

DISEÑO DE PLAN DE INSTRUMENTACION PARA MEDICION DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE LA IMPLEMENTACION DE INCLINOMETROS LASER TILT-90

R. Aravena Mellado¹, E. Nuñez Castellanos², R. Mata Lemus³ y F. Sanhueza Espinoza⁴

RESUMEN:

Los planes de auscultación cumplen un rol fundamental en el control y seguridad de los proyectos pudiendo garantizar un comportamiento adecuado ante posibles colapsos. Para llevar a cabo los procesos de medición se utiliza instrumentación, la cual está sujeta a un error instrumental que puede variar dependiendo del instrumento. Las nuevas tendencias para la estimación de asentamientos en obras subterráneas están marcando el uso del instrumento Laser Tilt-90, sin embargo, este instrumento ha sido poco probado y documentado en planes de instrumentación propuestos. En esta investigación se realiza una estimación del error instrumental del Laser Tilt-90 de manera que se pueda tomar en cuenta en diseños de monitoreo para la industria de la ingeniería. En ese sentido, se desarrolló un estudio de sensibilidad simulando los asentamientos en terreno a partir de pruebas para ángulos menores a 5° fijados geoméricamente. Los resultados mostraron que existe mayor error en los ángulos inferiores a 0,5°. Además, se pudo fijar diferentes errores para diferentes distancias horizontales de posicionamiento del instrumento en función de diferentes asentamientos esperados que permitió recomendar las distancias de separación.

PALABRAS CLAVES: Monitoreo; Ángulos; Asentamientos; Laser Tilt-90.

ABSTRACT: This document discusses the importance of instrumentation plans in ensuring project safety. Specifically, the Laser Tilt-90 instrument is being used to estimate settlements in underground works, but its instrumental error has not been documented. A sensitivity study was conducted, revealing that the error is greater at angles below 0.5°. The document recommends fixing different errors for different horizontal

KEYWORDS: Monitoring; Angles; Settlements; Laser Tilt-90.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, raravena@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, enunez@ucsc.cl

³ Profesor Informante, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rmata@ucsc.cl

⁴ Profesor Informante, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, franksanhueza@ucsc.cl

1. INTRODUCCION

La auscultación en un sistema subterráneo es una técnica utilizada para conocer los movimientos del terreno generados por la presencia de obras como túneles, piques, galerías y otros. Las obras producen cambios de estados tensionales en el sistema subterráneo que generan desplazamientos radiales, verticales y horizontales. Según John Dunncliff (1993), las magnitudes que se controlan mayoritariamente en las obras subterráneas son los desplazamientos del revestimiento y los movimientos del suelo alrededor de las excavaciones los que son monitoreados por medio de instrumentación geotécnica o geodésica. Debido a lo anterior, el monitoreo es una herramienta que permite garantizar la estabilidad en el sistema y también asegurar las áreas urbanas circundantes a la excavación.

Por otra parte, todo instrumento utilizado está sujeto a un error en su medición que puede ser estudiado para considerarse en los resultados. El no considerar un arrastre y acumulación de errores podría afectar los resultados finales condicionando la interpretación de la monitorización. Estos errores principalmente provienen de tres fuentes: error instrumental, errores naturales y errores personales (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006). En este trabajo se realiza un análisis al error instrumental del Laser Tilt-90, un sensor que puede medir asentamientos por medio de inclinaciones desde un punto de referencia. Debido a lo anterior, la principal motivación fue entender cómo afecta el error instrumental del Laser Tilt-90 en un diseño de instrumentación y como recomendar distancias de separación entre los equipos.

Según un estudio en la Línea 3 del Metro de Santiago realizada por Sofía Layera (2018) en el que se analizaron asentamientos producidos por la construcción de túneles interestación, se menciona que las secciones de monitoreo en superficie están separadas cada 5 metros desde el eje del túnel. Sin embargo, para este y otros casos de antecedentes no se menciona el por qué se definen tales distancias en los diseños de instrumentación. En otro trabajo realizado por Paola Heras (2018) se estudiaron las subsidencias de la Línea 1 del Metro de Quito con un diseño para obtener asentamientos máximos a 5, 10, 15 y 30 metros desde el eje del túnel para 25 secciones en un total de 50 metros, sin embargo, en este diseño tampoco se habla sobre como cuantificar las distancias de separación al analizar subsidencias, por otro lado, tampoco se recomienda el uso de inclinómetros para la obtención de asentamientos.

En una investigación en el Metro de Santiago realizada por Cristian Figueroa (2019) se estudió la influencia de los suelos, la profundidad y el diseño de los túneles en los asentamientos generados por el cruce de las Líneas 2, 5, 1 y 4 con la Línea 3 construida posteriormente por debajo. En este trabajo se analizó la medición realizada por instrumentos instalados al nivel de la losa de las líneas superiores, sin embargo, no se muestra una validación del plan de instrumentación y/o la implementación de inclinómetros para la medición de asentamientos. El trabajo de Cristian Figueroa es de suma importancia ya que se extrae información de los asentamientos reales medidos en el eje de la clave del túnel inferior y que fueron utilizados en las metodologías de cálculo del actual trabajo.

En la tesis doctoral realizada por Edinalva Gomes (2015) en un vertedero de Madrid, se estudió la magnitud y duración de los asientos generados por un terraplén de carga. Para el control de asentamientos, se utilizó instrumentación tipo LCA. Los resultados mostraron correctamente la curva más deformada hacia el centro del terraplén. En otro trabajo de terraplenes en España por Laura Baró (2007), se desarrolló una metodología de cálculo de asientos para suelos blandos mediante ensayos in-situ DMT y CPTU. La metodología para determinar asientos se validó al compararla los con asientos observados por otros equipos durante la construcción. Sin embargo, en ambos casos no hay una mención al definir tales distancia entre los puntos de medición. Tampoco hubo implementación tipo inclinómetros como equipo de medición de asientos.

Con respecto a los criterios de diseño en los planes de instrumentación, la tesis doctoral de Fernando Diez (2010) sobre el Nuevo Modelo de Madrid, propuso en sus objetivos de tesis establecer una metodología para estimar el volumen de asientos mediante hitos de nivelación en superficie y extensómetros de varillas en profundidad para la ampliación del Metro de Madrid durante los años 2003 al 2007. Según la información dispuesta, se implementaron 5418 hitos de nivelación y 796 extensómetros de varillas en la ampliación del Metro durante esos años, sin embargo, para el plan de auscultación no se expone información sobre como abarcar una optimización de la instrumentación utilizada.

En un trabajo realizado por LOM (2015) se entrega información sobre el control geotécnico en minería subterránea, en este se menciona que los criterios de selección y ubicación de los equipos dependen del tipo y condiciones de la mina y más específicamente la ubicación se relaciona con zonas en donde se esperen mayores deformaciones. Adicionalmente, la localización, disposición y espaciamiento de los equipos se debe realizar atendiendo a las condiciones específicas de la mina y los parámetros a medir. A pesar de las recomendaciones no se considera la incorporación del error instrumental de la medición en el criterio de espaciamiento entre equipos.

Según la guía técnica de AETOS (2015) para el control de asentamientos en obras subterráneas se utilizan hitos de nivelación, pernos de nivelación, extensómetros de varilla y electroniveles. Sobre criterios y recomendaciones para la disposición de instrumentos, se explica que la densidad de instrumentación está asociada al nivel de control técnico de la obra, sin embargo, se menciona que no hay reglas generales ni recetas aplicables sino más bien dependen de cada tipo de obra. A pesar de los criterios y recomendaciones no se menciona la influencia del error instrumental como un criterio para las distancias entre los equipos.

Los antecedentes vistos anteriormente demuestran que las distancias no obedecen a ningún requerimiento normativo, por otro lado, demuestra lo funcional que es la instrumentación para la obtención de asentamientos en terreno, sin embargo, ningún antecedente utiliza los inclinómetros. Dentro de los criterios de disposición de instrumentos no se nombra la importancia de los errores instrumentales como un factor de corrección a considerar. En base a esto, existe incertidumbre en recomendar rangos de distancia para las mediciones del Tilt-90 considerando su error instrumental.

Debido a lo anterior, el objetivo principal en este proyecto es determinar la influencia del error instrumental en la estimación de desplazamientos verticales utilizando el instrumento Laser Tilt-90. Por consiguiente, el presente estudio entrega información sobre un análisis numérico realizado al Laser Tilt-90 para ángulos inferiores a 5°. Los sensores son otorgados por la empresa Geosinergia con el fin de perfeccionar el trabajo de los sensores en la industria y desarrollar metodologías de cálculos. Eventualmente, extrapolar resultados que sean convenientes para desafíos de mayor envergadura.

2. METODOLOGIA

La metodología se divide en cinco etapas según el siguiente orden:

1. Funcionamiento del sensor Láser Tilt-90
2. Campaña de laboratorio
3. Obtención de ángulos y errores
4. Metodología para matriz de errores incluyendo error instrumental
5. Metodología para perfiles de asentamientos incluyendo error instrumental

2.1 Sensor Láser Tilt-90

El Láser Tilt-90 es un sensor que permite obtener ángulos de inclinaciones entre 0° a 90° en los tres ejes principales (x, y, z), además, medir distancias a través de un distanciómetro láser y también temperaturas. Sin embargo, el presente estudio se basa en las inclinaciones que son obtenidas en el eje x. En la figura 2.1 se muestra el sensor en estudio.



Figura 2.1: Modelo sensor Láser Tilt-90 otorgado por Geosinergia

La figura 2.2 muestra la convención de signos de todos los casos posibles de inclinaciones en el eje x junto al eje z, además, la posición del sensor en cada giro posible. El ángulo será positivo mientras el eje positivo de x apunte en sentido contrario a la gravedad y será negativo cuando apunte en sentido favorable. Cabe destacar que los ejes x con z son complementarios.

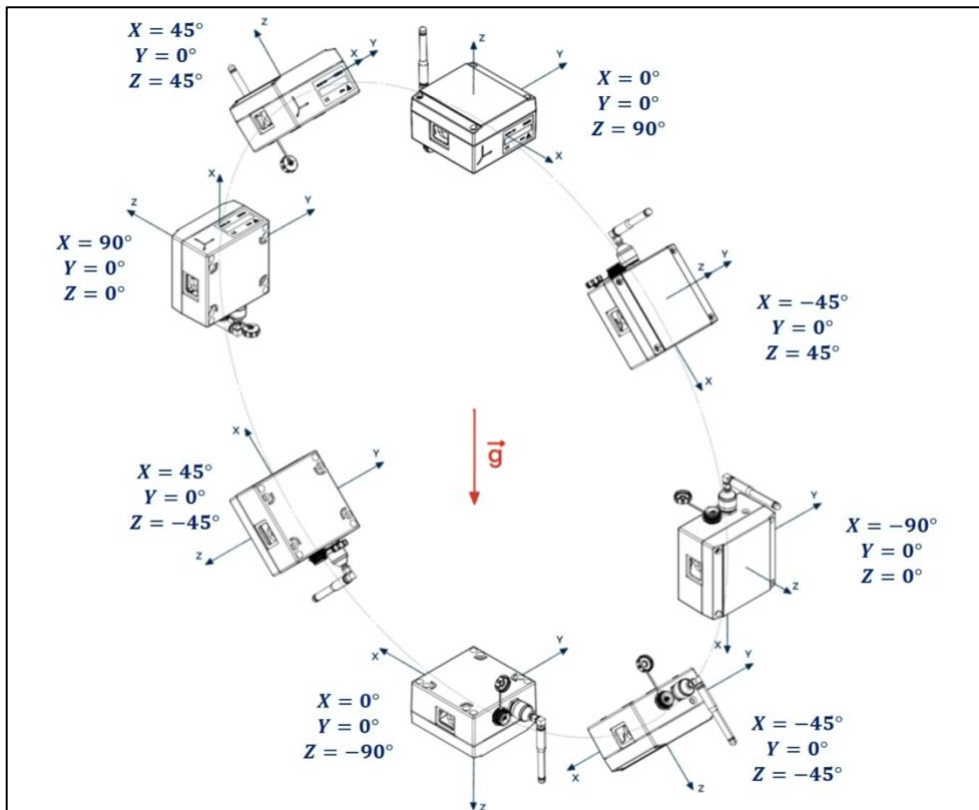


Figura 2.2: Convención de signos para inclinaciones de eje x con eje z

2.2 Campaña de laboratorio

Cuando del Tilt-90 se quiere utilizar mediciones recurrentes de el mismo, a pesar de estar en una misma ubicación e inclinación, siempre presenta diferencias en las mediciones y esto es lo que está asociado a un error instrumental. En ese sentido se hace necesario realizar una campaña experimental en laboratorio que permita obtener el ángulo en muchos instantes de tiempo y así estadísticamente analizar el error de la medición. Para ello, el objetivo del montaje en laboratorio fue crear una superficie inclinada para que el sensor instalado sobre esta pudiera medir el ángulo de inclinación.

A continuación se muestra el montaje para la obtención de mediciones con los materiales utilizados:

- Piezas de acero
- Herramientas de medición (guinchas, niveles, pie de metro digital, inclinómetro digital)
- Elevador manual
- Sensores Tilt-90 (3)
- Worldsensing app



Figura 2.3: Montaje para obtención de ángulos

Se formó una geometría entre la mesa de apoyo, la barra de acero y una altura variable (figura 2.3). La altura pudo variar en función del elevador manual y así variar el ángulo de inclinación hasta un valor conocido geoméricamente. Tal como se mencionó, el estudio se aplicó para inclinaciones fueran obtenidas por el eje x por lo que el sensor fue instalado en el sentido longitudinal de la barra.

2.3 Ángulo teórico, VMP y errores

Para realizar el análisis numérico se obtuvo el ángulo teórico y el valor más probable (VMP) para 25 ángulos entre 0° y 5°. Luego en base a esto, se calculó el error máximo y mínimo relativo y absoluto de cada ángulo.

2.3.1 Obtención del ángulo teórico

El ángulo teórico corresponde al ángulo que se forma de acuerdo con la trigonometría con las medidas de la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Medidas de los lados del triángulo y obtención del ángulo teórico

Nº de ángulo	Hipotenusa [cm]	Altura [cm]	Ángulo teórico [°]
1	140	0	0
2	140	0,25	0,1023
3	140	0,5	0,2046
4	140	0,75	0,3069
5	140	1	0,4092
6	140	1,25	0,5116
7	140	1,5	0,6139
8	140	1,75	0,7162
9	140	2	0,8185
10	140	2,25	0,9207
11	140	2,5	1,0230
12	140	2,75	1,1253
13	140	3	1,2276
14	140	3,25	1,3298
15	140	3,5	1,4321
16	140	3,75	1,5343
17	140	4	1,6366
18	140	4,5	1,8410
19	140	5	2,0454
20	140	5,5	2,2497
21	140	6	2,4540
22	140	7	2,8624
23	140	8	3,2705
24	140	9	3,6782
25	140	10	4,0856

2.3.2 Valor más probable (VMP)

Debido a la variabilidad en la obtención de los ángulos obtenidos de la medición del Tilt-90 se planteó realizar un análisis de distribución estadística para determinar el valor más probable de cada ángulo en función a la frecuencia que fuera más recurrente entre 240 mediciones (Tabla 2.2), debido a esto es que se utiliza el VMP.

En base a lo anterior, geoméricamente se fijaron los 25 ángulos de la tabla 2.1 realizando 240 mediciones para cada uno lo que arrojó un total de 6000 datos. Para realizar 240 mediciones del mismo ángulo se utilizó una frecuencia de 30 segundos.

Tabla 2.2: Ángulos teóricos fijado geoméricamente y cantidad de mediciones

Ángulo teórico [°]	Cantidad de mediciones
0	240
0,1023	240
0,2046	240
0,3069	240
0,4092	240
0,5116	240
0,6139	240
0,7162	240
0,8185	240
0,9207	240
1,0230	240
1,1253	240
1,2276	240
1,3298	240
1,4321	240
1,5343	240
1,6366	240
1,8410	240
2,0454	240
2,2497	240
2,4540	240
2,8624	240
3,2705	240
3,6782	240
4,0856	240

El análisis de recurrencia estadística se realizó en función de un histograma para cada uno de los ángulos. La figura 2.4 muestra un histograma que se utilizó para obtener y luego verificar el VMP de 0° en este caso con 842 mediciones. El valor más probable de 0° corresponde al valor medio del intervalo que tiene mayor recurrencia el cual es 0,00155° calculado como el valor medio del cuarto intervalo.

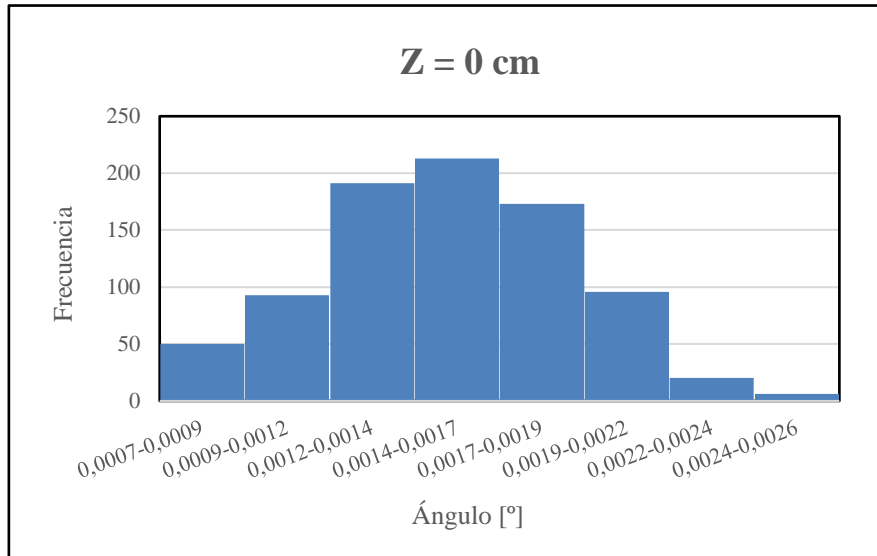


Figura 2.4: Histograma para la obtención del VMP de 0°

La tabla 2.3 muestra el valor del VMP para los 25 ángulos obtenido según la geometría fijada para el ángulo teórico.

Tabla 2.3: Geometría fijada para obtención del VMP de cada ángulo

N° de ángulo	Barra de acero [cm]	Altura [cm]	VMP [°]
1	140	0	0,0255
2	140	0,25	0,0605
3	140	0,5	0,2467
4	140	0,75	0,5096
5	140	1	0,3531
6	140	1,25	0,1335
7	140	1,5	0,6066
8	140	1,75	0,7513
9	140	2	1,1628
10	140	2,25	1,2852
11	140	2,5	0,9786
12	140	2,75	1,1840



13	140	3	1,226
14	140	3,25	1,4178
15	140	3,5	1,027
16	140	3,75	1,1814
17	140	4	1,6165
18	140	4,5	1,8217
19	140	5	1,6395
20	140	5,5	2,2409
21	140	6	2,2633
22	140	7	2,4541
23	140	8	3,2646
24	140	9	4,1853
25	140	10	3,7593

2.3.3 Cálculo error máximo y mínimo

La cuantificación del error se obtuvo de la forma relativa y absoluta, dado lo anterior se calculó el error máximo y mínimo de cada ángulo, para ello se buscó el valor máximo y el valor mínimo entre las 240 mediciones de cada ángulo en estudio. El error máximo está asociado al valor más probable con respecto al valor máximo que se puede obtener en el rango de las 240 mediciones mientras que el error mínimo está asociado al valor más probable con respecto al valor mínimo que se puede obtener en el mismo rango. El error máximo y mínimo de forma relativa se obtuvo de (1) y (2) y de forma absoluta de (3) y (4) como:

2.3.3.1 Errores calculados de forma relativa

$$Error\ máximo_{Relativo} = \frac{Valor\ máximo - Valor\ más\ probable}{Valor\ más\ probable} \times 100\ (%) \quad (1)$$

$$Error\ mínimo_{Relativo} = \frac{Valor\ mínimo - Valor\ más\ probable}{Valor\ más\ probable} \times 100\ (%) \quad (2)$$

2.3.3.2 Errores calculados de forma absoluta

$$Error\ máximo_{Absoluto} = Valor\ máximo - Valor\ más\ probable \quad (3)$$

$$Error\ mínimo_{Absoluto} = Valor\ mínimo - Valor\ más\ probable \quad (4)$$

El procesamiento de datos permitió formar la tabla 2.4 y 2.5 con la que se realizarán interpolaciones en la matriz de errores y en la metodología para obtener perfiles asentamientos.

Tabla 2.4: Errores relativos

Error máximo [1/100]	Error mínimo [1/100]
0,50196	0,05490
0,02149	0,01653
0,01621	0,00324
0,00275	0,00118
0,00595	0,02917
0,01873	0,00599
0,00330	0,00099
0,00133	0,00133
0,00069	0,00069
0,00381	0,00078
0,00353	0,00455
0,00148	0,00148
0,00122	0,00073
0,00236	0,00074
0,00107	0,00185
0,00076	0,00669
0,00152	0,00350
0,00060	0,00060
0,00043	0,00098
0,00535	0,00018
0,00194	0,00336
0,00039	0,00124
0,00046	0,00028
0,00078	0,00016
0,00024	0,00024

Tabla 2.5: Errores absolutos

Error máximo [°]	Error mínimo [°]
0,01280	0,00140
0,00130	0,00100
0,00400	0,00080
0,00140	0,00060
0,00210	0,01030
0,00250	0,00080
0,00200	0,00060
0,00100	0,00100
0,00080	0,00080
0,00490	0,00100
0,00345	0,00445
0,00175	0,00175
0,00150	0,00090
0,00335	0,00105
0,00110	0,00190
0,00090	0,00790
0,00245	0,00565
0,00110	0,00110
0,00070	0,00160
0,01200	0,00040
0,00440	0,00760
0,00095	0,00305
0,00150	0,00090
0,00325	0,00065
0,00090	0,00090

2.4 Metodología utilizada para realizar matriz de errores incluyendo error instrumental

Para determinar como los errores afectaban la medición se formaron dos matrices, una para error máximo y otra para error mínimo, ambas 17x20 datos que permitieron generar 340 ángulos en función de un máximo de 20 metros de separación y 17 medidas de asentamientos diferentes. Luego, se utilizó la tabla 2.4 y 2.5 para obtener errores interpolados según los ángulos arrojados en la matriz. Posteriormente, en base a los errores, se aplicó un formato condicional de color verde para los errores que fueran menores a los más probables, color amarillo a los errores más probables y color rojo errores mayores a los probables.

- color verde para errores menores a: $[EMP - \sigma]$
- color amarillo para errores entre: $[EMP - \sigma]$ y $[EMP + \sigma]$
- color rojo para errores mayores a: $[EMP + \sigma]$

Donde:

EMP: Error más probable máximo o mínimo para cada caso

σ : Desviación estándar del error máximo o mínimo para cada caso

2.5 Metodología propuesta para perfiles de asentamientos incluyendo error instrumental

En este apartado se explican los métodos para desarrollar la metodología de cálculo de perfiles de asentamiento incorporando los errores máximos y mínimos.

2.5.1 Modelo de Peck 1969

Existen muchos métodos empíricos y semi-empíricos para calcular asentamientos en superficie debido al paso de un túnel, el método empírico de Peck (1969) es uno de ellos debido a su simplicidad y el que ha tenido los mejores resultados representando de buena forma los perfiles transversales utilizando las mediciones en superficie (Maras- Dragocevic, 2012). La figura 2.5 muestra la ley de asientos de Peck (1969).

El método permite obtener a la deformación vertical δ_z en función de la distancia de separación con respecto al eje del túnel, la cual se expresa según lo siguiente:

$$\delta_z = \delta_{max} * e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (5)$$

Donde δ_{max} corresponde al asentamiento máximo sobre el eje del túnel, x la distancia transversal al eje del túnel, i es el punto de inflexión en la curva de distribución normal el cual está relacionado con las propiedades del suelo y la profundidad del túnel.

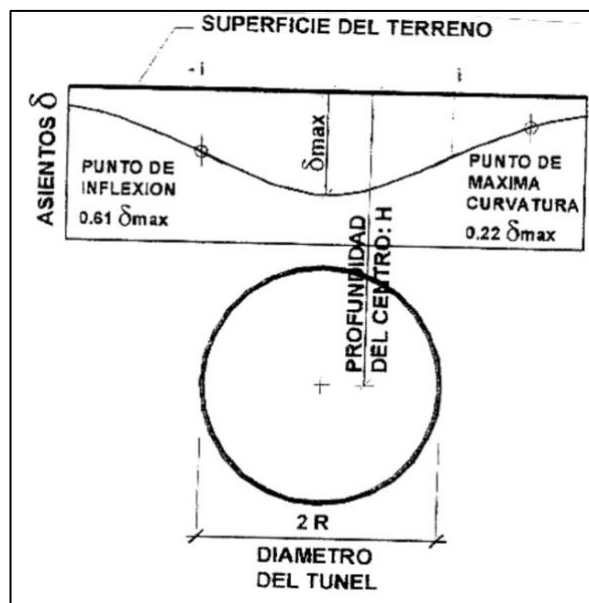


Figura 2.5: Ley de asientos en superficie Peck (1969)

2.5.2 Método Cinemático

El método Cinemático permite corregir un ángulo de inclinación en función de asentamientos obtenidos con la fórmula de Peck y en función de una distancia estándar horizontal entre sensores. En la práctica, el método Cinemático considera que a partir de un ángulo de inclinación obtenido por el Tilt-90 corregido de forma acumulada y la distancia de separación entre sensores se obtiene un δ_{max} corregido en el eje de la clave. Para emplearlo se realizó una metodología inversa y se utilizó valores de δ_{max} del trabajo de Cristian Figueroa. Las correcciones se realizaron en base al error máximo y mínimo según el tipo de error relativo y error absoluto con el objetivo de crear una comparativa entre ambos tipos de errores.

2.5.3 Información utilizada

Se utilizó la información de asentamientos reales del trabajo de Cristian Figueroa (2019) para 5 cruces de túneles del Metro de la ciudad de Santiago. Los valores disponibles son δ_{max} e i los cuales se muestran en la tabla 2.6. Los cruces que abarcó fueron los siguientes:

- Estación Cal y Canto, intersección líneas 2 y 3.
- Estación Plaza de Armas, intersección líneas 5 y 3.
- Estación Universidad de Chile, intersección líneas 1 y 3.
- Estación Irarrázaval, intersección líneas 5 y 3.
- Estación Plaza Egaña, intersección líneas 4 y 3.

Tabla 2.6: δ_{max} e i según Figueroa 2019

Estación	δ_{max} [mm]	i [m]
Cal y Canto	8,2	10,26
Plaza de Armas	15	15,53
Universidad de Chile	13	19,6
Irarrázaval	8,8	16,16
Plaza Egaña	8	9,56

2.5.4 Método corrección por rotación

Para crear perfiles de asentamiento se utilizó un método propuesto por la empresa Geosinergia nombrado corrección por rotación el cual se adaptó al estudio de cruces de túneles. En este método se crean los perfiles de asentamiento en base a una supuesta medición realizada por el Tilt-90. La tabla 2.7 muestra la distancia de los sensores con respecto al eje del túnel y el signo de la medición para crear un perfil. Se utilizó en una primera instancia una separación de 10 metros hasta llegar a 30 o 40 metros equivalente a 6 u 8 sensores Tilt-90 respectivamente. Para esta metodología se supone lo siguiente:

- Error instrumental incluido en la medición del Tilt-90
- Equipos instalados con igual sentido de orientación

En la práctica el método se utilizó para crear perfiles de asentamiento para los casos de estudio según los ángulos obtenidos por el método de Peck y según los ángulos del método de Peck corregidos mediante el método Cinemático con error instrumental.

Tabla 2.7: Distancia del Tilt-90 desde el eje del túnel y signo de medición

	Tilt 1	Tilt 2	Tilt 3	Eje de túnel	Tilt 4	Tilt 5	Tilt 6
Distancia desde el eje [m]	25	15	5	0	5	15	25
Signo de la medición	negativo	negativo	negativo	-	positivo	positivo	positivo

3. RESULTADOS

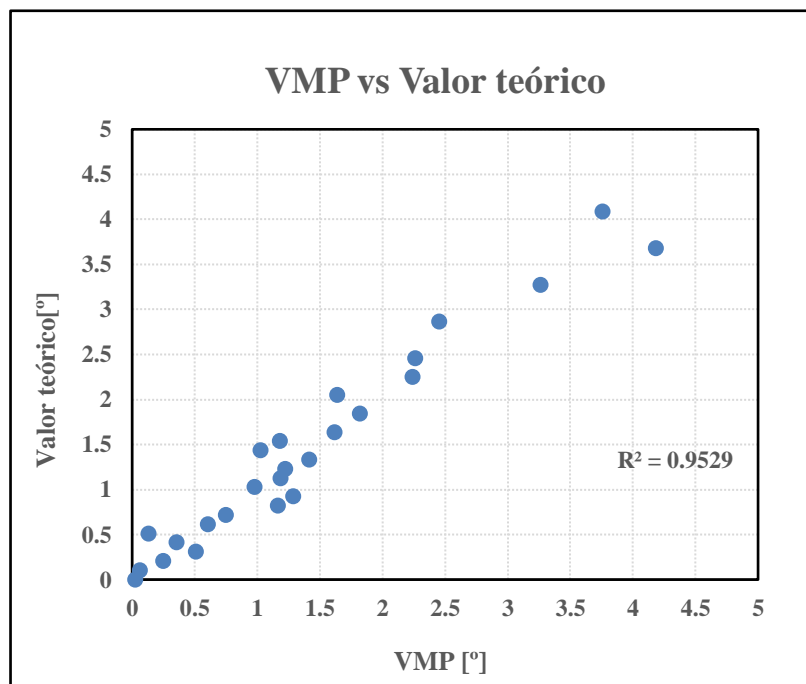
El capítulo de resultados se divide en tres análisis: análisis del error instrumental, análisis matriz de errores incluyendo el error instrumental, análisis de perfiles de asentamientos en cruces de túneles incluyendo el error instrumental.

3.1 Análisis error instrumental

En este apartado se presenta el análisis del error instrumental asociado a los 25 ángulos en estudio.

3.1.1 VMP, valor teórico y errores

La figura 3.1 muestra una gráfica de dispersión entre los VMP vs Valor teórico. En esta se puede apreciar la densidad de datos obtenidos para ángulos inferiores a 2,5°. El valor de R^2 demuestra que el ajuste no es perfecto lo que indica que existe un error entre ambos valores.


Figura 3.1: Relación entre VMP y valor teórico

Siguiendo la metodología anterior se realizó el procedimiento considerando el error máximo (figura 3.2) y error mínimo (figura 3.3). En ambos casos el comportamiento de los datos es similar al de la figura 3.1. Sin embargo, la ecuación entre estos gráficos es distinta, la que más se ajusta a la realidad es la del error máximo. A pesar de tener pendientes prácticamente iguales la diferencia se puede apreciar en el ángulo 0° ya que tienen diferentes puntos de corte en el eje y. Por otro lado, los R^2 demuestran en comparación al R^2 de la figura 3.1 se agregó otro error en la medición.

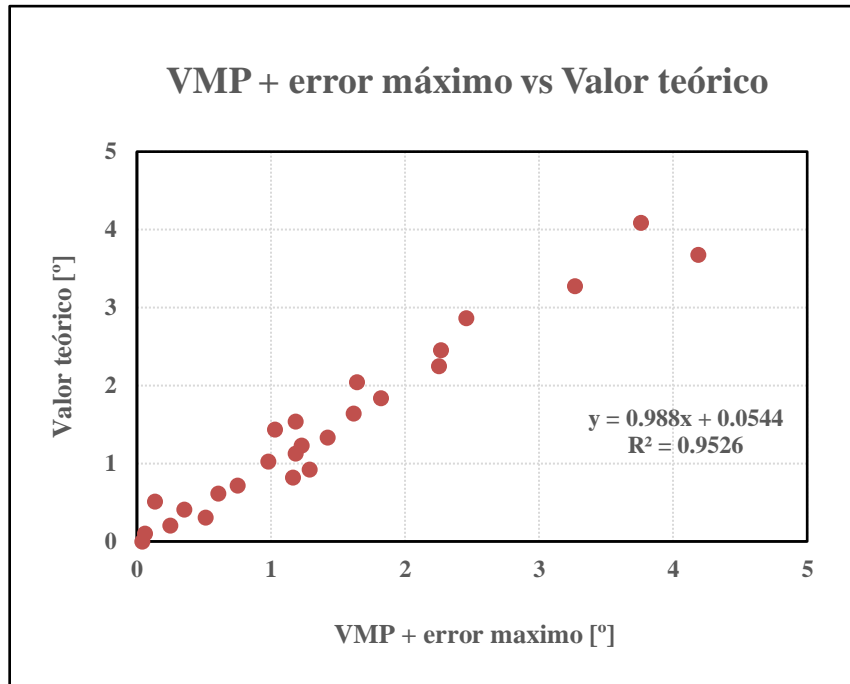


Figura 3.2: Relación entre VMP + error máximo y valor teórico

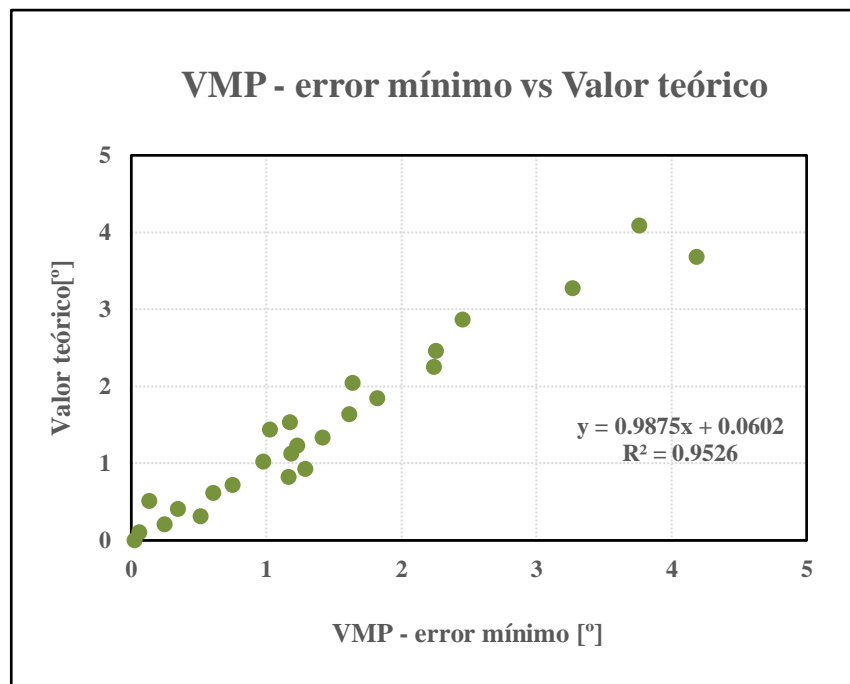


Figura 3.3: Relación entre VMP - error mínimo y valor teórico

En la figura 3.4 se muestra el gráfico de dispersión de VMP con respecto al error máximo, en esta se puede notar un comportamiento parejo en la línea del 0 a excepción del primer dato. Para ángulos sobre $2,26^\circ$ el error asociado es cercano al nulo. Para ángulos inferiores a $2,26^\circ$ se observa una variación en cuanto al error nulo. Para los ángulos inferiores a $0,5^\circ$ se observa una mayor separación respecto al error nulo, esto permite indicar que el error máximo afecta más a los ángulos que son inferiores a $2,26^\circ$ específicamente inferiores a $0,5^\circ$. Cabe destacar que el primer dato posee un error de un 50% el cual corresponde al error de 0° , además, que el R^2 es de 0,0847.

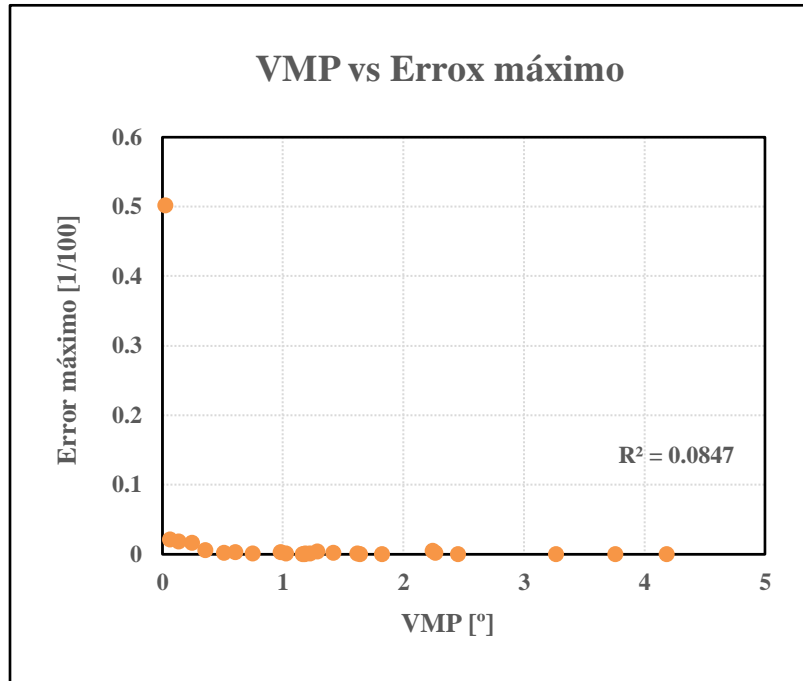


Figura 3.4: Relación entre VMP y el error máximo

En la figura 3.5 se muestra el gráfico de VMP con respecto al error mínimo. Para ángulos sobre los $3,26^\circ$ el error asociado es cercano al nulo. Para ángulos inferiores a $3,26^\circ$ se observa una variación respecto al error nulo. Para ángulos inferiores a $0,5^\circ$ se puede apreciar una mayor variación respecto al error nulo. Esto permite indicar que el error mínimo afecta más a los ángulos inferiores a $3,26^\circ$ específicamente inferiores a $0,5^\circ$. No obstante, cabe destacar que a diferencia del error máximo, el error mínimo llega hasta un 5%.

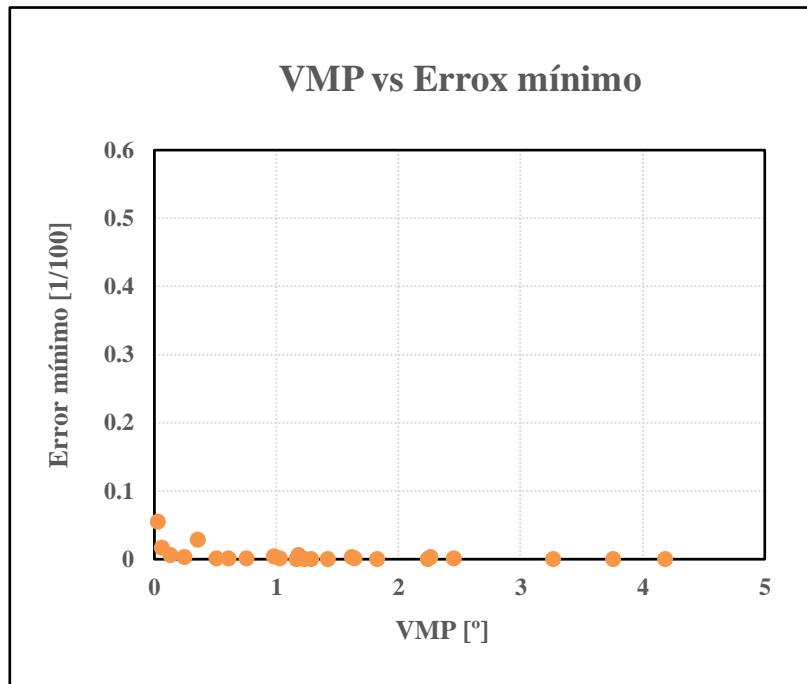


Figura 3.5: Relación entre VMP y el error mínimo

3.1.2 VMP y desviación estándar

Adicionalmente, se realizó el gráfico dispersión del VMP con respecto a la desviación estándar (figura 3.6). En el gráfico se puede ver que 16 de 25 VMP tienen una desviación estándar inferior 0,001. Además, Se puede apreciar una mayor desviación estándar para el rango algunos ángulos bajos y entre los 2° a 2,4°.

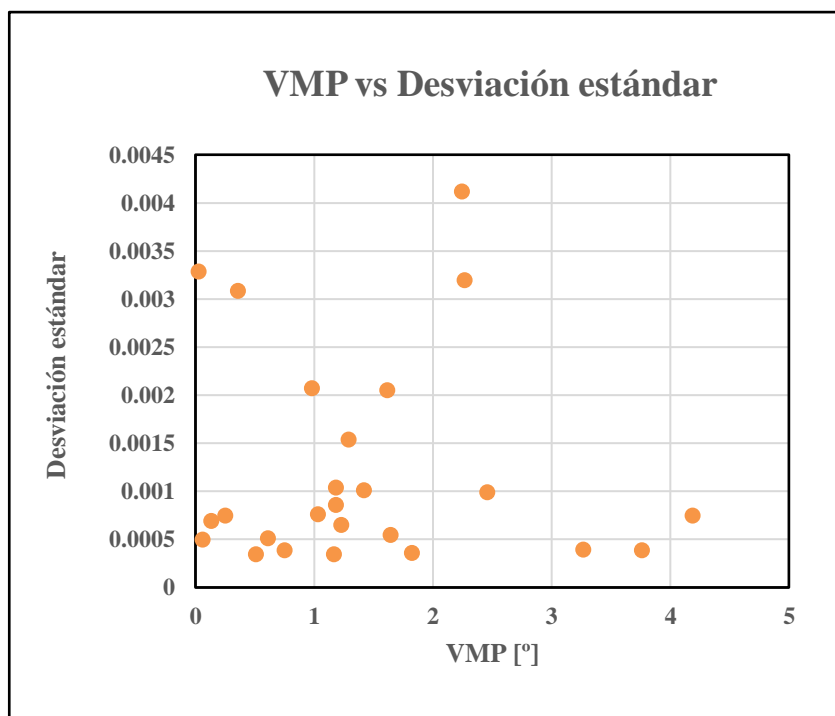


Figura 3.6: Relación entre VMP y desviación estándar

3.1.3 Histogramas

A continuación se muestran los histogramas realizados para determinar los valores más probables del error máximo, error mínimo y desviación estándar según los valores más frecuentes. Para el caso del error máximo (figura 3.7) se observa que todos los errores quedaron en el primer intervalo a excepción del error del 50%. Como resultado el VMP es 0,05 correspondiente a 5%. Para el caso del error mínimo (figura 3.8) se puede observar que el porcentaje del histograma disminuye, sin embargo, el VMP queda en el primer intervalo y da como resultado 0,005 que corresponde a un 0,5%.

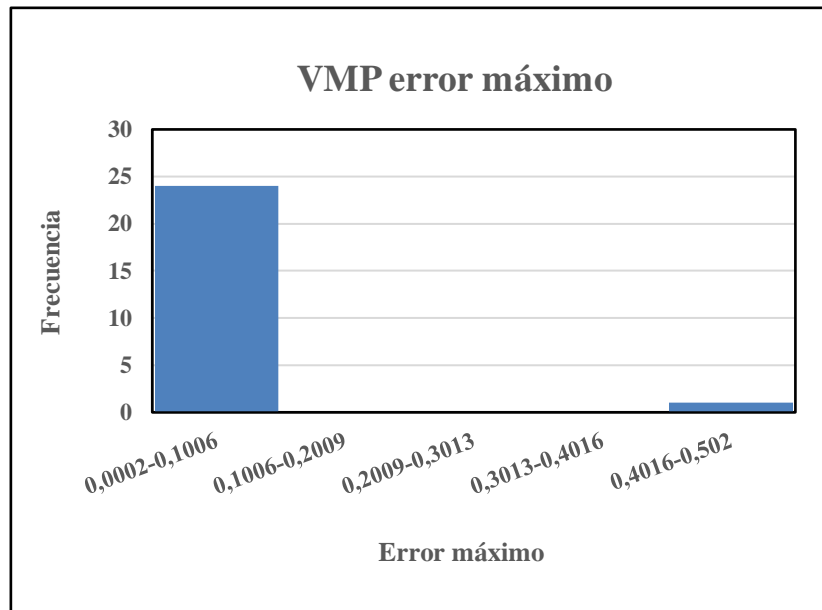


Figura 3.7: Histograma para obtención VMP del error máximo

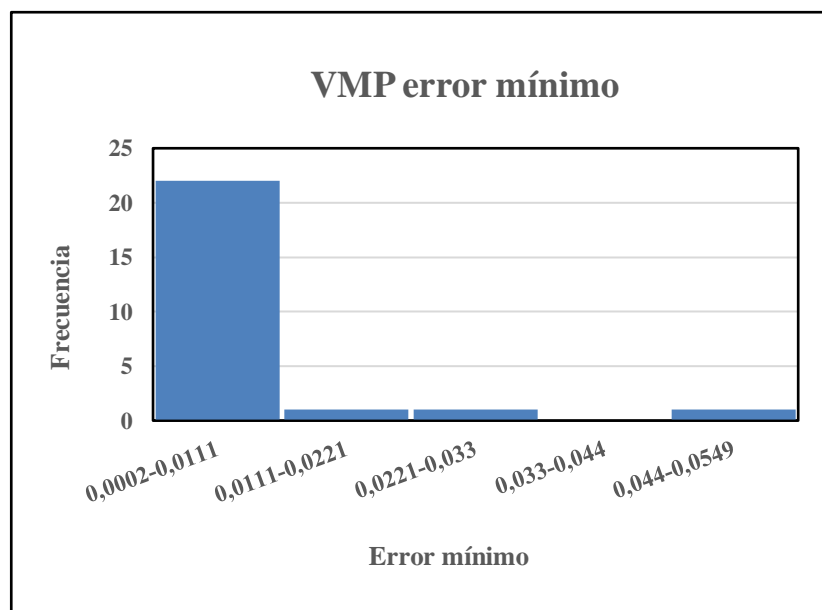


Figura 3.8: Histograma para obtención VMP del error mínimo

Para el caso de la desviación estándar (figura 3.9), el VMP se obtiene también del primer intervalo. Como resultado, el VMP de la desviación estándar es 0,0007. En base a lo anterior, se puede decir que tanto errores como desviación estándar coinciden en que los valores más probables son valores del primer rango de los histogramas, por lo tanto, se puede indicar que son los valores más bajos dentro de los valores posibles.



Figura 3.9: Histograma desviación estándar

3.2 Matriz con error máximo y error mínimo incluido

Con el fin de recomendar distancias de separación entre sensores se aplicó un formato condicional que incluye el error instrumental. Los resultados muestran la influencia del error instrumental en la medición de asentamientos hasta un máximo de 20 metros de separación en función de 17 medidas de asentamiento diferentes. Para realizar la recomendación de distancias entre equipos se utiliza como criterio: cantidad de errores rojos y amarillos por columna, umbrales de serviciabilidad de la línea según trabajo de cruces de túneles de Cristian Figueroa, distancias de separación en antecedentes estudiados e idealmente un criterio económico al utilizar una gran cantidad de instrumentos en proyectos de mayor envergadura.

La matriz queda expresada según:

- color verde – errores menores a los errores más probables
- color amarillo – errores más probables
- color rojo – errores mayores a los errores más probable

3.2.1 Error máximo con formato condicional

En la tabla 3.1 para error máximo, se observa un comportamiento creciente del color rojo a medida que aumenta la separación lo que da a entender que se requiere de mayores asentamientos para no caer en los errores altos, por otro lado, según la información utilizada los umbrales de serviciabilidad para asentamientos en cruces de túneles tienden a no sobrepasar un umbral esperado de aprox. 18 mm y un umbral de alarma de aprox. 20 mm, en base a esto se acota la tabla y las distancias entre 10 a 20 metros no se consideran. Luego, utilizando el criterio de menor cantidad de errores rojos sobre amarillos el rango se reduce de 1 a 8 metros. Posteriormente, según los antecedentes estudiados la distancia mínima de separación entre instrumentos para túneles es 5 metros. Considerando lo anterior la distancia recomendada de separación para el Tilt-90 está entre los 5 a 8 metros con respecto al error máximo.

Tabla 3.1: Error máximo con formato condicional

Metros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196
0,0025	0,01938	0,16563	0,27774	0,33380	0,36743	0,38985	0,40587	0,41788	0,42722	0,43469
0,005	0,00544	0,01938	0,05352	0,16563	0,23290	0,27774	0,30977	0,33380	0,35248	0,36743
0,0075	0,00850	0,01487	0,01938	0,02122	0,09836	0,16563	0,21368	0,24971	0,27774	0,30016
0,01	0,00947	0,00544	0,01692	0,01938	0,02085	0,02184	0,02254	0,16563	0,20300	0,23290
0,0125	0,00133	0,00435	0,01173	0,01753	0,01938	0,02061	0,02149	0,08155	0,12826	0,16563
0,015	0,00194	0,00850	0,00544	0,01487	0,01790	0,01938	0,02043	0,02122	0,05352	0,09836
0,0175	0,00358	0,01745	0,00360	0,01015	0,01642	0,01815	0,01938	0,02030	0,02102	0,03110
0,02	0,00143	0,00947	0,00509	0,00544	0,01298	0,01692	0,01832	0,01938	0,02020	0,02085
0,0225	0,00191	0,00271	0,00850	0,00323	0,00921	0,01487	0,01891	0,01846	0,01938	0,02012
0,025	0,00107	0,00133	0,01447	0,00435	0,00544	0,01173	0,01621	0,01753	0,01856	0,01938
0,0275	0,00106	0,00088	0,01667	0,00547	0,00300	0,00858	0,01352	0,01661	0,01774	0,01864
0,03	0,00115	0,00194	0,00947	0,00850	0,00390	0,00544	0,01083	0,01487	0,01692	0,01790
0,0325	0,00059	0,00378	0,00317	0,01298	0,00480	0,00285	0,00813	0,01251	0,01591	0,01716
0,035	0,00046	0,00358	0,00225	0,01745	0,00569	0,00360	0,00544	0,01015	0,01382	0,01642
0,0375	0,00289	0,00250	0,00133	0,01487	0,00850	0,00435	0,00275	0,00780	0,01173	0,01487
0,04	0,00467	0,00143	0,00103	0,00947	0,01208	0,00509	0,00339	0,00544	0,00963	0,01298
Metros	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196
0,0025	0,44081	0,44591	0,45022	0,45391	0,45712	0,45992	0,46239	0,46459	0,46656	0,46833
0,005	0,37966	0,38985	0,39847	0,40587	0,41227	0,41788	0,42282	0,42722	0,43115	0,43469
0,0075	0,31851	0,33380	0,34673	0,35782	0,36743	0,37584	0,38326	0,38985	0,39575	0,40106
0,01	0,25736	0,27774	0,29499	0,30977	0,32258	0,33380	0,34369	0,35248	0,36035	0,36743
0,0125	0,19620	0,22168	0,24324	0,26172	0,27774	0,29175	0,30412	0,31511	0,32494	0,33380
0,015	0,13505	0,16563	0,19150	0,21368	0,23290	0,24971	0,26455	0,27774	0,28954	0,30016
0,0175	0,07390	0,10957	0,13976	0,16563	0,18805	0,20767	0,22498	0,24037	0,25414	0,26653
0,02	0,02139	0,05352	0,08801	0,11758	0,14321	0,16563	0,18541	0,20300	0,21873	0,23290
0,0225	0,02072	0,02122	0,03627	0,06953	0,09836	0,12359	0,14585	0,16563	0,18333	0,19926
0,025	0,02005	0,02061	0,02108	0,02149	0,05352	0,08155	0,10628	0,12826	0,14793	0,16563
0,0275	0,01938	0,01999	0,02051	0,02096	0,02135	0,03951	0,06671	0,09089	0,11252	0,13200
0,03	0,01871	0,01938	0,01995	0,02043	0,02085	0,02122	0,02714	0,05352	0,07712	0,09836
0,0325	0,01804	0,01876	0,01938	0,01991	0,02036	0,02076	0,02112	0,02143	0,04172	0,06473
0,035	0,01736	0,01815	0,01881	0,01938	0,01987	0,02030	0,02068	0,02102	0,02132	0,03110
0,0375	0,01669	0,01753	0,01824	0,01885	0,01938	0,01984	0,02025	0,02061	0,02093	0,02122
0,04	0,01572	0,01692	0,01767	0,01832	0,01889	0,01938	0,01981	0,02020	0,02054	0,02085

3.2.2 Error mínimo con formato condicional

En la tabla 3.2 para error mínimo, se aprecia un comportamiento similar al anterior pero con mayor cantidad de errores altos. Los umbrales de serviciabilidad permiten descartar las distancias entre 10 a 20 metros. Considerando el umbral de alarma de 20 mm. y el criterio de menor cantidad de errores mayores a los más probables se reduce las distancias de 1 a 6 metros. Posteriormente considerando los antecedentes estudiados, las distancias recomendadas de separación para el Tilt-90 esta entre 5 a 6 metros con respecto al error mínimo.

Tabla 3.2: Error mínimo con formato condicional

Metros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196
0,0025	0,01121	0,16563	0,27774	0,33380	0,36743	0,38985	0,40587	0,41788	0,42722	0,43469
0,005	0,00159	0,01121	0,01909	0,02804	0,03341	0,03699	0,03955	0,04147	0,04296	0,04416
0,0075	0,02453	0,00304	0,01121	0,01586	0,02267	0,02804	0,03188	0,03476	0,03699	0,03879
0,01	0,00299	0,00159	0,00501	0,01121	0,01493	0,01909	0,02420	0,02804	0,03103	0,03341
0,0125	0,00133	0,01517	0,00255	0,00656	0,01121	0,01431	0,01653	0,02133	0,02506	0,02804
0,015	0,00072	0,02453	0,00159	0,00304	0,00749	0,01121	0,01387	0,01586	0,01909	0,02267
0,0175	0,00379	0,00831	0,00864	0,00231	0,00377	0,00811	0,01121	0,01354	0,01535	0,01730
0,02	0,00133	0,00299	0,02171	0,00159	0,00275	0,00501	0,00856	0,01121	0,01328	0,01493
0,0225	0,00074	0,00109	0,02453	0,00538	0,00217	0,00304	0,00590	0,00889	0,01121	0,01307
0,025	0,00185	0,00133	0,01372	0,01517	0,00159	0,00255	0,00324	0,00656	0,00915	0,01121
0,0275	0,00541	0,00088	0,00533	0,02497	0,00342	0,00207	0,00283	0,00424	0,00708	0,00935
0,03	0,00234	0,00072	0,00299	0,02453	0,01125	0,00159	0,00242	0,00304	0,00501	0,00749
0,0325	0,00064	0,00116	0,00101	0,01642	0,01909	0,00211	0,00200	0,00267	0,00320	0,00563
0,035	0,00090	0,00379	0,00117	0,00831	0,02693	0,00864	0,00159	0,00231	0,00288	0,00377
0,0375	0,00058	0,00301	0,00133	0,00474	0,02453	0,01517	0,00118	0,00195	0,00255	0,00304
0,04	0,00081	0,00133	0,001030941	0,00299	0,01804	0,02171	0,00678	0,00159	0,00223	0,00275
Metros	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196	0,50196
0,0025	0,44081	0,44591	0,45022	0,45391	0,45712	0,45992	0,46239	0,46459	0,46656	0,46833
0,005	0,04513	0,04595	0,04664	0,04723	0,04774	0,04819	0,04858	0,04893	0,04925	0,04953
0,0075	0,04025	0,04147	0,04250	0,04339	0,04416	0,04483	0,04542	0,04595	0,04642	0,04684
0,01	0,03537	0,03699	0,03837	0,03955	0,04058	0,04147	0,04226	0,04296	0,04359	0,04416
0,0125	0,03048	0,03252	0,03424	0,03572	0,03699	0,03811	0,03910	0,03998	0,04076	0,04147
0,015	0,02560	0,02804	0,03011	0,03188	0,03341	0,03476	0,03594	0,03699	0,03794	0,03879
0,0175	0,02072	0,02356	0,02597	0,02804	0,02983	0,03140	0,03278	0,03401	0,03511	0,03610
0,02	0,01629	0,01909	0,02184	0,02420	0,02625	0,02804	0,02962	0,03103	0,03228	0,03341
0,0225	0,01460	0,01586	0,01771	0,02037	0,02267	0,02468	0,02646	0,02804	0,02945	0,03073
0,025	0,01291	0,01431	0,01551	0,01653	0,01909	0,02133	0,02330	0,02506	0,02663	0,02804
0,0275	0,01121	0,01276	0,01408	0,01520	0,01617	0,01797	0,02014	0,02207	0,02380	0,02535
0,03	0,00952	0,01121	0,01265	0,01387	0,01493	0,01586	0,01698	0,01909	0,02097	0,02267
0,0325	0,00783	0,00966	0,01121	0,01254	0,01369	0,01470	0,01559	0,01638	0,01814	0,01998
0,035	0,00614	0,00811	0,00978	0,01121	0,01245	0,01354	0,01450	0,01535	0,01611	0,01730
0,0375	0,00445	0,00656	0,00835	0,00989	0,01121	0,01238	0,01340	0,01431	0,01513	0,01586
0,04	0,00317	0,00501	0,00692	0,00856	0,00997	0,01121	0,01231	0,01328	0,01415	0,01493

3.3 Aplicación de metodología incluyendo el error instrumental para medición de asentamientos

En este apartado se presenta la última parte del capítulo de resultados donde se incorporó el error instrumental del Laser Tilt-90 en perfiles de asentamiento mediante el método de Peck. Para ello se agregó el error máximo y error mínimo con el fin obtener el asentamiento en el eje de la clave del túnel según el cálculo relativo y absoluto del error. En base a lo anterior, se puede observar de que manera influye el error instrumental con respecto a los umbrales de serviciabilidad.

Los resultados muestran que en todos los casos de estudio el asentamiento obtenido con el error absoluto fue mayor al obtenido con el error relativo. La menor diferencia entre el error relativo y absoluto considerando el error mínimo de corrección fue de 0,3 mm en la estación Cal y Canto y Plaza Egaña, la mayor diferencia fue de 0,8 mm en la estación Irrarázaval. Por otra parte, la menor diferencia considerando el error máximo de corrección fue 2,4 mm en la estación Cal y Canto, la mayor diferencia fue de 6,3 mm en la estación Irrarázaval.

Con respecto a los umbrales de serviciabilidad, considerando la corrección por error máximo, tanto para la estación Plaza de Armas como la estación Universidad de Chile se alcanzó el umbral esperado con el error relativo y el umbral de alarma con el error absoluto. Otra estación que alcanzó un umbral fue en Irrarázaval con el error absoluto. La corrección por error mínimo no alcanzó ningún umbral, sin embargo, este error se ajusta mejor a un perfil realizado con el método empírico de Peck.

3.3.1 Cruce Líneas 2 y 3, estación Cal y Canto

Para la estación Cal y Canto la figura 3.10 muestra el perfil de asentamiento de la Línea 2 sin error y con error relativo, la figura 3.11 el perfil sin error y con error absoluto. La tabla 3.3 muestra el asentamiento real y la estimación de asentamientos incluyendo el error instrumental con respecto al tipo de error.

Tabla 3.3: Estimación de asentamientos corregidos

Tipo de error	δ_{max} real [mm]	δ_{max} corregido por error mínimo [mm]	δ_{max} corregido por error máximo [mm]
Sin error	8,2	-	-
Error relativo	-	8,6	11,6
Error absoluto	-	8,9	14

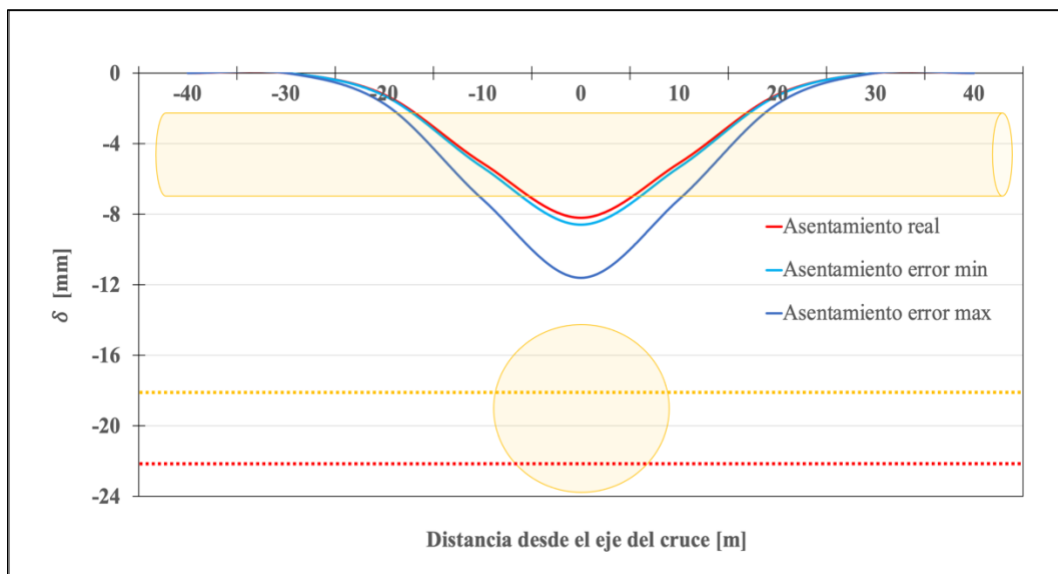


Figura 3.10: Perfil de asentamiento cruce Línea 2 - Línea 3 sin error y con error relativo

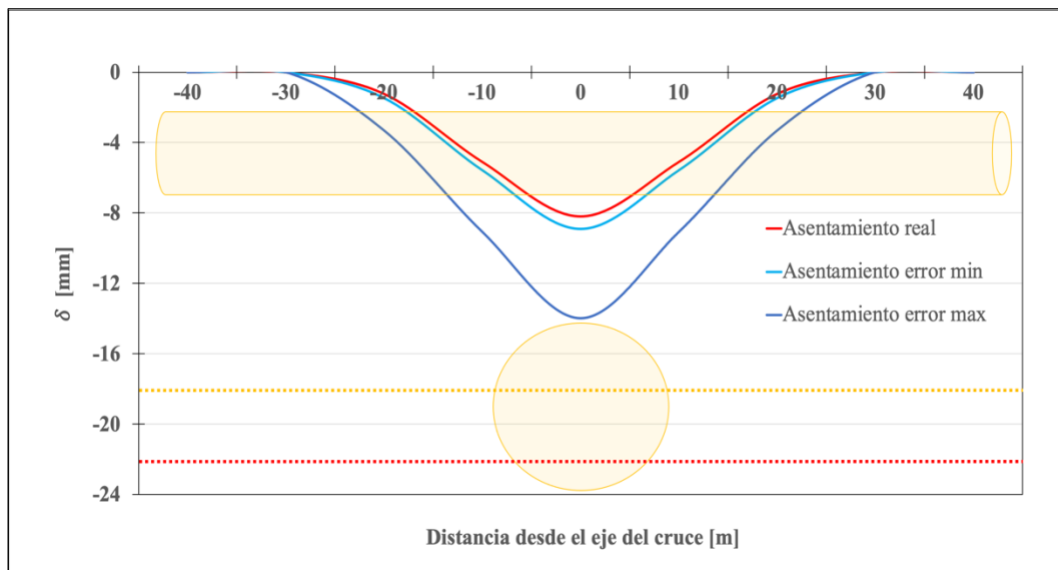


Figura 3.11: Perfil de asentamiento cruce Línea 2 - Línea 3 sin error y con error absoluto

3.3.2 Cruce Líneas 5 y 3, estación Plaza de Armas

Para la estación Plaza de Armas la figura 3.12 muestra el perfil de asentamiento de la Línea 5 sin error y con error relativo y la figura 3.13 el perfil sin error y con error absoluto. La tabla 3.4 muestra el asentamiento real y la estimación de asentamientos incluyendo el error instrumental con respecto al tipo de error.

Tabla 3.4: Estimación de asentamientos corregidos

Tipo de error	δ_{max} real [mm]	δ_{max} corregido por error mínimo [mm]	δ_{max} corregido por error máximo [mm]
Sin error	15	-	-
Error relativo	-	15,7	20,9
Error absoluto	-	16,2	24,5

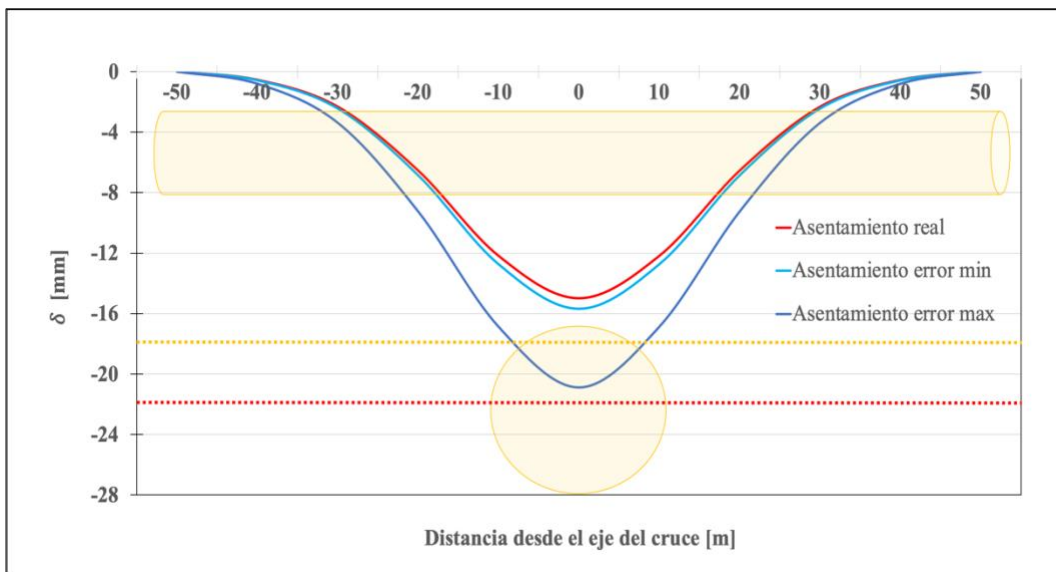


Figura 3.12: Perfil de asentamiento cruce Línea 5 - Línea 3 sin error y con error relativo

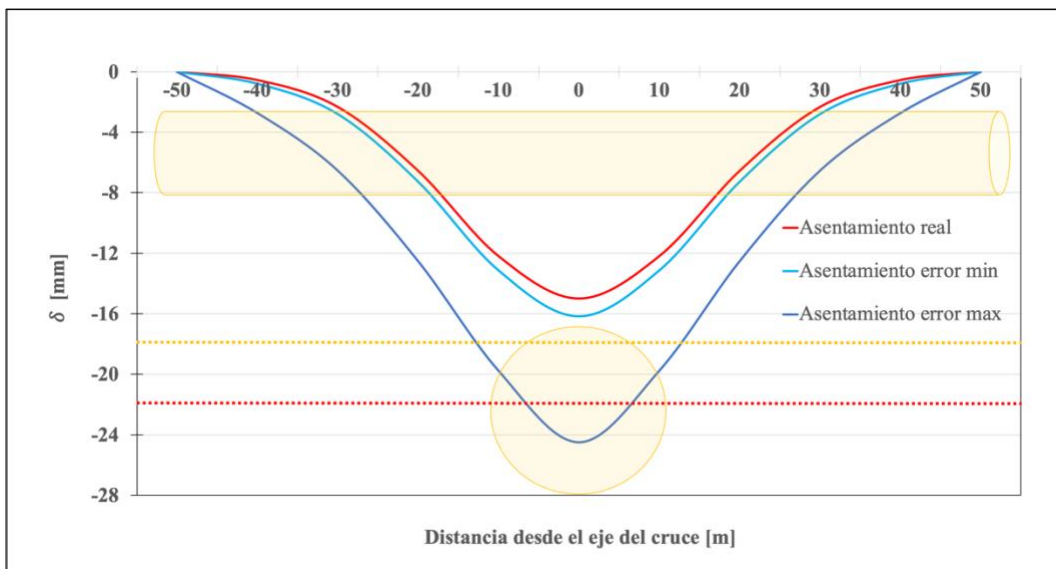


Figura 3.13: Perfil de asentamiento cruce Línea 5 - Línea 3 sin error y con error absoluto

3.3.3 Cruce Líneas 1 y 3, estación Universidad de Chile

Para la estación Universidad de Chile la figura 3.14 muestra el perfil de asentamiento de la Línea 1 sin error y con error relativo y la figura 3.15 el perfil sin error y con error absoluto. La tabla 3.5 muestra el asentamiento real y la estimación de asentamientos incluyendo el error instrumental con respecto al tipo de error.

Tabla 3.5: Estimación de asentamientos corregidos

Tipo de error	δ_{max} real [mm]	δ_{max} corregido por error mínimo [mm]	δ_{max} corregido por error máximo [mm]
Sin error	13	-	-
Error relativo	-	13,6	18,5
Error absoluto	-	14,2	22,7

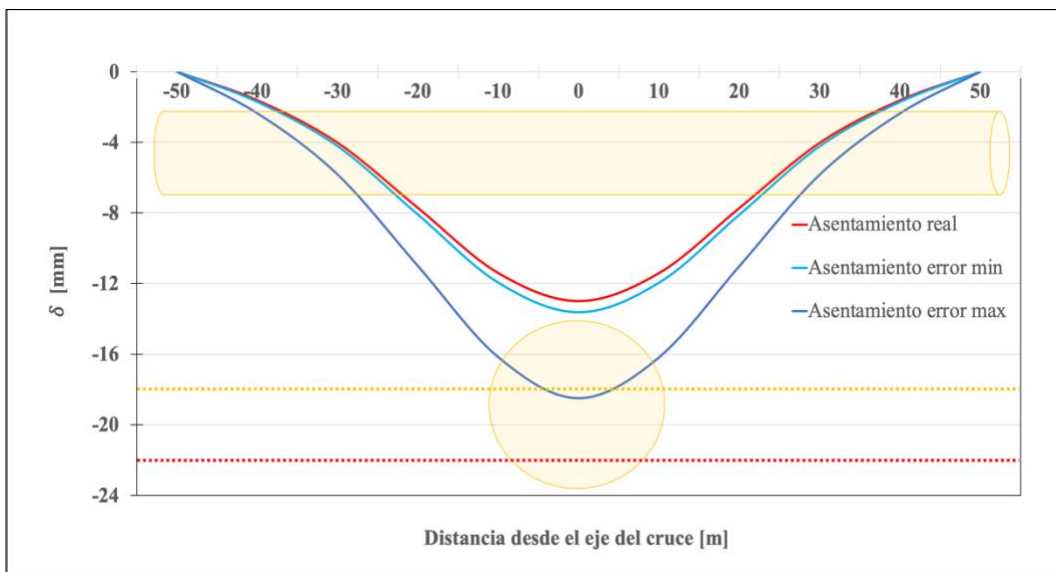


Figura 3.14: Perfil de asentamiento cruce Línea 1 - Línea 3 sin error y con error relativo

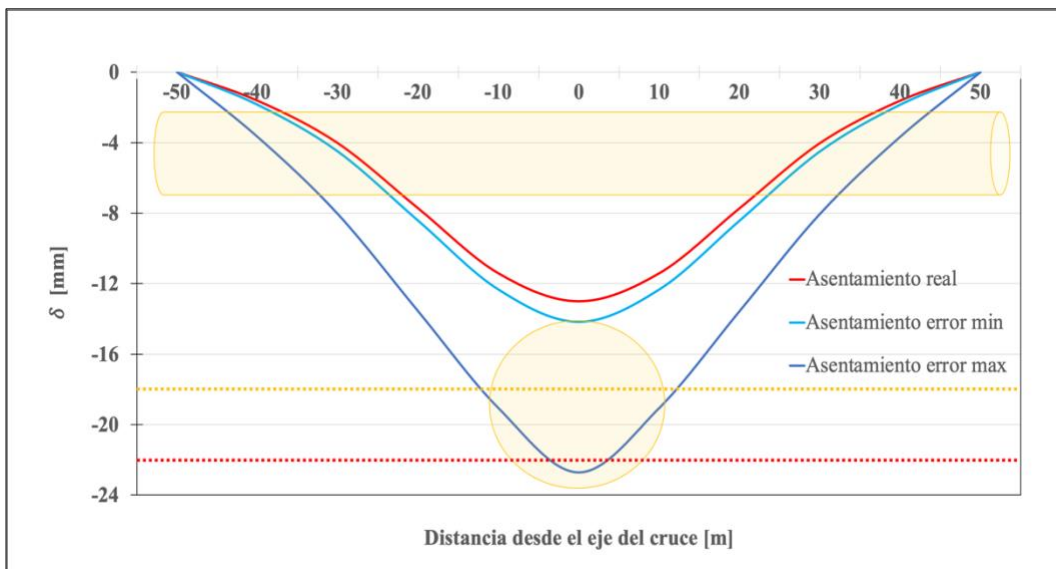


Figura 3.15: Perfil de asentamiento cruce Línea 1 - Línea 3 sin error y con error absoluto

3.3.4 Cruce Líneas 5 y 3, estación Irrarázaval

Para la estación Irrarázaval la figura 3.16 muestra el perfil de asentamiento de la Línea 5 sin error y con error relativo y la figura 3.17 el perfil sin error y con error absoluto. La tabla 3.6 muestra el asentamiento real y la estimación de asentamientos incluyendo el error instrumental con respecto al tipo de error.

Tabla 3.6: Estimación de asentamientos corregidos

Tipo de error	δ_{max} real [mm]	δ_{max} corregido por error mínimo [mm]	δ_{max} corregido por error máximo [mm]
Sin error	8,8	-	-
Error relativo	-	9,2	12,7
Error absoluto	-	10	19

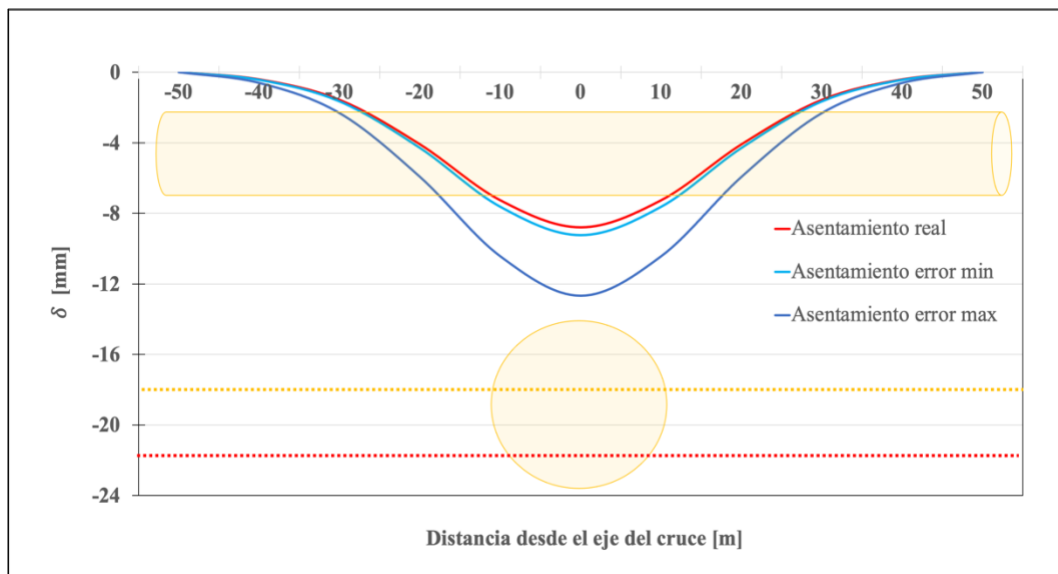


Figura 3.16: Perfil de asentamiento cruce Línea 5 - Línea 3 sin error y con error relativo

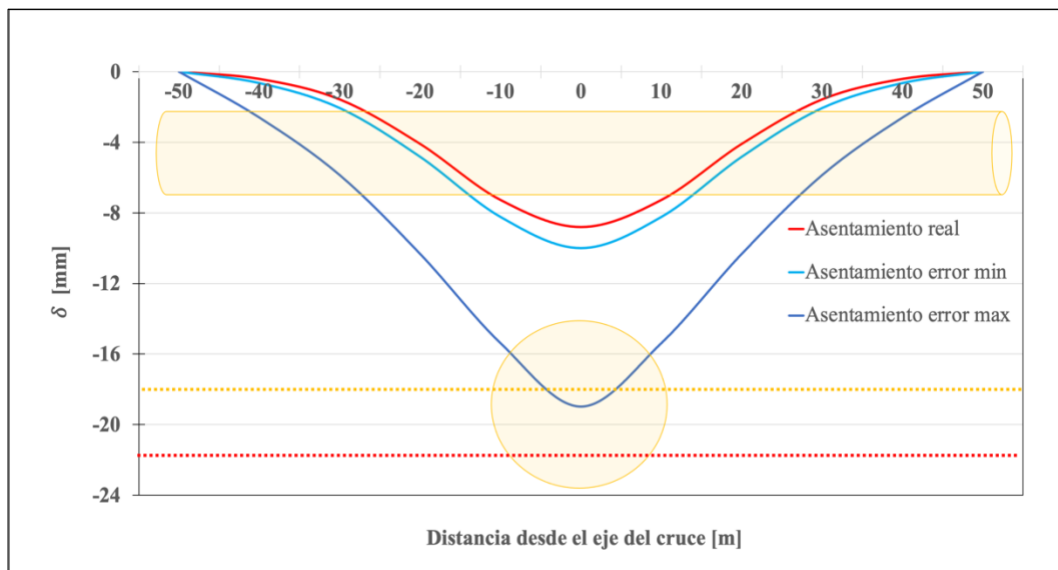


Figura 3.17: Perfil de asentamiento cruce Línea 5 - Línea 3 sin error y con error absoluto

3.3.5 Cruce Líneas 5 y 3, estación Plaza Egaña

Para la estación Plaza Egaña la figura 3.18 muestra el perfil de asentamiento de la Línea 4 sin error y con error relativo y la figura 3.19 sin error y con error absoluto. La tabla 3.7 muestra el asentamiento real y la estimación de asentamientos incluyendo el error instrumental con respecto al tipo de error.

Tabla 3.7: Estimación de asentamientos corregidos

Tipo de error	δ_{max} real [mm]	δ_{max} corregido por error mínimo [mm]	δ_{max} corregido por error máximo [mm]
Sin error	8,0	-	-
Error relativo	-	8,4	11,3
Error absoluto	-	8,7	13,8

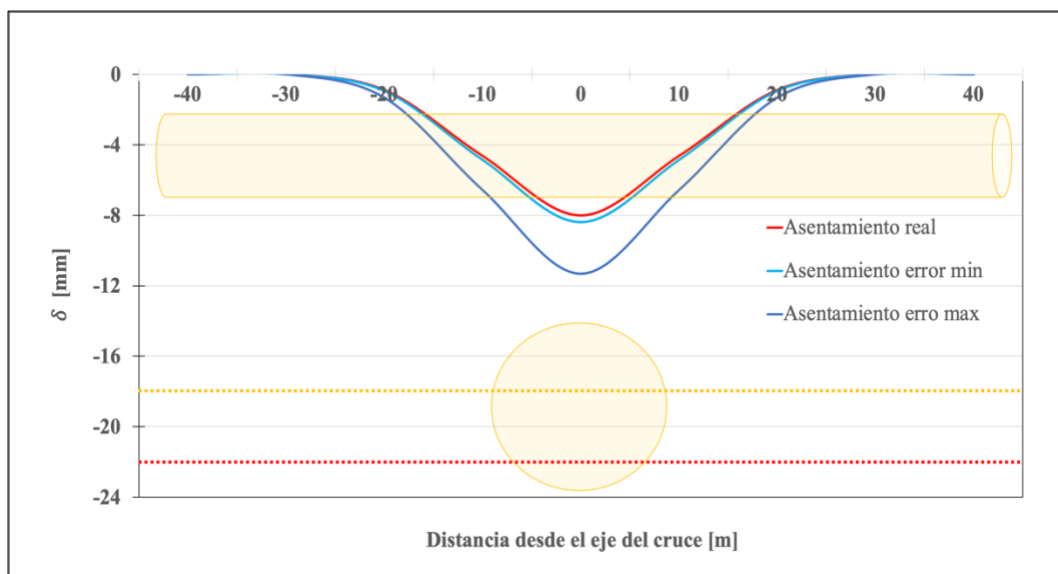


Figura 3.18: Perfil de asentamiento cruce Línea 4 - Línea 3 sin error y con error relativo

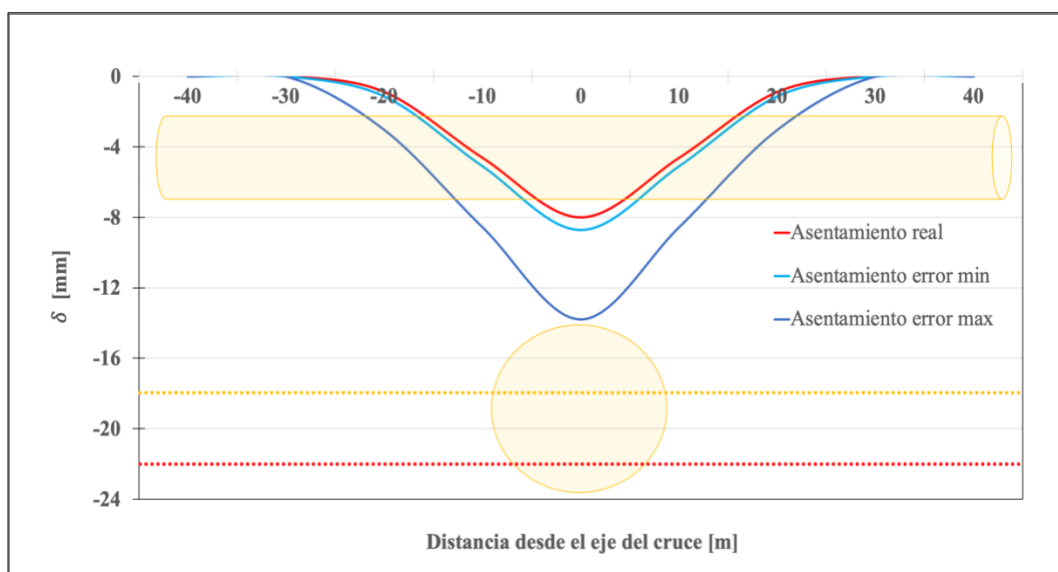


Figura 3.19: Perfil de asentamiento cruce Línea 4 - Línea 3 sin error y con error absoluto

4. DISCUSION

4.1 Análisis del error instrumental

Los resultados muestran que el valor del VMP es cercano al ángulo teórico, sin embargo, se pudo notar una diferencia importante. El ángulo teórico aumenta a medida que aumenta la altura del triangulo lo que no necesariamente ocurrió para el VMP (tabla 2.3). Esto se debe a que la estimación del VMP tiene errores inherentes debido a que las condiciones en la obtención de ángulos no son del todo controladas, lo cual agrega otro error en la obtención del VMP que correspondería al error natural según Ghilani et al. (2006).

El análisis del error instrumental arrojó una banda del posible error para cada ángulo en estudio. Este método se limita a que si la distorsión del ángulo esta fuera del error máximo y mínimo, no se podría detectar las variaciones del ángulo para estimar asentamientos.

El error mínimo en algunas ocasiones fue mayor que el error máximo, esto ocurre ya que no corresponden al error más bajo y el error más alto respectivamente sino que se entiende como la diferencia del valor más probable asociado al mínimo valor que se puede obtener en las 240 mediciones y el error máximo a la diferencia del valor más probable asociado al máximo valor que se puede obtener, por lo tanto, los errores forman un rango donde se encuentra el error del instrumento.

4.2 Matriz de errores incluyendo error instrumental

La tabla de errores en la que se aplicó el formato condicional denota como cuando las distancias de separación aumentan los errores también aumentan, así mismo, muestra que a medida que los asentamientos aumentan, los errores van disminuyendo, esto es debido a que como se mostró en el apartado del análisis del error instrumental en general el error tiende a disminuir a medida que el ángulo aumenta.

Para pequeños asentamientos, se recomendaría tener pequeñas distancias para poder producir mayores ángulos y así disminuir el error, sin embargo, si se esperan mayores asentamientos estas distancias puede ser incrementada de manera más óptima, no obstante, según lo que se ha observado en otros estudios los asentamientos tienen a no sobrepasar los 18 mm según un umbral esperado de serviciabilidad.

4.3 Perfiles de asentamiento incluyendo error instrumental

La corrección del error mínimo arrojó valores mejor ajustados del asentamiento en el eje de la clave que el error máximo, esto se debe a que todos los ángulos corregidos están interpolados con el ángulo de 0° y tal como se vió durante apartados anteriores el error máximo de 0° esta sujeto a un mayor porcentaje de error que el error mínimo de 0° lo que hace corregir el primer ángulo acumuladamente en mayor cantidad.

Por una parte, el error máximo acercó el asentamiento a los umbrales de serviciabilidad mientras que por otra parte, el error mínimo se ajustó mejor con el perfil obtenido con los ángulos de Peck, para este ultimo caso el error mínimo no sobrepasó ningún umbral de serviciabilidad.

El asentamiento más crítico en cuanto a sobrepasar un umbral de alarma de 20 mm fue en la estación Plaza de Armas, con el error relativo 20,9 mm y el error absoluto 24,5 mm, en la estación Universidad de Chile con error absoluto se alcanzó los 22,7 mm. Con respecto al umbral esperado de 18 mm, se vió sobrepasado en la estación Universidad de Chile donde el asentamiento llegó a 18,5 mm considerando el error relativo y en la estación Irrarázaval donde el asentamiento llegó a 19 mm considerando el error absoluto.

4.5 Singularidad del error en 0°

Para la medición del 0° con 240 mediciones se determinó que los errores eran mucho mayores a los de otros ángulos, inclusive con valores de hasta de 50%. En vista de esto para el ángulo 0° se optó por obtener una mayor cantidad de datos con 842 mediciones y así realizar una estadística más fidedigna, sin embargo, esta mayor cantidad de datos siguió mostrando la misma tendencia con errores de hasta 60%, lo que indica que para ángulos muy pequeños el Tilt-90 puede tener grandes errores en su medición.

Debido a la singularidad del error máximo de 0° que llegaba hasta un 50% se realizó un estudio de forma paralela con el error absoluto el cual fue aplicado de forma directa para los casos de cruces de túneles, no obstante, utilizando este error se analizó nuevamente el apartado del error instrumental y de la matriz de errores. El error absoluto permitió quitar la singularidad, sin embargo, los resultados arrojaron una mayor una mayor variabilidad entre los datos por lo que al realizar interpolaciones aumentaba más el error que al obtenerlo por medio del error relativo. La figura 4.1 muestra el R^2 del error absoluto el cual se puede comparar con el R^2 del error relativo (figura 3.4).

Con respecto a la matriz de errores para recomendar distancias de separación entre sensores, el formato condicional con error absoluto arrojó el mismo comportamiento para el error máximo y sin colores rojos para el error mínimo. Debido a esto, el error máximo es el más desfavorable y el que restringe la recomendación. En base a lo anterior, se obtuvo las mismas distancias recomendadas lo que se puede comprobar con la tabla 4.1 aplicado al error máximo y la tabla 4.2 para error mínimo con respecto a las tablas 3.1 y 3.2 vistas anteriormente.

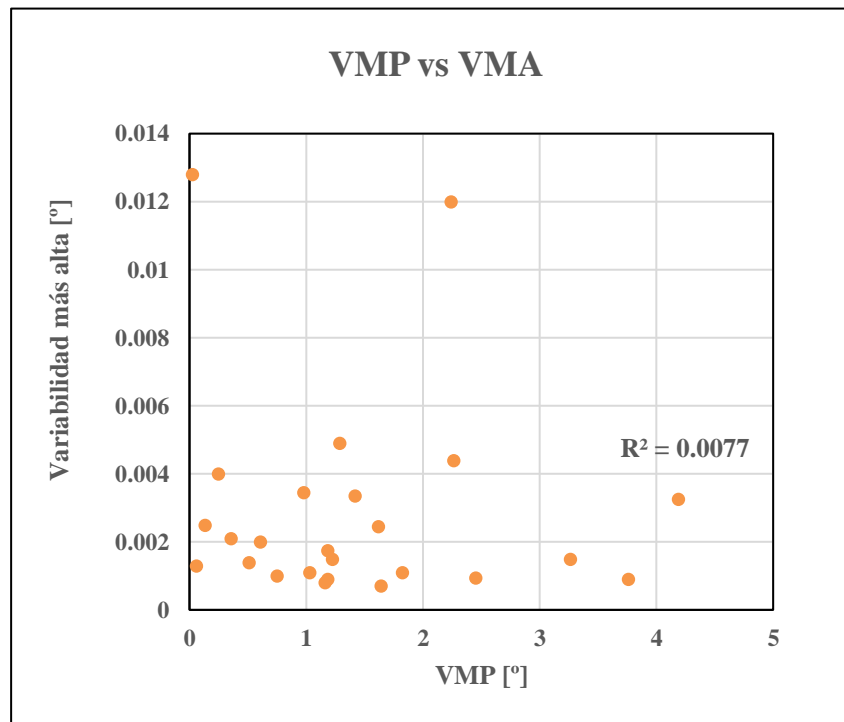


Figura 4.1: Relación entre VMP y VMA



Tabla 4.1: Error máximo con formato condicional mediante error absoluto

Metros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280
0,0025	0,00238	0,00475	0,00744	0,00878	0,00959	0,01011	0,01050	0,01079	0,01101	0,01119
0,005	0,00192	0,00238	0,00207	0,00475	0,00636	0,00744	0,00820	0,00878	0,00923	0,00959
0,0075	0,00218	0,00374	0,00238	0,00143	0,00314	0,00475	0,00590	0,00676	0,00744	0,00797
0,01	0,00220	0,00192	0,00364	0,00238	0,00162	0,00207	0,00359	0,00475	0,00564	0,00636
0,0125	0,00100	0,00175	0,00313	0,00332	0,00238	0,00175	0,00130	0,00274	0,00385	0,00475
0,015	0,00244	0,00218	0,00192	0,00374	0,00314	0,00238	0,00184	0,00143	0,00207	0,00314
0,0175	0,00374	0,00260	0,00159	0,00283	0,00389	0,00301	0,00238	0,00191	0,00154	0,00153
0,02	0,00170	0,00220	0,00191	0,00192	0,00338	0,00364	0,00292	0,00238	0,00196	0,00162
0,0225	0,00261	0,00170	0,00218	0,00151	0,00265	0,00374	0,00346	0,00285	0,00238	0,00200
0,025	0,00110	0,00100	0,00237	0,00175	0,00192	0,00313	0,00400	0,00332	0,00280	0,00238
0,0275	0,00152	0,00086	0,00243	0,00199	0,00146	0,00253	0,00348	0,00380	0,00322	0,00276
0,03	0,00191	0,00244	0,00220	0,00218	0,00165	0,00192	0,00296	0,00374	0,00364	0,00314
0,0325	0,00106	0,00475	0,00193	0,00232	0,00185	0,00142	0,00244	0,00328	0,00394	0,00351
0,035	0,00078	0,00374	0,00147	0,00246	0,00204	0,00159	0,00192	0,00283	0,00354	0,00389
0,0375	0,00635	0,00260	0,00100	0,00238	0,00218	0,00175	0,00140	0,00237	0,00313	0,00374
0,04	0,01048	0,00170	0,00091	0,00220	0,00229	0,00191	0,00154	0,00192	0,00273	0,00337
Metros	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280	0,01280
0,0025	0,01134	0,01146	0,01156	0,01165	0,01173	0,01179	0,01186	0,01190	0,01196	0,01199
0,005	0,00988	0,01011	0,01033	0,01050	0,01065	0,01079	0,01090	0,01101	0,01110	0,01119
0,0075	0,00841	0,00878	0,00908	0,00935	0,00959	0,00978	0,00996	0,01011	0,01026	0,01038
0,01	0,00694	0,00744	0,00784	0,00820	0,00851	0,00878	0,00901	0,00923	0,00941	0,00959
0,0125	0,00548	0,00609	0,00661	0,00705	0,00744	0,00776	0,00807	0,00833	0,00856	0,00878
0,015	0,00402	0,00475	0,00537	0,00590	0,00636	0,00676	0,00711	0,00744	0,00772	0,00797
0,0175	0,00255	0,00340	0,00413	0,00475	0,00529	0,00575	0,00617	0,00654	0,00687	0,00717
0,02	0,00135	0,00207	0,00290	0,00359	0,00421	0,00475	0,00522	0,00564	0,00602	0,00636
0,0225	0,00169	0,00143	0,00165	0,00245	0,00314	0,00374	0,00428	0,00475	0,00517	0,00555
0,025	0,00204	0,00175	0,00151	0,00130	0,00207	0,00274	0,00332	0,00385	0,00433	0,00475
0,0275	0,00238	0,00206	0,00180	0,00157	0,00137	0,00173	0,00238	0,00297	0,00348	0,00394
0,03	0,00272	0,00238	0,00209	0,00184	0,00162	0,00143	0,00144	0,00207	0,00263	0,00314
0,0325	0,00307	0,00270	0,00238	0,00211	0,00187	0,00167	0,00149	0,00133	0,00178	0,00234
0,035	0,00341	0,00301	0,00267	0,00238	0,00213	0,00191	0,00171	0,00154	0,00138	0,00153
0,0375	0,00375	0,00332	0,00296	0,00265	0,00238	0,00214	0,00194	0,00175	0,00158	0,00143
0,04	0,00391	0,00364	0,00325	0,00292	0,00263	0,00238	0,00216	0,00196	0,00178	0,00162

Tabla 4.2: Error mínimo con formato condicional mediante error absoluto

Metros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140
0,0025	0,00092	0,00112	0,00121	0,00126	0,00129	0,00131	0,00132	0,00133	0,00134	0,00134
0,005	0,00064	0,00092	0,00103	0,00112	0,00118	0,00121	0,00124	0,00126	0,00128	0,00129
0,0075	0,00840	0,00078	0,00092	0,00099	0,00106	0,00112	0,00116	0,00119	0,00121	0,00123
0,01	0,00068	0,00064	0,00083	0,00092	0,00098	0,00103	0,00108	0,00112	0,00115	0,00118
0,0125	0,00100	0,00545	0,00073	0,00085	0,00092	0,00097	0,00100	0,00105	0,00109	0,00112
0,015	0,00088	0,00840	0,00064	0,00078	0,00086	0,00092	0,00096	0,00099	0,00103	0,00106
0,0175	0,00376	0,00175	0,00318	0,00071	0,00081	0,00087	0,00092	0,00096	0,00098	0,00101
0,02	0,00158	0,00068	0,00772	0,00064	0,00075	0,00083	0,00088	0,00092	0,00095	0,00098
0,0225	0,00099	0,00072	0,00840	0,00206	0,00070	0,00078	0,00084	0,00089	0,00092	0,00095
0,025	0,00190	0,00100	0,00396	0,00545	0,00064	0,00073	0,00080	0,00085	0,00089	0,00092
0,0275	0,00700	0,00086	0,00077	0,00884	0,00137	0,00069	0,00076	0,00081	0,00086	0,00089
0,03	0,00383	0,00088	0,00068	0,00840	0,00409	0,00064	0,00072	0,00078	0,00083	0,00086
0,0325	0,00115	0,00135	0,00063	0,00508	0,00681	0,00092	0,00068	0,00074	0,00080	0,00084
0,035	0,00150	0,00376	0,00081	0,00175	0,00953	0,00318	0,00064	0,00071	0,00076	0,00081
0,0375	0,00100	0,00310	0,00100	0,00075	0,00840	0,00545	0,00060	0,00067	0,00073	0,00078
0,04	0,00184	0,00158	0,00091	0,00068	0,00574	0,00772	0,00254	0,00064	0,00070	0,00075
Metros	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140	0,00140
0,0025	0,00135	0,00135	0,00136	0,00136	0,00136	0,00136	0,00137	0,00137	0,00137	0,00137
0,005	0,00130	0,00131	0,00131	0,00132	0,00133	0,00133	0,00133	0,00134	0,00134	0,00134
0,0075	0,00125	0,00126	0,00127	0,00128	0,00129	0,00129	0,00130	0,00131	0,00131	0,00132
0,01	0,00120	0,00121	0,00123	0,00124	0,00125	0,00126	0,00127	0,00128	0,00128	0,00129
0,0125	0,00115	0,00117	0,00118	0,00120	0,00121	0,00122	0,00124	0,00124	0,00125	0,00126
0,015	0,00109	0,00112	0,00114	0,00116	0,00118	0,00119	0,00120	0,00121	0,00122	0,00123
0,0175	0,00104	0,00107	0,00110	0,00112	0,00114	0,00115	0,00117	0,00118	0,00119	0,00120
0,02	0,00100	0,00103	0,00106	0,00108	0,00110	0,00112	0,00114	0,00115	0,00116	0,00118
0,0225	0,00097	0,00099	0,00101	0,00104	0,00106	0,00108	0,00110	0,00112	0,00113	0,00115
0,025	0,00095	0,00097	0,00098	0,00100	0,00103	0,00105	0,00107	0,00109	0,00111	0,00112
0,0275	0,00092	0,00094	0,00096	0,00098	0,00099	0,00101	0,00104	0,00106	0,00108	0,00109
0,03	0,00089	0,00092	0,00094	0,00096	0,00098	0,00099	0,00100	0,00103	0,00105	0,00106
0,0325	0,00087	0,00090	0,00092	0,00094	0,00096	0,00097	0,00099	0,00100	0,00102	0,00104
0,035	0,00084	0,00087	0,00090	0,00092	0,00094	0,00096	0,00097	0,00098	0,00099	0,00101
0,0375	0,00082	0,00085	0,00088	0,00090	0,00092	0,00094	0,00095	0,00097	0,00098	0,00099
0,04	0,00079	0,00083	0,00086	0,00088	0,00090	0,00092	0,00094	0,00095	0,00096	0,00098

4.5 Reducción de 10 a 5 metros de distancia entre sensores

Con el fin de comprobar la recomendación de separación entre Tilt-90 se redujo la distancia estándar de 10 metros a 5 metros. Con esta recomendación los asentamientos en el eje de la clave no se redujeron de manera relevante. Esto ocurrió porque al disminuir la distancia entre los sensores, los ángulos de inclinación también disminuyen acercándose más al ángulo de 0° y según la forma de calcular los errores, los ángulos cercanos al 0° están sujetos a errores más altos por lo que no se obtuvo una gran diferencia entre los asentamientos máximos.

En el caso del error relativo con los sensores separados a 10 metros el asentamiento en el eje de la clave sobrepasó los umbrales de serviciabilidad en dos cruces de túneles, con la reducción a 5 metros el asentamiento en la clave disminuyó hasta un 1% manteniéndose los valores de asentamiento mayores a los de los umbrales. Con respecto al error absoluto, con los sensores separados a 10 metros el asentamiento en el eje de la clave sobrepasó los umbrales de serviciabilidad en tres cruces de túneles, con la reducción 5 metros disminuyó el asentamiento hasta un 8%, esto permitió en al menos uno de los tres cruces obtener un asentamiento menor al umbral esperado.

La figura 4.2 muestra que con 10 metros de separación el asentamiento en el eje de la clave para la estación Irrarával pasó el umbral esperado, sin embargo, la figura 4.3 muestra que con una reducción a 5 metros de separación el asentamiento en el eje de la clave no sobrepasa el umbral de serviciabilidad.

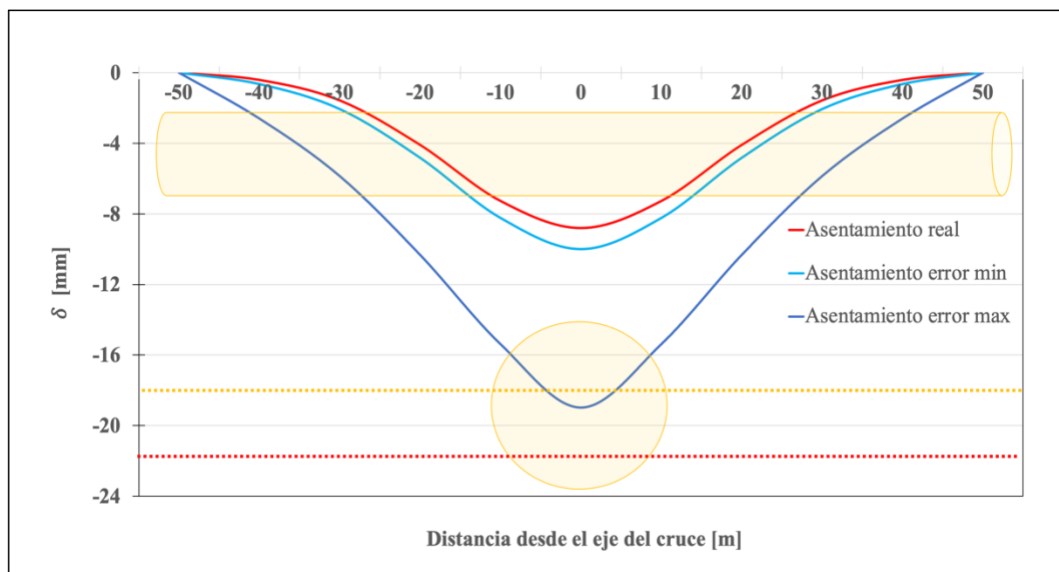


Figura 4.2: Perfil de asentamiento cruce Línea 5 - Línea 3 con error absoluto y 10 metros de separación entre sensores

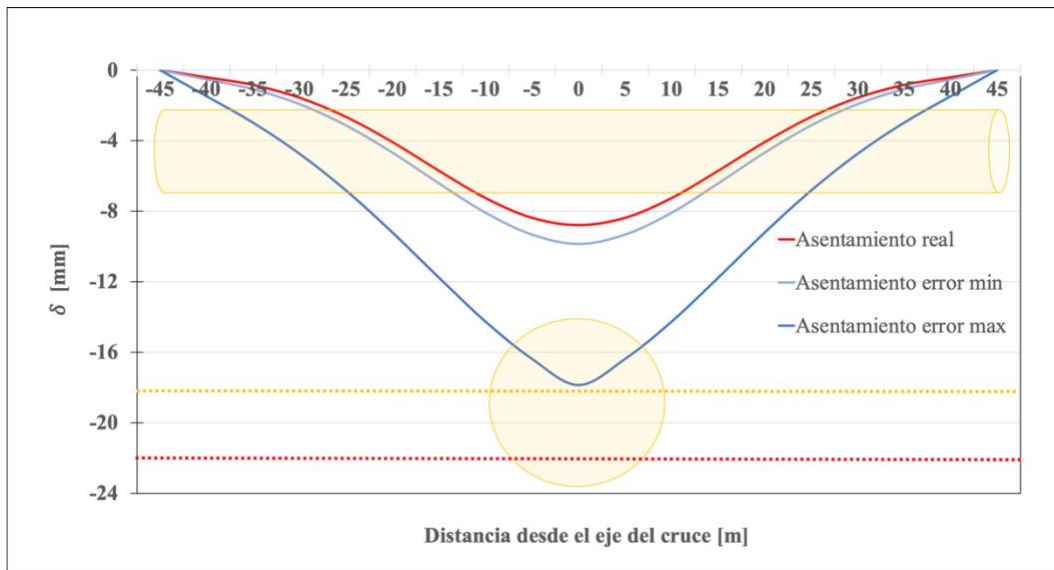


Figura 4.3: Perfil de asentamiento cruce Línea 5 - Línea 3 con error absoluto y 5 metros de separación entre sensores

5. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos durante este trabajo y el análisis completo realizado se puede concluir lo siguiente:

- Los ángulos inferiores a $2,5^\circ$ presentan los errores más altos, específicamente los inferiores a $0,5^\circ$.
- Para un rango de ángulos entre 0° a $4,18^\circ$ obtenidos por el Laser Tilt-90 el error máximo más probable corresponde a un 5% y el error mínimo más probable a un 0,57%.
- Debido a la mayor variabilidad entre los datos el error absoluto arrojó valores de asentamientos mayores que el error relativo sobrepasando en mayor cantidad los umbrales de serviciabilidad.
- Utilizando el error absoluto y 10 metros de separación, el error máximo aumentó el asentamiento en el eje de la clave del túnel hasta un 116%, mientras que el error mínimo lo aumentó hasta un 13,5%.
- Utilizando el error relativo y 10 metros de separación, el error máximo aumentó el asentamiento en el eje de la clave del túnel hasta un 44%, mientras que el error mínimo lo aumentó hasta un 5%.
- A 5 metros de separación el error absoluto disminuyó el asentamiento hasta un 8% mientras que el error relativo hasta un 1%.
- Según el análisis realizado la distancia sugerida para separación entre sensores Laser Tilt-90 es entre entre 5 y 8 metros considerando el error máximo.
- Según el análisis realizado la distancia sugerida para separación entre sensores LaserTilt-90 es entre entre 5 y 6 metros considerando el error mínimo.

6. REFERENCIAS

AETOS. Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas.

Baró, L. (2007). Cálculo de asientos mediante ensayos "in situ". Aplicación a la nueva área terminal del Prat. Universidad Politécnica de Cataluña.

Díez Rubio, F. (2010). *Nuevo modelo Madrid para la estimación de asientos producidos en túneles con tuneladoras epb de gran diámetro* (Doctoral dissertation, Caminos).

Dunnicliff, J. (1993). "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Chapter 4: Systematic Approach to Planning Monitoring Programs using Geotechnical Instrumentation". Ed. John Wiley & Sons, New York, 37- 44.

Figuroa Cid, C. (2019). Estudio de deformaciones de túneles metropolitanos en zonas de cruce por construcción de túnel inferior: Estudio basado en la experiencia de la ingeniería y construcción de la línea 3 del metro de Santiago. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170761>

Gomes Bastos, E. (2016). *El comportamiento geomecánico deformacional de los residuos urbanos: aplicación a un caso real* (Doctoral dissertation, Caminos).

Ghilani, Charles (1) & Wolf, Paul (2). (2006). (1) Ph.D. Professor of Engineering. Surveying Engineering Program. Pennsylvania State University. (2) Ph.D. Professor Emeritus. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Wisconsin-Madison. "Adjustment Computations: Spatial Data Analysis". Ed. John Wiley & Sons.

Heras, G., & del Carmen, P. (2018). Análisis de subsidencias mediante el modelo de Madrid en la Línea 1 del Metro de Quito, tramo "La Magdalena-San Francisco" del PK: 21+ 000 al PK: 21+ 500 (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

Layera Díaz, S. (2018). Back analysis del modelo numérico utilizado para el diseño de los túneles interestación de la Línea 3 del Metro de Santiago. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/159587>

Peck, R. B. (1969). "Deep excavation and tunneling in soft ground". Proc., 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México City, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 225 - 290.

Madariaga, L. L. O. J. (2015). *Guía sobre control geotécnico en minería subterránea*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Dirección General de Política Energética y Minas.

Snežana Maraš-Dragojević. (2012). "Analysis of ground settlement caused by tunnel construction". MSc. CE University of Belgrade Faculty of Civil Engineering. Revista GRADEVINAR.