



## Programa de Ingeniería Geotécnica

**Informe: EIC-Lanamme-INF-1098-2022**  
**Monitoreo de deformaciones verticales y**  
**asentamientos diferenciales en la sección del bastión**  
**2 del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1,**  
**Limal- Cañas**



Preparado por:

Ing. Laura Solano Matamoros  
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica  
Agosto, 2022





<b>1. Informe</b> EIC-Lanamme-INF-1098-2022		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Monitoreo de deformaciones verticales y desalineamientos diferenciales en la sección del bastión 2 del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas.		<b>4. Fecha del Informe</b> 19/08/2022
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b> <i>Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica, el presente informe muestra un resumen de los resultados obtenidos en la evaluación de la verticalidad y desalineamiento diferencial que posiblemente pueden estar asociados a aparentes asentamientos del muro de relleno reforzado del paso a desnivel San Miguel en la ruta nacional 1, Limonal – Cañas. Los resultados obtenidos demuestran desplomes hacia adentro y hacia afuera del eje de los muros analizados. Estos desplomes, en el caso de la sección del muro ubicada sobre la alcantarilla a 62 m del bastión 2 del paso San Miguel, cumple con las especificaciones de verticalidad solicitadas en la sección 255 del CR-2010. Se obtuvieron pequeñas diferencias entre la medición de la ubicación de los paneles del levantamiento realizado en febrero 2022 al levantamiento de julio 2022, promediando 1,14 mm de diferencia entre un modelo y otro. Sin embargo, no se considera apropiado atribuirlo a un posible asentamiento dada la limitante asociada a la georreferenciación de los modelos de elevación digital (MEDs), y se recomienda realizar un futuro levantamiento con VANT a partir de las mismas coordenadas utilizadas en julio 2022. Finalmente, es importante mencionar que el manual de la FHWA, indica que las secciones de muro que no se ajusten a las tolerancias establecidas, deben ser reconstruidos sin costo adicional para la Administración, ya que, los paneles desalineados no pueden ser empujados, ni tampoco pueden ser tirados para colocarlos en su lugar; puesto que esto, puede dañar los paneles y refuerzos, y con ello debilitar el sistema.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Muros de relleno reforzado, verticalidad, desplome, asentamientos.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> -	<b>10. Núm. de páginas</b> 14
<b>11. Preparado por:</b>          <b>Fecha:</b> 19 / 08 / 2022		
<b>12. Revisado y aprobado por:</b>          <b>Fecha:</b> 19 / 08 / 2022		



## Contenido

I.	Introducción.....	4
II.	Antecedentes relacionados con la verticalidad de los muros de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas .....	4
III.	Uso de sistemas l�dar estacionarios para el levantamiento de modelos tridimensionales de los muros de relleno reforzado .....	5
	III.1 Hallazgos en el levantamiento de Julio de 2022 de la sección de la cara frontal del muro de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas .....	6
	III.2 Hallazgos en el levantamiento de febrero de 2022 de la sección de la cara frontal del muro de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas .....	8
IV.	Verificación de asentamientos en las placas de las columnas sobre la alcantarilla ubicada a 62 m del bastión 2 del muro de relleno reforzado del del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas. ....	11
V.	Comentarios finales .....	13
VI.	Referencias .....	14



## Monitoreo de deformaciones verticales y desalineamientos diferenciales en la sección del bastión 2 del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas

### I. Introducción

Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica (UAT), el presente informe muestra un resumen de los resultados obtenidos en el monitoreo de una sección 52 m del muro de relleno reforzado del bastión 2. Se analizó la situación actual en cuanto a verticalidad y desalineamientos diferenciales de las columnas de la zona sobre la alcantarilla ubicada a 63 m del bastión 2 del muro de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas, con respecto a las mediciones realizadas los días 23 y 24 de febrero del presente año por la UAT y la oficina de Geomática (OGEO).

A continuación, se presentan algunos comentarios relacionados con los resultados, análisis desarrollados y el cumplimiento con respecto a las tolerancias admisibles de deformaciones para este tipo de estructuras, así como también se indican algunas recomendaciones y buenas prácticas existentes en la bibliografía internacional para el adecuado cumplimiento de las mismas.

### II. Antecedentes relacionados con la verticalidad de los muros de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas

Como se mencionó en el informe “EIC-Lanamme-INF-0441-2022”, los resultados obtenidos del levantamiento realizado en campo demuestran que el muro ubicado en la margen derecha del paso elevado San Miguel, presenta desplomes tanto hacia adentro como hacia afuera del eje vertical del muro. En este informe se concluye que el muro presenta una zona crítica que indican no conformidades de la tolerancia establecida por el CR-2010, reflejando posibles prácticas constructivas deficientes en el levantamiento del muro. La zona crítica de acuerdo con los resultados del informe emitido en abril del presente año, está comprendida aproximadamente hasta los 45 m del muro ubicado en la margen derecha del paso elevado San Miguel en la RN 1 Limonal- Cañas. En general esta margen del muro presenta desalineamiento hacia afuera del muro respecto a la altura total, lo que puede generar una sensación de inseguridad para los usuarios. Además, al presentar cierta inclinación hacia afuera del muro, se considera que podría generar una condición desfavorable para la estabilidad del muro y podría desmejorar una vez el proyecto entre en la fase operativa. Por lo tanto, se considera recomendable implementar un sistema de monitoreo para contar con un registro periódico de las deformaciones de verticalidad del muro en el tiempo y poder hacer recomendaciones de mejoramiento oportunas.

Por su parte en el informe “EIC-Lanamme-INF-0792-2022”, se hizo la revisión de la información suministrada por parte de la Administración del Proyecto Liminal – Cañas en su oficio DM-2022-2415, en respuesta a las observaciones realizadas por el Programa de Ingeniería Geotécnica en los informes EIC-Lanamme-INF-0326-2021, EIC-Lanamme-INF-0096-2022, EIC-Lanamme-0120-2022, EIC-Lanamme-INF-0136-2022 y EIC-Lanamme-INF-0441-2022. En dicho documento se concluye que se a grandes rasgos que se considera adecuado el tratamiento realizado, sin aceptar que con la información aportada indica cumplimiento a ciertos aspectos observados. Hasta el momento, algunas de las observaciones realizadas en informes pasados del PIG persisten, sin embargo, estos aspectos han sido aceptados como subsanados por parte de la Unidad Supervisora y por lo tanto por la Administración, al realizarse el debido proceso de análisis y contar con los al existir documentos correspondientes.



### III. Uso de sistemas lidar estacionarios para el levantamiento de modelos tridimensionales de los muros de relleno reforzado

Debido a los cuestionamientos existentes con respecto a la verificación de deformaciones y la verticalidad de las caras de los muros de suelo reforzado, se procedió a realizar un levantamiento de los muros utilizando un sistema de lidar terrestre estacionario.

Según Ruiz, P. *et al.* (2014), la palabra lidar proviene del acrónimo en inglés *Laser Imaging Detection and Ranging*, cuya traducción al español sería “detección de imágenes por láser y distancia”. El fundamento de la tecnología lidar está en medir distancias iluminando un objetivo con un rayo láser y posteriormente analizando la luz reflejada e información generada en ese objetivo. Cada dato o punto generado con lidar por sí solo no tiene mucha utilidad. Sin embargo, al unir los millones de puntos generados a partir de un barrido con un escáner láser en un área específica, se pueden recrear superficies en tres dimensiones. Para ello, todos los pulsos de retorno del láser son registrados y almacenados en la memoria del escáner y se calcula la distancia entre el instrumento y el objeto donde se reflejó el rayo láser.

Usando principios de física y óptica, el escáner puede obtener la posición de cada punto a partir del haz refractado, la cual es almacenada como una coordenada x-y-z. Con esto es posible registrar reptación, cárcavas, grietas, vegetación, elementos de fachadas de edificios, carros, personas, etc., con un error máximo de ubicación de puntos de 3 mm, el cual puede reducirse a menos de 1 mm si se aplican procedimientos de topografía de precisión y rutinas que se encuentran incluidas el software de la unidad. Con el modelo tridimensional creado, es posible obtener distancias, alturas, pendientes y volúmenes con un alto grado de precisión. Con estos modelos se puede crear superficies, figuras sólidas y modelos de elevación que pueden ser utilizados en programas de diseño asistido por ordenador (conocidos como CAD) o en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Específicamente, para el levantamiento realizado en Limonal – Cañas, fue utilizado un escáner LEICA modelo C10 de segunda generación de la OGEO, con capacidad de realizar un levantamiento de prácticamente cualquier ambiente. Este modelo presenta un rango efectivo de operación de hasta 200 m. La portabilidad de este equipo y su alta velocidad en la toma de datos permite realizar fácilmente trabajos de levantamiento digital de diferentes obras de infraestructura como edificios, puentes, muros de retención, etc. De esta forma, es posible contar un registro digital fidedigno de la condición particular del objeto levantado y determinar cambios estructurales, asentamientos diferenciales, deterioros y deformaciones.

De esta manera, fue realizado el levantamiento de aproximadamente 52 metros en total, que contemplan la sección sobre la alcantarilla en la cara frontal del muro y la margen del lado derecho (sentido Limonal-Cañas). Con base en la nube de puntos levantada con el escáner lidar se procedió a generar un Modelo de Elevación Digital (MED). Lo anterior permite recrear modelos tridimensionales que permiten analizar la forma y características de las superficies de las caras de los muros para identificar y cuantificar posibles deformaciones que serían imposibles apreciarlas visualmente desde el terreno. La Figura 1 muestra el MED obtenido.

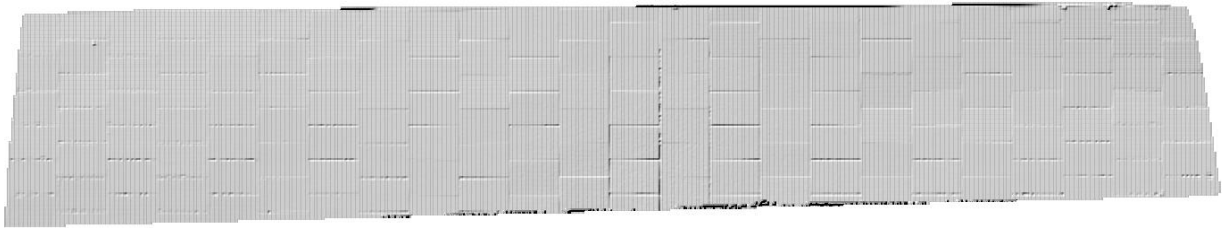


Figura 1. Modelo de elevación digital del muro de relleno reforzado en la margen derecha, del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas

A partir del modelo mostrado en la Figura 1 fue posible generar las curvas de nivel a intervalos cada 1 cm. Con estas curvas de nivel se definieron secciones transversales al eje longitudinal del muro separadas cada 2 m para la sección del muro correspondiente a la margen derecha, con la finalidad de evaluar la verticalidad de la cara del muro de relleno reforzado, y poder realizar una comparación con los resultados obtenidos del levantamiento realizado en febrero del 2022.

### III.1 Hallazgos en el levantamiento de Julio de 2022 de la sección de la cara frontal del muro de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas

Con el fin de monitorear el comportamiento del muro, la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR, definió como crítica la sección que tiene como eje central la alcantarilla ubicada a 62 m del bastión 2 del muro de relleno reforzado en la margen derecha, del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas.

Con base en el levantamiento realizado, los resultados obtenidos de la verticalidad de este se muestran en la Figura 2. En este caso se presentan los resultados de las secciones a intervalos cada 2 m. El eje vertical corresponde a la altura o elevación de la cara del muro (en metros) y el eje horizontal el desplazamiento vertical de la cara del muro (en milímetros). En el caso del eje horizontal, las líneas de división corresponden a la tolerancia que permite el Manual de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica (CR-2010). En estas figuras, el lado izquierdo del gráfico representa el relleno del muro y las discontinuidades observadas representan las juntas de los paneles prefabricados de concreto.

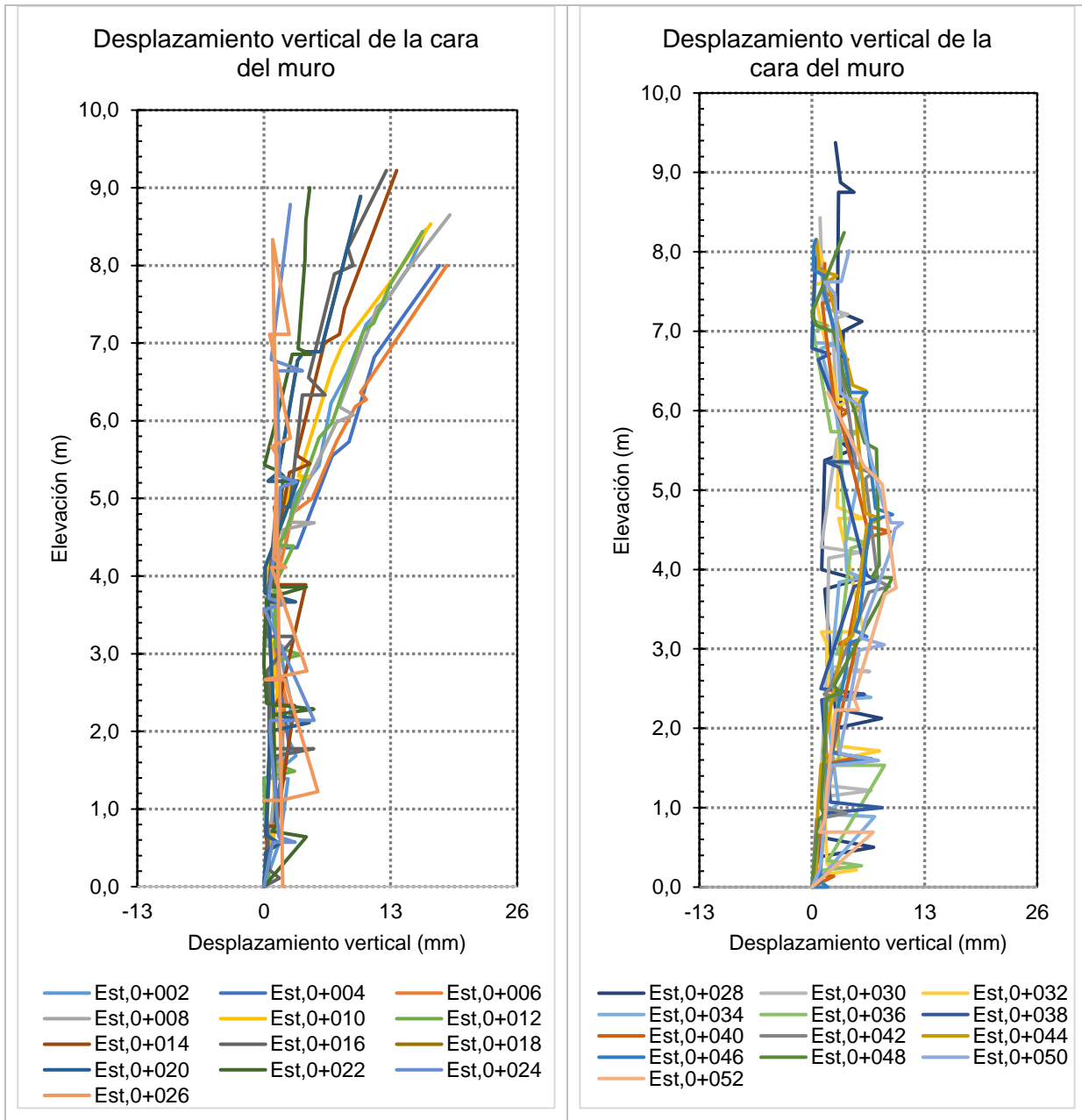


Figura 2. Resultados de verticalidad del Muro de relleno reforzado

Como se puede observar en la Figura 2, el muro en la sección analizada presenta desplomes, tanto hacia afuera del muro como hacia adentro del mismo, con valores que se encuentran dentro de la tolerancia establecida por el CR-2010, de una relación de 13 mm por cada 3 m de altura.

Con la finalidad de cuantificar y evidenciar la verticalidad del muro, la Tabla 1 muestra los valores de la diferencia de verticalidad observada por cada 3 m de altura, en la sección longitudinal del muro. Los valores entre paréntesis, mostrados en la Tabla 1, corresponden a los desplomes hacia afuera del muro (signo negativo), donde se nota que ninguno de los valores excede la tolerancia permitida por el CR-2010, de igual manera los desplomes hacia adentro del muro (signo positivo), tampoco existen incumplimientos de las tolerancias.



Tabla 1. Valores obtenidos para la diferencia de verticalidad observada por cada 3 m de altura para cara del muro de relleno reforzado del Muro

Estación	Diferencia de elevación (m)							Total
	0-3	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	
Est,0+002	(1.79)	1.37	(0.45)	(4.75)	(9.05)			(16.65)
Est,0+004	(1.23)	0.06	(2.97)	(8.15)	(11.27)	(12.67)		(18.01)
Est,0+006	(1.08)	0.06	(3.01)	(7.52)	(11.93)			(18.78)
Est,0+008	(1.78)	(0.30)	(2.09)	(6.00)	(9.03)			(19.09)
Est,0+010	(0.88)	1.01	(1.38)	(4.44)	(7.98)			(17.13)
Est,0+012	(3.42)	(1.46)	(2.70)	(3.65)	(8.25)			(16.29)
Est,0+014	(2.69)	0.69	0.61	(1.54)	(5.35)	(7.82)	(8.74)	(8.28)
Est,0+016	(1.76)	(0.23)	(2.23)	(1.89)	(4.87)	(6.40)	(8.05)	(12.04)
Est,0+018	(0.68)	0.22	(2.14)	(1.73)	(5.95)			(9.92)
Est,0+020	(0.68)	0.22	(2.14)	(1.73)	(5.95)			(9.92)
Est,0+022	(0.03)	0.20	(0.74)	(1.20)	(2.57)	(2.42)		(4.70)
Est,0+024	(2.10)	0.53	(1.01)	0.65	(0.21)	(0.31)		(2.71)
Est,0+026	(1.04)	(0.61)	0.03	0.29	1.57	(0.62)		(1.92)
Est,0+028	(2.09)	0.43	1.34	(1.20)	(2.49)	(1.62)	(2.77)	(2.71)
Est,0+030	(1.74)	(0.47)	(0.69)	(1.14)	(0.52)	0.98		(0.92)
Est,0+032	(1.70)	(2.95)	(0.73)	(1.46)	3.15	2.04		(0.51)
Est,0+034	(2.45)	(0.12)	(3.10)	(0.22)	3.97	4.51		(0.58)
Est,0+036	(3.09)	1.28	(0.55)	1.31	4.04			(0.15)
Est,0+038	(2.52)	1.93	(2.44)	(0.35)	6.10			(0.37)
Est,0+040	(4.99)	(4.20)	(2.34)	1.08	4.26			(1.48)
Est,0+042	(4.99)	(4.20)	(2.34)	1.08	4.26			(0.01)
Est,0+044	(3.46)	(4.99)	(4.17)	(1.53)	2.49	5.26		(6.61)
Est,0+046	(4.28)	(4.55)	(4.40)	(1.71)	3.45	6.87		(0.45)
Est,0+048	(4.83)	(6.39)	(6.04)	(0.06)	5.13	4.72		(3.73)
Est,0+050	(6.11)	(6.65)	(4.04)	0.54	5.43	3.54		(4.26)
Est,0+052	(6.51)	(7.83)	(5.70)	3.67				(1.79)

Nota:

(Signo negativo) = Desplome hacia afuera del muro

Signo positivo = Desplome hacia adentro del muro

La columna que representa el desplome total del muro se refiere a la diferencia vertical que existe respecto a la altura total del muro, a pesar de que las placas ubicadas en los niveles más altos se encuentran desplomadas hacia afuera de la cara del muro esto no representa una afectación a nivel estructural. Sin embargo, se considera apropiado rectificar las zonas más altas del muro ya que al iniciar la fase operativa dicha condición puede desmejorar comprometiendo la integridad de la estructura.

### III.2 Hallazgos en el levantamiento de febrero de 2022 de la sección de la cara frontal del muro de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas

Con el fin de comparar el comportamiento en cuanto a verticalidad del muro, se procedió a extraer del levantamiento realizado en febrero del presente año, la sección correspondiente a la zona crítica definida por la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR. Con base en el levantamiento realizado, se presentan los resultados de las secciones a intervalos cada 2 m. El eje vertical corresponde a la altura





o elevación de la cara del muro (en metros) y el eje horizontal el desplazamiento vertical de la cara del muro (en milímetros). En el caso del eje horizontal, las líneas de división corresponden a la tolerancia que permite el Manual de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica (CR-2010). En estas figuras, el lado izquierdo del gráfico representa el relleno del muro y las discontinuidades observadas representan las juntas de los paneles prefabricados de concreto.

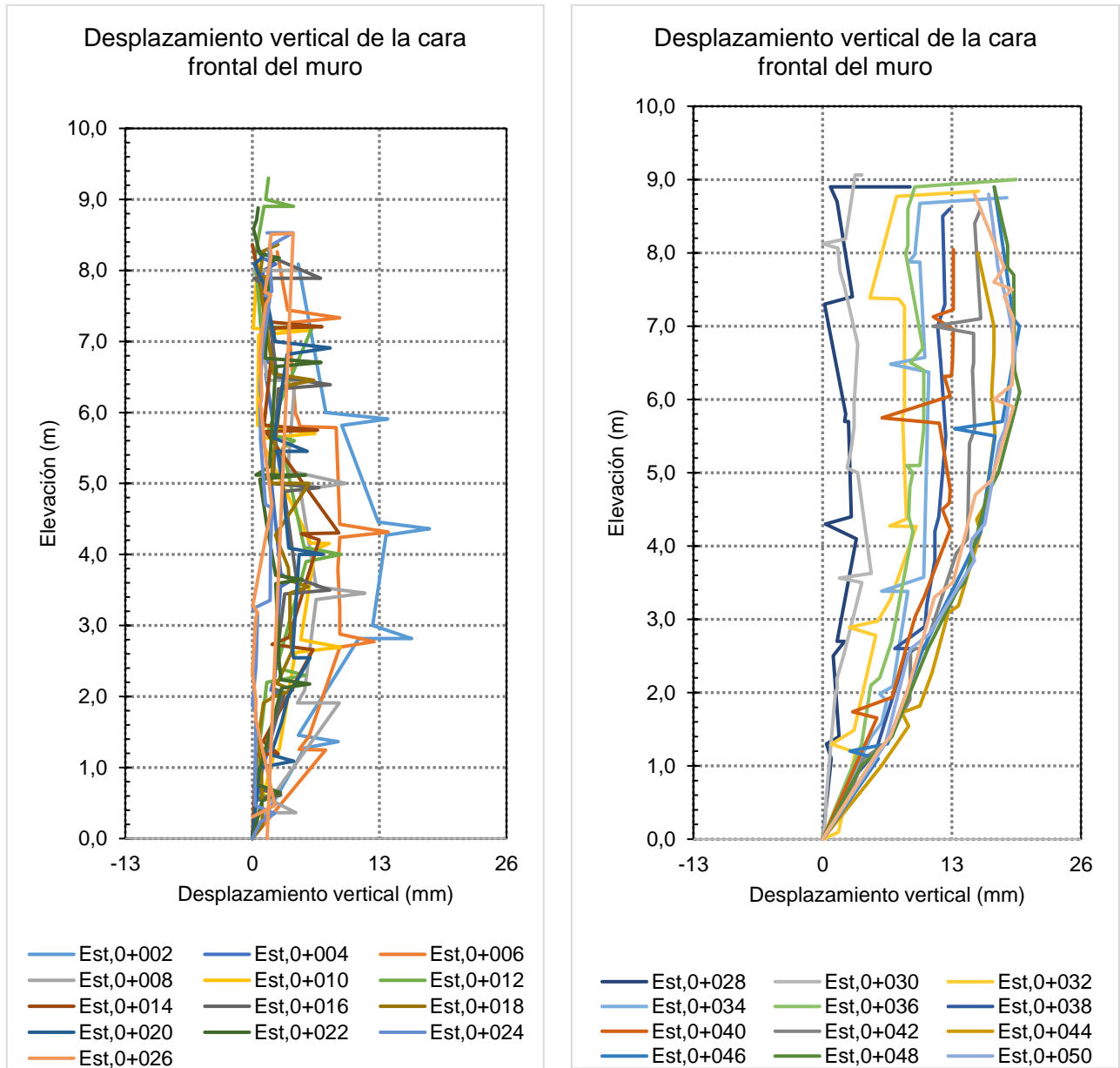


Figura 3. Resultados de verticalidad del muro margen derecha

Como se puede observar en la Figura 3, el muro en la sección analizada sección presenta desplomes, tanto hacia afuera del muro como hacia adentro del mismo, con valores que se encuentran dentro de la tolerancia establecida por el CR-2010, de una relación de 13 mm por cada 3 m de altura.

Con la finalidad de cuantificar y evidenciar la verticalidad del muro, la Tabla 2 muestra los valores de la diferencia de verticalidad observada por cada 3 m de altura. Los valores entre paréntesis, mostrados en



la Tabla 2 corresponden a los desplomes hacia afuera del muro (signo negativo), donde se nota que existen incumplimientos de la tolerancia permitida por el CR-2010 a partir de los 3 metros de altura

Tabla 2. Valores obtenidos para la diferencia de verticalidad observada por cada 3 m de altura para cara del muro de relleno reforzado del Muro margen derecha

Estación	Diferencia de elevación (m)							Total
	0-3	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	
Est,0+002	(12.32)	(9.19)	(4.20)	4.80	7.21	6.55		(4.71)
Est,0+004	(2.62)	(1.59)	1.13	0.66	1.44	0.87		(0.81)
Est,0+006	(8.94)	(2.83)	(1.59)	4.52	4.99	5.91		(2.53)
Est,0+008	(6.19)	(1.81)	(4.53)	2.10	4.98	9.42		(4.62)
Est,0+010	(5.17)	(4.46)	0.61	4.61	5.69	2.53		(0.55)
Est,0+012	(3.68)	(8.62)	(2.60)	1.28	3.55	3.50		(1.65)
Est,0+014	(4.12)	(6.07)	(1.60)	2.80	4.27	4.68		(1.55)
Est,0+016	(2.89)	(3.38)	1.43	0.38	2.11	(3.39)		(0.46)
Est,0+018	(3.85)	(2.25)	(3.57)	1.16	1.48	1.23		(2.63)
Est,0+020	(4.29)	(4.02)	0.57	1.64	2.43	2.57		(1.03)
Est,0+022	(2.65)	(1.20)	1.93	0.54	0.59	(0.90)		(0.59)
Est,0+024	(0.50)	(1.56)	(1.08)	(0.30)	0.71	(0.67)		(1.50)
Est,0+026	(0.52)	(1.59)	(1.10)	(0.28)	0.70	(0.42)		(1.51)
Est,0+028	(1.86)	(2.45)	(1.44)	(0.17)	2.63	(0.48)		(8.80)
Est,0+030	(3.03)	(3.87)	(2.23)	(0.15)	1.41	1.94	(0.02)	(3.96)
Est,0+032	(5.65)	(5.75)	(4.22)	(2.59)	0.50	2.30		(15.68)
Est,0+034	(8.12)	(6.77)	(4.49)	(2.49)	0.14	1.15		(18.54)
Est,0+036	(7.38)	(5.20)	(4.35)	(2.80)	(0.89)	0.71	(9.27)	(19.45)
Est,0+038	(10.35)	(7.16)	(4.87)	(1.80)	(0.30)	(0.10)		(12.80)
Est,0+040	(9.24)	(8.90)	(5.45)	(2.57)	(0.43)	(0.58)		(13.15)
Est,0+042	(11.27)	(10.21)	(5.94)	(3.92)	2.91	(1.39)		(15.91)
Est,0+044	(12.46)	(9.58)	(6.50)	(4.62)	(1.73)			(15.60)
Est,0+046	(11.59)	(10.13)	(8.35)	(6.88)	(4.57)	(1.42)		(17.25)
Est,0+048	(12.08)	(11.32)	(8.89)	(7.56)	(3.37)	(0.93)		(17.27)
Est,0+050	(11.64)	(10.02)	(9.60)	(7.10)	(4.13)	(0.25)		(16.71)
Est,0+052	(10.63)	(9.41)	(8.78)	(6.60)	(5.13)	(0.42)		(15.27)

Nota:

(Signo negativo) = Desplome hacia afuera del muro

Signo positivo = Desplome hacia adentro del muro

Es importante destacar, que la magnitud de estos cambios de inclinación o pendiente, inicialmente hacia afuera y posteriormente hacia adentro del muro, son responsables de que sean observados en el sitio grandes deformaciones en el muro. Lo cual fue particularmente evidente en los estacionamientos iniciales que corresponden a las zonas de mayor altura del muro.

Como se mencionó anteriormente, la columna que representa el desplome total del muro se refiere a la diferencia vertical que existe respecto a la altura total del muro a pesar de que las placas ubicadas en los niveles más altos se encuentran desplomadas hacia afuera de la cara del muro esto no representa una afectación a nivel estructural. Sin embargo, se considera apropiado rectificar las zonas más altas

del muro ya que al iniciar la fase operativa dicha condición puede desmejorar comprometiendo la integridad de la estructura.

#### IV. Verificación de los desalineamientos en las placas de las columnas sobre la alcantarilla ubicada a 62 m del bastión 2 del muro de relleno reforzado del del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas

Inicialmente, con la colaboración de la Oficina de Geomática (OGEO) del LanammeUCR, se realizó un levantamiento con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio en julio de 2022.

Este levantamiento, permitió la generación de un Modelo de Elevación Digital (MED) por medio de técnicas fotogramétricas. Mediante esta metodología es posible realizar la reconstrucción geométrica de un objeto por medio de fotografías aéreas captadas desde dos puntos de vista diferentes. Lo anterior permite recrear modelos tridimensionales que permiten analizar la forma y características de la fachada del muro e identificar posibles asentamientos y llevar un monitoreo de estos.

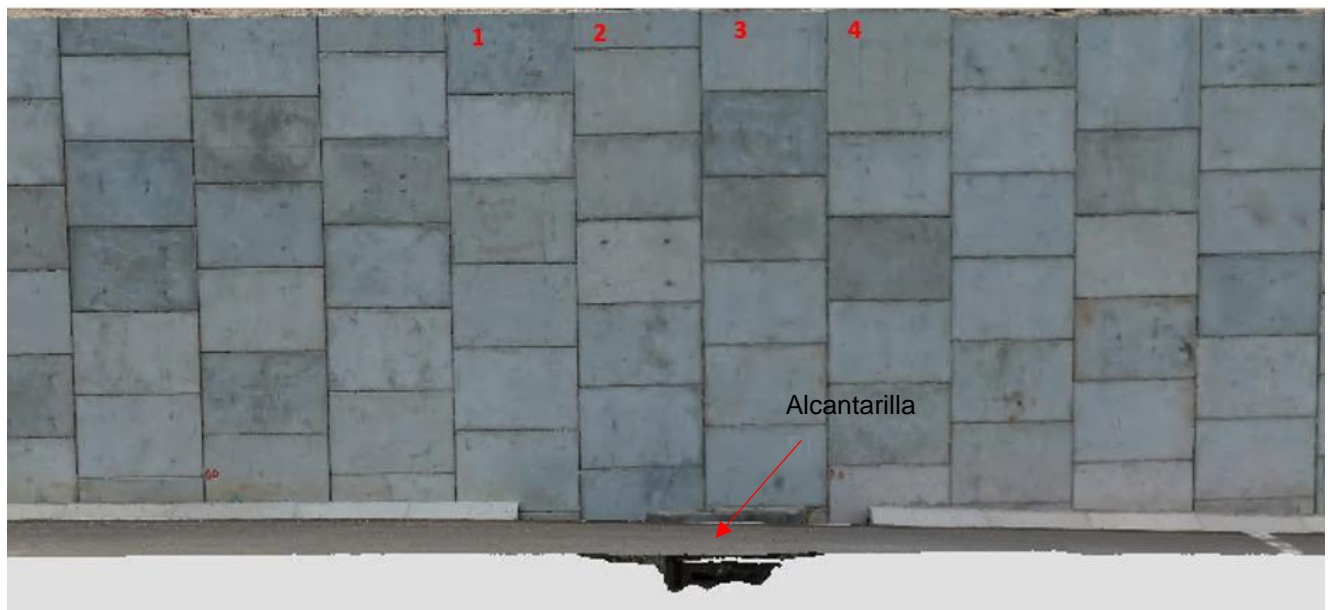


Figura 4. Modelo de elevación digital de la cara del muro analizada

El procedimiento para evaluar los posibles asentamientos en las columnas que de acuerdo con el informe “EIC-Lanamme-INF-0136-2022”, fueron observados desalineamientos diferenciales en los vértices y daños en algunos de los paneles sobre la alcantarilla consistió en, a partir del modelo georreferenciado determinar la ubicación de ambos vértices superiores de cada panel, y determinar la diferencia de altura. Los resultados obtenidos pueden ser comparados con futuros levantamientos georreferenciados con las mismas coordenadas utilizadas en el levantamiento de julio 2022. En la Tabla 3, se presentan los resultados de la ubicación en el eje “Y” de los vértices de los paneles de las columnas etiquetadas como 10, 11, 12, 13, y la respectiva diferencia en cada caso.



Tabla 3. Estimación de desalineamientos diferenciales en las columnas ubicadas sobre la alcantarilla a 62 m del bastión 2 del muro de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas

Altura (m)	Columna Escama	1			2			3			4		
		y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)
1.800	1.000	62.543	62.536	7.000	61.796	61.823	27.000	62.534	62.525	9.000	69.955	69.929	26.000
2.300	2.000	64.033	64.023	10.000	63.275	63.306	31.000	64.043	64.018	25.000	67.755	67.739	16.000
3.800	3.000	65.541	65.521	20.000	65.782	65.801	19.000	65.530	65.514	16.000	66.266	66.238	28.000
5.300	4.000	67.039	67.023	16.000	66.289	66.303	14.000	67.019	67.012	7.000	64.772	64.756	16.000
6.800	5.000	68.530	68.522	8.000	67.788	67.802	14.000	68.523	68.515	8.000	63.251	63.277	26.000
8.300	6.000	69.961	69.959	2.000	69.290	69.295	5.000	69.951	69.949	2.000	61.787	61.789	2.000

Se puede observar que las diferencias superan en casi todos los niveles los 15 mm y que la zona con un desalineamiento diferencial de mayor magnitud en los vértices de los paneles corresponde a los primeros 5 m de altura del muro medidos desde el nivel de la alcantarilla.

Con el fin de comparar a grandes rasgos los desalineamientos diferenciales de los paneles de dichas columnas, los cuales pueden estar asociados a posibles asentamientos de la estructura o a una falla estructural en la alcantarilla, se procedió a repetir el procedimiento para las nubes de puntos obtenidas en febrero y julio 2022 con el sistema de líder terrestre estacionario. En las Tabla 4 y Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de los paneles en cada modelo obtenido.

Tabla 4. Estimación de desalineamientos diferenciales en las columnas ubicadas sobre la alcantarilla a 62 m del bastión 2, para el levantamiento Lidar realizado en febrero 2022

Altura (m)	Columna Escama	1			2			3			4		
		y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)
1.800	1.000	0.909	0.9324	23.100	1.619	1.641	22.300	0.884	0.912	27.500	1.442	1.475	32.600
2.300	2.000	2.407	2.4285	21.400	3.101	3.131	29.700	2.349	2.374	24.500	2.998	3.034	35.700
3.800	3.000	3.915	3.926	11.500	4.599	4.630	30.600	3.898	3.923	25.400	4.495	4.534	39.100
5.300	4.000	5.443	5.4573	14.800	6.114	6.138	24.600	5.417	5.436	18.900	5.996	6.014	18.200
6.800	5.000	6.945	6.961	15.800	7.611	7.626	15.100	6.841	6.853	11.400	7.498	7.519	20.400
8.300	6.000	9.042	9.0432	1.700			-	8.302	8.311	8.500			-

Tabla 5. Estimación de desalineamientos diferenciales en las columnas ubicadas sobre la alcantarilla a 62 m del bastión 2, para el levantamiento Lidar realizado en julio 2022

Altura (m)	Columna Escama	1			2			3			4		
		y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)	y <sub>IZQ</sub>	y <sub>DER</sub>	ΔY (mm)
1.800	1.000	1.490	1.514	24.600	0.653	0.676	23.200	1.272	1.299	26.600	0.465	0.498	32.100
2.300	2.000	2.934	2.956	21.800	2.462	2.492	30.300	2.770	2.795	25.300	1.885	1.922	36.600
3.800	3.000	4.494	4.505	11.900	3.673	3.702	28.800	4.272	4.298	26.600	3.193	3.235	42.700
5.300	4.000	5.866	5.881	15.700	5.154	5.179	24.900	5.770	5.788	17.700	4.942	4.961	19.100
6.800	5.000	7.335	7.347	12.500	6.628	6.643	14.900	7.269	7.279	10.200	6.480	6.502	21.700
8.300	6.000			-	8.115	8.123	7.700			0.000	7.878	7.899	20.700

Dada la diferencia de la fuente entre los datos obtenidos con el VANT y el Lidar, no es recomendable comparar directamente los datos ya que al no estar georreferenciados al mismo punto existen diferencias en la superposición de las mediciones. Las dimensiones obtenidas con el VANT pueden ser comparadas con futuros levantamientos georreferenciados al mismo punto. Con la finalidad de visualizar las diferencias entre los levantamientos, la Tabla 6 muestra una comparativa de los desalineamientos



diferenciales de las placas de cada columna analizada en MED obtenido en los respectivos levantamientos Lídár.

Tabla 6. Comparación de desalineamientos diferenciales detectados en las mediciones realizadas a cada levantamiento realizado con Lídár

Altura (m)	Columna	1			2			3			4		
	Escama	febrero	julio	$\Delta$	febrero	julio	$\Delta$	febrero	julio	$\Delta$	febrero	julio	$\Delta$
1.8	1.0	23.1	24.6	1.5	22.3	23.2	0.9	27.5	26.6	0.9	32.6	32.1	0.5
2.3	2.0	21.4	21.8	0.4	29.7	30.3	0.6	24.5	25.3	0.8	35.7	36.6	0.9
3.8	3.0	11.5	11.9	0.4	30.6	28.8	1.8	25.4	26.6	1.2	39.1	42.7	3.6
5.3	4.0	14.8	15.7	0.9	24.6	24.9	0.3	18.9	17.7	1.2	18.2	19.1	0.9
6.8	5.0	15.8	12.5	3.3	15.1	14.9	0.2	11.4	10.2	1.2	20.4	21.7	1.3
8.3	6.0	1.7	-	-	-	7.7	-	8.5	-	-	-	20.7	-

Los resultados obtenidos con el sistema Lídár no se encuentran georreferenciados a un punto en común, sin embargo, la magnitud de los desalineamientos diferenciales obtenidos es similar para ambos levantamientos. Las diferencias obtenidas no se pueden asociar específicamente a un posible asentamiento ya que los levantamientos no están georreferenciados en el mismo punto.

## V. Comentarios finales

Es importante indicar que los resultados obtenidos en este informe no representan resultados definitivos de un análisis de asentamientos diferenciales para las columnas del muro de relleno reforzado de la margen derecha del bastión 2, específicamente de la sección sobre la alcantarilla ubicada a 62 m del bastión; ya que, entre las limitaciones presentes para este análisis, se tuvo la omisión de la georreferenciación de los modelos de elevación digital obtenidos con el sistema Lídár. El principal aspecto por considerar para un monitoreo de una estructura es la adecuada georreferenciación de los levantamientos para realizar un análisis de su comportamiento en el tiempo. Es por ello que a partir del MED generado con el VANT, si es posible realizar el monitoreo con mayor precisión para futuros análisis, pues este si se encuentra georreferenciado.

A partir del análisis realizado con los MED obtenidos con la metodología Lídár, se concluye que existe un desalineamiento de las placas que conforman las columnas de la fachada del muro, presentando rotación en sentido contrario a las manecillas del reloj. Se presenta un incremento diferencial de la ubicación de los vértices de las placas de 1,14 mm en promedio, dadas las condiciones mencionadas anteriormente, esta diferencia puede estar asociada a las diferencias de coordenadas entre levantamientos o a un posible incremento del asentamiento. Por lo que se recomienda realizar un futuro levantamiento con el VANT georreferenciado a las mismas coordenadas para que pueda ser comparado con los resultados de la Tabla 3.

Finalmente, en cuanto a la verticalidad del muro, la sección analizada cumple con lo indicado en el CR-2010 que corresponde a una tolerancia de 13 mm por cada 3 m de altura. A pesar de que las placas ubicadas en los niveles mas altos se encuentran desplomadas hacia afuera de la cara del muro esto no representa una afectación a nivel estructural. Sin embargo, se considera apropiado rectificar las zonas mas altas del muro ya que al iniciar la fase operativa dicha condición puede desmejorar comprometiendo la integridad de la estructura.



## VI. Referencias

- Programa de Ingeniería Geotécnica (2022). *EIC-Lanamme-INF-0441-2022 Informe de verificación de deformaciones verticales en los muros de relleno reforzado del paso elevado San Miguel en Ruta Nacional 1, Limonal- Cañas*. LanammeUCR. San José.
- Programa de Ingeniería Geotécnica (2022). *EIC-Lanamme-INF-0792-2022- Informe de revisión de la nota de respuesta DM-2022-2415. Proyecto Limonal - Cañas*. LanammeUCR. San José.