



Variaciones en los tiempos de captura en la elaboración de modelos de nubes de puntos con Escáner Láser Terrestre por condiciones de campo

Variations in capture times in the development of point cloud models with a Terrestrial Laser Scanner due to fieldwork conditions

Cruz-Ramírez, Luis Carlos¹

Alejo-García, Víctor Hugo²

Camargo-Suárez, Eli Álvaro Eliuh³

Zárate-Martínez, Jorge Fernando⁴

^{1,2,3,4}Laboratorio de Posgrado, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Tecamachalco, Instituto Politécnico Nacional, México.

¹lcruzr@ipn.mx | <https://orcid.org/0000-0002-3651-4471>

²valejog2001@alumno.ipn.mx | <https://orcid.org/0009-0003-9708-107X>

³kalefeliuh@gmail.com | <https://orcid.org/0009-0006-3262-9243>

⁴abcenteringles@gmail.com | <https://orcid.org/0009-0001-3979-2477>

Recibido el 06 de Octubre del 2023, aprobado el 21 de Noviembre del 2023



RESUMEN | Los láser escáneres tienen una configuración para la captura 3D en el cual, para determinada densidad (baja, media y alta) se cuenta con tiempos específicos. Para densidades bajas el tiempo que se puede tardar en realizar una captura de nubes de puntos con RGB es cerca de los 7 minutos. Sin embargo, los tiempos de captura de campo no dependen solamente de la configuración del equipo, sino que es necesario tener en cuenta una serie de factores humanos que intervienen en el trabajo de campo, tales como (a) el seguimiento de una planeación, (b) el tiempo de colocación y ajuste del trípode por estación, (c) la colocación y ajuste de los targets y (d) la nivelación de la estación. Estos factores son aleatorios porque son factores humanos. Entonces, ¿Cuánto puede variar el tiempo de captura de campo considerando las condiciones humanas? El objetivo de este estudio fue estimar el tiempo aproximado de captura por estaciones durante un levantamiento 3D de un edificio con un TLS modelo Leica ScanStation C10. Para estimar el tiempo promedio de levantamiento, se analizaron 3 casos de estudios: Regina 143, Escuela Belisario Domínguez y la Capilla del Museo ExTeresa Arte Actual. Se estimaron medias, medianas y desviaciones estándares de las capturas con resoluciones bajas para nubes de puntos y para RGB. Se encontró que el tiempo medio de captura por estación fue de 12 minutos 30 segundos, con desviaciones estándares de 4 minutos y 36 segundos. El tiempo que tarda la cuadrilla de trabajo de campo en realizar actividades de ajustes, en promedio, es de 2 minutos y 44 segundos. Estos datos son de utilidad para la planeación de proyectos de levantamiento con instrumentos similares.

PALABRAS CLAVE | Escaneo-láser, estimaciones, patrimonio, tecnología, TLS.

ABSTRACT | Laser scanners have a configuration for 3D capture in which, for certain density (low, medium and high) specific times are available. For low densities, the time it may take to capture point clouds with RGB is close to 7 minutes. However, fieldwork capture times do not depend only on the configuration of the equipment, in instead of it is necessary to take into account a series of human factors that intervene in fieldwork, such as (a) following a planning, (b) the time of placement and adjustment of the tripod per station, (c) the placement and adjustment of the targets and (d) the leveling of the station. These factors are random because they are human factors. So, how much can fieldwork capture time vary



considering human conditions? The aim of this study was to estimate the approximate capture time by stations during a 3D survey of building campaign with a TLS model Leica ScanStation C10. To estimate the average measurement time, 3 cases of studies were analyzed: Regina 143, Belisario Domínguez School and the ExTeresa Arte Actual Museum Chapel. Means, medians and standard deviations of the captures with low resolutions were estimated for point clouds and for RGB. Results point out that the average capture time per station was 12 minutes 30 seconds, with standard deviations of 4 minutes and 36 seconds. The time it takes the fieldwork crew to do adjustment activities, on average is 2 minutes and 44 seconds. These data will be useful for planning survey projects with similar instruments.

Keywords: Estimates, heritage, TLS, technology, laser-scanning.

Introducción

El objetivo de este estudio fue estimar el tiempo aproximado que se requiere por estación para realizar la captura de dimensiones espaciales 3D de edificios –levantamiento digital– con un Escáner Láser Terrestre (*Terrestrial Laser Scanner: TLS*) –modelo Leica ScanStation C10– considerando parámetros mecánicos y humanos. El origen de esta investigación tiene relación con la necesidad de conocer el tiempo que se necesita para realizar un levantamiento –el *levantamiento de campo* también es llamado en la literatura como *campana de levantamiento*– con TLS durante la etapa de trabajo de campo, además de la relevancia y variabilidad que tienen las condiciones humanas en la ejecución de un levantamiento con instrumentos digitales. Conocer el tiempo de levantamiento tiene implicaciones en la planeación del trabajo de campo, el costo de un proyecto y la optimización de recursos.

Los TLS son instrumentos digitales que envían una serie de pulsaciones de luz, que cambian de dirección periódicamente, en función del ángulo de inclinación vertical y el ángulo de dirección horizontal (Wu, 2022), para determinar las distancias (Dallas, 2003, p. 67) de los elementos físicos que delimitan un espacio, con el uso de sensores que identifican las superficies de reflexión. Las mediciones se realizan utilizando distintos métodos, los cuales pueden ser, por medio del (a) tiempo de vuelo (*time of flight*) –el cual consiste en estimar mediciones a partir de la velocidad a la que se propaga el pulso de luz desde el sensor hasta una superficie de rebote– o (b) por cambio fases (*phase shift*) –método que realiza estimaciones en un proceso de comparaciones entre dos fases de ondas propagadas: estándar y reflejada– (Abdel-Barry, 2011).

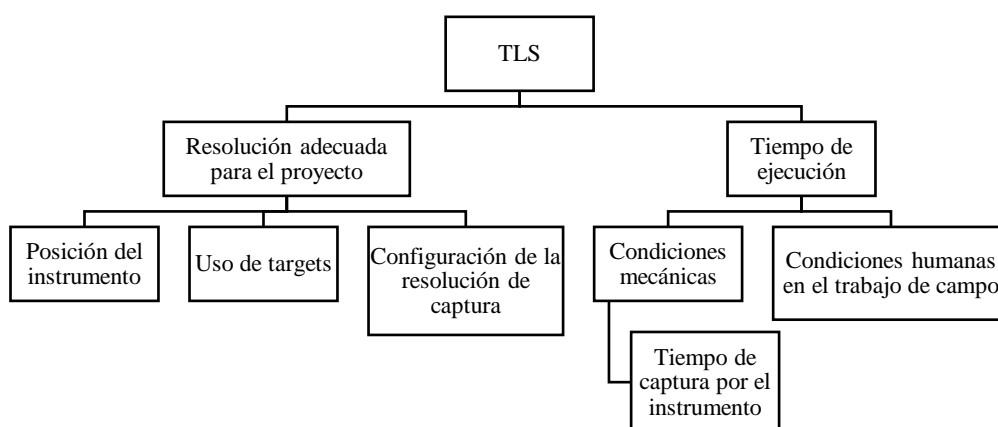
Se conoce que, para planear un proyecto de dimensionamiento con TLS se necesita considerar al menos un balance entre la resolución adecuada para el levantamiento y el tiempo de ejecución, en el que se busca ejecutar el levantamiento en el menor tiempo posible (Mat-Zam et al., 2018). En cuanto a la resolución, los TLS son instrumentos diseñados para realizar mediciones con alto nivel de densidad de puntos (Suchocki et al., 2020) y para estudios de alta precisión (Grussenmeyer et al., 2011). Por ejemplo, pueden obtenerse detalles milimétricos, útiles para la captura de la forma (Kwoczyńska et al., 2016), conocer desplazamiento y desniveles (Castagnetti et al., 2012), identificar humedades en superficies (Suchocki et al., 2020), en el estudio de las deformaciones y en el monitoreo en edificios patrimoniales (Mukupu et al., 2016). Sin embargo, las resoluciones¹ finales varían según (a) la posición que tenga el instrumento en campo (Remondino, 2011, p. 1122) –mejora al estar ubicado a menor distancia de la superficie de medición y de manera perpendicular al plano, (b) el uso de *targets* (Pritchard, 2017, p 217) y (c) los ajustes de configuración de resolución de captura del mismo instrumento –baja, mediana o alta–, que permiten determinar el número de pulsaciones que realizará durante su puesta en marcha, lo cual a su vez depende del modelo del instrumento.



Con respecto al tiempo que se emplea para realizar un levantamiento, este depende de dos variables: las condiciones mecánicas y las condiciones humanas. Las condiciones mecánicas están relacionadas con la configuración de la resolución del instrumento antes mencionado –capturar un modelo con mejor resolución y precisión le toma mayor tiempo de captura al instrumento–. La segunda depende de una serie de condiciones humanas del trabajo de campo. Entre estas condiciones se pueden mencionar: (a) el tiempo que se demora la *cuadrilla de trabajo de campo* (CTC) en hacer el cambio de ubicación de la estación –aquí se incluyen los ajustes que se tengan que realizar con el instrumento, tales como la colocación del trípode, nivelación y ensamble–, (b) las complejidades de ajustes según las características de la superficie del terreno, barreras u obstáculos físicos no identificados previamente y (c) los factores del rendimiento humano de la CTC de trabajo de campo (ver Figura 1).

Figura 1

Condiciones necesarias en un proyecto de dimensionamiento de campo con TLS



Se conoce que existe una relación entre el *tiempo de captura de campo*² y la resolución de la *nube de puntos* (PC) resultante. El tiempo que le toma al instrumento realizar la captura de medidas aumenta según se incrementa la resolución. Para lograr mayores resoluciones el instrumento requiere mayor tiempo de captura³, porque realiza pulsaciones láser más continuas (Mat-Zam et al., 2018) –este parámetro se encuentra preconfigurado por modelos de estaciones TLS–. Por otro lado, la resolución también puede aumentar o disminuir según el número de posiciones del instrumento en campo. Analizar algunas posiciones de manera estratégica y planeada mejora la resolución final, pero al costo de aumentar el tiempo de registro de campo. Con base en lo mencionado en líneas anteriores, ahora queda clara la relevancia que tiene el tiempo de captura.

El problema está con *las condiciones humanas del trabajo de campo*: las relacionadas con el cambio de estación, la experiencia de uso y el rendimiento por cansancio. Primero, en cuanto al cambio de estación, aunque la posición del instrumento pueda planearse previamente conociendo la forma y configuración del edificio –para esto se requieren proyecciones o diagramas de plantas arquitectónicas del edificio y seguir algún método de estimación de posiciones⁴, como los mencionados por Soudarissanane et al. (2011)–, el tiempo variará según las distancias que la CTC deberá recorrer entre las estaciones y la coordinación que lleve para identificar previamente la estación que continúa.

Una vez identificada la siguiente ubicación, se procede a realizar el conjunto de ajustes de la estación en esa posición. El siguiente problema surge por la necesidad de dejar la estación sobre una

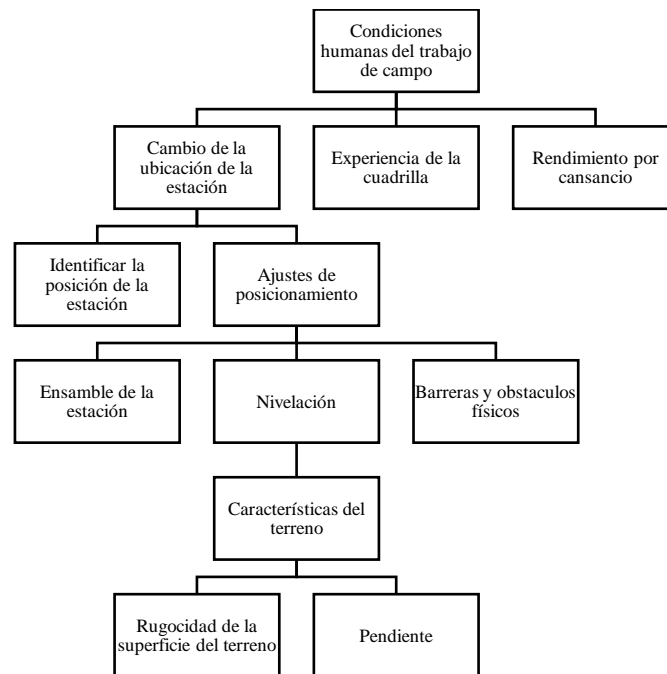


superficie estable. Aquí influye la superficie del terreno: la pendiente y la rugosidad. Si la estación no tiene nivelación automática, se deberá de nivelar de manera manual, lo que implica un tiempo de ajuste por parte de la CTC.

El tiempo puede reducirse o aumentar en función de la experiencia que tenga la CTC en nivelar el trípode con la estación. Si la superficie es lisa –como los pisos cerámicos– se requieren bases anti-derrapantes, si la superficie es blanda –como el suelo o áreas con vegetación– el trípode requiere tener bases con puntales. En un levantamiento es común encontrar los dos tipos de superficies, por lo que la CTC aplicará soluciones en el momento, lo que aumentará el tiempo de captura⁵.

Además, en ocasiones existen barreras y obstáculos no identificados, que es necesario reconsiderar para lograr la cobertura completa de las superficies, que conlleva a realizar ajustes en la planeación de posiciones del instrumento. Esto dependerá de las soluciones que encuentra la CTC. También es necesario mencionar que los obstáculos tienen implicaciones en la colocación de los *targets* en campo. Finalmente, el rendimiento por cansancio, luego de pasar una serie de horas continuas, se refleja comúnmente, en la segunda mitad de la jornada de trabajo (ver Figura 2).

Figura 2
Condiciones variables en el trabajo de campo.



Así es como *las condiciones humanas del trabajo de campo* tienen implicaciones en el tiempo para el levantamiento. En este contexto, la pregunta de investigación que se plantea es ¿Cuánto puede variar el tiempo de captura de campo considerando las condiciones humanas? Llama la atención que el estudio de los tiempos de capturas en levantamientos no ha sido explorado al detalle. La mayoría de los estudios no menciona estos parámetros. Algunas referencias hacen mención comparativa entre métodos tradicionales y métodos digitales, comparan dos instrumentos de mediciones digitales, o bien, la diferencia entre el trabajo de campo en comparación con el procesamiento de los datos, pero sin detallar factores que determinan el tiempo de levantamiento.



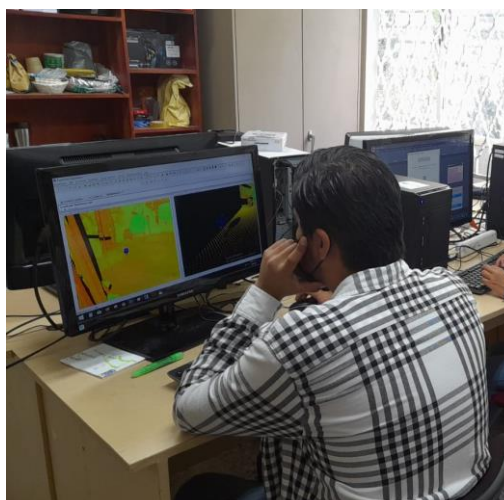
Estudios como los de González-Aguilera et al. (2009), Mukupa et al. (2016), Klapa et al. (2017) o Mat-Zam et al. (2018), mencionan las ventajas del levantamiento con TLS sobre los métodos de captura tradicional, porque permiten tomar dimensiones en menor tiempo y con mayor precisión. Por el contrario, el TLS no tiene ventaja al ser comparado con un Escáner Láser Móvil Manual (*Handheld Mobile Laser Scanner: HMLS*), ya que, en estudios comparativos entre estos dos tipos de instrumentos, el TLS queda en desventaja porque requiere de mayor tiempo para recuperar datos y procesarlos en comparación con el HMLS (Sirmacek et al., 2016; Ryding et al., 2015). Este es un problema conocido de los TLS y está relacionado con el tiempo de registro –unión de *nubes de puntos* (PC) por estaciones– ya que consume un tiempo considerable en el procesamiento de datos. En contraste el HMLS tiene menor resolución (ver Figura 3). Idrees y Pradhan (2016, p. 80), estiman que el tiempo de trabajo de campo es un tercio del tiempo de procesamiento de datos en el registro de estaciones⁶, pero sin indicar cuanto les tomó realizar alguna de esas tareas.

Figura 3

Captura de campo y registro de campo.



Captura de dimensiones de campo



Procesamiento de datos: Registro de estaciones

Los estudios de levantamientos de áreas forestales se aproximan a mencionar el tiempo promedio de escaneo. Tremblay y Béland (2018) mencionan que el trabajo de campo en el levantamiento de áreas forestales consume una cantidad de tiempo considerable por la necesidad de implementar *targets* artificiales, donde un levantamiento de 176 estaciones les llevó 11 días con un TLS Riegl VZ-400. Este es otro dato, sin contexto, porque se desconoce la cantidad de horas de trabajo por día y las condiciones del lugar de levantamiento. Por otro lado, Ryding et al. (2015) en su estudio comparativo entre TLS y HMLS, presentan estimaciones de tiempos de levantamientos para áreas forestales, donde indican que tres escaneos con un TLS FARO FOCUS 3D, les tomó 60 minutos durante el trabajo de campo. Otro estudio, conducido por Aguilar et al. (2019) menciona que realizar un levantamiento de un área forestal, les tomó en promedio 8 minutos por estación, con un escáner FARO FOCUS 3D X-330, considerando la limpieza de la vegetación, la colocación de los targets y la georreferenciación. Sin embargo, en el levantamiento de edificios los parámetros para áreas forestales no son de mucha utilidad porque se trata de características completamente distintas.



El estimador más cercano que se encontró en la literatura, está relacionado con un estudio de un levantamiento de espacios interiores de un *laboratorio de cómputo* en Malasia, llevado a cabo por Lee et al. (2013) quienes mencionan que para capturar un espacio rectangular con un TLS Leica ScanStation C10, con una planeación de cuatro estaciones, en resolución media y con el uso de targets les tomó dos horas, con un tiempo promedio de 7 minutos por escaneo en cada estación. Aunque este estudio proporciona mayor información, no se detalla porqué les tomó dos horas la captura de todo el espacio.

Esta breve revisión de literatura, evidencia la necesidad de estimar parámetros y métodos confiables que se puedan utilizar para planear un proyecto de dimensionamiento de campo con TLS. Para esto, la hipótesis que se plantea es que, el tiempo de un levantamiento de campo con un TLS se puede estimar con un nivel alto de precisión, únicamente conociendo las condiciones mecánicas y las condiciones humanas del trabajo de campo, los cuales pueden ser obtenidos siguiendo el método que enseguida se detalla.

Método

En el tiempo de trabajo de campo para un levantamiento con TLS intervienen dos variables: las condiciones mecánicas y las condiciones humanas (ver Tabla 1). Las condiciones mecánicas están representadas por el tiempo de captura del instrumento (t_i). Las condiciones humanas del trabajo de campo están representadas por el rendimiento de la CTC ($t_{\Delta r}$). Cada estación está compuesta por el tiempo mecánico (t_m) y el tiempo humano (t_h). Otra manera de representarlo es que el tiempo por estación (t_e), que es igual a la suma del tiempo del instrumento (t_i) más el tiempo de cambio de estación ($t_{\Delta e}$).

Tabla 1

Descripción de relaciones entre tiempos de capturas y actividades

Relaciones	Descripción	Condiciones
$t_m = t_i = f(x_{pc}, x_{rgb})$	El tiempo de captura del instrumento (t_i)	Mecánicas
$t_h = t_{\Delta r} = t_{\Delta e}$	El tiempo por rendimiento de la CTC	Humanas
$t_{\Delta e} = f(x_a) = f(x_i, x_d, x_c, x_s, x_p)$	El tiempo de cambio de posición de la estación ($t_{\Delta e}$)	Humanas
$t_e = t_i + t_{\Delta e}$	Tiempo por estación	

El tiempo de captura del instrumento (t_i) está en función de la resolución de la PC (x_{pc}) y de la resolución de las fotografías para la proyección RGB (x_{rgb}): $t_i = f(x_{pc}, x_{rgb})$. El tiempo que le toma al instrumento en realizar la captura de PC (t_{pc}) y el RGB (t_{rgb}) depende de la resolución de captura. La resolución de la PC (x_{pc}) se midió en número de puntos. La resolución fotográfica (x_{rgb}) se midió en pixeles. La resolución de la PC puede tomar valores preestablecidos, como pueden ser resolución baja, media, alta y muy alta. Por esta razón, el tiempo de captura del instrumento se trata de una variable con valores conocidos.

El rendimiento de la CTC ($t_{\Delta r}$) se puede estimar al sumar el tiempo que le toma a la CTC en realizar un cambio de posición de la estación ($t_{\Delta e}$). El tiempo de cambio de posición de la estación ($t_{\Delta e}$) está en función de los ajustes para posicionar la estación (x_a), que se estima en función del tiempo que le lleva al operador configurar el instrumento, que depende de la dificultad para identificar la posición de la siguiente estación (x_i), desplazar el instrumento (x_d), ensamblar el instrumento (x_c), colocarlo sobre una superficie que puede ser lisa, rugosa, rígida o blanda (x_s) y de la pendiente del terreno (x_p). Debido a que estas actividades se realizan de manera simultánea, el tiempo de cambio de posición de la estación ($t_{\Delta e}$) se estimó de manera conjunta.



El tiempo de levantamiento por estación se puede estimar sumando el tiempo de las actividades mecánicas (t_m) –que es el tiempo del instrumento (t_i)– más el tiempo humano (t_h) –que viene dado por el tiempo de rendimiento de la CTC ($t_{\Delta e}$)–. Para estimar el tiempo final de levantamiento, es necesario sumar los tiempos de todas las estaciones, menos la primera estación, ya que se trata de un tiempo atípico porque implica en montaje del instrumento.

Consideraciones y exclusiones

Para este estudio, se conformó la CTC de levantamientos con participantes que sabían utilizar el instrumento. Todos los participantes tenían experiencia en al menos un *proyecto de levantamiento de campo* de nueve estaciones. Además, conocían los ajustes del instrumento y existía una planeación de la ubicación de las estaciones para los proyectos de levantamiento. La experiencia del personal de campo es necesaria para evitar la exposición del instrumento a malas prácticas de uso. Por lo anterior, la experiencia de la cuadrilla no se incluyó en el análisis de datos para esta investigación.

Otro dato de importancia que es necesario tomar en cuenta en un proyecto de levantamiento, es que el tiempo de captura de la primera estación es el más tardado. La primera estación representa un tiempo atípico y esto se debe a que el tiempo es relativamente mayor porque incluyen otras actividades tales como: el tiempo que se requiere para llevar todos los instrumentos necesarios a la primera estación de captura – mover los instrumentos de una bodega al lugar de levantamiento–, extraer los instrumentos de sus cajas, empaques o elementos protectores, encender el instrumento, armar los trípodes con sus targets, entre otras actividades. Por esta razón, el primer punto fue tratado de manera individual. La primera estación se excluye del análisis. Finalmente, todas las capturas de TLS consideradas en este estudio fueron realizadas con una resolución baja. Este dato es de importancia, porque la resolución de captura hace variar el tiempo.

Instrumentos

El instrumento utilizado en esta investigación fue el TLS Leica ScanStation C10. El radio de captura máximo que posee es de 300 metros y el mínimo es de 0.1m. Este modelo tiene integrada una cámara de 4 megapíxeles que toma fotografías con resoluciones de 640x640 (baja), 960x960 (media) y 1920x1920 (alta) para poder realizar el mapeo de colores RGB sobre la PC. Además, se utilizaron de cuatro a ocho targets de 6” que se localizaban según las necesidades de cada estación.

Casos de estudio

Para esta investigación se analizaron los datos registrados de tres proyectos de levantamiento de campo: Regina 143 (R143), Escuela Belisario Domínguez (EBD) y Capilla del Museo ExTeresa Arte Actual (CMEAA) (ver Tabla 2). Los tres casos de estudios se encuentran localizados en la Ciudad de México, tienen diferentes dimensiones, por lo que también tienen diferente número de estaciones. R143 y CMEAA se ejecutaron en jornadas aproximadas de ocho horas. EBD se ejecutó en jornadas de cuatro horas, por lo que también varía el número de días en levantamientos.

Tabla 2
Características generales de los casos de estudios

Proyecto	Edificios	No de estaciones	Días de levantamiento
P-1	Regina 143 (R143)	101	4 días
P-2	Escuela Belisario Domínguez (EBD)	142	7 días
P-3	Capilla del Museo ExTeresa Arte actual (CMEAA)	26	1 día



Muestras

Se tomaron diferentes muestras de datos correspondientes a tres proyectos de levantamiento con TLS. Cada uno de los proyectos de levantamiento se realizó siguiendo una planeación de estaciones. Para el caso de R143 y CMEAA, se tenían planos esquemáticos que ayudaron a planear de manera precisa el número de estaciones. En el caso de la EBD, primero se realizó un recorrido en sitio para estimar el número de estaciones que se requerían para llevar a cabo el proyecto de levantamiento de campo. El número de estaciones ideales se registraron en un plano esquemático para luego proceder con el levantamiento.

Las observaciones de los tiempos se ejecutaron por un miembro de la CTC que tenía la tarea de llevar el seguimiento de estaciones y el registro de los tiempos entre estas. Los tiempos fueron medidos con el uso de diferentes modelos de smartphone con sistema operativo Android (Android OS) 11 o superior. Se utilizó el cronometro de la aplicación *Reloj*, incluida por defecto en Android OS.

El inicio del tiempo de cada estación comenzaba con las actividades de cambio de localización de la estación y se concluía al terminar la captura RGB del instrumento. Acá se tomaron tres muestras, cada una correspondiente a un edificio muestreado. En cada edificio se tomaron datos por bloques que se fueron segmentando de la Muestra 1 a la Muestra 3, para conocer al detalle los tiempos de actividades humanas y mecánicas.

El primer conjunto de datos fue tomado todo en un solo bloque. Este iniciaba en el momento en que la CTC se aproxima al trípode para moverlo a la siguiente estación y finalizaba con la toma de captura del instrumento. El segundo conjunto de datos fue tomado considerando dos bloques temporales: (2A) desde el momento en que la CTC se aproxima al trípode para moverlo a la siguiente estación, ubica la nueva posición del instrumento, realiza los ajustes de la estación, coloca los targets y (2B) el tiempo que le toma al instrumento en terminar la captura (PC + RGB). Para el tercer conjunto de datos fue tomado en tres bloques: se tomó el tiempo (3A) desde el momento en que la CTC se aproxima al trípode para moverlo a la siguiente estación, ubica la nueva posición del instrumento, realiza los ajustes de la estación y coloca los targets –similar al bloque 2A–; (3B) el tiempo que le toma al instrumento en realizar la captura de la PC y (3C) el tiempo que le toma al instrumento en realizar la captura de RGB. La diferencia entre la muestra 2 y la muestra 3, es que la muestra 3 contiene el proceso 2B, en dos partes 3B y 3C, tomando los tiempos de PC y RGB por separado (ver Tabla 3).

La razón por la que se tomaron de esta manera las muestras tiene relación con el diseño de investigación que se presenta en la siguiente sección. Otra aclaración que es necesaria realizar es que, si bien las ubicaciones de las estaciones se establecen durante la planeación, y la localización de target se prevé mientras se corre el tiempo de captura mecánica, al mover el instrumento se toma la decisión de localizar la estación y de targets en función de la variación de visibilidad que puede tener la estación por ligeras variaciones de colocación que suelen estar dentro de un metro de radio del punto estimado.



Tabla 3
Actividades consideradas en cada muestra de datos

Muestras de datos			Actividades
Edificios			
R143	EBD	CMEAA	
Muestra 1	Muestra 2A	Muestra 3A	CTC se aproxima al trípode para moverlo Ubica la nueva posición del instrumento Colocar estación en una superficie estable Realizar los ajustes de la estación Colocar los targets
	Muestra 2B	Muestra 3B	Tiempo de captura de PC del instrumento
		Muestra 3C	Tiempo de captura de RGB del instrumento

Diseño de la investigación

Aunque los tiempos fueron medidos en minutos y segundos, todos los datos relacionados con tiempos se convirtieron a segundos para ser analizados. La descripción de número de observaciones y casos de estudios seleccionados se presentan en la Tabla 4. Para estimar los tiempos totales de capturas por estación (t_e) se seleccionaron datos de los tres casos de estudios, por días de trabajo. Un total de 216 observaciones. Acá se calcularon los tiempos medios, máximos, mínimos y las desviaciones estándares para tener parámetros que describieran los tiempos medios de levantamiento por estación.

Tabla 4
Resumen de las muestras consideradas

Análisis	Casos de estudio	Observaciones
$t_e = t_h + t_m = (t_{\Delta e} + t_i)$	R143 + EBD + CMEAA	216
(t_i)	EBD + CMEAA	78
(t_{pc})	CMEAA	26
(t_{rgb})	EBD + CMEAA	26
$(t_{\Delta e})$	EBD + CMEAA	93

Se buscó conocer el tiempo que tarda el instrumento (t_i) en realizar la capturar de PC y RGB, con base en 78 observaciones de los casos de estudios EBD (día 1-3: 52 observaciones) y CMEAA (26 observaciones). Adicionalmente, se estimó el tiempo de cada captura mecánica por separado. Para conocer el tiempo que tarda el instrumento en realizar la capturar la PC (t_{pc}), se extrajeron los parámetros del instrumento. El análisis que se realizó fue para conocer la relación que tenían las diferentes resoluciones predeterminadas del instrumento. Al ser parámetros definidos de manera mecánica, se sabe que los datos están relacionados, por lo que esto se puede describir por medio de una función que se puede conocer con un análisis de regresión, esperando un índice de correlación con sobreajuste de $R^2 = 1$. Posteriormente, se



realizaron observaciones para saber si los datos proporcionados por el instrumento eran correctos. Esta evaluación solamente se realizó con las resoluciones baja de capturas de PC.

Por otro lado, está el tiempo que tarda el instrumento en realizar la capturar RGB (t_{rgb}). En este caso se realizaron observaciones en la que se registraron los datos para la resolución baja de 640x640. Se tomó como caso de estudio todo el levantamiento de CMEAA. El total de observaciones fueron de 26 estaciones. Todas las estaciones fueron de interiores. El tiempo se tomó por separado, para conocer el tiempo medio de captura. Acá se realizó el tratamiento de datos perdidos para una observación.

El otro análisis que se realizó fue para conocer el tiempo de cambio de estación ($t_{\Delta e}$). Se consideraron 93 observaciones, correspondientes a los casos de estudios EBD (días 4-6: 67 observaciones) y CMEAA (26 observaciones). El tiempo medio de la primera estación se analizó de manera separada, según los días observados.

Estrategia de análisis

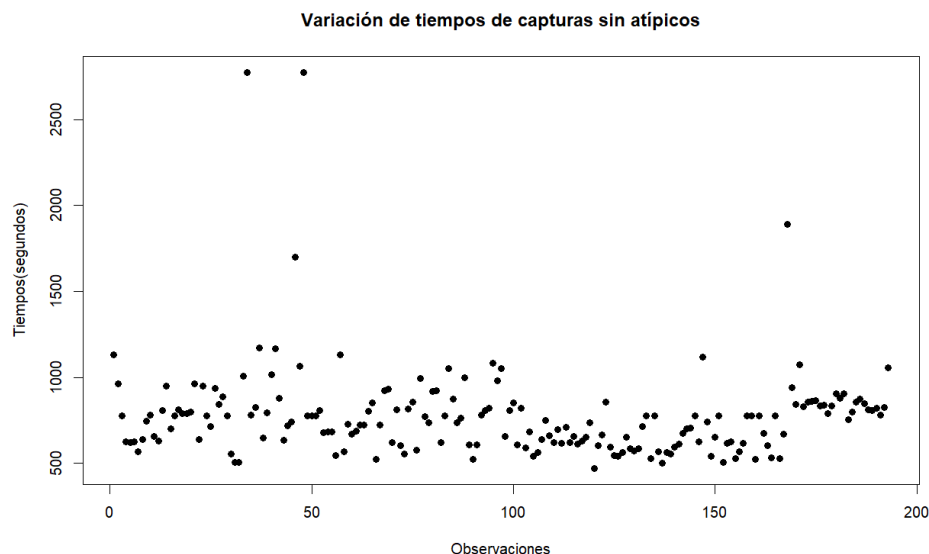
En cuanto al tratamiento de datos perdidos, solo se realizó en los casos donde algunas observaciones dentro del conjunto de datos de un día se habían perdido. Los datos perdidos fueron sustituidos de manera manual por las medias. Los datos de los días 1-3 del proyecto de levantamiento 2 solo fueron analizados para estimar los tiempos del instrumento (t_i), porque se perdieron los datos del cambio de estaciones ($t_{\Delta e}$), que correspondieron a un total de 52 estaciones, que representan el 36.61% de los datos de este caso de estudio. Los datos fueron analizados con CRAN, en la IDE RStudio. El tratamiento de atípicos se realizó con la función *rm.outliers*, en el paquete *outliers* de Komsta (2022). Los atípicos fueron sustituidos por sus respectivas medianas.

Resultados

Las observaciones relacionadas con los tiempos promedios de captura por estación (t_e) se presentan de manera gráfica en la Figura 4. Este tiempo corresponde a la suma del tiempo de captura del instrumento (t_i) más el tiempo de ajuste de cambio de estación ($t_{\Delta e}$). Luego de completar los datos perdidos y ajuste de atípicos, la media encontrada fue de 776s –equivalentes a 12m56s– y la mediana encontrada fue de 750s – 12m30s–. La desviación estándar encontrada fue de 276.51s – 4m:36s–.

Figura 4

Variación de los tiempos promedios de captura por estación (t_e)



Luego se procedió a realizar el análisis solamente del cambio de posición de la estación ($t_{\Delta e}$). Las observaciones se presentan en el diagrama de dispersión en la Figura 5. Luego de realizar el tratamiento de datos perdidos y ajuste de atípicos, la media y la mediana encontrada fue de 164.6 –equivalentes a 2m44s-. La desviación estándar encontrada fue de 132.82s –2m:12s-.

Figura 5

Variación de los tiempos que se requieren para el cambio de posición de la estación ($t_{\Delta e}$).

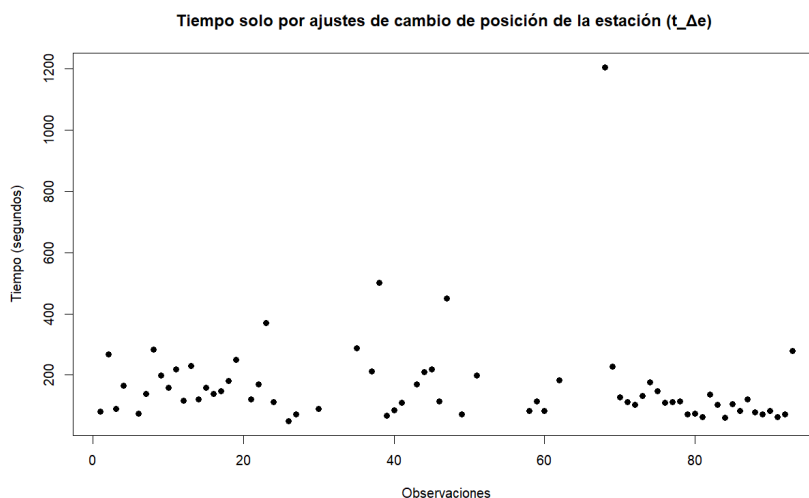
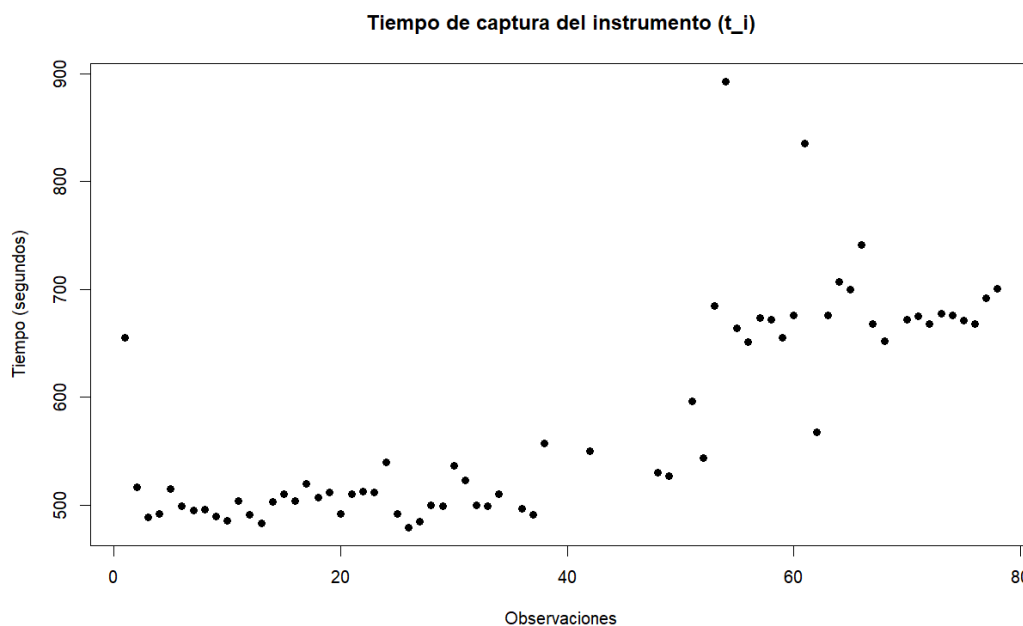


Figura 6

Variaciones en los tiempos de captura del instrumento (t_i).



En cuanto al tiempo que requiere el instrumento para realizar la captura (t_i), luego de realizar las operaciones antes mencionadas para el tratamiento de datos perdidos y de atípicos, la media obtenida fue de 553.5s –9m13s- y la mediana fue de 578.6s –9m38.6s-. La desviación estándar encontrada fue de 89.32s



–1m 29.32s–. En este análisis se encontraron variaciones significativas entre los casos de estudios analizados. Dichas variaciones se pueden observar en la

Figura 6. De la observación 1 a la 54 pertenecen al caso de estudio EBD –que conservan un patrón–, las siguientes corresponden al caso de estudio de CMEAA. Para la muestra de EBD todas las capturas fueron realizadas en exteriores, y en el caso de CMEAA, todas las capturas fueron realizadas en interiores.

Esto condujo a llevar a cabo el análisis de un solo levantamiento con capturas exteriores e interiores. Para este análisis se realizó un análisis de Fisher para dos varianzas, tomando como base datos las capturas de R143. Al categorizar los valores correspondientes a capturas interiores y exteriores se encontró que si existe una diferencia significativa. Se encontró un valor de F (6.542), para un valor crítico de F (1.74), $P(F \leq f)$ una cola (2.08E-07). Esto indica que si existe una diferencia significativa en los tiempos de captura de interiores en relación a las capturas exteriores.

En cuanto al tiempo por capturas de nubes de puntos (t_{pc}), en la variación de las resoluciones configuradas por el instrumento existe la siguiente relación: la resolución media tiene el doble de puntos en cada eje que la resolución baja, la resolución alta tiene el doble que la resolución media y la resolución muy alta tiene 2.5 veces más puntos que la resolución alta. En la Tabla 5 se muestran los datos recuperados del instrumento, que indican la resolución de la PC resultante a una distancia de 100 metros, la cual varía según la resolución seleccionada en el sistema (ver Figura 7).

Tabla 5

Tiempos de captura de un TLS Leica ScanStation C10 en relación a la resolución ajustada

Tipo de resolución	Distancia	Resolución		N° de puntos	Tiempo de captura
		Horizontal	Vertical		
Resolución baja	100 m	0.2m	0.2m	3,141 x 1,178	01 min + 43 seg = 103 s
Resolución media	100 m	0.1m	0.1m	6,282 x 2,356	06 min + 49 seg = 409 s
Resolución alta	100 m	0.05m	0.05m	12,565 x 4,712	27 min + 09 seg = 1,629 s
Resolución muy alta	100 m	0.02 m	0.02 m	31,414 x 11,780	171min +21seg= 10,281 s

Nota: Las columnas “Distancia”, “Horizontal” y “Vertical”, son indicadores de la resolución y deben leerse de la siguiente manera: para una captura en “Resolución baja”, a una distancia de 100 metros del punto donde se coloque la estación, la distancia de un punto a otro en el eje horizontal es de 0.2m y la distancia vertical con el siguiente punto más cercano es de 0.2m. Datos recuperados por los autores desde la observación directa del instrumento.

Para este análisis se calculó el número de puntos registrados por estación según la resolución y el tiempo en segundos (ver Tabla 6). El resultado obtenido es un modelo con un R=1, la función que describe esta relación es $y = (3 \times 10^{-05})x + 5.7373$ (ver Figura 7). Esta función adaptada al problema mencionado donde $t_i = f(x_r)$, se describe como $t_i = (3 \times 10^{-05})(x_r) + 5.7373$.

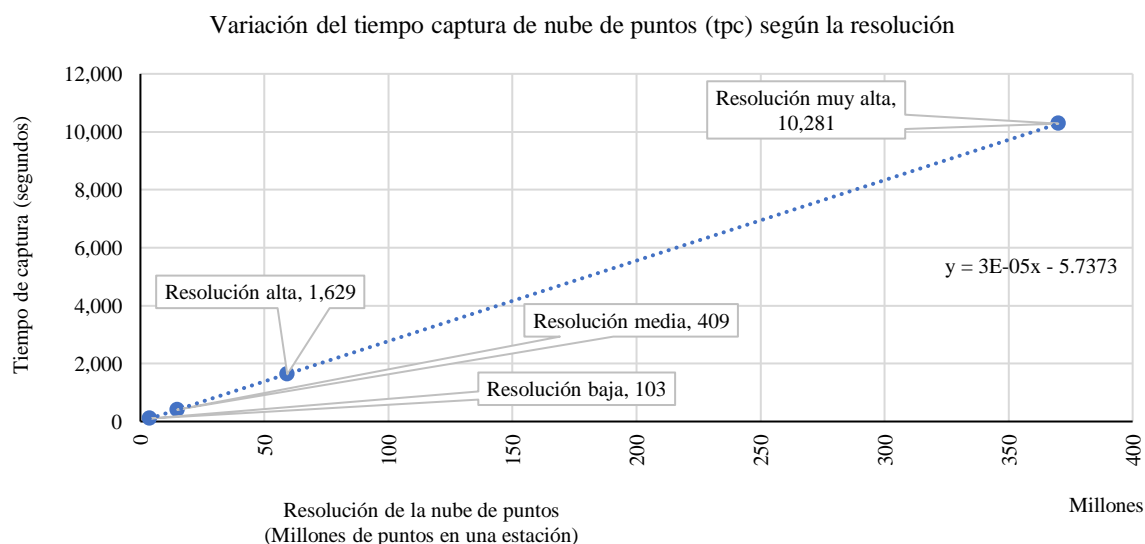
Tabla 6

Relación resolución y tiempo de captura del instrumento.

Resolución	Puntos por estación	Tiempo (seg)
Resolución baja	3,700,098	103
Resolución media	14,800,392	409
Resolución alta	59,206,280	1,629
Resolución muy alta	370,056,920	10,281

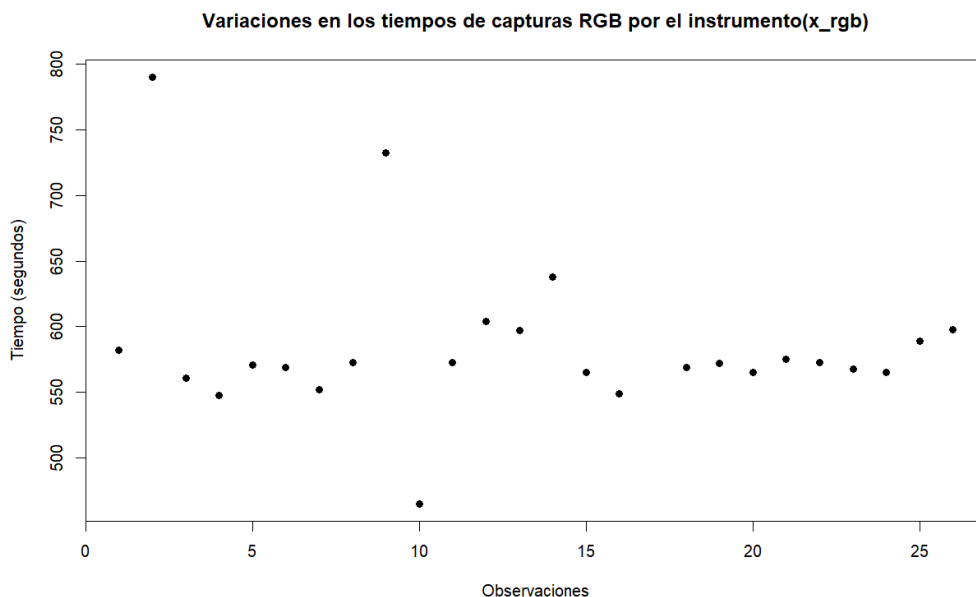


Figura 7
Variación de tiempo de captura de nube de puntos (t_{pc})



El segundo componente para conocer el tiempo de captura del instrumento, es el tiempo de captura de RGB (t_{rgb}). Enseguida se encuentra un diagrama de dispersión representativo del tiempo de captura. La media encontrada fue de 587.7s –9m47s– y la mediana fue de 572.5s –9m32.5s–. La desviación estándar fue de 59.58s (ver Figura 8).

Figura 8
Variaciones en los tiempos de capturas RGB por el instrumento.



Discusión

La variabilidad del tiempo de levantamiento por condiciones mecánicas, aunque según el instrumento indica que son constantes, en la realidad presentan algunas variaciones. Estas se presentan cada vez que el equipo requiere realizar ajustes en el compensador de nivel. Esto ocurre siempre en la primera estación o cuando la superficie en la que se encuentra no es lo suficientemente rígida, tales como duelas de madera, plafones, o placas metálicas ligeras utilizadas en rampas.

La variación del tiempo de captura de nubes de puntos suele ser bastante constante. Sin embargo, se observaron aumentos significativos al analizar la variación del tiempo de captura del instrumento cuando este se realizaba en espacios interiores. Se encontró que las variaciones pueden ser hasta del doble del tiempo. Esto se debe principalmente a la etapa de captura de RGB, ya que a la cámara interna del instrumento le toma más tiempo realizar enfoques en espacios interiores que suelen ser más oscuros que los espacios exteriores.

En cuanto a los tiempos por actividades humanas, se encontró que en realidad este no consume más tiempo que lo que consume el instrumento. En promedio el tiempo humano es de 2 a 3.3 veces el tiempo que se tarda el instrumento en promedio. Aunque existen situaciones que sin duda hacen que el tiempo se incremente, estos casos son atípicos y no suelen ser constantes. Estos están relacionados con la primera captura, con los desplazamientos de los instrumentos a otras zonas, cambio de pisos y cambios de baterías.

Las desviaciones estándares encontradas en su mayoría suelen tener valores altos. Para el caso de las actividades humanas es casi el mismo tiempo que el tiempo promedio. La desviación estándar del tiempo de captura por estación también es relativamente alta, ya que es de un tercio del tiempo promedio.

Los resultados encontrados en esta investigación son contrastantes con los encontrados en la literatura, tal como se encontró en Lee et al. (2013). Primero porque los parámetros encontrados en esta investigación si nos permiten tener estimadores más detallados y además proporcionan criterios para planear los levantamientos de campo. Es así como la hipótesis planteada, entorno a que *el tiempo de un levantamiento de campo con un TLS se puede estimar con un nivel alto de precisión, conociendo las condiciones mecánicas y condiciones humanas del trabajo de campo*, queda comprobada.

A manera de conclusión, uno de los problemas abiertos que queda por explorar es la relación de tiempo que lleva el registro-unión de nubes de puntos en gabinete en comparación con el trabajo de campo, ya que en Idrees y Pradhan (2016, p. 80) se encontró una relación de 1:3. También queda por explorarse ¿qué tanto influye el uso de targets en el registro manual de PC de estaciones de TLS?

Será necesario incluir en estudios ulteriores, como afecta la caída de rendimiento de trabajo en el tiempo. Como parámetro de partida se deja abierto el siguiente planteamiento. El tiempo de la caída de rendimiento por cansancio está en función de cómo se varía el rendimiento por estación en el transcurso de las horas de trabajo durante una jornada ($\frac{x_{\Delta r}}{t_{\Delta h}}$) o la variación del rendimiento promedio con el paso de los días de levantamiento ($\frac{x_{\Delta r}}{t_{\Delta d}}$). Un estimador medio es la suma del tiempo de la cuadrilla entre el número de estaciones en el día de trabajo ($\sum_{n=1}^k \frac{t_{\Delta e n}}{k}$).



Agradecimiento

Este artículo fue elaborado en el marco del proyecto SIP No 20230014.

Créditos por edificio registrado.

Regina 143 (R143), Ciudad de México. Planeación: Adrián Herrera-Flores y Luis Carlos Cruz-Ramírez. Trabajo de campo: Luis Carlos Cruz-Ramírez, Adrián Herrera-Flores, Diana Monserrat Veloz-García, Adrián Alejandro Maldonado-Vega, Lizeth García-García, Víctor Hugo Alejo-García, Francisco López-Campo y Cinthia Cruz-Martínez. Registro: Valentín Uribe-Piedras.

Escuela Belisario Domínguez (EBD), Ciudad de México. Planeación: Víctor Hugo Alejo-García y Luis Carlos Cruz-Ramírez. Trabajo de campo: Víctor Hugo Alejo-García, Eli Álvaro Eliuh Camargo-Suárez, Luis Carlos Cruz-Ramírez, Francisco López-Campo, Lizeth García-García, Cinthia Cruz-Martínez, Fernando Ortega Malpica, Melanie Aguilar-Flores, Jessica Samantha Romero-Coss, Adrián Herrera Flores. Registro: Víctor Hugo Alejo-García y Valentín Uribe-Piedras.

Capilla del Museo ExTeresa Arte actual (CMEAA), Ciudad de México. Trabajo de campo: Víctor Hugo Alejo-García, Eli Alvaro Eliuh Camargo Suárez y Luis Carlos Cruz-Ramírez. Registro: Luis Carlos Cruz-Ramírez y Fernando Ortega-Malpica.

Referencias

- Abdel-Bary Ebrahim, M. (2011). *3D laser scanners: History, applicatiосn and future*. Assiut, Egypt: Assiut University.
- Aguilar, F. J., Nemmaoui, A., Peñaver, A., Rivas, J. R., & Aguilar, M. A. (2019). Developing Allometric Equations for Teak Plantations Located in the Coastal Region of Ecuador from Terrestrial Laser Scanning Data. *Forest*, 10(1050). doi:10.3390/f10121050
- Castagnetti, C., Bertacchini, E., Capra, A., & Dubbini, M. (2012). Terrestrial Laser Scanning for Preserving Cultural Heritage: Analysis of Geometric Anomalies for Ancient Structures. *FIG Working Week 2012*. Rome, Italy. Obtenido de <https://iris.unimore.it/handle/11380/746897>
- Dallas, R. (2003). Measured Surveys of Historic Buildings: User Requirements and Technical Progress. *Journal of Architectural Conservation*, 9(2), 58-81. doi:10.1080/13556207.2003.10785343
- Eld, M., Mizerák, M., & Trojan, J. (2018). 3d Laser Scanner: History and Applications. *Acta Simulatio*, 1-5. doi:10.22306/asim.v4i4.54
- González-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Gómez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J., & Gutierrez-Alonso, G. (2009). 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art. *Sensors*, 9(2), 1108-1127. doi:10.3390/s90201108
- Idrees, M. O., & Pradhan, B. (2016). A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. *International Journal of Speleology*, 45(1), 71-88. doi:10.5038/1827-806X.45.1.1923
- Klapa, P., Mitka, B., & Zygmunt, M. (2017). Application of Integrated Photogrammetric and Terrestrial Laser Scanning Data to Cultural Heritage Surveying. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 95(2017). doi:10.1088/1755-1315/95/3/032007
- Komsta, L. (2022). *Package 'outliers'*. Repository CRAN. Obtenido de <https://search.r-project.org/CRAN/refmans/outliers/html/rm.outlier.html>
- Kwoczyńska, B., Litwin, U., Piech, I., Obirek, P., & Ślédź, J. (2016). The Use of Terrestrial Laser Scanning in Surveying Historic Buildings. *2016 Baltic Geodetic Congress*. Poland: IEEE. doi:10.1109/BGC.Gematics.2016.54
- Lee, S. Y., Majid, Z., & Setan, H. (2013). 3D DATA ACQUISITION FOR INDOOR ASSETS USING TERRESTRIAL LASER SCANNING. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and*



- Spatial Information Sciences, Volume II-2/W1, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop*. Istanbul, Turkey.
- Mat-Zam, P., Fuad, N., Yusoff, A., & Majid, Z. (2018). EVALUATING THE PERFORMANCE OF TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR LANDSLIDE MONITORING. *International Conference on Geomatics and Geospatial Technology*. Kuala Lumpur, Malaysia. Obtenido de <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-35-2018>
- Mukupu, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., & Al-Manasir, K. (2016). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*. doi:10.1080/00396265.2015.1133039
- Pritchard, D., Sperner, J., Hoepner, S., & Tenschert, R. (2017). Terrestrial laser scanning for heritage conservation: the Cologne Cathedral documentation project. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, págs. 213-220. Ottawa, Canada. doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-213-2017
- Remondino, F. (2011). Heritage Recording and 3D modeling with photogrammetry and 3d scanning. *Remote Sensing*, 1104-1138. doi:10.3390/rs3061104
- Ryding, J., Williams, E., J. Smith, M., & Eichhorn, M. P. (2015). Assessing Handheld Mobile Laser Scanners for Forest Surveys. *Remote sensing*, 2015(7), 1095-1111. doi:10.3390/rs70101095
- Sirmacek, B., Shen, Y., Lindenbergh, R., Zlatanova, S., & Diakite, A. (2016). COMPARISON OF ZEB1 AND LEICA C10 INDOOR LASER SCANNING POINT CLOUDS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume III-1, 2016*. Prague, Czech Republic. doi:10.5194/isprsannals-III-1-143-2016
- Soudarissanane, S. S., & Lindenbergh, R. C. (2011). Optimizing terrestrial laser scanning measurement setup. *ISPRS Workshop Laser Scanning*. Calgary, Canada. doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-127-2011
- Suchocki, C., Damięcka-Suchocka, M., Katzer, J., Janicka, J., Rapinski, J., & Stałowska, P. (2020). Remote Detection of Moisture and Bio-Deterioration of Building Walls by Time-Of-Flight and Phase-Shift Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensing*. doi:10.3390/rs12111708
- Tremblay, J.-F., & Béland, M. (2018). Towards operational marker-free registration of terrestrial lidar data in forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146(2018), 430-435. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.10.011
- Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2022). Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. doi:10.3390/s22010265

¹ La resolución de una nube de puntos (PC) aumenta al aumentar la densidad de puntos. Por lo que en adelante cuando se mencione una mejora de resolución en la PC se hace referencia a una mejora en la densidad.

² Este también puede encontrarse en la literatura como tiempo de observación del instrumento (*observation time*).

³ Pero esta relación no tiende al infinito, tiene límites, dentro de los parámetros configurables por el instrumento.

⁴ Nota del revisor: También puede obtenerse un valor optimizado de estaciones con la aplicación de diagramas de Isovist de Space Syntax.

⁵ Nota del revisor: Se puede proponer utilizar trípodes para cámaras de uso pesado, estos trípodes limitan la apertura máxima. Facilita mucho el levantamiento en superficies lisas. En contraste, el peso del instrumento limita el rendimiento de la cuadrilla y dificulta el proceso de cambio de estación.

⁶ Los autores no dan detalles las características del equipo de cómputo en la que se procesaron los datos, ni el dominio técnico de quien elaboró el proceso de registro. El lector debe considerar contextualizar el dato en el momento de la publicación, ya que los procesadores y tarjetas de video tienen un rol representativo en la manipulación de modelos 3D.

