

Control vertical de infraestructura civil, mediante lidar terrestre y topografía clásica

Vertical control of civil infrastructure, using terrestrial lidar and classic topography

Esteban V. Vargas¹, Juan Mc Gregor-Sanabria², Gustavo Lara-Morales³

V. Vargas, E; Mc Gregor-Sanabria, J; Lara-Morales, G. Control vertical de infraestructura civil, mediante lidar terrestre y topografía clásica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° especial. Marzo, 2025. I Congreso Internacional de Gestión de Proyectos (CIGEPRO). Pág. 49-62.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i6.8176>

1 Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
estebanjesus.vargas@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-3861-0053>

2 Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Centro de Investigación en Estudios para el Desarrollo Sostenible. CIEDES UCR. Costa Rica.
juan.mcgregor@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-9285-8757>

3 Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
gustavo.lara@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-0380-3311>



Palabras clave

Control vertical; topografía clásica; LiDAR Terrestre; auscultación.

Resumen

En ingeniería la obra civil puede estar sujeta a desplazamiento horizontal y vertical debido a causas naturales, deformaciones o factores netamente humanos, por lo que es importante realizar una verificación precisa para así asegurar que las estructuras se encuentren dentro de los parámetros de diseño previamente establecidos, analizando la información recolectada en campo, para así determinar los posibles efectos en la estructura y proceder a su corrección o mitigación. En el presente caso de estudio se realizó el control de verticalidad de una estructura para determinar la existencia de desplazamientos verticales considerando las recomendaciones del Manual de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010. Para ello se utilizan dos metodologías de medición en conjunto, una basada en la obtención de datos mediante LiDAR Terrestre y otra en la topografía clásica, enlazadas a través del establecimiento de una poligonal de referencia local aplicando el método de Bessel mediante series completas, asegurando el enlace de la información obtenida mediante ambas técnicas, y detectando desplazamientos mayores a los recomendados por la normativa, además se valida la información obtenida mediante LiDAR Terrestre con lo cual se logra obtener un modelo de la estructura en estudio, el cual funciona como referencia para una aplicación puntual de la topografía clásica en zonas de interés y realizar el análisis de la información de forma más eficiente y rápida, asegurando además la calidad de la información. La metodología propuesta no solo valida el uso del LiDAR Terrestre a partir de la comparación con instrumental y metodologías comprobadas en el control de obra civil, sino que permite la detección de desplazamientos mediante una integración precisa de los datos de referencia obtenidos de la nube de puntos y la exactitud de las estaciones totales para verificaciones puntuales. Dicho enfoque facilita el monitoreo continuo de infraestructuras, reduciendo tiempo de análisis y garantizando la calidad de los datos, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para la gestión de proyectos.

Keywords

Vertical control; classical surveying; terrestrial LiDAR; auscultation.

Abstract

The civil works may be subject to vertical or horizontal displacements due natural causes, deformations or human factors, so it is important ensure that the structures are within the design parameters form an accurate field check and the respective analysis to determine corrective measures to mitigate or remedy possible impacts on the infrastructure. In the present study case, the verticality of the structure was controlled, to verify its verticality and determine the existence of displacements, taking into consideration the recommendations of the Manual de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010. For this purpose, two measurement methodologies are used together, the first one based in the utilization of the Terrestrial LiDAR and the last one using conventional surveying, linked through the establishment of a local reference polygonal applying the Bessel method with complete series, ensuring the connection between the information obtain through both techniques, and subsequently detecting movements greater than those recommended by regulations. In addition, the data obtain with Terrestrial LiDAR is validated, thereby obtaining a model of the structure under study, serves as a reference for the application of conventional surveying in interest areas and perform the analysis of the information more efficiently and quickly, also ensuring the quality of the data obtain in the vertical

control. The methodology proposed validate the use of Terrestrial LiDAR from the comparison with instruments and methodologies recognized in the control of civil works, also allows the detection of displacements through a precise integration of the reference data obtained from the point cloud and the accuracy of the total station for specific verifications. This approach provides continuous monitoring of infrastructures, reducing analysis time and ensuring data quality, making it a fundamental tool for project management.

Introducción

En la construcción de obra civil es importante recopilar información adecuada sobre el comportamiento de las estructuras presentes en cada proyecto, para así establecer si cumplen con los parámetros establecidos previamente en el diseño, ya sea mediante un control en la nivelación de base estabilizada en una obra vial, la demostración de la capacidad de un puente para resistir adecuadamente las cargas establecidas en el diseño antes de abrirse al público, o el control constante durante la colocación y alineamiento de vigas. Para lograr obtener los datos requeridos respecto al comportamiento de la estructura sin intervenirla o afectarla, es necesario contar con metodologías adecuadas y bien definidas, con las cuales se pueda comprobar el funcionamiento de la obra de forma efectiva, y tomar las medidas correctivas necesarias [1], [2]. Asimismo, debe escogerse el instrumental para cumplir con las tolerancias de diseño para la toma de datos.

Debido a que cada obra de infraestructura tiene características específicas es importante seleccionar la metodología adecuada para llevar a cabo las tareas requeridas, como sucede en el monitoreo de deformaciones mediante técnicas topográficas en grandes estructuras como represas, en las que es necesario contar con redes de control tanto dentro como fuera de la estructura en terreno estable y con inter visibilidad, manteniendo un monitoreo constante tanto en la red de control como los de monitoreo para determinar la existencia de desplazamientos [3]. También al realizar un control vertical de estructuras, utilizando como apoyo datos de un levantamiento previo, debidamente verificado, para así realizar el control de la estructura desde varias perspectivas, manteniendo toda la información enlazada, y determinar mediante la verificación de puntos localizados en la zona alta, intermedia y baja de la estructura, el nivel de desplome del edificio y determinar las medidas correctivas una vez se analice la información suministrada [4].

A nivel general al definir una metodología de control topográfico deben de seguirse una serie de pautas que garanticen la calidad de la información al verificar y determinar los procedimientos a seguir para realizar la inspección [5] estableciendo puntos de referencia dentro de la zona de estudio con comprobaciones, análisis de la exactitud y precisión suministrada por el equipamiento utilizado, además de determinar la existencia de hitos o referencias cercanas a la obra y la calidad de las mismas, para asegurar que la red de puntos de referencia se mantenga en el tiempo en caso de requerir nuevos controles, lo cual se logra de acuerdo con Wolf y C. Ghilani [6] utilizando redes de control horizontal y vertical que permitan asegurar la trazabilidad de la información durante y después de los trabajos realizados. Finalmente, y una vez realizada la toma de datos se debe comprobar que la información se encuentre dentro de las tolerancias establecidas previamente en el diseño de la obra a controlar.

Para la escogencia de una metodología es necesario tomar en cuenta el instrumental disponible, así como sus precisiones. Además, debido a la gran gama de equipos que se pueden encontrar en la actualidad, se debe analizar muy bien tanto los requerimientos de la obra como el presupuesto con el que se cuenta, ya que existe instrumental capaz de obtener millones de punto por segundo, pero que requiere software especializado y un análisis detallado durante el postproceso de la nube de puntos, como sucede como el LiDAR Terrestre [7], o equipos como

Estaciones Totales que mediante técnicas topográficas clásicas, brindan información directa en campo sobre el estado de las estructuras, pero a una menor escala de velocidad y cantidad de datos adquiridos, por lo que requieren de una mayor cantidad de tiempo de ejecución en campo.

Para el desarrollo del caso de estudio se analiza un sector de aproximadamente 60 metros de longitud del muro lateral de un paso a desnivel, el cual es dividido en secciones verticales separadas cada 3 metros. Además, se crea una poligonal base a lo largo de la zona de estudio, para asegurar que la información obtenida tanto mediante Topografía Clásica, como por técnicas LiDAR Terrestre sean compatibles para el análisis y validación de la información.

Por lo anterior el objetivo de este trabajo es aportar una metodología de control que aproveche la rápida recolección y el nivel de detalle derivado de las técnicas LiDAR Terrestre, en la obtención de la información de referencia de toda la estructura, en conjunto con el uso de metodologías topográficas clásicas para la verificación de sectores de la obra que, a partir de la referencia obtenida con la nube de puntos, requieran ser verificadas en distintos períodos y poder ser comparadas con la información del modelo creado, todo ello partiendo de una red de puntos de apoyo con la cual se asegure el enlace de ambas metodologías de recolección de datos y su trazabilidad.

Metodología



Figura 1. Zona de Estudio.

La zona de estudio tal y como se muestra en la Figura 1 consta de una sección de un muro sobre la marginal de un paso a desnivel, dicha sección consta de aproximadamente 60 m de longitud, con alturas máximas entre los 6 y 9 metros, de forma que en caso de existir cambios de verticalidad puedan ser apreciados de forma clara y permitan contrastar las metodologías utilizando técnicas LiDAR Terrestre y topografía convencional. Asimismo, la franja en estudio cuenta con una amplia marginal permitiendo el establecimiento de la poligonal de apoyo con una mínima interferencia en el uso de la misma y mitigando a su vez la afectación en las mediciones debidas a vibraciones producidas por el flujo cercano y a la obstaculización visual entre el instrumental y el área de trabajo.

El objetivo principal de este estudio es brindar una metodología que utilice tanto las ventajas brindadas por los levantamientos LiDAR Terrestre, en cuanto a cantidad de información y velocidad en la adquisición de datos, como los beneficios en cuanto a precisión de instrumental topográfico convencional. Para ello no se deben dejar de lado los efectos de los errores asociados al sistema de medida (instrumento, trípode, objetivo), así como los errores inducidos por las condiciones ambientales, ya que como señala Ghilani [8], los errores están presentes en cada observación realizada.

Por lo anterior y para determinar el error esperado en las mediciones se debe analizar tanto el instrumental a utilizar como el diseño de la poligonal y técnicas de medición. Para determinar el error esperado se utiliza la ley de propagación de errores simplificada, mostrada en la ecuación 1, la cual describe como los errores en las mediciones se van transfiriendo al resultado final.

$$\varepsilon_z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (1)$$

Donde ε_z es el error total, $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{x_n}$, son las contribuciones al error (centrado, puntería, instrumento, entre otros) y ∂ indica la derivada parcial de la función que representa a la contribución del error en los casos de mediciones indirectas. A partir de la ecuación 1 se pueden determinar los errores esperados tanto para la poligonal base, como para las mediciones de verticalidad realizadas con Láser escáner y con Estación Total, las cuales se abordarán en los apartados siguientes.

Polygonal Base

Para el enlace de ambas metodologías se estableció una poligonal base o de apoyo que consta de 6 estacionamientos separados cada 15 m, tal y como se muestra en la Figura 2. Además, se establecieron referencias en varios puntos de la zona de trabajo, para la relocalización de puntos en caso de que sean removidos. Asimismo, se añadieron a la poligonal dos pilares localizados en las inmediaciones del paso a desnivel, los cuales fueron medidos utilizando equipo GNSS, para de ser necesario, georreferenciar la información obtenida.

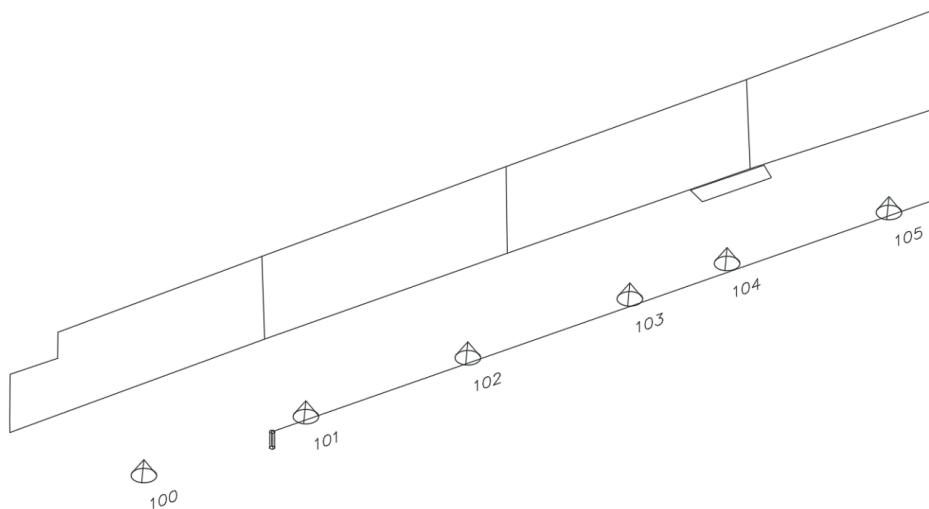


Figura 2 Distribución de puntos a lo largo del muro en estudio.

Una vez materializados los puntos se determinó el error esperado a partir de la ecuación 1, para las mediciones de posición de $\varepsilon_{DH} = \pm = \pm 1.9$ mm, el cual se obtiene tomando en cuenta la desviación típica angular de $\sigma_{ang} = \pm = \pm 1''$, la desviación típica en Medición Electromagnética de Distancias (MED) de $\sigma_{MED} = \pm 1$ mm + 1.5 ppm, en mediciones con prisma de la Estación total, y al error de centrado estimado del sistema de trípodes de madera $\sigma_c = \pm 1$ mm. Tomando el error previamente calculado se procede con la medición de los estacionamientos para dotar de coordenadas a la poligonal, para ello se realizaron tres series mediante la Regla de Bessel a través de una aplicación de series completas, la cual consiste en visar el punto requerido en posición I (CI) del objetivo, tomar el dato requerido, para seguidamente realizar un giro horizontal de 180° y un giro vertical de más de 270°, recolectando información nuevamente del mismo punto, pero en posición II (CD), tal y como se muestra en la Figura 3. Lo anterior proporciona valores angulares libres de errores asociados a la construcción del instrumental, además reduce la influencia de las equivocaciones durante la observación, de ángulos y distancias [9].

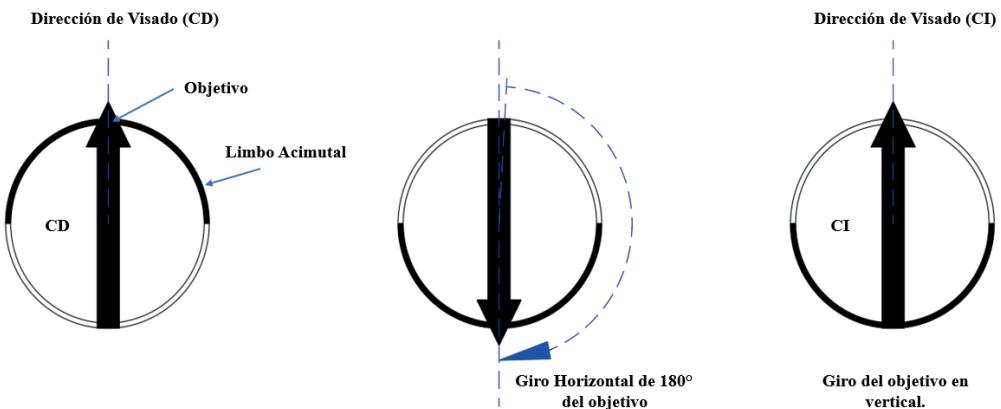


Figura 3. Regla de Bessel para series completas.

En cada medición de series se verificó la calidad de los errores a partir del reporte generado por el colector de datos, verificando tras cada medición la calidad de los datos basándose en el error esperado tanto angular como de distancia, el cual se mantiene dentro de los márgenes esperados, tal y como se muestra en el cuadro 1 y generando el sistema de coordenadas de la poligonal de apoyo expuesto en el cuadro 2.

Cuadro 1 Desviaciones estándar angulares y de distancia.

Punto	$\pm \sigma_{Horizontal}$	$\pm \sigma_{MED}$ (m)	$\pm \sigma_{Vertical}$
100	0°00'02"	0.0000	0°00'01"
101	0°00'00"	0.0001	0°00'02"
102	0°00'02"	0.0001	0°00'01"
103	0°00'01"	0.0001	0°00'02"
104	0°00'00"	0.0001	0°00'01"
105	0°00'03"	0.0000	0°00'01"
106	0°00'01"	0.0000	0°00'01"

Cuadro 2 Coordenadas de la Poligonal Base.

ID	x (m)	y (m)	Altura (m)	Descripción
100	1000.000	2000.000	500.000	EST_01
101	977.728	2060.916	499.185	EST_02
102	969.619	2089.923	498.142	EST_03
103	961.858	2116.805	497.485	EST_04
104	950.997	2152.905	497.551	EST_05
105	935.630	2200.588	498.024	EST_06
106	1012.966	1929.107	499.500	EST_07

Obtención de datos mediante LiDAR Terrestre

Para la medición con Escáner Láser se colocaron tres Targets sobre trípodes robustos, dos localizados sobre estacionamientos de la poligonal, en conjunto con el instrumental de medición y uno cercano al muro de estudio, además se colocaron Dianas temporales a lo largo de la pared, tal y como se muestra en la Figura 4, afín de contar con las referencias necesarias para localizar el levantamiento 3D sobre la poligonal de apoyo y con suficiente traslape para el procesamiento de puntos.

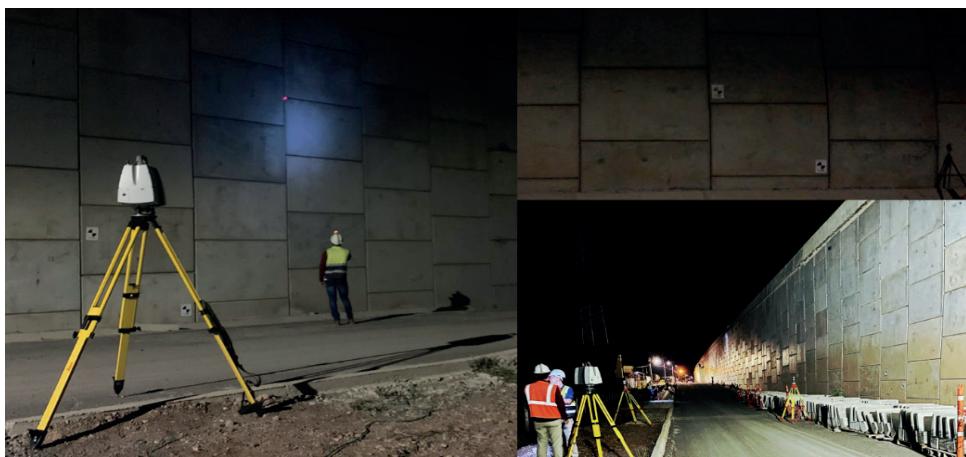


Figura 4. Medición con LiDAR Terrestre.

Posterior a la recolección de información en la zona de estudio, se realizó el procesamiento de la nube de puntos enlazando un total de 12 nubes de puntos, a lo largo de todo el paso a desnivel, en la Figura 5 se muestra en el conjunto un traslape del 60 % y un error menor a 0.010 m, así como muestras de los enlaces individuales.

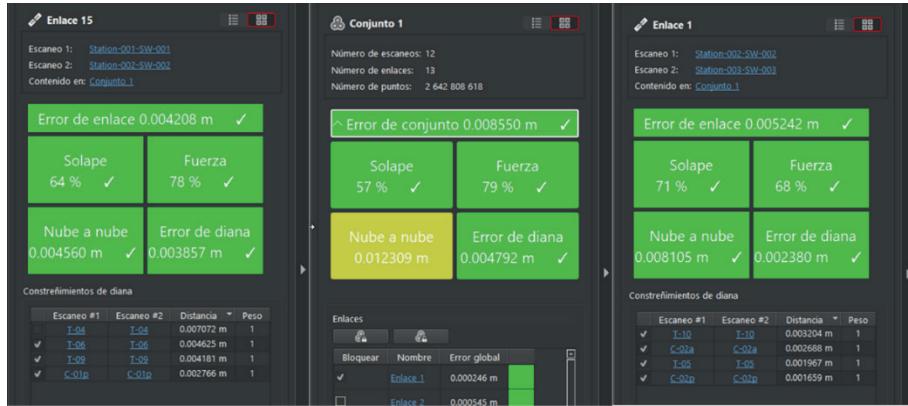


Figura 5. Ejemplo de Conjunto y Enlaces.

En la Figura 6 se muestran los datos antes de eliminación del ruido generado por objetos, plantas y personas en la zona de trabajo, así como la eliminación general de información no relevante.

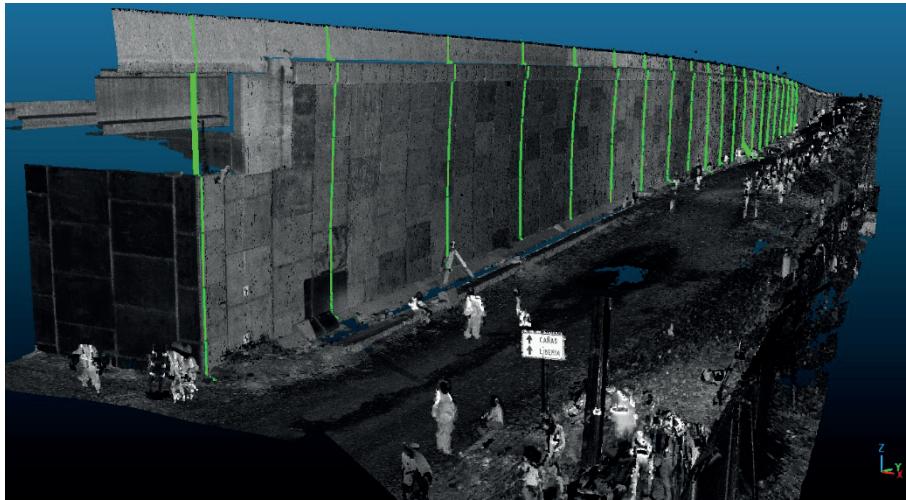


Figura 6. Secciones Sobre Nube de Puntos.

Finalizado el procesamiento de la nube de puntos se extrae la información del comportamiento vertical de la estructura mediante la creación de una superficie de comparación, a la vez que se genera un alineamiento con secciones verticales separadas horizontal y verticalmente cada 3 metros, tal y como se aprecia en la Figura 7. La creación de las secciones verticales puede realizarse tanto de forma automática, como manual, no obstante, para el caso de estudio se opta por la recolección punto a punto de la información para la creación de las secciones, para la posterior comparación con los datos obtenidos mediante la metodología topográfica clásica.

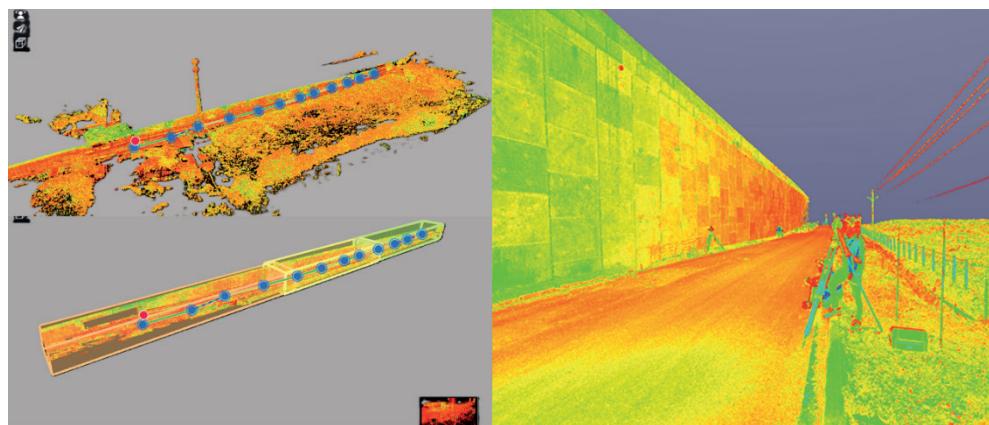


Figura 7. Enlace y limpieza de la nube de puntos.

Recolección de Información Mediante Topografía Clásica

La metodología de levantamiento consiste en la localización de las secciones verticales creadas a partir de la nube de puntos en campo, para ello primeramente se utiliza la técnica de series completas para verificar que cada uno de los estacionamientos de donde se realizarán las mediciones cumplen con las tolerancias previamente establecidas. Una vez verificada la calidad de la medición se crea una línea base en el muro generada a partir de dos referencias extraídas de la nube de puntos del levantamiento LiDAR Terrestre (21 y 22), tomando como punto de partida la sección 0, tal y como se muestra en la Figura 8.

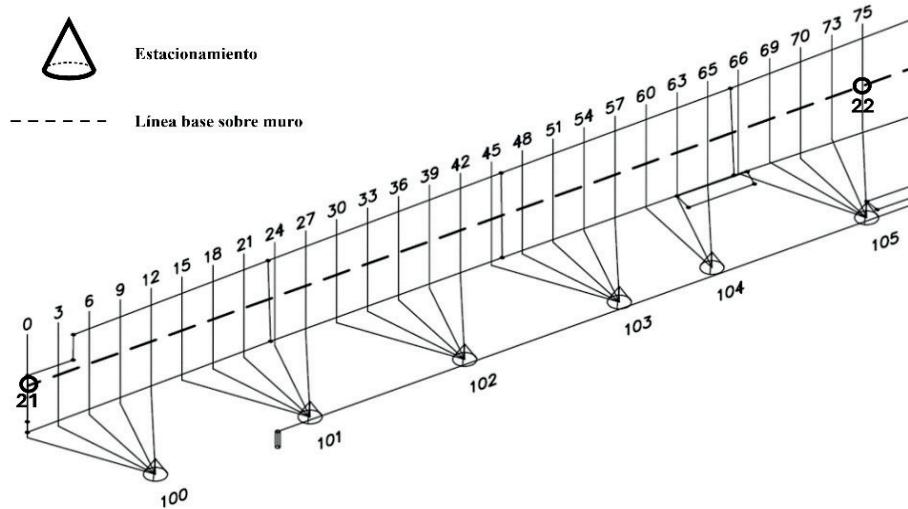


Figura 8. Distribución de secciones sobre línea base, a partir de la poligonal de apoyo.

Como se aprecia en la Figura 8, desde cada uno de los estacionamientos de la poligonal de apoyo, solo se recolectan un máximo de 5 secciones verticales, esto para mitigar el error lateral debido al ángulo generado entre el instrumental de medición y la sección del muro. Finalmente, para la identificación de los datos de cada una de las secciones verticales del muro y facilitar su procesamiento se utiliza una nomenclatura de cuatro dígitos, indicando en los tres primeros el número de sección donde se recolectan los datos y en el cuarto dígito indicando el número de punto medido sobre el muro, de forma tal que el identificador 0030 se refiere a la base del muro de la sección 0+003, mientras que el identificador 0064 al punto 4 recolectado en la sección 0+006. En el cuadro 3, se brinda una muestra de los datos recolectados mediante topografía convencional.

Cuadro 3. Muestra de Datos Recolectados con Estación Total.

ID	x (m)	y (m)	z (m)	ID	x (m)	y (m)	z (m)
0000	985.200	2005.106	499.044	0034	984.405	2007.982	504.417
0001	985.203	2005.110	500.000	0035	984.448	2007.998	507.207
0002	985.197	2005.106	501.501	0060	983.459	2010.840	499.301
0003	985.212	2005.116	503.000	0061	983.453	2010.839	500.724
0004	985.231	2005.128	504.509	0062	983.447	2010.839	502.214
0030	984.353	2007.971	499.3234	0063	983.512	2010.847	503.701
0031	984.352	2007.970	500.714	0064	983.572	2010.855	505.193
0032	984.349	2007.962	502.201	0065	983.656	2010.866	506.955
0033	984.377	2007.972	503.709				

Nota: Se utiliza un sistema de coordenadas local para facilidad de lectura.

Resultados y discusión

Las siguientes gráficas presentan los resultados obtenidos al aplicar las metodologías LiDAR Terrestre y técnicas topográficas clásicas. Para la representación de la verticalidad, se utiliza un gráfico de barras horizontales, para cada estacionamiento, en donde el eje x, indica el incremento positivo (desplome) o negativo del muro, mientras que el eje y indica a la altura del muro a la que fue tomada la información.

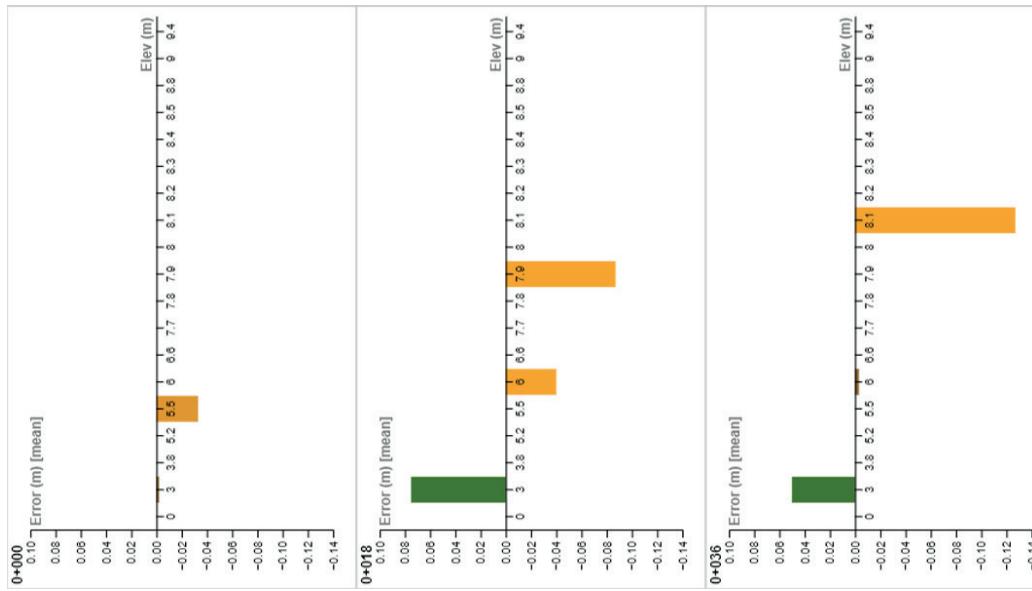


Figura 9. Muestra del desplazamiento vertical mediante metodología LiDAR.

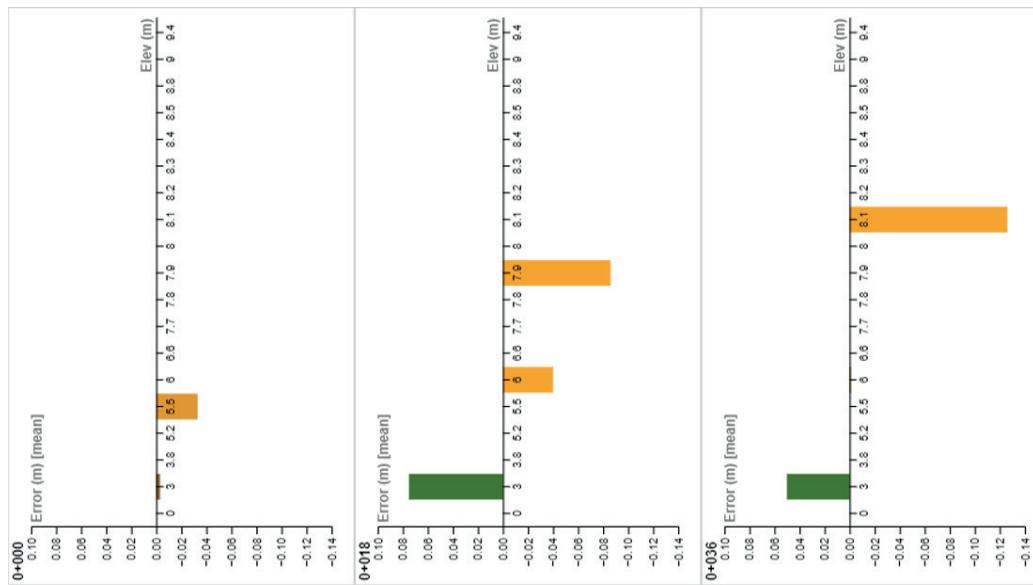


Figura 10. Muestra del desplazamiento vertical mediante metodología topográfica clásica.

La Figura 9 y Figura 10 presentan una alta equivalencia en los datos, esto en parte es debido a que la desviación típica de las mediciones en cada metodología es muy similar, y la cual es calculada partiendo de las especificaciones técnicas de cada equipo y a la dispersión de la poligonal de referencia, por lo que al aplicar la ecuación 1 al sistema LiDAR Terrestre la dispersión de las mediciones puntuales será de $\sigma_{3D} = \pm 3.04$ mm, y de $\sigma_{3D} = \pm 2.50$ mm, para la de la Estación Total, lo que incrementa la confiabilidad en los datos y valida la información obtenida mediante la metodología LiDAR Terrestre, al ser la metodología Clásica más precisa y comprobar que es posible obtener los mismos datos con metodologías más modernas y rápidas. Además, en la Figura 11 se puede apreciar que la máxima diferencia entre ambas técnicas, en la medición vertical no supera los 0.8 cm, respaldado por el cuadro 4 y el cuadro 5.

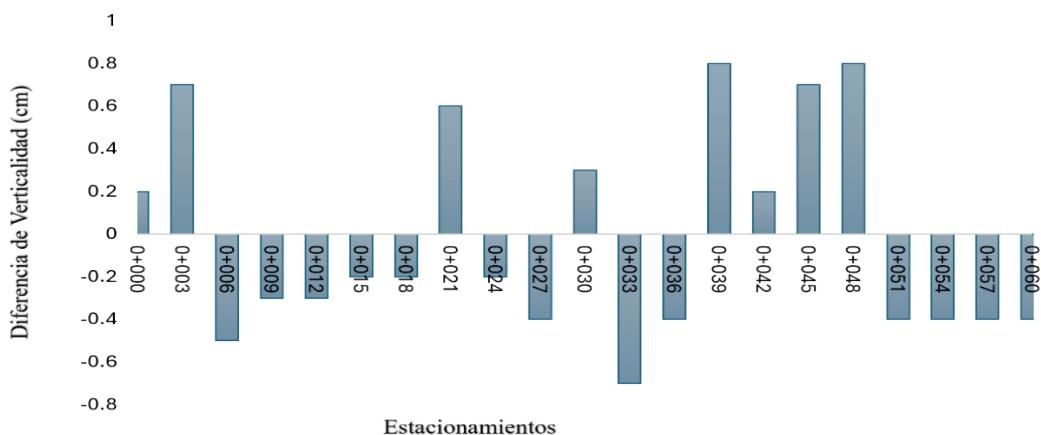


Figura 11. Comparación entre Metodología LiDAR Terrestre y Técnicas Topográficas Clásicas.

Cuadro 4. Comparación entre Metodologías, estacionamientos 0+000 al 0+027.

EST	Comparativa (cm)	EST	Comparativa (cm)	EST	Comparativa (cm)
0+000	0	0+009	-0.1	0+018	0
0+000	0.2	0+009	0	0+018	0
0+000	0.1	0+009	-0.3	0+018	-0.2
0+000	0.2	0+009	-0.3	0+021	0
0+000	0.1	0+012	0	0+021	0.5
0+003	0	0+012	0	0+021	0.6
0+003	0.7	0+012	-0.2	0+021	0.6
0+003	0.6	0+012	-0.1	0+021	0.4
0+003	0.6	0+012	-0.3	0+021	0.5
0+003	0.7	0+012	-0.3	0+024	0
0+003	0.5	0+015	0	0+024	0.1
0+006	0	0+015	0.1	0+024	0
0+006	0	0+015	0	0+024	0.1
0+006	-0.3	0+015	0.1	0+024	-0.2
0+006	-0.5	0+015	0.1	0+024	-0.1
0+006	-0.4	0+018	0	0+024	-0.2
0+006	-0.4	0+018	0	0+027	0
0+009	0	0+018	0	0+027	-0.1

Cuadro 5. Comparación entre Metodologías, estacionamientos 0+027 al 0+060.

EST	Comparativa (cm)	EST	Comparativa (cm)	EST	Comparativa (cm)
0+027	-0.1	0+039	0.7	0+051	0
0+027	-0.3	0+039	0.7	0+051	0.1
0+027	-0.3	0+042	0	0+051	-0.1
0+030	0	0+042	0.2	0+051	-0.1
0+030	0.3	0+042	0.2	0+051	-0.1
0+030	0	0+042	0.1	0+051	-0.3
0+030	0.2	0+042	0.1	0+051	-0.4
0+030	0.1	0+042	0.2	0+054	0
0+030	0.1	0+042	-0.1	0+054	-0.1
0+033	0	0+045	0	0+054	-0.1
0+033	-0.4	0+045	0.5	0+054	-0.4
0+033	-0.7	0+045	0.4	0+054	-0.3
0+036	0	0+045	0.7	0+057	-0.1
0+036	0.1	0+045	0.6	0+057	-0.1
0+036	0	0+045	0.4	0+057	-0.2
0+036	-0.1	0+048	0.8	0+057	-0.4
0+036	-0.4	0+048	0.8	0+057	-0.4
0+036	-0.3	0+048	0.6	0+060	0
0+039	0	0+048	0.6	0+060	0.2
0+039	0.7	0+048	0.5	0+060	0
0+039	0.6	0+048	0.6	0+060	-0.2

La integración de metodologías LiDAR Terrestre con técnicas clásicas a través de un sistema de coordenadas común, ofrece una solución robusta para el monitoreo de estructuras civiles. Además, al contar con información de la estructura gracias al levantamiento LiDAR, es posible verificar zonas de interés de forma puntual en distintos períodos sin la necesidad de realizar un nuevo escaneo de la estructura, con todo el procesamiento y logística que conlleva, en su lugar es posible utilizar la información de referencia generada, para realizar verificaciones puntuales de la estructura, aprovechando técnicas clásicas y obteniendo información comparable de forma rápida y en sitio. De esta forma no solo se mejora la velocidad de detección, sino que optimiza el uso de recursos tecnológicos y humanos, brindando además un mayor control de lo que sucede en la estructura y facilitando el manejo de la información en la gestión de proyectos similares.

Conclusiones

Luego de analizar la información obtenida a través de ambas metodologías, en donde se evidencia la similitud entre las mediciones de verticalidad y tomando en cuenta que el instrumental utilizado en la metodología topográfica convencional cuenta con una precisión angular y de Medición Electromagnética de Distancias (MED) superior a la de un LiDAR Terrestre convencional, validando los datos recopilados por esta última elevando el nivel de confianza en esta metodología.

Dada la gran cantidad de información obtenida mediante la metodología LiDAR Terrestre, la cual debe ser procesada y requiere en gran medida software especializado, es más adecuado utilizar la metodología para crear una superficie de comparación de la zona de estudio y exportarla a un formato asequible y manejable, en plataformas con las que el usuario final cuente, manteniendo una debida referenciación, para así utilizarla en conjunto con los métodos clásicos para obtener información de forma rápida y precisa, para la comparación con el modelo de referencia.

Al aplicar la integración de las metodologías propuestas, es posible crear modelos virtuales de estructuras que requieran estudios similares, ya que la misma es adaptable y ofrece soluciones efectivas para los desafíos que se dan en el control de obras. Además, la metodología propuesta brinda la capacidad de identificar desplazamientos de manera eficiente mejorando la planificación a largo plazo en la gestión del proyecto, al reducir costos y brindar herramientas para el monitoreo continuo de estructuras, sin la necesidad de realizar mediciones completas de la misma.

Referencias

- [1] Ca. F. Cordero Calderón, *Auscultación de Obras*. San José, 1999.
- [2] Y. Arrieta Barboza, "Establecimiento de un Sistema de Información Geográfica para el análisis de estabilidad de torres de transmisión eléctrica del Instituto Costarricense de Electricidad. Aplicación práctica: Línea de transmisión Río Macho-San Isidro del General.," 2016.
- [3] J. J. Vila Ortega, Gonzalo. Jiménez Cleves, and Julián. Garzón Barrero, "Monitoreo y Control Topográfico de Obras," 2012.
- [4] J. L. Rodríguez Torres, "Levantamientos topográficos y geodésicos para el control horizontal y vertical de proyectos civiles para obra de infraestructura," 2015.
- [5] Surveying Committee, *Surveying and Geomatics Engineering: Principles, Technologies, and Applications*, no. 152. American Society of Civil Engineers, 2022. doi: <https://doi.org/10.1061/9780784416037>.
- [6] P. Wolf and C. Ghilani, *Topografía*, 14va ed. México: PEARSON, 2016.

- [7] J. F. Fontes Quintana, "Uso del GPS y Escáner Láser Terrestre en Levantamientos Topográficos," Universidad de Sonora, 2016. [Online]. Available: <http://www.repositoryinstitucional.uson.mx/bitstream/20.500.12984/1801/1/maytorenariveraalvaroantoniol.pdf>
- [8] C. D. Ghilani, *Adjustment Computations Spatial Data Analysis*, Sixth. John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [9] M. R. Chueca Casquedo, J. M. Benito Oterino, R. Caturla Vázquez, M. T. Fernández Pareja, and F. J. Olmedo Delgado, "Topografía I Contenido Teórico 2da Parte," 2009.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.