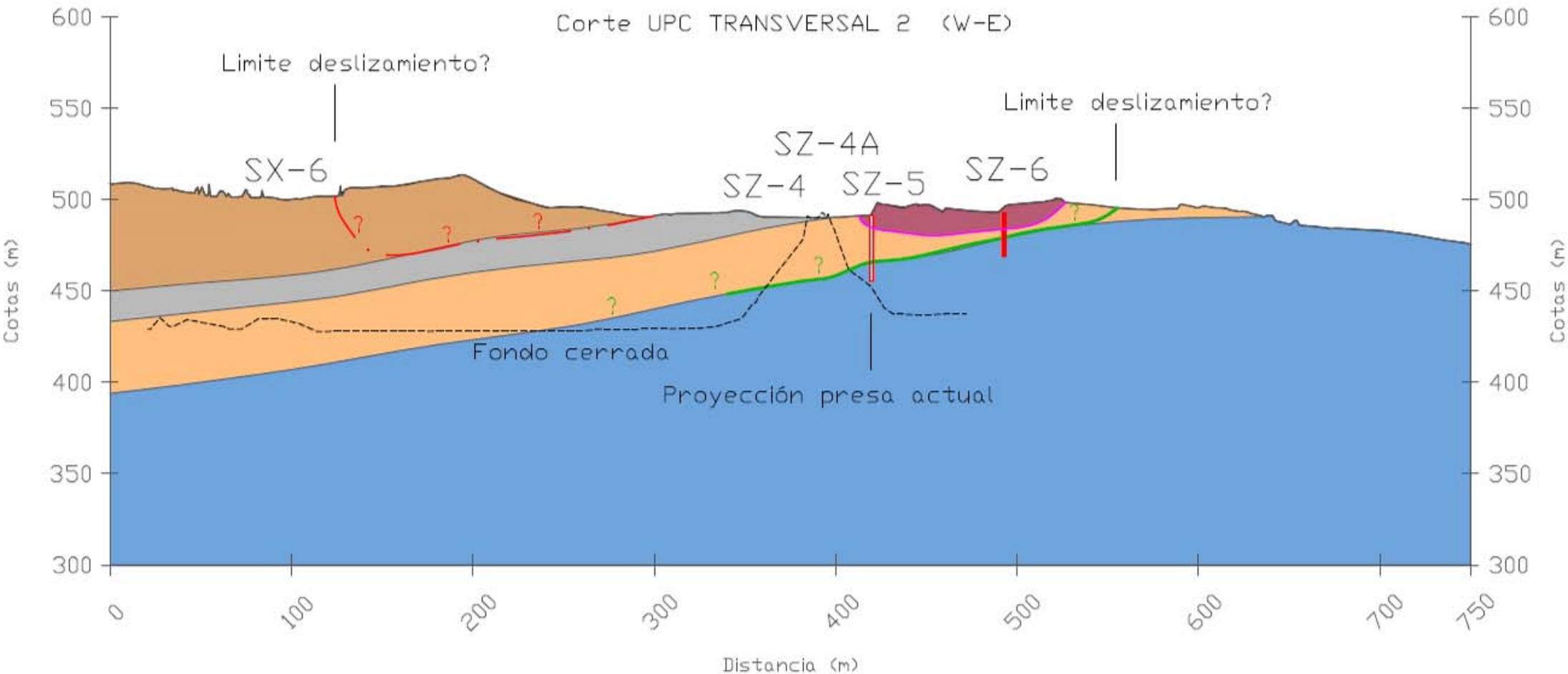
Corte UPC 1 (S/SW-N/NE)



— Sup. Principal de Rot.
— Otras superficies
 Inclinómetro

FLYSCH
 F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
 F2: Arcillitas
 F1: Arcillitas con Intercalaciones de areniscas
 Margas de Pamplona

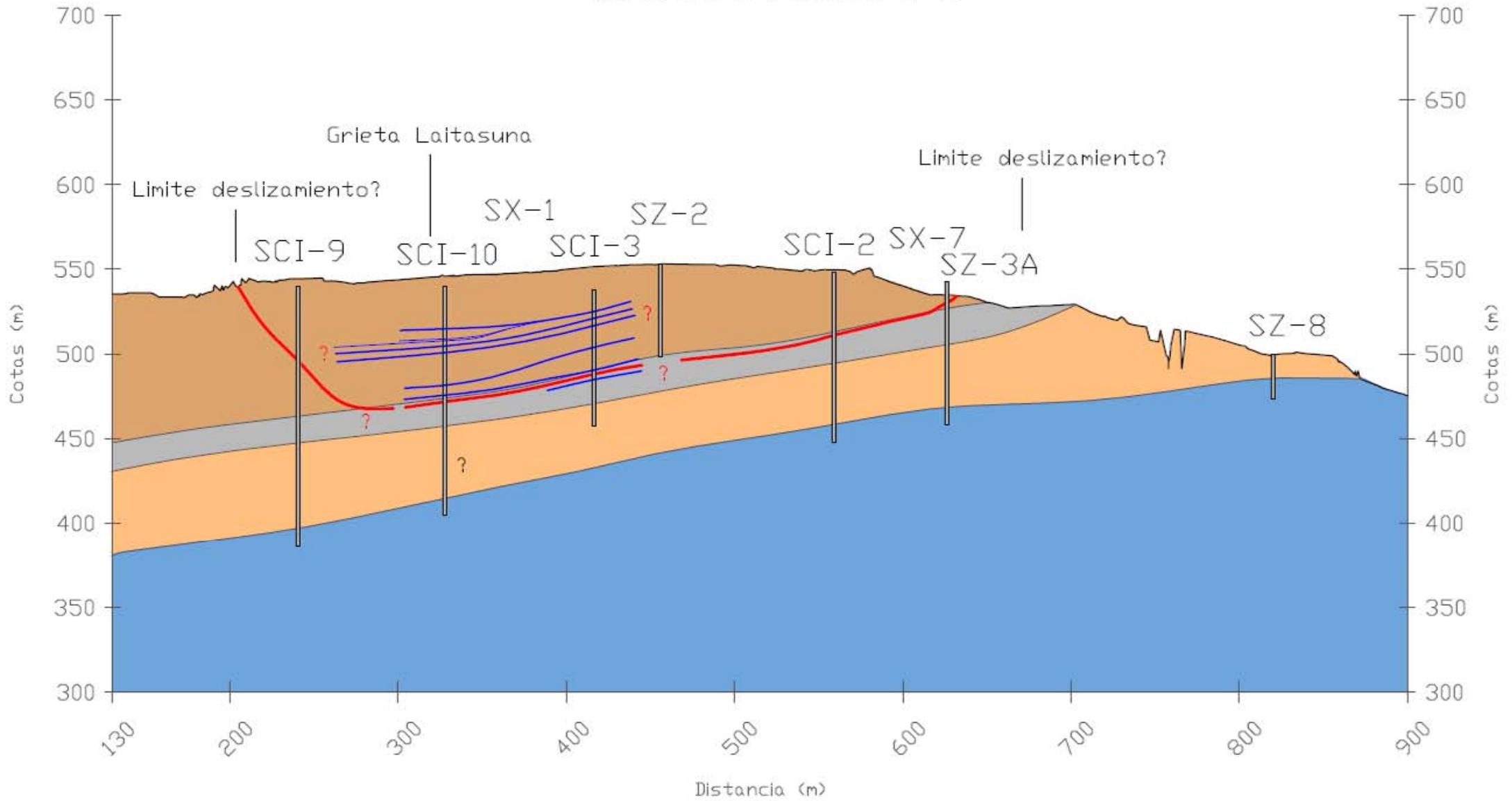
Corte UPC TRANSVERSAL 2 (W-E)



- Sup. Principal de Rot.
- Sup. Inferior de Rot.
- Sup. Rot. el Inglés
- Otras superficies
- Inclinómetro

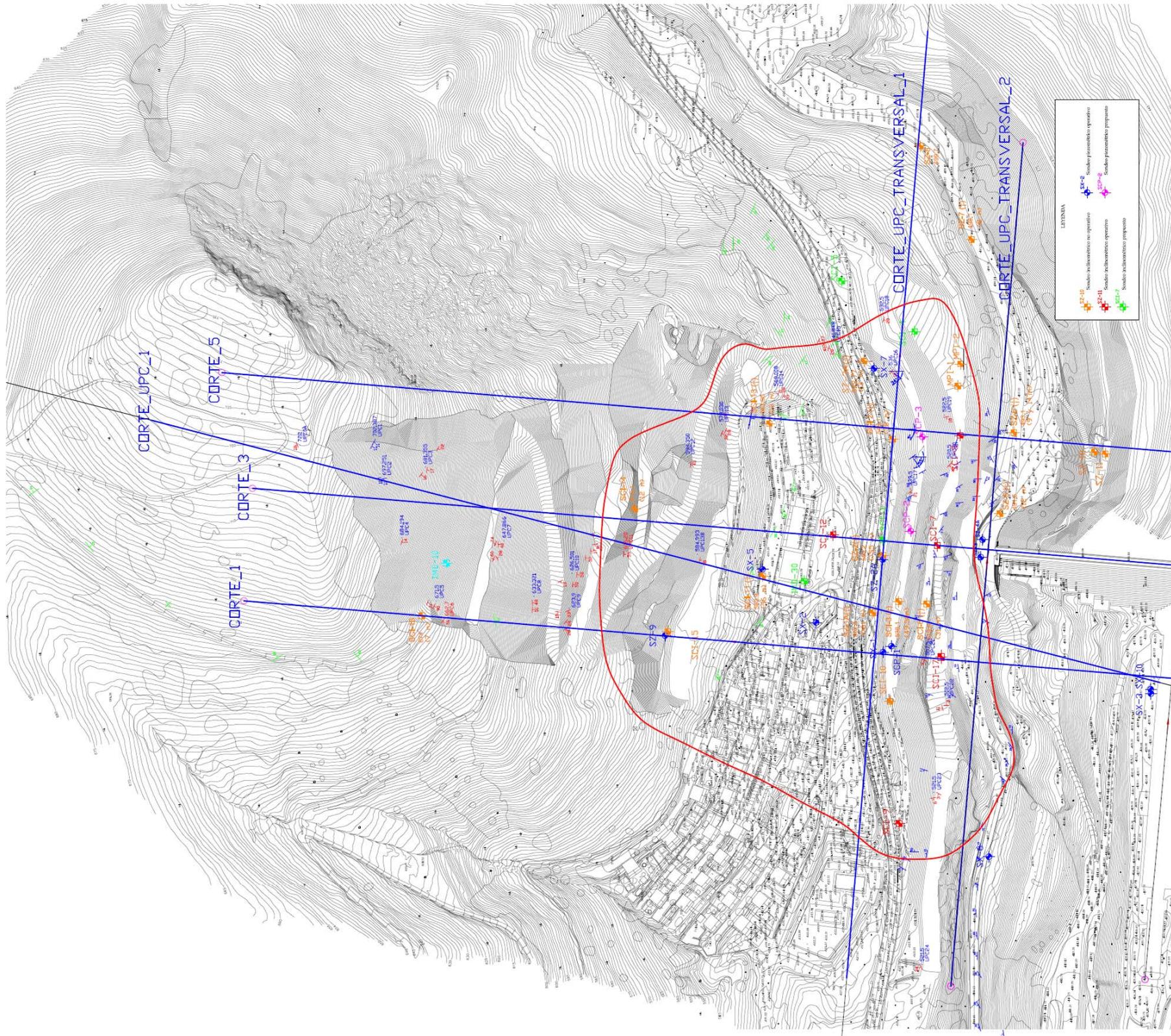
- Deslizamiento del Inglés
 - F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
 - F2: Arcillitas
 - F1: Arcillitas con Intercalaciones de areniscas
 - Margas de Pamplona
- FLYSCH

Corte UPC Transversal (W-E)



- Sup. Principal de Rot.
- Otras superficies
- ▮ Inclinómetro

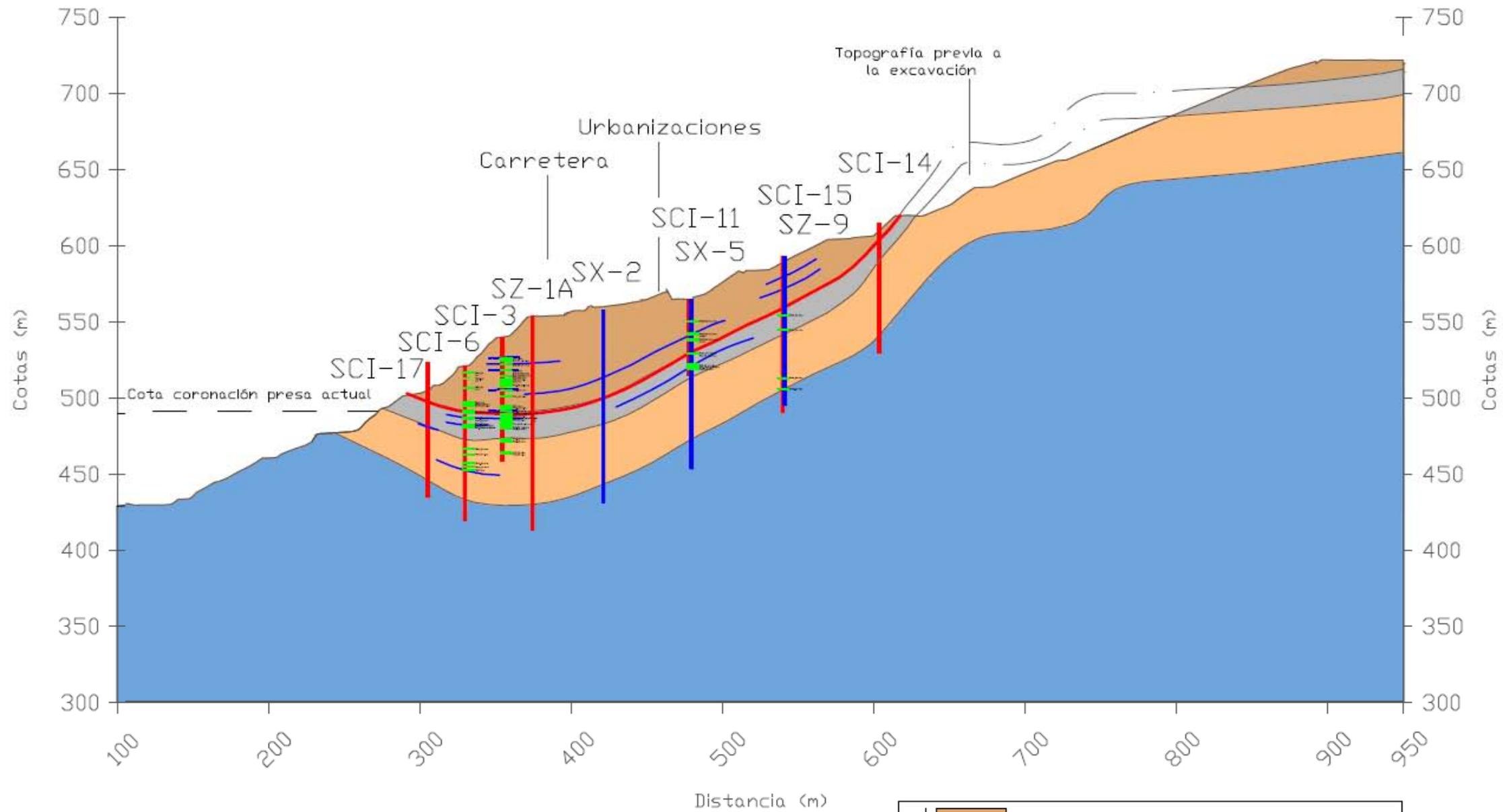
- FLYSCH
- F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas
 - F2: Arcillitas
 - F1: Arcillitas con Intercalaciones de areniscas
 - Margas de Pamplona



LEYENDA

	Señales hidrométricas en operación
	Señales hidrométricas operativas
	Señales piezométricas operativas
	Señales piezométricas propuestas

Corte UPC 1 (S/SW-N/NE)



- █ Sondeo inclinométrico
- █ Sondeo piezométrico
- █ Sup. de cizalla observada en testigo

- | | |
|--------|---|
| FLYSCH | F3: Areniscas con intercalaciones de arcillitas |
| | F2: Arcillitas |
| | F1: Arcillitas con Intercalaciones de areniscas |
| | Margas de Pamplona |