



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE AGRIMENSURA

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRIMENSOR

**DISEÑO DE METODOLOGÍA DE
TRABAJO PARA EL ESCaneo CON
TECNOLOGÍA LÁSER 3D, APLICADA
A LA ARQUITECTURA PATRIMONIAL**

MATEOS VIERA RODRÍGUEZ – CI: 4.236.500-8

TUTOR: PROF. ING. AGRIM. RICARDO YELICICH PELAEZ

Montevideo, Uruguay

Mayo, 2019

PÁGINA DE APROBACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba la Tesis de Investigación:

Título

.....
.....

Autor/s

.....

Tutor

.....

Carrera

.....

Puntaje

.....

Tribunal

Profesor.....(Nombre y firma)

Profesor.....(Nombre y firma)

Profesor.....(Nombre y firma)

Fecha

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo general del trabajo	14
2.2. Objetivo específico del trabajo	14
2.3. Alcance	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1. Tecnología láser escáner	15
3.1.1. Historia del láser	15
3.1.2. Fundamentos del láser escáner	16
3.2. Clasificación de equipos de escaneo	23
3.2.1. Clasificación por contacto	23
3.2.2. Clasificación por sistema de medida	23
3.2.3. Clasificación por sistema de barrido	39
3.2.4. Clasificación por posición	41
3.3. Aplicaciones del escaneo láser	42
3.3.1. Topografía	43
3.3.2. Geología y minería	44
3.3.3. Patrimonio cultural y arquitectura patrimonial	46
3.3.4. Obras civiles e infraestructuras	47
3.3.5. Plantas industriales	47
3.3.6. Prevención de incendios	48
3.3.7. Medición de volúmenes en canteras	49
3.3.8. Temblores y terremotos	50
3.3.9. Derrumbes y hundimientos	51
3.3.10. Entretenimiento	52
3.3.11. Catastro	52
3.3.12. Subestaciones y líneas de alta tensión	53
3.3.13. BIM – Building Information Modeling	54
3.4. Metodología General	55

3.4.1. Planificación	56
3.4.2. Trabajo previo en campo.....	63
3.4.3. Toma de datos	68
3.4.4. Preparación de los datos.....	69
3.4.5. Registro y georreferenciación de los escaneos.....	70
3.4.6. Procesamiento de los datos	74
3.4.7. Control de calidad.....	77
3.5. Análisis de los errores	77
3.5.1. Errores instrumentales	78
3.5.2. Errores relacionados con los objetos.....	83
3.5.3. Condiciones ambientales	85
3.5.4. Errores metodológicos.....	87
4. ESTADO DEL ARTE.....	88
4.1. Antecedentes y aplicaciones de esta tecnología en Uruguay.....	88
4.1.1. La Calera de las Huérfanas.....	89
4.1.2. Iglesia de Cristo Obrero – Estación Atlántida.....	90
4.2. Antecedentes y aplicaciones de esta tecnología en el mundo	92
4.2.1. Patrimonio Cultural	93
4.2.2. Catedral San Miguel Arcángel (Vitoria)	94
4.2.3. Modelización 3D de la fachada principal del Monasterio de Santiago de Uclés	96
4.2.4. Obtención del modelo tridimensional de la puerta latina del S. XVI D.C. mediante equipo láser escáner terrestre	98
5. ANÁLISIS PRÁCTICO Y PRUEBAS DE CAMPO.....	100
5.1. Equipo utilizado y sus características	100
5.1.1. Equipo utilizado en el relevamiento	100
5.1.2. Características	101
5.1.3. Configuración de los parámetros de escaneo	102
5.2. Software	106
5.3. Análisis previo.....	106
5.4. Pruebas de campo y análisis de los resultados.....	110
5.4.1. Prueba interior - Instituto de Agrimensura.....	111
5.4.2. Prueba exterior - Fuera de Facultad de Ingeniería.....	117

5.4.3. Comparación de coordenadas obtenidas en las pruebas.....	120
5.5. Metodología propia	123
5.5.1. Planificación	123
5.5.2. Trabajo previo en campo.....	130
5.5.3. Toma de datos	132
5.5.4. Preparación de los datos.....	142
5.5.5. Registro de los escaneos	145
5.5.6. Procesamiento de los datos y análisis de los resultados.....	163
6. CONSIDERACIONES FINALES.....	176
7. CONCLUSIONES	178
BIBLIOGRAFÍA.....	181
ANEXO A.....	185
ANEXO B.....	189
ANEXO C.....	211

RESUMEN

A lo largo de los años ha sido notoria la constante evolución y actualización, tanto del equipamiento como de las metodologías usadas en el ejercicio de la profesión del Ingeniero Agrimensor. De la mano de los avances en la tecnología, las últimas décadas registran la mayor concentración de estos cambios. Dichos avances nos permiten contar con herramientas más rápidas y precisas, permitiendo agilizar el proceso de recolección de información, pero principalmente maximizar la cantidad de datos que se recogen en cortos periodos de tiempo, con altos grados de precisión. En particular, a comienzos de ésta década, ingresaron al mercado uruguayo los equipos Escáner Láser Terrestres 3D (TLS), siendo su utilización lentamente cada vez más aceptada. Gracias a su gran versatilidad permiten su utilización en múltiples tareas relacionadas a la Agrimensura en nuestro país; aunque también han sido objeto de críticas, ya sea por falta de conocimiento sobre los mismos, así como por falta de confiabilidad en la precisión de sus resultados.

El objetivo principal de este trabajo es definir una metodología que contenga los lineamientos necesarios para el correcto uso y aplicación de los equipos Escáner Láser Terrestres 3D. En particular, la utilización de estos a la conservación y documentación del patrimonio construido y a la arquitectura patrimonial.

Se presentará la aplicación de esta metodología a un caso real y actual de conservación y documentación del patrimonio construido. Para el examen de esta situación real, se estudiaron distintos métodos de registro de los escaneos analizando los errores asociados a cada etapa del proceso, así como los errores luego de registrar todos los escaneos y obtener la nube de puntos del proyecto.

Palabras clave

Escáner láser terrestre 3D, Arquitectura Patrimonial, Patrimonio Construido, Nube de puntos.

1. INTRODUCCIÓN

La documentación geométrica obtenida mediante la tecnología láser escáner 3D, es un aporte fundamental en los trabajos de conservación y rehabilitación de construcciones históricas y sitios arqueológicos. Estos equipos permiten realizar un registro *in situ* y posterior documentación precisa y en detalle, para obtener resultados fiables y ajustados a la realidad. Mediante los métodos utilizados con esta tecnología se puede determinar la ubicación, la forma, el tamaño; permitiendo también identificar las distintas patologías que puedan afectar al objeto, como lo son los problemas estructurales, las deformaciones, etc.

Una característica particular de esta tecnología aplicada al relevamiento de construcciones y sitios históricos, es la posibilidad de realizar el registro geométrico de objetos sin necesidad de contacto, constituyendo una ventaja en las tareas de rehabilitación y reconstrucción de los mismos. Para dar un ejemplo, a pocos días de la presentación formal de este documento se conoció la noticia internacional de la pérdida de parte de la histórica edificación de la catedral de Notre Dame en París, Francia. Sin dudas la aplicación de equipos con tecnología láser escáner 3D será una herramienta básica para la reconstrucción; ya que en el año 2010 fue relevada con un Leica ScanStation C10, equipo escáner láser 3D con cámara incorporada (equipo de características similares al utilizado en este proyecto). Tener este tipo de información sobre cualquier estructura o construcción considerada como patrimonial o cultural resulta de vital importancia para su reconstrucción.

Pero la documentación del patrimonio cultural no consiste únicamente en la toma *in situ* de los datos necesarios para su registro en detalle, sino que también involucra los procedimientos necesarios para procesar información recogida, su presentación posterior y él o los archivos de los datos imprescindibles y necesarios para representar la forma, volumen y tamaño del elemento documentado en un determinado momento de la vida de este.

Es habitual la exigencia de trabajar con rapidez y precisión en lo que refiere a la documentación de los elementos patrimoniales, para ello, hoy en día se trabaja con los métodos topográficos tradicionales y principalmente en nuestro país con la fotogrametría. Además, aunque la mayor parte de los resultados necesarios en los levantamientos se orientan a representaciones planimétricas en 2D (plantas, secciones, cortes), cada

vez se hace más necesario obtener un registro en 3D con más detalle y con ello, un modelo tridimensional que represente gráficamente tanto la geometría del edificio como el aspecto y textura de sus distintas caras y detalles. En este sentido se ha avanzado en las últimas décadas en la aplicación y las técnicas de fotogrametría, y más recientemente en la captura de nubes de puntos por medio de tecnologías láser escáner 3D, aunque en menor proporción.

En cuanto a los demás problemas de la ingeniería, esta nueva tecnología tardó más tiempo en comenzar a utilizarse de forma habitual, pero en la actualidad es una de las disciplinas que más está aprovechando estas nuevas herramientas. Las posibilidades de uso son innumerables, desde el diseño de pequeñas piezas industriales, hasta el registro geométrico de superestructuras de ingeniería para su ejecución y posterior control.

En la actualidad, las tecnologías láser escáner están demostrando un avanzado ritmo de crecimiento en calidad, tanto en instrumental como en metodologías de trabajo y software de tratamiento de datos, permitiendo un gran abanico de posibilidades para la obtención de modelos tridimensionales de cualquier tipo, con gran precisión y exactitud.

Los levantamientos topográficos que se realizan con instrumentos de medición del tipo láser escáner requieren de procesos para el tratamiento de información que difieren de los utilizados tradicionalmente en un proyecto de topografía. En estos relevamientos, se obtienen muchos datos en poco tiempo; en cada escaneo se obtiene información de millones de puntos, los cuales no tienen por qué estar vinculados con puntos de otros escaneos, siendo imprescindible realizar un procesamiento cuidadoso y tener control sobre los resultados obtenidos.

Para ligar o vincular los escaneos obtenidos mediante la tecnología láser escáner 3D es muy importante trabajar con un solape adecuado y, sobre todo, con los puntos en común entre ellos. Si no se logra en campo suficientes puntos en común para luego ligar los escaneos, no se lograrán resultados precisos. Los softwares aplican sus algoritmos luego de encontrar puntos, geometrías o elementos homólogos en los distintos escaneos, requiriendo especial cuidado y control por parte del usuario. Aunque se trabaje con softwares reconocidos, aceptados y que contengan buenos algoritmos, pueden (y es común que ocurra) cometer errores, como por ejemplo, emparejar elementos de manera incorrecta. Además, el registro de escaneos puede hacerse por varios métodos, pero para todos

los casos será necesaria la interpretación correcta de los resultados que arroja el software.

Para este documento se realizaron diferentes emparejamientos de escaneos para el registro, buscando mejor precisión; a su vez se probaron todos los métodos que ofrecía el software para realizar el registro.

Todas las actividades que se entienden necesarias para lograr un correcto procedimiento de trabajo con equipos láser escáner 3D se dan a conocer en detalle en este trabajo, con el fin de armar una metodología que describa el flujo necesario de las mismas, intentando generar un complemento a los conocimientos actuales. Ingenieros Agrimensores y otros profesionales que utilizan esta tecnología no cuentan actualmente con asignaturas ni cursos académicos abocados a dicha problemática; lo que se busca es que el lector sea capaz además de entender cómo funcionan, porqué son necesarios y cuáles podrían ser sus posibles usos o aplicaciones. Por lo que el objetivo es la definición de una guía o protocolo general de trabajo aplicando la tecnología de los equipos láser escáner 3D con relación a la arquitectura patrimonial o patrimonio construido.

Además, dicha guía metodológica se aplicará para un caso particular de conservación y documentación del patrimonio construido. El lugar elegido se sitúa en el barrio Capurro de la ciudad de Montevideo, Uruguay, allí se ubican los restos del muro perimetral de lo que se conocía antiguamente como “Caserío de los Negros” o “Caserío de Filipinas”, donde actualmente se encuentran emplazadas la Escuela N° 47 y el Jardín de Infantes (Escuela N° 237).

Contexto histórico

“Caserío de los negros”

La siguiente reseña histórica, descripción y ubicación del “Caserío de los Negros” fue extraída del documento “El Caserío de Filipinas de Montevideo”, publicado en la revista de Arqueología Histórica Argentina y Latinoamericana (Número 8 (2)) año 2014. Por Roberto Bracco Boksar y José M. López Mazz.

(<http://www.universidad.edu.uy/renderResource/index/resourceId/52135/siteId/1>)

Montevideo, durante las últimas dos décadas del siglo XVIII, en el contexto de las reformas borbónicas, se transforma en uno de las principales y luego,

por orden de la Corona española en 1791, en el único puerto de ingreso de esclavos al Río de la Plata, Chile y Perú (Isola 1975: 53-59).

El Cabildo de Montevideo, en el año 1787, ante la proximidad de la llegada de dos fragatas inglesas con 1.000 esclavos, ordena a la Compañía de Filipinas, a quien se le ha otorgado permiso de introducir de 5.000 a 6.000 esclavos por año, durante dos años, construir “habitación bastante para los negros [...] en la boca del Arroyo Miguelete, hacia la parte del Cerro, que es el paraje que está a la costa del mar y se nombra Jesús María” (Studer 1958: 273). Se actúa ante la necesidad de disponer de un espacio que «resguardara» a los esclavos, como también a los vecinos de las enfermedades traídas por ellos.

El propietario de las tierras donde inicialmente se ordenó construir el depósito, argumentando que perjudicaría a su hacienda, labranza y ganado, logra que el Cabildo lo reubique en la boca del Miguelete, en la costa de la playa. Se concreta el primer hecho que inicia la confusión sobre su emplazamiento.

En consecuencia, el “Caserío de Filipinas” o “Caserío de los Negros” se erige en el litoral este de la ensenada, constituyéndose en la edificación más grande de extramuros, en dimensión física y económica. Es el incremento del comercio que integra la trata, el que lleva a la prosperidad, a finales del siglo XVIII, a aquella ciudad puerto que había nacido en 1724-1726, como respuesta al escenario geopolítico determinado por la incesante expansión portuguesa. Entre 1786 y 1812, al menos 60.000 esclavos fueron traídos al Río de la Plata desde África y Brasil (Borucki 2008).

El terreno del Caserío

“El análisis de los documentos que llevó a la ubicación del caserío fue en sus comienzos un aspecto lateral de una investigación de la evolución histórica de la ensenada de Montevideo, en el marco de un Estudio de Impacto Arqueológico (Bracco 2002). A partir de los prometedores resultados iniciales se comenzó a compilar más información, transformándose en un sólido núcleo de antecedentes para plantear un abordaje desde la arqueología.”

El análisis de la ubicación del Caserío consistió en una ardua tarea de estudio, recopilación, digitalización, restitución de planos de Montevideo y

su ensenada. Partiendo de planos desde fines del siglo XVIII, hasta escrituras actuales de las propiedades situadas hoy allí.

“El resultado más relevante en lo arqueológico, fue reconocer que extensos lienzos del muro perimetral de ambos centros educativos presentan evidencias de pertenecer al muro exterior del “caserío”. Estos se desarrollan sobre la actual calle Capurro, Juan María Gutierrez y en el linde entre el Jardín de Infantes y el Parque Capurro. Las pruebas que llevan al diagnóstico son:

Según la descripción del Isidoro de María (1958: 262 y ss.) el caserío “ocupaba una manzana de terreno bajo muro” de ladrillo (...“el ladrillo del cercado”...). Los mampuestos del muro y sus pilares son ladrillos de color naranja con núcleo reducido, son del tipo de “ladrillo de campo”; presentando, dentro de la forma prismática, curvaturas e irregularidades en bordes y vértices. Sus dimensiones promedio son 36 cm de largo, 17 cm de ancho y 5 cm de espesor. Aunque no se dispone para Montevideo de una tipología de ladrillos para el período colonial las características tecnológicas y dimensiones son consistentes con los utilizados en construcciones del siglo XVIII en otras partes del Río de la Plata (ver, por ejemplo: Moreno 1995; Uribe 2005).

El muro tiene un ancho promedio de 40 cm. Actualmente su altura no es mayor a un metro. Posiblemente, al cambiar la función del recinto, fue desmontado en forma parcial para permitir visibilidad desde fuera y para dentro del predio. También sufrió reparaciones en su revoque y en múltiples oportunidades fue pintado. Presenta contrafuertes de 60 cm por 60 cm, distribuidos cada 4 varas (= un estadal). El aparejo es muy singular, integrando lineadas a tizón, a sogá con liga de cal y arena, y a sardinel con liga de barro.

El estudio comparativo de los planos de inicios y mediados del siglo XIX con los actuales muestra que el predio no tuvo modificaciones en sus límites en el sector ocupado por la escuela y el jardín de infantes; el muro sigue dichos límites y apoya directamente sobre sustrato natural, no habiéndose hallado ninguna evidencia, por debajo, de estructuras anteriores.”

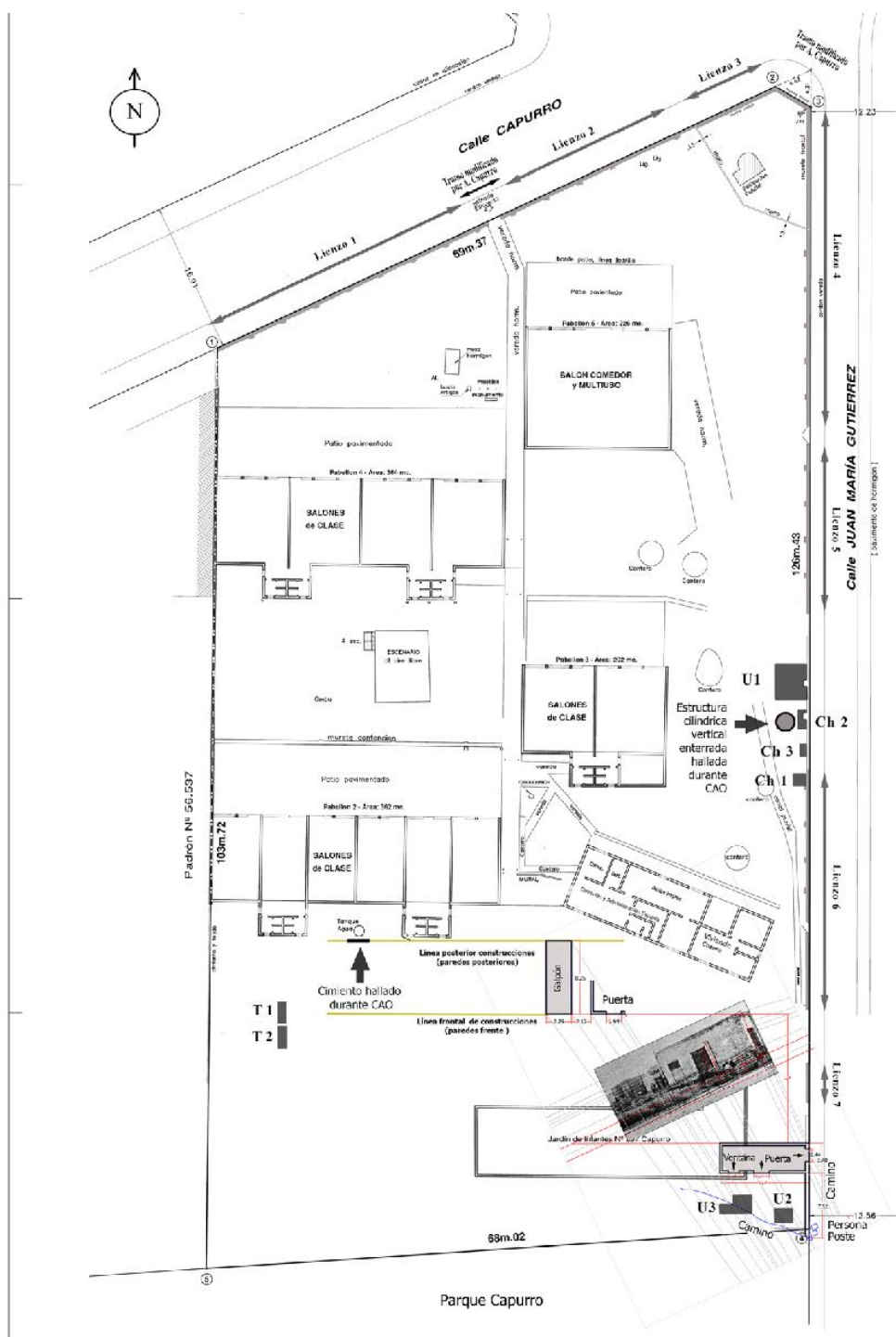


Figura 1.1: Plano actual de la escuela y jardín de Infantes donde se indican: 1.- los lienzos del muro perimetral que corresponden al caserío; 2.- los sectores de dicho muro modificados por A. Capurro aproximadamente en 1880; 3.- los sondeos y excavaciones arqueológicas (U1, U2, U3, Ch1, Ch2, Ch3, T1 y T2); 4.- la cisterna y del cemento hallados durante el Control Arqueológico de Obra. La superposición de la planta de las construcciones del "caserío" reconstruidas a partir de la foto, permite observar que el último cimiento referido coincide en ubicación y dirección con la línea posterior de las construcciones. (Fuente: L. Mazz y R.Bracco, 2014).

Consideraciones

“El análisis sistemático de documentación histórica y particularmente de documentación dominial, llevó a reconocer el espacio que actualmente está delimitado por la calle Capurro, Juan María Gutiérrez y el límite este del Parque Capurro como el lugar donde se encontraba emplazado el Caserío de Filipinas de Montevideo. Hoy una parte importante de dicho predio está ocupado por una escuela y un jardín de infantes públicos, donde dominan áreas no construidas.

Dos instancias de relevamiento e intervenciones arqueológicas en dichas áreas permitieron identificar estructuras del depósito colonial que se encuentran por encima y por debajo del nivel del suelo. Destacándose parte de su muro perimetral que, en extensos tramos, integra el actual muro perimetral de la escuela y del jardín de infantes. También se hallaron cimientos y una cisterna, cuyos emplazamientos los señalan como restos del caserío. El conjunto de esta información conforma un corpus de base para futuras investigaciones del sitio arqueológico, como también para la puesta en valor y gestión patrimonial del lugar, contemplando todas las dimensiones e implicancias socioculturales que su historia integra.”



Figura 1.2: Vista actual de la ubicación del Caserío, parte de la manzana catastral número 2389. (Fuente: Google Earth)

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general del trabajo

El objetivo general del trabajo será definir una metodología a aplicar para el uso de equipos láser escáner topográficos terrestres 3D para la conservación y documentación del patrimonio construido.

2.2. Objetivo específico del trabajo

El objetivo específico del trabajo será el análisis de los errores en el registro de la nube de puntos usando los distintos métodos luego de aplicar la metodología para lograr la identificación y documentación de los restos de la antigua construcción denominada “Caserío de los Negros”.

2.3. Alcance

Estudiar la metodología y redactar lineamientos de trabajo, así como planes futuros. Estos lineamientos deben contener los tópicos y temas imprescindibles que aseguren una correcta y eficiente realización de los trabajos con equipos láser escáneres topográficos 3D.

3. MARCO TEÓRICO

Por tratarse del primer proyecto de grado en Uruguay referente a este tema, se hará hincapié en el marco teórico revisado, tratando de abarcar muchos temas referentes a la tecnología láser y a los equipos de escaneo, además de sus usos y aplicaciones.

3.1. Tecnología láser escáner

3.1.1. Historia del láser

La historia del láser se remonta al año 1916, cuando Albert Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada de los átomos, según el cual un átomo recibe luz de la misma longitud de onda de la que puede emitir, es estimulado a emitirla en ese instante.

El siguiente trabajo fundamental para la evolución posterior del láser fue el del bombeo óptico, desarrollado a principios de la década del cincuenta por Alfred Kastler (1902-1984), nacido en Guewiller, Alsacia, y educado en Colmar, entonces posesión alemana. El trabajo de Kastler sobre el bombeo óptico, basado en técnicas de resonancias ópticas, fue desarrollado con la colaboración de su alumno Jean Brossel, de la École Normale Supérieure de París, desembocando en el descubrimiento de métodos para subir el nivel energético a los átomos; dicho de otro modo, métodos para que los electrones de los átomos suban al nivel deseado, utilizando efectos de resonancia óptica. Estos métodos recibieron el nombre de bombeo óptico por el mismo Kastler.

Charles H. Townes en 1951 se encontraba muy preocupado por encontrar un método para producir ondas de radio de longitud de onda muy corta, del orden de milímetros, y se le ocurrió un método para producir microondas usando el fenómeno de la emisión estimulada, basándose en la predicción de Einstein y en los estudios sobre bombeo óptico que realizó Alfred Kastler. La comprobación de su idea se la propuso como tesis doctoral a su alumno James P. Gordon, en la Universidad de Columbia. Les costó tres años construir, con la colaboración de Helbert Zeiger, un dispositivo que

amplificaba microondas mediante emisión estimulada, al que llamaron máser.

(http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/sec_7.htm)

En septiembre de 1957, Townes, junto con Arthur Schowlow, comenzaron a pensar en el problema de construir ahora otro dispositivo similar al máser, pero que emitiera luz en lugar de microondas. Es interesante conocer la anécdota de que Townes solicitó una patente para artefactos que emitieran luz por el mecanismo de emisión estimulada, y de que poco después lo hizo también otro investigador de la misma Universidad de Columbia, llamado Gordon Gould, reclamando prioridad. Hay algunos que creen que Gould tenía razón. Lo cierto es que nadie niega que se hicieran algunos descubrimientos similares. Hasta la fecha sigue el pleito legal sobre quién tiene la razón.

Finalmente, Theodore H. Maiman logró construir el láser en 1960 en los laboratorios de investigación de la compañía aérea Hughes, en Malibú, California.

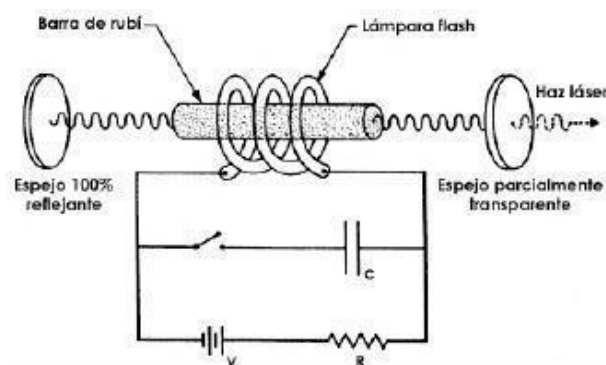


Figura 1.3: Esquema de un láser. (Fuente: J. Lerma, 2008)

3.1.2. Fundamentos del láser escáner

1. El espectro electromagnético y la luz

El espectro electromagnético nos es más familiar de lo que podría pensarse. Las microondas que utilizamos para calentar la comida y para el teléfono celular, por ejemplo, utilizan partes del espectro electromagnético. La razón por la que vemos los objetos es porque emiten, reflejan o

transmiten una parte de la franja visible del espectro que llamamos luz. Esta parte del espectro electromagnético está compuesta por los colores que podemos ver en el arco iris (desde los rojos y naranjas hasta los azules y violetas).

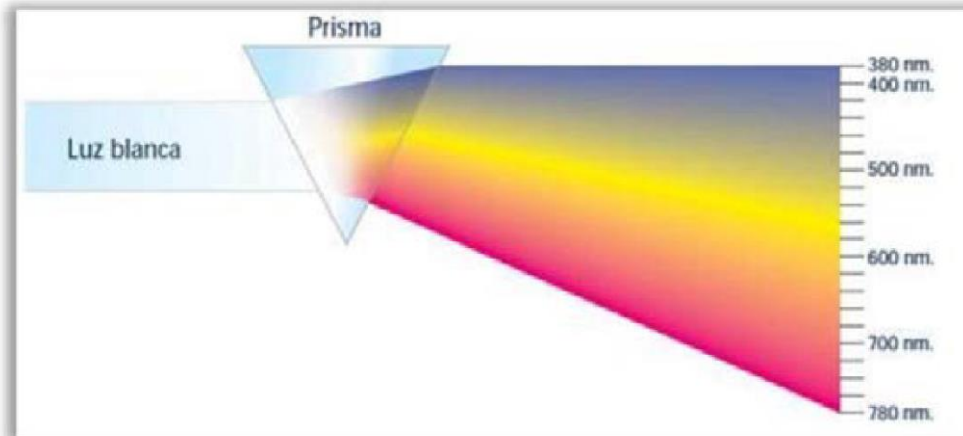


Figura 1.4: La luz y su descomposición de ondas visibles. (Fuente: F. Romeral, 2014)

Cada uno de los colores corresponde a una longitud de onda diferente. Esto se puede observar si hacemos pasar luz blanca a través de un prisma de vidrio. La luz violeta es desviada -refractada- más que la roja debido a que tienen una longitud de onda más corta, y es por ello por lo que vemos el efecto del arcoíris.

Las longitudes de onda del espectro electromagnético varían desde las ondas largas de radio (del tamaño de edificios) hasta los cortos rayos gamma más pequeños que el núcleo de un átomo.

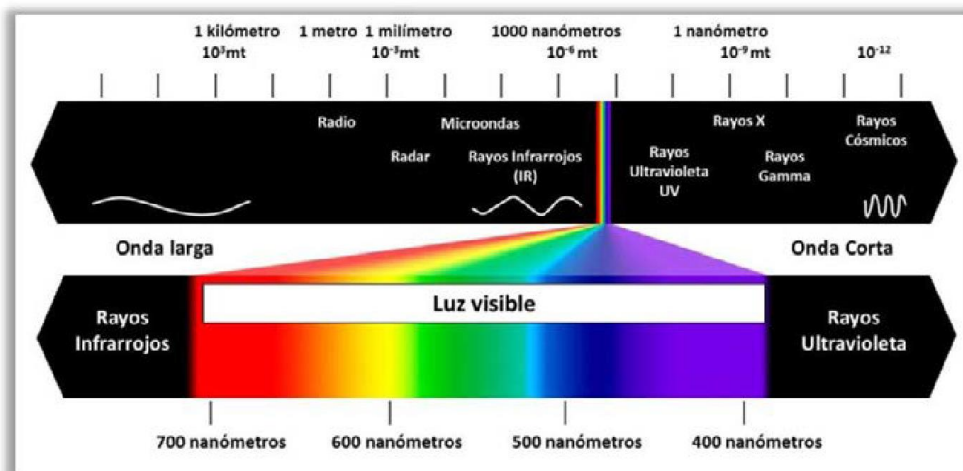


Figura 1.5: El espectro electromagnético. (Fuente: S.Casas, 2015)

El espectro electromagnético se puede expresar en términos de energía, longitud de onda o frecuencia. Estas magnitudes están relacionadas mediante las siguientes ecuaciones:

$c = v \cdot \lambda$; despejando v tenemos:

$v = c / \lambda$, por último:

$$E = h \cdot v$$

Dónde: c = velocidad de la luz = 299.792.458 m/s

h = constante de Planck = $6.626069 \cdot 10^{-34}$ J*s.

v = frecuencia

λ = longitud de onda.

De este modo, las frecuencias altas del espectro tienen longitudes de onda cortas y energía alta, y viceversa.

2. Láseres

A un instrumento que sea capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro se le llama láser. Un láser típico emite luz en un estrecho y poco divergente haz de luz de longitud de onda bien definida (correspondiente a un color particular si el láser opera en el espectro visible). Esto contrasta con otra fuente de luz como la bombilla incandescente, que emite luz con una gran abertura y con un amplio espectro de longitudes de onda, lo que hace que veamos la luz de la bombilla de color blanco y no solo en una dirección. Estas propiedades se conocen con el término coherencia.

Los láseres son similares a los transistores, generan o amplifican luz al igual que los transistores generan o amplifican señales electrónicas de audio, radio o frecuencias de microondas. La palabra láser es acrónimo en inglés de las palabras amplificación de la luz por emisión inducida de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Actualmente, los láseres se usan en la vida diaria, especialmente en los dispositivos de almacenamiento óptico como los reproductores de CD y DVD, en los cuales el láser escanea la superficie del disco para la lectura de los datos. Otras aplicaciones comunes del láser son los lectores de códigos de barra y, obviamente, los punteros láser. En la industria, los láseres se usan para cortar el acero y otros metales, para grabar

estampados como por ejemplo las letras de los teclados de las computadoras; también se utilizan en aplicaciones médicas, militares, entre otras.

3. Propiedades importantes de la luz láser

La luz láser es simplemente luz generada por un instrumento láser. Esta luz tiene algunas propiedades muy especiales que la distinguen de la luz proveniente de otras fuentes:

- La luz láser se genera en forma de haz láser. Este haz tiene un alto (a veces extremadamente alto) grado de coherencia espacial, por lo tanto, se propaga en una dirección bien definida con un haz moderadamente divergente. El término coherencia hace referencia a que la señal eléctrica guarda una relación de fase constante en diferentes puntos a lo largo de largas distancias y se focaliza produciendo manchas de luz muy pequeñas.
- La luz láser también tiene un alto grado de coherencia temporal (en la mayoría de los casos), lo que equivale a una longitud de coherencia larga. Longitudes de coherencias largas implican una rígida relación de fase a través de intervalos de tiempo relativamente largos, correspondientes a largas distancias de propagación (normalmente algunos kilómetros).
- Se obtiene un ancho de banda espectral (o ancho de línea) estrecho combinando una coherencia temporal grande con un tiempo de coherencia grande. Esto significa que los haces de láser visible tienen un cierto color puro, por ejemplo, rojo, verde o azul, pero no blanco o magenta. Por ejemplo, la mayoría de los láseres usados en mediciones cortas y medianas tienen una longitud de onda de 1064 nm (infrarrojo cercano) o 532 nm (láser verde). Es destacable que una longitud de coherencia larga introduce una tendencia al fenómeno del ruido láser, es decir, que se puede observar un patrón granular característico. El efecto se puede observar cuando un haz láser incide en una superficie metálica.
- En la mayoría de los casos, la luz láser está polarizada linealmente. Esto significa que el campo eléctrico oscila en una dirección particular.

La luz láser puede tener otras propiedades destacables en función de la aplicación:

- La luz láser puede ser visible, pero la mayoría de los láseres emiten en otras regiones del espectro, particularmente en el infrarrojo cercano, que el ojo humano no puede percibir.

- La luz láser no siempre es continua, pero puede ser emitida en forma de pulsos cortos o ultracortos. Como consecuencia de esto, los máximos de potencia pueden ser extremadamente altos.

Los haces de láser permanecen enfocados cuando se proyectan sobre un escenario lejano gracias a las propiedades de coherencia. Otra propiedad fundamental de las ondas de luz láser es su velocidad de propagación. La luz viaja con una velocidad finita y constante en un determinado medio. Como consecuencia de estas propiedades, la luz láser es muy adecuada para la medición de objetos.

4. Seguridad láser

El láser se usa en una amplia variedad de aplicaciones, entre las que encontramos aplicaciones científicas, militares, medicina y el comercio, todos ellos desarrollados desde la invención del láser en 1960. La coherencia, de alta monocromaticidad, y la capacidad de alcanzar potencias extremas son propiedades que permiten utilizarlo en estas aplicaciones especializadas. Por tanto, la luz láser debe ser manejada con una precaución extrema y se estima fundamental conocer los diferentes tipos de láser.

Para permitir a los usuarios que determinen el riesgo potencial, todos los láseres e instrumentos que hacen uso del láser están etiquetados y clasificados dependiendo de la longitud de onda y de la potencia de energía que produce el láser. El estándar europeo IEC 60825-1 proporciona información sobre las distintas clases y precauciones asociadas. Se describen siete clases de láser:

- **Clase 1.** Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos para visión intrahaz.
- **Clase 1M.** Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero pueden ser peligrosos si se emplean lentes con el haz.
- **Clase 2.** Láseres que normalmente producen un reflejo ciego para proteger al ojo. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección en condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso instrumentos ópticos con visión intrahaz.
- **Clase 2M.** Láseres que normalmente producen un reflejo ciego para proteger al ojo. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección en condiciones de utilización razonablemente previsibles. Sin embargo, la

visión de la salida del haz puede ser peligrosa si el usuario emplea lentes con el haz.

- **Clase 3R.** Láseres potencialmente peligrosos cuando se produce visión directa intrahaz, aunque el riesgo es menor que en el caso de láseres de la Clase 3B.

- **Clase 3B.** Normalmente son peligrosos si ocurre exposición directa intrahaz, aunque la visión de reflexiones difusas es normalmente segura. Generalmente, esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo.

- **Clase 4.** Si se observan directamente causarán daños en los ojos o en la piel. Los láseres de esta clase también pueden producir reflexiones peligrosas. Esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo.

Los usuarios de sistemas de escaneo láser deben ser siempre conscientes de la clase de su instrumento. Particularmente, el usuario debe asegurarse que se está utilizando la clasificación correcta. (Véase al estándar IEC para más información sobre seguridad láser).

Precauciones particulares y procedimientos para tener en cuenta en topografía, alineación y nivelación, se describen en el estándar IEC para los productos con láser Clase 1M, Clase 2M y Clase 3R. Estas precauciones relevantes para los escaneos láser son:

- Sólo el personal cualificado y preparado debe ser asignado para instalar, ajustar y utilizar el equipamiento láser.
- Las áreas donde se utiliza estos láseres deberían estar señalizadas con la señal de advertencia apropiada.
- Deberían tomarse precauciones para asegurar que el personal no mire al haz (de manera prolongada e intrahaz ya que puede ser peligroso). La visión directa del haz a través de instrumentos ópticos (teodolitos, etc.) también puede ser peligrosa.
- Deberían tomarse precauciones para garantizar que el haz láser no se dirige a superficies especulares tipo espejo de manera intencionada.
- Cuando el equipo láser no esté en uso debe guardarse en un sitio donde el personal no autorizado no tenga acceso.

- Debe utilizarse equipamiento láser especial a prueba de explosiones en entornos con peligro potencial de explosión (p. ej. plantas petroquímicas, minas). Las propiedades de este equipamiento son: el máximo de potencia del láser y la temperatura máxima deberían estar limitados. Además, que no produzca chispas.

5. Equipo láser escáner y escaneo láser

Un equipo láser escáner consta de dos componentes básicos: un dispositivo de medida de distancias y un mecanismo de barrido (que es un sistema motorizado de espejos que desvía el láser en las direcciones vertical y horizontal). Esta tecnología láser escáner es capaz de medir distancias de una gran cantidad de puntos, y al mismo tiempo ángulos y además el valor de la reflectancia de las distintas superficies impactadas por el láser. Con los valores angulares y las distancias se podrán calcular las coordenadas tridimensionales (x, y, z) de cada uno de los puntos.

El escaneo láser describe el método mediante el cual una superficie se muestrea o escanea usando tecnología láser. Se analiza un entorno u objeto real para tomar datos sobre su forma y, posiblemente, su apariencia (por ejemplo, el color). Los datos capturados pueden ser usados más tarde para realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales o modelos tridimensionales útiles para una gran variedad de aplicaciones.

Mediante el escaneo láser obtenemos una nube de puntos, que será procesada mediante un software para poder generar el modelo tridimensional del objeto escaneado.

La gran ventaja del escaneo láser es el poder tomar una gran cantidad de puntos con una alta precisión en un periodo de tiempo relativamente corto. Es como tomar una fotografía con información de profundidad. Y al igual que en el caso de la fotografía, los escáneres láser son instrumentos de punto de vista. Por tanto, es necesario realizar múltiples capturas desde diferentes estaciones para garantizar una cobertura completa de la estructura u objeto.

Los escáneres 3D son distintos a las cámaras fotográficas ya que estas últimas reúnen información de color sobre la superficie, mientras que los escáneres 3D reúnen información acerca de su geometría, es decir, que obtienen la posición en el espacio de cada punto analizado. (Aunque cada vez más se ha avanzado, al punto que hoy en día existen equipos de

escaneos que son capaces de captar el color del píxel punto a punto, para luego colorear la nube de puntos - Contreras, Ainara. 2014).

3.2. Clasificación de equipos de escaneo

3.2.1. Clasificación por contacto

1. En contacto con el objeto

Este tipo de escáneres examinan el modelo mediante toques físicos sobre el objeto, es decir, cada toque en el objeto corresponde con un punto del modelo. Con este tipo de escáner se obtienen modelos muy precisos, por lo que se utilizan para fabricar piezas. Presentan como inconveniente la posibilidad de dañar el objeto escaneado al tocarlo y que su velocidad de escaneo es lenta en comparación con otro tipo de escáneres.

2. Sin contacto con el objeto

Este tipo de escáneres funcionan de manera que no llegan a tocar el objeto escaneado físicamente, sino que utilizan algún tipo de radiación como puede ser la luz (láser, infrarroja, natural) o el ultrasonido, entre otros. Este es el caso de los escáneres que se van a tratar y los cuales vamos a clasificar.

3.2.2. Clasificación por sistema de medida

Debido a los recientes desarrollos en la visión por ordenador y la tecnología de sensores, la luz se ha utilizado de varias maneras para medir objetos. Estas técnicas de medición se pueden dividir en dos categorías: técnicas activas y pasivas.

Las técnicas pasivas no emiten radiación alguna, pero en cambio se basan en detectar la radiación ambiental reflejada. La mayoría de los escáneres de este tipo detectan la luz visible porque es una radiación ambiental fácilmente disponible. Otros tipos de radiación, como el infrarrojo también puede ser usado. Los métodos pasivos suelen ser muy baratos porque la

mayoría de las cosas no necesitan más hardware que una cámara digital. El problema con estas técnicas es que dependen de encontrar correspondencias entre imágenes 2D, lo que no siempre tiene una única solución. Por ejemplo, patrones repetitivos tienden a producir errores. La precisión de estos métodos depende mayoritariamente de la resolución de las imágenes y de la densidad de elementos identificables en ellas.

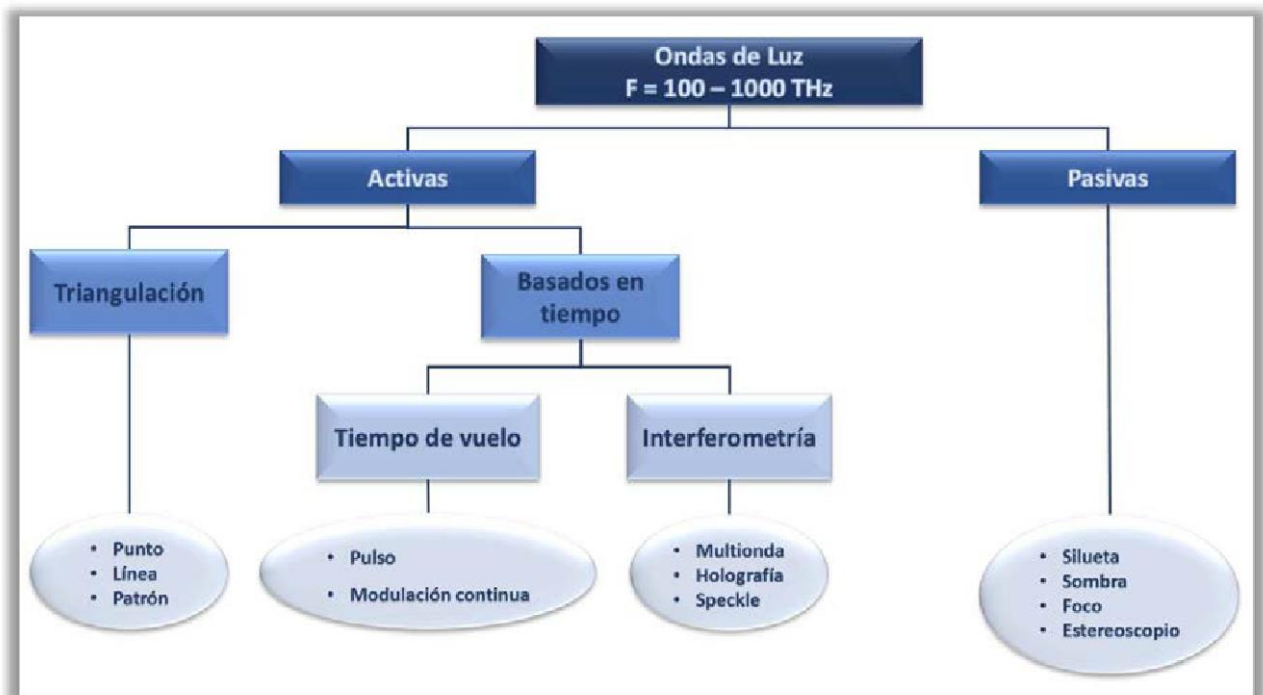


Figura 3.1: Clasificación de equipos láser escáner según sistema de medida.
(Fuente: F. Romeral, 2014)

Los escáneres activos emiten algún tipo de radiación controlada y detectan su reflexión con el fin de sondear un objeto o un entorno. Los posibles tipos de radiación utilizados incluyen la luz, los ultrasonidos o los rayos X. Como estas técnicas de medición activa requieren una transmisión láser y un receptor son mecánicamente más complejos que las técnicas pasivas. Las principales ventajas de estos sistemas son:

- No requieren luz ambiental, porque ellos generan su propia radiación.
- Proporcionan gran cantidad de mediciones de manera automática.
- Se pueden utilizar en superficies sin rasgos distintivos.
- Capturan mucha información en poco tiempo (1.000 – 1.000.000 puntos/segundo).

Sin embargo, algunos sistemas activos pueden verse afectados por fuentes de luz externas, reflectividad, color y rugosidad.

Existe diferentes tipos de escáneres activos, diferenciándose todos ellos en la manera que el escáner recibe y/o analiza la señal de radiación reflejada.

1. Tipos de escáneres pasivos

- Estereoscopios

En la visión normal, el observador ve los objetos en tres dimensiones, llamémosle alto, ancho y profundidad. La habilidad de ver o apreciar la profundidad depende del hecho de que observamos los objetos con dos ojos, aproximadamente a la misma distancia del objeto, pero viendo este bajo diferentes ángulos, por lo que cada ojo registra una imagen levemente diferente.

Dichas imágenes se fusionan o combinan en el cerebro brindando la percepción de la profundidad o vista tridimensional del objeto. La distancia entre nuestros ojos es tan reducida que las diferencias angulares pasan a ser muy pequeñas para la observación de los objetos lejanos, siendo dificultoso el registrar su profundidad.

En la observación bajo estereoscópico de fotografías cuyas imágenes se superponen parcialmente, como en el caso de las fotografías aéreas, estamos observando imágenes de la misma porción del terreno captados bajo dos puntos de vista muy separados (las posiciones de la cámara).

El ojo derecho está registrando un área en la fotografía de la derecha, mientras que el ojo izquierdo está registrando la misma área en la fotografía de la izquierda.

El efecto es el mismo que si tuviéramos un observador con un ojo en una posición de cámara y el otro en la posición la siguiente de la cámara. El cerebro fusiona esas imágenes, percibiendo entonces la tercera dimensión, pudiendo apreciar el relieve artificialmente.

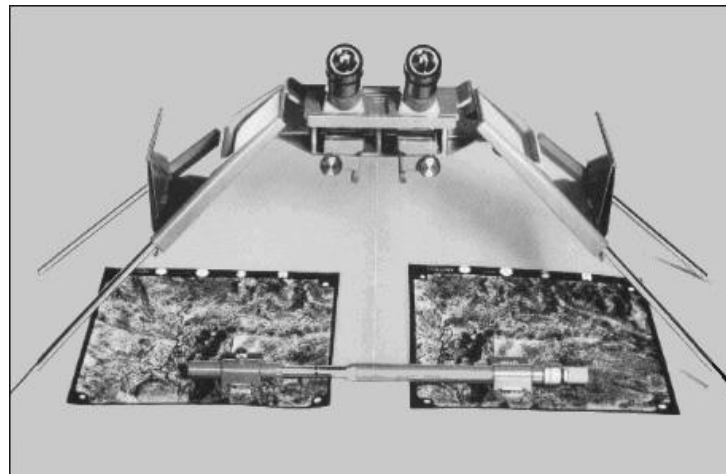


Figura 3.2: Estereoscopio de espejos y barra de paralaje. (Fuente: http://www.gisiberica.com/estereoscopos/estereoscopios_de_espejos.htm)

- Silueta

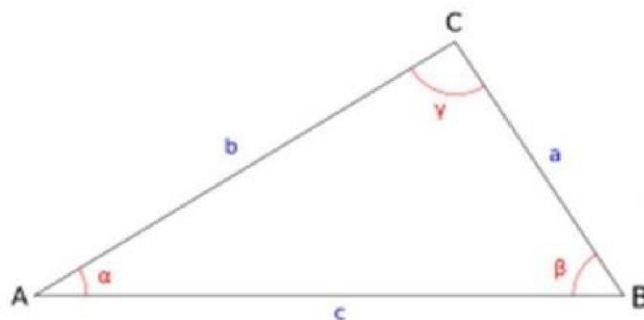
Este tipo de escáneres 3D usan bosquejos creados de una sucesión de fotografías alrededor de un objeto tridimensional contra un fondo muy bien contrastado. Estas siluetas se estiran y se cruzan para formar la aproximación visual “hull” del objeto (es una entidad geométrica creada por la técnica de la forma de la silueta de la reconstrucción 3D). Esta clase de técnicas no son capaces de detectar algunas concavidades de un objeto (como el interior de un tazón).

2. Tipos de escáneres activos

En la práctica, el método de triangulación activa fue inventado para solucionar el notable problema de correspondencia encontrado en las técnicas de medición pasiva. El problema de correspondencia se puede establecer de la siguiente manera: dadas dos imágenes, I_1 e I_2 , de una escena tomada desde dos puntos de vista, la orientación relativa de las cámaras y un par de puntos homólogos entre las dos imágenes, se puede calcular el correspondiente punto en 3D usando el principio de la triangulación. De este modo, el problema de correspondencia consiste en encontrar pares de puntos homólogos en diferentes imágenes. El método de triangulación activa usa la luz del láser para solucionar este problema marcando el punto del objeto con el color de la luz del láser. De este modo, el haz puede ser detectado fácilmente en la imagen. Por ello estos escáneres suelen denominarse como de triangulación óptica.

2.1. Medición basada en triangulación

Los triángulos son la base de muchas técnicas de medición. Se utilizaron en mediciones geodésicas básicas en la Grecia antigua y todavía pueden encontrarse en las modernas cámaras 3D basadas en láser. Los fundamentos matemáticos del triángulo (trigonometría), que son la base de las técnicas de medición por triangulación, han sido atribuidas al filósofo griego Thales (Siglo VI A.C.):



$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos(\alpha)$$

$$c = a \cdot \cos(\beta) + b \cdot \cos(\alpha)$$

Figura 3.3: Trigonometría, teoremas del seno y coseno.
(Fuente: Apuntes de S. de Referencia, 2012)

Un escáner láser por triangulación utiliza este mismo principio para investigar el entorno. Se dirige un patrón láser sobre el objeto y se emplea una cámara para buscar la localización de la proyección de este. El emisor láser y la cámara se instalan con un ángulo constante, creando un triángulo entre ellos y la proyección del láser sobre el objeto. De ahí el nombre de triangulación. Debido a esta configuración, la proyección del láser cambia el campo de visión de la cámara en función de la distancia a la misma.

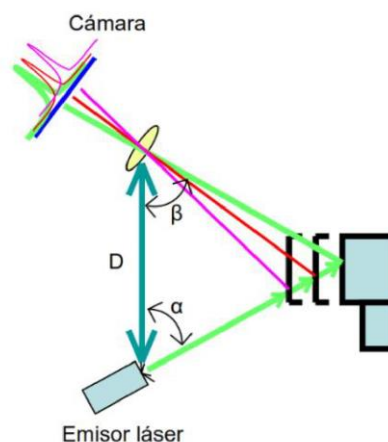


Figura 3.4: Principio del láser escáner basado en triangulación.
(Fuente: A.Contreras, 2014)

Se observa que el lado D del triángulo de la imagen es conocido, es decir, la distancia entre la cámara y el emisor láser. El ángulo del emisor láser α , también es conocido. El ángulo de la cámara β puede ser determinado encontrando la localización del haz láser en el campo de visión de la cámara. Estos tres elementos determinan completamente la forma y el tamaño del triángulo y proporcionan la profundidad exacta del objeto medido.

Se puede demostrar que, cuanto mayor es el lado D (base), menor es el error en la estimación de la profundidad del objeto. Sin embargo, la base no puede ser muy grande porque entonces el emisor láser y la cámara tendrían un solape en el campo de visión muy reducido y la proyección del láser no siempre podría ser capturada por la cámara.

A modo de resumen, las posibles maneras para reducir la imprecisión en la dirección de la profundidad son:

- ✓ La reducción de la distancia del objeto al escáner reduce los efectos de las sombras.
- ✓ El incremento de la base de triangulación D aumenta los efectos de las sombras.
- ✓ El incremento de la distancia focal de la lente disminuye el campo de visión.
- ✓ La reducción de la imprecisión de la medición se puede obtener aumentando los píxeles de la cámara.

En la mayoría de los casos se usa y arrastra una línea de láser, en lugar de un único punto, para obtener un objeto completo en 3D. Esto significa que el ángulo del emisor láser también cambia mientras se barre el objeto.

A causa de las limitaciones físicas de usar una base mayor y un campo de visión limitado en la cámara, los escáneres por triangulación se usan en aplicaciones que generalmente requieren una distancia de uso menor a 10 metros. Comparados con los escáneres de medio y largo alcance, los escáneres por triangulación alcanzan precisiones muy elevadas, del orden de micras.

Como se ha comentado anteriormente, el método de triangulación activa usa la luz del láser para solucionar el problema de identificación en la imagen, marcando el punto del objeto con el color de la luz láser y de este modo, el haz puede ser detectado fácilmente en la imagen. Para evitar el uso de fixturas, se han impuesto algunas modificaciones innovadoras. En lugar de mover/rotar el emisor láser para cubrir todo el objeto, se pueden proyectar patrones de puntos o líneas que cubran todo el objeto a la vez.

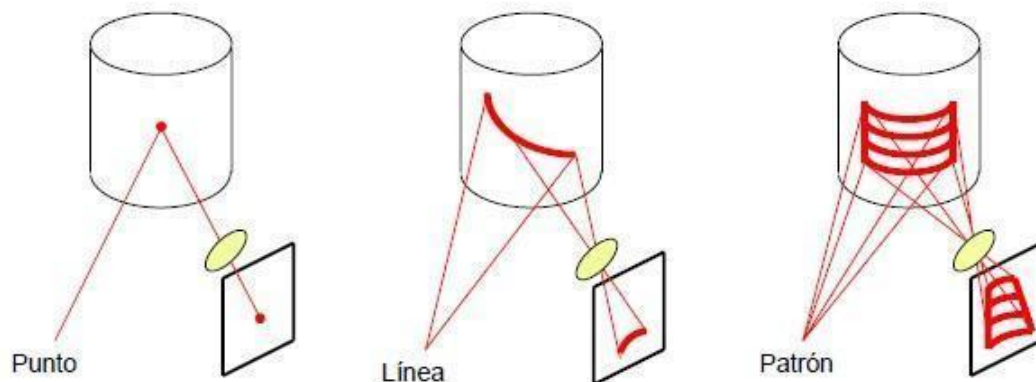


Figura 3.5: Técnicas de proyección usadas en los escáneres de triangulación.
(Fuente: S.Casas, 2015)

Hasta el momento se han utilizado diferentes patrones que van desde líneas regulares hasta patrones especialmente codificados que modulan su frecuencia o su fase en el tiempo para proporcionar una mejor precisión. En el último caso se requiere que el escáner esté estático en relación con el objeto.



Figura 3.6: Principio del láser escáner basado en triangulación.
(Fuente: J. Lerma, 2014)

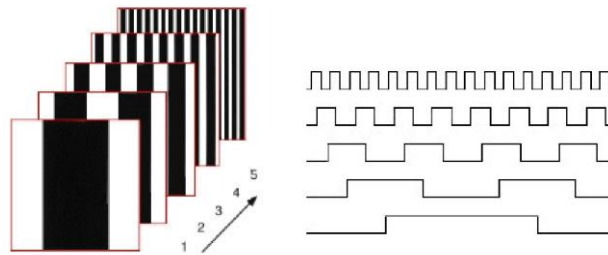


Figura 3.7: Patrón de código binario modulado en fase, también llamado proyección fringe. (Fuente: J. Lerma, 2014)

Incluso se utilizan patrones más complejos basados en el efecto Moiré para aumentar la precisión y robustez de estos sistemas. El efecto Moiré se produce como resultado de interactuar juntas dos señales con amplitud modulada. Este fenómeno se puede observar en la televisión cuando se entrevista a gente que viste alguna prenda de ropa a rayas. Un escáner Moiré proyecta un patrón regular sobre el objeto a escanear mientras que la cámara que toma la escena tiene integrado otro patrón regular. La interferencia de estos dos patrones genera un patrón Moiré a partir del cual se pueden determinar cambios precisos de profundidad.

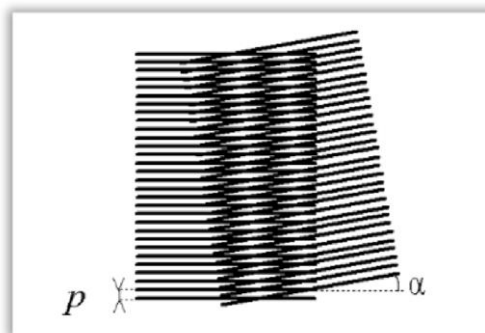


Figura 3.8: Patrón Moiré con elementos lineales. (Fuente: S.Casas, 2015)

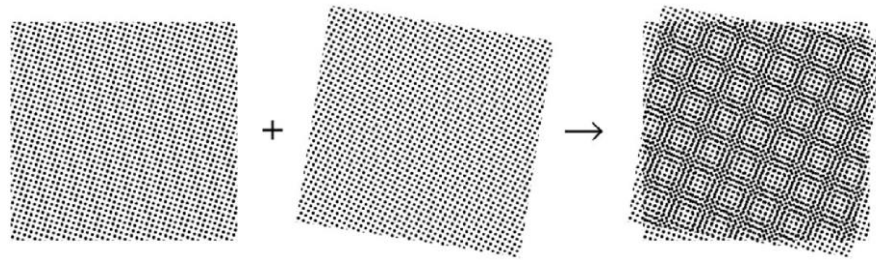


Figura 3.9: Patrón Moiré con elementos puntuales. (Fuente: S.Casas, 2015)

Como último apunte sobre los escáneres por triangulación, el principal reto al usar sistema de proyección de patrones de líneas codificadas es la separación única de las diferentes direcciones de proyección en objetos que tienen saltos repentinos en profundidad y grandes diferencias de textura a lo largo de la superficie.

2.2. Medición basada en tiempo

Los escáneres de medición basados en tiempo son escáneres activos que miden un intervalo de tiempo entre dos sucesos. En general, hay dos principios de medición por tiempo: escaneos basados en pulsos (tiempo de vuelo) y basados en fase.

2.2.1. Escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo, detección incoherente)

Las ondas de luz viajan con una velocidad finita y constante a través de un medio. Por consiguiente, cuando puede medirse el tiempo durante el cual la luz viaja de una fuente a un objeto reflectante y regresa a la fuente, la distancia a dicha superficie puede calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$D = \frac{(c \cdot t)}{2}$$

dónde:

- c = velocidad de la luz en el aire
- t = tiempo en que tarde la señal en ir y volver

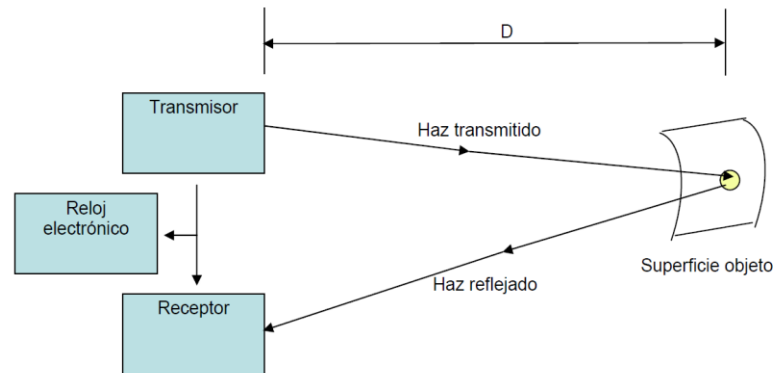


Figura 3.10: Principio de un láser escáner basado en el tiempo de vuelo.
(Fuente: A.Contreras, 2014)

La velocidad de la luz en el vacío es exactamente 299.792.458 m/s. Si la luz viaja por el aire, se debe aplicar un factor de corrección igual al índice de refracción (en función de densidad del aire). Tomando el valor de la velocidad de la luz en el aire como 3,108 km/s aproximadamente se puede obtener que tarde 3.33 nanosegundos en recorrer un metro. Por tanto, para alcanzar una precisión de 1mm, necesitamos ser capaces de medir intervalos de tiempo de alrededor de 3.33 picosegundos.

Los escáneres por tiempo de vuelo no suelen usar haces continuos, sino pulsos de láser. Escanean todo su campo de visión punto a punto cambiando la dirección del haz mediante una unidad de desviación. Un láser escáner 3D típico basado en tiempo de vuelo puede medir de 2.000 a 50.000 puntos por segundo.

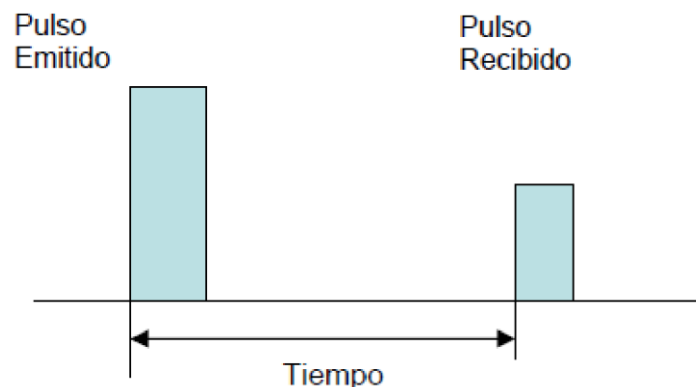


Figura 3.11: Diferencia entre los pulsos láser. (Fuente: A.Contreras, 2014)

Hay que destacar que para que no se produzcan mediciones ambiguas, el tiempo medido (t) debe ser mayor que la amplitud del pulso (T_{pulso}). De esta manera:

$$t > T_{pulso}$$

$$d > \frac{1}{2} c * T_{pulso}$$

Para entender mejor estas ecuaciones, podemos utilizar valores. Tomando T_{pulso} como 10ps, la máxima precisión que se puede alcanzar es de $d = 1.5\text{mm}$. La mayoría de los sistemas comerciales de medio y largo alcance proporcionan una precisión entre 6 y 10 mm.

Como la precisión depende del mecanismo del reloj, el error de un escáner por tiempo de vuelo es casi independiente de la distancia (excepto en el caso de los láseres de huella).

Es importante destacar que el método derivado del tiempo para medir el retorno del pulso depende de la resolución temporal deseada, de la resolución del reloj y del rango dinámico requerido del pulso. Normalmente, algunos principios para clasificar el diseño son el tiempo límite (amplitud constante), el tiempo de paso cero (la derivada), el tiempo del primer momento (la integral) y la constante de fracción de tiempo.

En un sistema de tiempo de vuelo, la máxima frecuencia de pulso está determinada por el hecho de que el emisor no puede enviar un pulso hasta que no haya recibido el anterior. La finalidad de esta restricción es evitar la confusión en la llegada de pulsos, lo que recibe el nombre de máximo rango de certeza. Este parámetro depende de la duración del pulso y de su frecuencia.

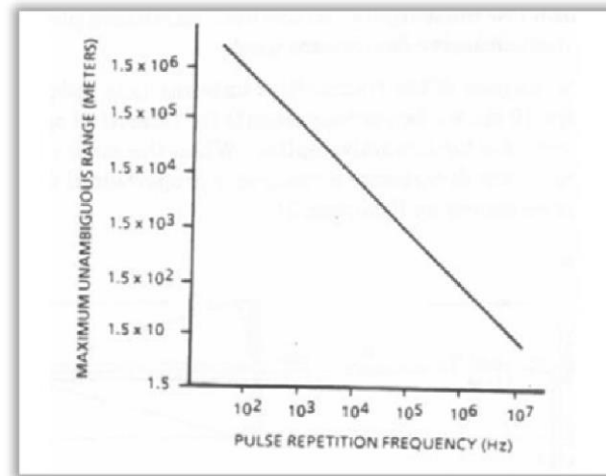


Figura 3.12: Máximo rango de certeza en función de la frecuencia de pulso.
(Fuente: J. Lerma, 2014)

Hay tres factores principales que determinan la precisión de un sistema de medida por pulsos:

- La capacidad de seleccionar la misma posición relativa en el pulso emitido y recibido para medir el intervalo de tiempo. Esto está limitado por el ruido, la fluctuación, la fuerza de la señal, la sensibilidad del detector, y la brevedad y la capacidad de reproducción del emisor del pulso.
- La precisión con la que se fija un lapso de tiempo.
- La precisión del instrumental en la medida de los intervalos de tiempo.

La ventaja de usar un sistema de pulsos para las mediciones láser de distancia es la alta concentración de la energía transmitida. Esta energía hace posible que se alcance el ratio señal-ruido (SNR) necesario para altas precisiones en mediciones de larga distancia (hasta varios centenares de metros). El inconveniente es el problema de detectar la llegada de los retornos dispersos del pulso debido a la naturaleza cambiante de las tolerancias ópticas y la atenuación atmosférica.

2.2.2. Escáneres basados en fase

Otro principio de medición basado en tiempo evita el uso de relojes de alta precisión modulando la potencia del haz láser. La luz emitida (incoherente) se modula en amplitud y se envía a una superficie. La reflexión dispersa se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviada y recibida, y por tanto el tiempo.

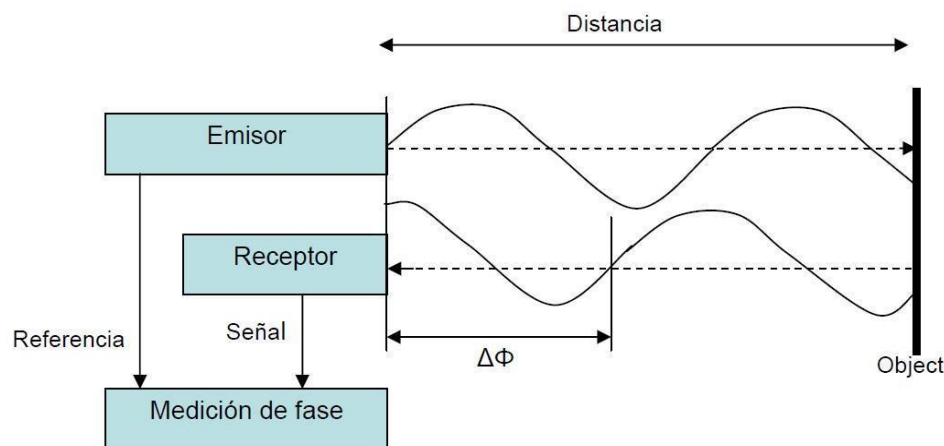


Figura 3.13: Principio de medición basado en fase. (Fuente: Santana, 2008)

Los escáneres basados en fase típicos modulan su señal utilizando modulaciones sinusoidales, amplitud modulada (AM), frecuencia modulada (FM), pseudo ruido o modulación polarizada. En el caso de una señal sinusoidal modulada, la luz reflejada se demodula por medio de cuatro puntos de muestra que son disparados a la onda emitida. A partir de cuatro puntos medidos $c(\tau_0)$, $c(\tau_1)$, $c(\tau_2)$ y $c(\tau_3)$ el desfase o diferencia de fase $\Delta\phi$, el desplazamiento B y la amplitud A se pueden calcular mediante:

$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4}$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2}$$

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{c(\tau_0) - c(\tau_2)}{c(\tau_1) - c(\tau_3)}\right)$$

La diferencia de fase puede estar relacionada con el retardo similar al medido en los escáneres basados en pulso. La relación entre el desfase ($\Delta\phi$), la frecuencia modulada ($f_{modulada}$) y el retardo (t) es:

$$t = \frac{\Delta\phi}{2\pi \cdot f_{modulada}}$$

Por tanto, según la ecuación de medición de distancia basada en tiempo de vuelo, la distancia al objeto viene dada por:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{f_{modulada}}$$

Nuevamente, tomando valores lo entenderemos mejor. Con una frecuencia de 10MHz y una resolución de fase de 0.01 grados (no demasiado difícil con estándares electrónicos), podemos obtener una resolución en z alrededor de 0.5mm.

Los escáneres con modulación continua del haz también tienen un máximo rango de certeza, similar al de los sistemas de tiempo de vuelo. Para estos sistemas el alcance está limitado al que corresponde a un retardo de fase de un ciclo de la onda senoidal. La ecuación del máximo rango de certeza de una onda continua es:

$$Z_{amb} = \frac{c}{2 \cdot f_{modulada}}$$

En el ejemplo anterior, el intervalo está sobre los 15m (frecuencia de 10 MHz). La ambigüedad en la medición de distancia es proporcional a Z_{amb} e inversamente proporcional al cociente señal ruido (SNR). Para evitar el inconveniente de un intervalo de ambigüedad en la medición, se pueden utilizar varias frecuencias de manera que con las frecuencias más bajas (mayor longitud de onda) se localiza el punto a medir y con altas frecuencias se mide distancia con precisión. En la última generación de escáneres basados en fase, se superponen 2 o incluso 3 longitudes de onda diferentes. La longitud de onda larga define la distancia con unicidad y la

longitud de onda corta define la precisión que puede obtenerse. Generalmente, estos escáneres presentan una velocidad mayor y una resolución mejor que los escáneres de tiempo de vuelo, pero una precisión menor.

Generalmente, la precisión de un escáner basado en la fase está limitada por:

- Frecuencia de la señal o modulación.
- Precisión en el ciclo de medición de la fase.
- Estabilidad del oscilador de modulación.
- Turbulencias en el aire por el que se realiza la medición.
- Variaciones en el índice de refracción del aire.

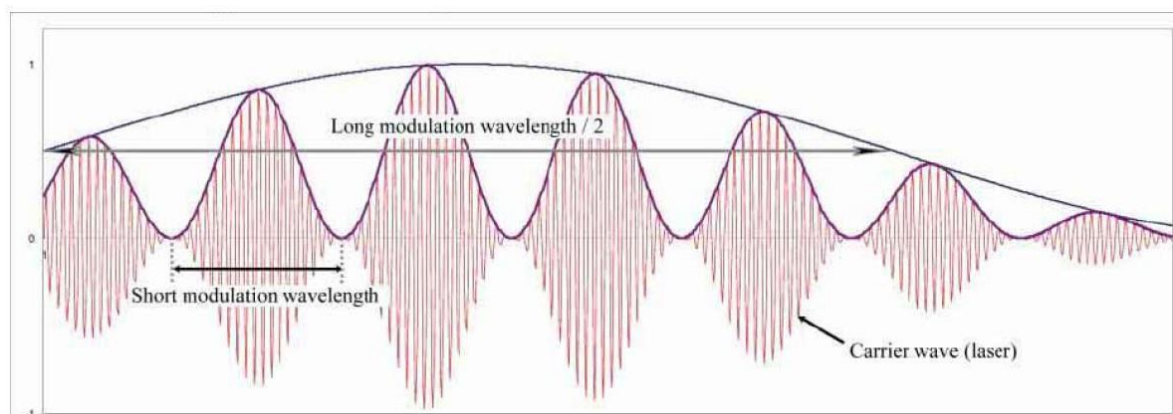


Figura 3.14: Esquema de dos modulaciones de onda y una onda portadora para la medición de distancias basada en fase. (Fuente: Santana, 2008)

2.3. Interferometría (coherente)

Interferometría significa que se usa la interferencia de diferentes ondas de luz para registrar posiciones tridimensionales en el espacio. La interferometría óptica se utiliza desde el siglo XIX. Las mediciones se restringieron a distancias de pocos centímetros debido a la intensidad limitada y la coherencia de las fuentes de luz convencionales. Estas restricciones se superaron cuando se inventaron los láseres. Los láseres han permitido desarrollar la interferometría y la han convertido en una

técnica rápida, de alta precisión y versátil en la medición de largas distancias.

La medición interferométrica de distancias puede ser de muy alta precisión. Ofrece un grado de precisión mayor que los métodos telemétricos basados en el tiempo de vuelo o modulación del haz. Sin embargo, se adecua perfectamente en entornos con atmósfera controlada (interiores, por ejemplo) con distancias no superiores a decenas de metros.

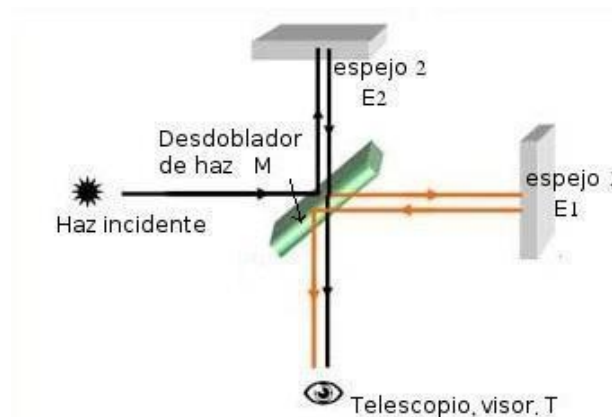


Figura 3.15: Esquema de un interferómetro. (Fuente: J. Lerma, 2014)

En un láser escáner interferométrico, el haz láser se divide usando un prisma que refleja la mitad del haz en una dirección (brazo de referencia) y transmite la otra mitad (brazo de medición). Ambas partes del haz viajan por diferentes y cuando se combinan se producen interferencias *fringe*. Desplazamientos muy pequeños (del orden de una fracción de longitud de onda) pueden detectarse (usando detección coherente), y también pueden medir grandes distancias con baja ambigüedad (contando las longitudes de onda). Se han construido muchos sistemas con este principio, por ejemplo, multionda, holografía e interferometría *speckle*. Estos sistemas consiguen precisiones muy altas a costa de ser muy caros.

La luz estructurada es un tipo de tecnología que utiliza la proyección de un patrón de luz determinado en el objeto y analizan la deformación del patrón para obtener el modelo. El reflejo se captura con una cámara de fotografía y posteriormente mediante unos algoritmos se determina la posición de cada punto en el espacio 3D.

El patrón de luz suele consistir en un conjunto de líneas paralelas generadas bien por interferencia láser o por proyección. Si se realiza mediante la proyección del patrón de luz los escáneres estarían en la

categoría de triangulación óptica. En algunos casos de estos equipos de interferencia láser o de proyección óptica, dos cámaras fotográficas situadas a los lados del emisor de luz permiten obtener mejores resultados.

Mediante el análisis de la deformación de las líneas se obtienen los puntos 3D. El ancho de una línea es función de la inclinación de la superficie del objeto en que se refleja. La frecuencia y la fase de la línea también aportan información, que se pueden analizar mediante la transformada de Fourier.

Como con el resto de las tecnologías ópticas, este tipo de escáneres tiene problemas con las superficies transparentes y reflexivas puesto que la luz no interfiere en ellas el mismo reflejo que en las opacas. Una manera de solucionar este problema es aplicando una capa fina de laca opaca a las superficies problemáticas.

3.2.3. Clasificación por sistema de barrido

En esta clasificación podemos distinguir escáneres de cámara, híbridos o panorámicos.

1. Escáner de cámara

Este sistema de barrido está limitado a un ancho de escena específico, delimitado por el tamaño de la ventana de barrido, que puede ser de un máximo de 60° tanto en ángulo horizontal como en vertical. Desde el punto de vista óptico consiste en un espejo interno que incrementa su ángulo horizontalmente; para que otro espejo interno realice el barrido desde arriba hacia abajo o viceversa. Se denomina de tipo cámara, porque su visibilidad, campo de acción y operatividad, son muy parecidos a los de una cámara de fotogrametría terrestre.

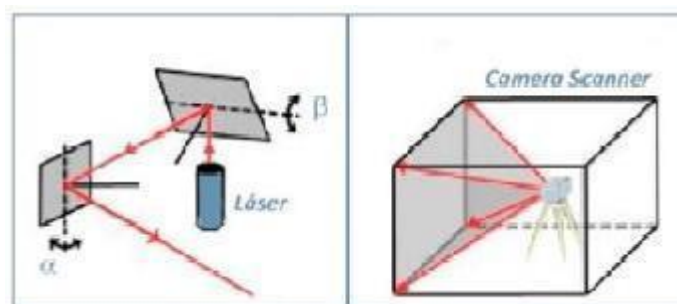


Figura 3.16: Sistema de barrido, cámara. (Fuente: S.Casas, 2015)

2. Escáner Panorámico

El sistema de barrido de estos permite girar el haz de luz alrededor de dos ejes (horizontal y vertical) de manera similar a un teodolito. Para cada posición se realiza un barrido vertical completo con un espejo rotativo de alta velocidad, permitiendo realizar un barrido total de 360° por 310° . La única zona que queda por barrer es la delimitación por la base del propio instrumento.

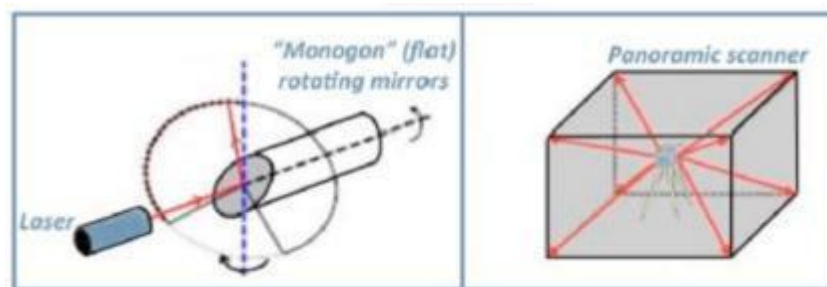


Figura 3.17: Sistema de barrido, estático. (Fuente: S.Casas, 2015)

3. Escáner Híbrido

Este sistema es una combinación de los dos anteriores. El láser gira pequeños intervalos horizontales, y en cada intervalo el espejo oscilante se mueve desde arriba hacia abajo en forma similar a los del tipo cámara, con algunas limitaciones en el barrido vertical, pudiendo girar 360° y tomar todo lo que tiene alrededor.

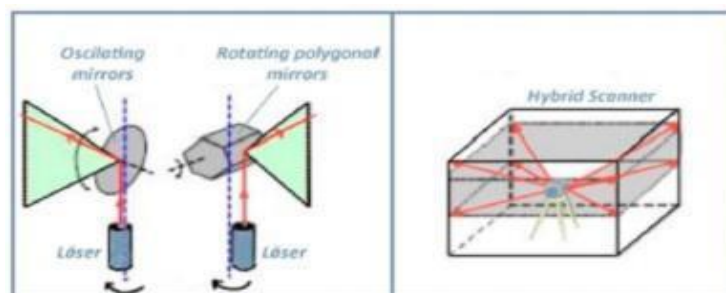


Figura 3.18: Sistema de barrido, híbrido. (Fuente: S.Casas, 2015)

3.2.4. Clasificación por posición

1. Equipos estáticos

Estos equipos se mantienen en una posición fija durante la toma de datos, generalmente montados sobre trípodes o plataformas estables. El dispositivo, por lo general, se mueve a pequeños incrementos angulares de izquierda a derecha, y entre cada incremento se queda en una posición estática, en la que el espejo giratorio se mueve de abajo hacia arriba y va disparando el láser a intervalos predeterminados. Las ventajas de este tipo de equipos son la precisión y la alta densidad de puntos. El láser escáner estático suele ser el método más extendido para realizar escaneos terrestres.



Figura 3.19: Equipo estático. (Fuente: Propia)

2. Equipos dinámicos

Dentro de los escáneres terrestres, existe una versión dinámica de los mismos que es básicamente un sistema compuesto por uno o dos escáneres montados sobre el techo de un vehículo. Estos escáneres exploran de derecha e izquierda del vehículo realizando un barrido de 300 m de ancho, con detalles milimétricos de todos los puntos del terreno que va recorriendo. Estos vehículos llevan montados sistemas GNSS

(GPS+GLONASS+GALILEO), juntamente con una plataforma inercial o IMU, que mantiene la precisión en las coordenadas en los momentos de sombra, es decir, cuando los satélites son insuficientes para mantener el tiempo real RTK en forma dinámica. También existen equipos láser escáneres dinámicos para medir específicamente vías y túneles, que van montados sobre carros de medición y consiguen rendimientos muy superiores a los realizados con equipo estático.



Figura 3.20: Equipos dinámicos. (Fuente: S.Casas, 2015)

3.3. Aplicaciones del escaneo láser

En un principio, los escáneres láser eran de corto alcance y se utilizaban en el diseño automatizado e industrial para facilitar el Diseño Asistido por Ordenador (CAD). Esto contribuyó a la producción en masa de productos de consumo. (F. Romeral, 2014).

Sin embargo, se ha ido aplicando a otros campos como consecuencia de la constante evolución tecnológica que se está produciendo. Los escáneres láser de medio alcance fueron desarrollados para la industria petroquímica. Debido a la complejidad de sus plantas, que solo estaban documentadas con planos en dos dimensiones, la aparición de los escáneres láser permitió la gestión completa de las instalaciones en tres dimensiones.

Otras disciplinas como el patrimonio cultural, la arquitectura, el desarrollo urbanístico, la medicina forense y la industria del entretenimiento han adoptado esta tecnología gracias a las ventajas del láser escáner: la inexistencia de contacto con el objeto, la alta precisión, el largo alcance, rápida adquisición, entre otras.

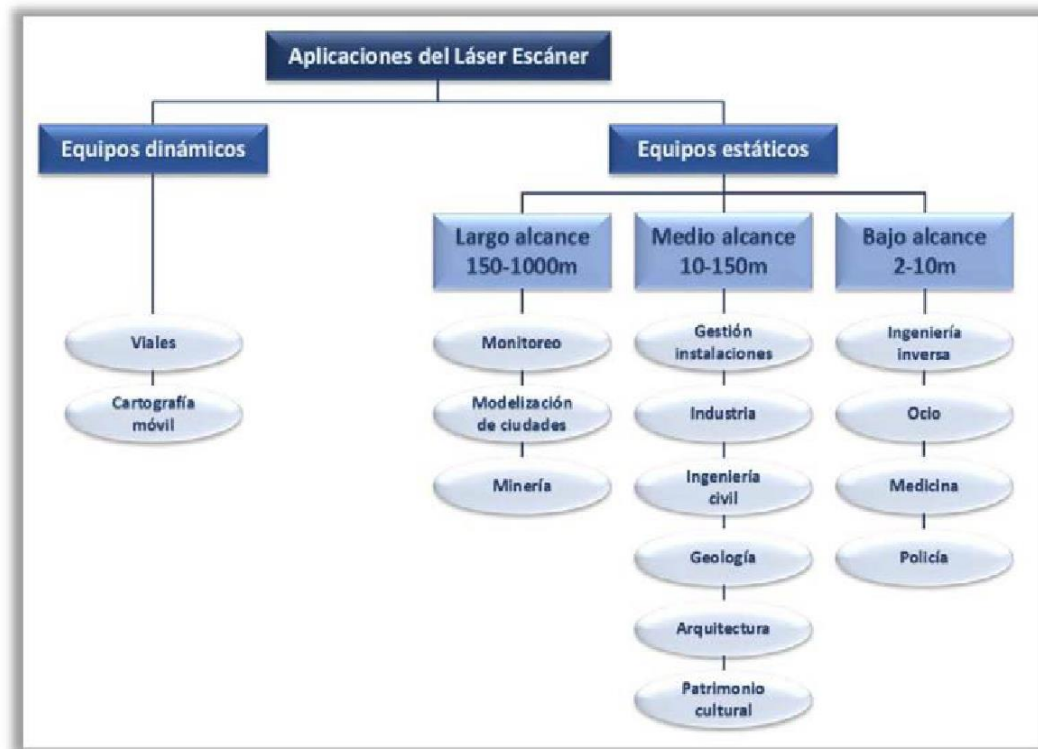


Figura 3.21: Aplicaciones del TLS. (Fuente: F. Romeral, 2014)

3.3.1. Topografía

La tecnología láser escáner se utiliza dentro del campo de la topografía de manera que agiliza el proceso de recolección de datos. Por ejemplo, el láser escáner se puede utilizar en levantamientos de alta definición, que consisten en la captura de información rápida, detallada y precisa de una superficie o volumen. El equipo láser escáner realiza un barrido de la superficie relevando miles de puntos por segundo y obteniendo una nube de puntos 3D compuesta por miles o millones de mediciones individuales en un sistema de coordenadas (x, y, z) que componen un modelo tridimensional de los objetos registrados.



Figura 3.22: TLS aplicado a la topografía. (Fuente: <https://www.bimnd.es/servicios/escaner-laser-3d/>)

3.3.2. Geología y minería

El escaneo láser de afloramientos geológicos es una poderosa herramienta para recoger información relacionada con la geometría de las superficies complejas, de manera que se puede matematizar y analizar rigurosamente la geometría de algunas superficies que han sido deformadas por procesos geológicos en las rocas. También permite obtener información de lugares inaccesibles con otro tipo de instrumentos.

De esta forma se puede lograr tener por ejemplo el volumen extraído de cierto mineral en un determinado periodo de tiempo, escaneando y comparando los volúmenes obtenidos.



Figura 3.23: TLS en geología y minería. (Fuente: <https://www.daztopografia.com/servicios/laser-escaner-3d>)

Dentro de la minería también se suele utilizar el láser escáner en los siguientes casos:

- Topografía de explotaciones a cielo abierto.
- Topografía de explotaciones en interior. Cámaras y pilares, grandes huecos.
- Cubicaciones de volumen de material, en avance de excavación y en stocks y acopios irregulares.
- Topografía en zonas inestables, deslizadas y con taludes. Zonas problemáticas y de acceso difícil.
- Topografía para actualización del avance de los frentes y cubicación periódica de explotaciones.
- Simulaciones virtuales para zonas restauradas en estudios de impacto.
- Espacios subterráneos mineros para depósitos de residuos.

3.3.3. Patrimonio cultural y arquitectura patrimonial

Esta tecnología es ideal para la documentación de edificaciones, monumentos y lugares históricos con detalle y gran precisión, generando nubes de puntos en 360° de las superficies escaneadas para crear modelos 3D que se emplean en la posterior restauración o en planes de conservación histórica. Características como la medición sin contacto y la nula alteración del objeto analizado hace que en determinadas ocasiones esta tecnología sea la única alternativa posible.



Figura 3.24: TLS aplicado a la arquitectura patrimonial. (Fuente: Propia)

3.3.4. Obras civiles e infraestructuras

Estos equipos pueden ser utilizados en este ámbito para:

- Topografía de avances de obra, control de calidad y mediciones en las certificaciones.
- Cartografía y modelización de obras e infraestructuras.
- Control de la geometría en la excavación de túneles y cubicación de los volúmenes de relleno de hormigón.
- Control de geometría y deformaciones en obras e infraestructuras.



Figura 3.25: TLS aplicado a obras civiles. (Fuente: F. Romeral, 2014)

3.3.5. Plantas industriales

El escaneo láser permite obtener modelos tridimensionales muy precisos de estructuras y componentes de instalaciones industriales. Los modelos “*as built*” representan el estado real de la instalación en el momento de estudio por lo que resultan muy útiles para la planificación de trabajos, la formación de personal y la simulación de maniobras, especialmente en zonas de difícil acceso o en condiciones ambientales

severas. Los modelos pueden exportarse a programas de diseño tipo CAD o bien en formatos nativos de cada marca, con lo cual no se pierde ninguna información y se puede acceder a ella en cualquier momento.

Gracias al trabajo en 360° que se logra con los escaneos, se pueden obtener visualizadores panorámicos en entornos web que permiten moverse en el entorno real de la planta, identificar componentes, obtener coordenadas, medir distancias en tres dimensiones e identificar interferencias o fallas sin necesidad de estar físicamente en la zona de trabajo.



Figura 3.26: TLS aplicado a plantas industriales. (Fuente: Propia)

3.3.6. Prevención de incendios

La tecnología láser escáner puede ser una herramienta muy importante en la prevención de incendios. Se realiza el escaneo de un escenario donde se ha producido un incendio, obteniendo la nube de puntos 3D y posteriormente se traslada a un programa de simulación de incendios para poder investigar el comportamiento de los mismos (la transferencia de calor por radiación y convección, la pirólisis de la combustión de un material, el crecimiento del incendio, y la propagación de las llamas).

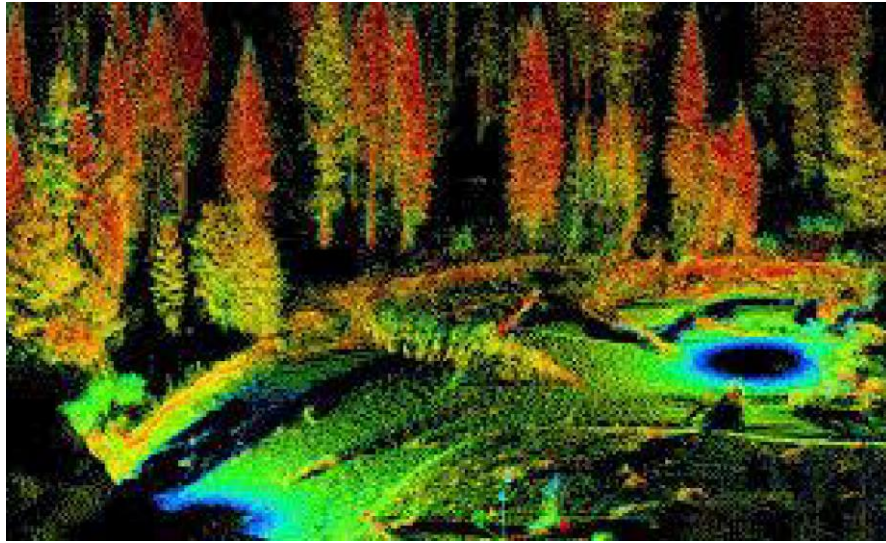


Figura 3.27: TLS aplicado a la prevención de incendios.
(Fuente: S.Casas, 2015)

3.3.7. Medición de volúmenes en canteras

La medición de volúmenes en canteras es un problema que tradicionalmente ha sido abordado mediante topografía tradicional; es una labor de elevado costo que debe realizarse inevitablemente con continuidad a lo largo de la explotación.

La aparición de los equipos láser escáner ha significado la posibilidad de realizar estas mediciones con una rapidez antes inalcanzable y, sobre todo, con una precisión incomparablemente más alta que la proporcionada por los métodos clásicos.

La utilización de nubes de puntos para el estudio de taludes o derribos provocados por la explotación de este tipo de recintos ofrece la posibilidad de una recreación tridimensional, con precisión centimétrica, de la que podemos extraer, tanto volúmenes como secciones en cualquier dirección del espacio para su posterior uso mediante programas de topografía.

El uso de los escáneres láser multiplica los puntos monitorizados, en forma de lograr basar el cálculo de volumen en unas pocas decenas de puntos, se pasa a hacerlo en varios miles o hasta millones dependiendo de la extensión del recinto.



Figura 3.28: TLS aplicado al cálculo de volúmenes de canteras. (Fuente: <https://grafinta.com/productos/polaris-laser-escaner-terrestre/>)

3.3.8. Temblores y terremotos

Con el fin de restablecer lo más rápido posible los daños provocados en las infraestructuras ferroviarias, carreteras y edificios, el escaneo láser 3D se impone como la herramienta de análisis más rápida y eficaz. Los resultados obtenidos permiten al mismo tiempo preparar las reparaciones necesarias con los programas informáticos actuales, y afinar los resultados de las simulaciones teóricas al compararlos con resultados reales relevados en campo.

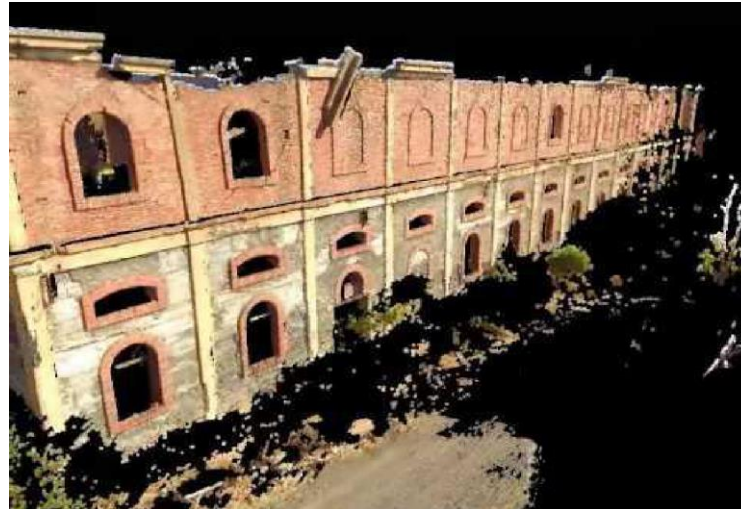


Figura 3.29: TLS aplicado a temblores y terremotos.
(Fuente: S.Casas, 2015)

3.3.9. Derrumbes y hundimientos

Cuando sucede un derrumbe, al realizar el escaneo, el modelo digital que se obtiene permite a las personas expertas (profesionales en geología, construcción, ingeniería civil, etc.) analizar cuáles pudieron ser las causas del derrumbe, así como también la mejor forma para la reconstrucción.



Figura 3.30: TLS aplicado a derrumbes y hundimientos.
(Fuente: A. Contreras, 2014)

3.3.10. Entretenimiento

Los escáneres 3D son usados en la industria del entretenimiento para crear los modelos digitales 3D para películas y videojuegos. En el caso que exista el modelo del objeto en el mundo real que se quiere recrear, es mucho más rápido.



Figura 3.31: TLS aplicado al entretenimiento.
(Fuente: S.Casas, 2015)

3.3.11. Catastro

El montaje de escáneres de alta velocidad sobre plataformas móviles está creando una verdadera revolución en los relevamientos topográficos aplicados a la vialidad y al catastro. El equipo compuesto por dos escáneres montados sobre los laterales del techo del vehículo, con cámaras digitales, van capturando fotos al mismo tiempo que los escáneres barren y guardan la nube de puntos. En el ámbito del Catastro, después de una simple circulación por las calles o avenidas, tendremos el relevamiento de fachadas en tiempo casi real, y posteriormente en post proceso, se pueden asignar a cada parcela sus códigos correspondientes.

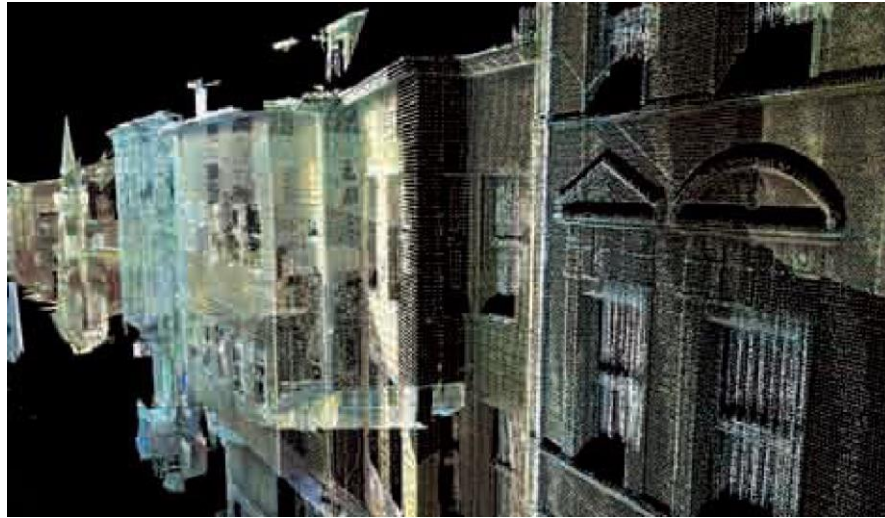


Figura 3.32: Escáner láser terrestre aplicado al catastro. (Fuente: S.Casas, 2015)

3.3.12. Subestaciones y líneas de alta tensión

Otra aplicación común es sobre los corredores para líneas y subestaciones eléctricas. Con la tecnología láser se puede registrar y discriminar los objetos de interés, tanto detalles del terreno, como detalles del camino, árboles o torres eléctricas.



Figura 3.33: TLS aplicado líneas de alta tensión. (Fuente: <http://www.lindesnet.com/Documentos/00-Torres%20AT.pdf>)

3.3.13. BIM – Building Information Modeling

El modelado de información de construcción (BIM, *Building Information Modeling*), es el proceso de generación y gestión de datos del proyecto durante su ciclo de vida utilizando software dinámico de modelado en tres dimensiones y en tiempo real, para disminuir la pérdida de tiempo y recursos en el diseño y la construcción.

Este proceso produce el modelo de información que abarca la geometría, las relaciones espaciales, la información geográfica, así como las cantidades y las propiedades de los componentes. Los softwares BIM son capaces de lograr mejoras por medio de representaciones de las partes y componentes que están siendo utilizados en la construcción de un edificio.

Los productos obtenidos de los escaneos con equipos láser escáner 3D son suministro fundamental para los proyectos pensados con esta nueva tecnología.



Figura 3.34: TLS aplicado a BIM. (Fuente: A. Rodríguez)

3.4. Metodología General

“Utilizar un escáner láser en la captura de un edificio no es solo apretar un botón y esperar a que se obtengan los resultados. Se requiere un profundo conocimiento del equipo y del proceso de escaneo. Algunos pasos del proceso de escaneo son bastante automáticos mientras que otros todavía requieren una labor intensa por parte del usuario.” (Lerma & Biosca, 2008). En este capítulo se discutirá el proceso general del escaneo láser terrestre.



Figura 3.35: Método general de trabajo con equipos láser escáner.
(Fuente: F. Romeral, 2014)

3.4.1. Planificación

En la actualidad no hay ningún proceso estándar para la planificación de un escaneo láser terrestre. Sin embargo, la planificación debe contener, como mínimo, los siguientes puntos de acuerdo con la mayoría de los artículos, trabajos y blogs consultados de usuarios de escáneres láser:

- Determinar los objetivos
- Análisis del área a relevar
- Determinar las técnicas de medición y el equipamiento
- Gestión de los datos

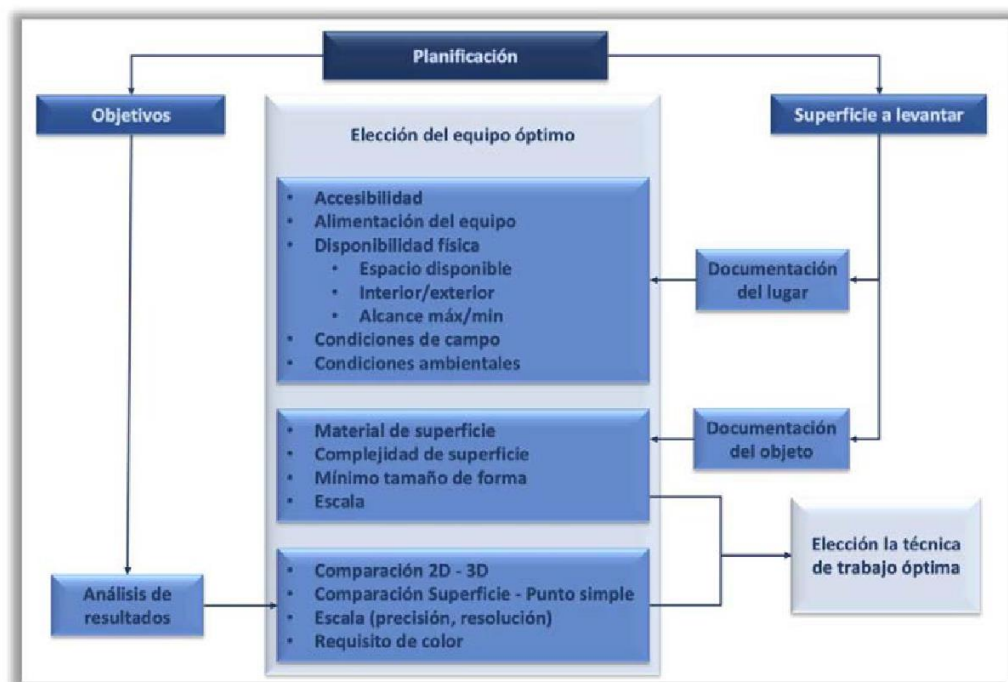


Figura 3.36: Planificación de trabajos con equipos láser escáner. (Fuente: F. Romeral, 2014)

1. Determinar los objetivos del trabajo

Uno de los puntos clave cuando se escanea un objeto es conocer las necesidades del cliente. Para entenderlas se debería poder responder algunas preguntas:

- ¿Por qué el cliente quiere que se documente ese objeto y que quiere hacer con los datos de la documentación?

La justificación de la necesidad de documentar un objeto o un edificio puede proporcionar una idea acerca de los requerimientos en los resultados y en la precisión. A menudo, el cliente puede pensar que el escaneo láser es la herramienta perfecta para su problema porque ha escuchado que otra empresa lo ha usado. O, incluso, por el contrario, el cliente puede no estar seguro de usar con un escaneo láser para la captura porque confía más en las técnicas tradicionales.

Sabiendo las necesidades de los clientes, se puede ofrecer una guía sobre las técnicas de medición más apropiadas.

- ¿Qué resultados necesita?

En relación con la motivación del trabajo, necesitamos definir los documentos a entregar. Estos documentos pueden ser desde planos 2D y cortes, hasta modelos 3D o incluso maquetas 3D a escala del elemento o estructura escaneada. En algunos casos puede que el cliente solo quiera la nube de puntos cruda (datos directos de la observación) con la finalidad de archivarla. Particularmente importante es el nivel de detalle (tamaños de los elementos más pequeños) de los documentos a entregar porque ello ayuda a determinar la resolución (densidad de puntos, o distancia entre los mismos).

2. Análisis del área a relevar

Analizar qué tipo de información se necesita del objeto a modelar nos da una idea de la complejidad y del tiempo necesario para llevar a cabo la tarea. Como ya se mencionó, la resolución requerida y la precisión de la documentación vienen condicionadas por la escala del levantamiento o por la entidad mínima reconocible en los productos finales que se entregan. Notas de campo, informes, mapas, planos, fotografías o videos del lugar pueden ayudar a determinar los posibles riesgos del momento de captura, de igual modo que relevamientos anteriores que pudieran haber sido realizados con otras técnicas (mediciones con cinta, Estación Total (ET) o GPS).

No solo es necesario analizar la información útil del objeto en cuestión sino también de sus alrededores. El lugar puede estar emplazado en un sitio disperso con obstrucciones, limitando los posibles estacionamientos, o puede incluso haber restricciones temporales para acceder al lugar.

Indirectamente, los emplazamientos posibles del equipo determinan el alcance máximo y mínimo que el escáner debe cumplir.

Usando todos esos datos, se puede tomar una decisión acertada acerca de la técnica más adecuada. En caso de seleccionarse el escáner láser, se puede determinar el tipo. El escaneo láser es una técnica altamente desarrollada, pero no siempre es la solución más efectiva. Algunas veces es mucho más fácil y eficiente utilizar otra técnica. Algunas razones para elegir este tipo de técnicas y equipos son:

- Estructuras de superficies muy complejas
- Necesidad de entregar documentación 3D.
- Necesidad de medición de superficies en lugares de mediciones puntuales.
- Relevamientos en lugares remotos o de difícil acceso.
- Documentar sin saber a priori el futuro de los datos.

3. Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser

Una vez recopilada la información del sitio a documentar y elegido el escaneo láser como la mejor técnica posible para ello, hay que planificar tanto el emplazamiento del equipo láser como los puntos de referencia.

Las posiciones óptimas para el estacionamiento del equipo se deben elegir de manera que garanticen una máxima cobertura y precisión y, al mismo tiempo, se minimice el número de escaneos. La precisión de la medición depende del diámetro de la huella del láser, teniendo en cuenta además que el ángulo de incidencia y el alcance de este son de gran importancia para determinar la posición del escáner. (R. Buron, 2014).

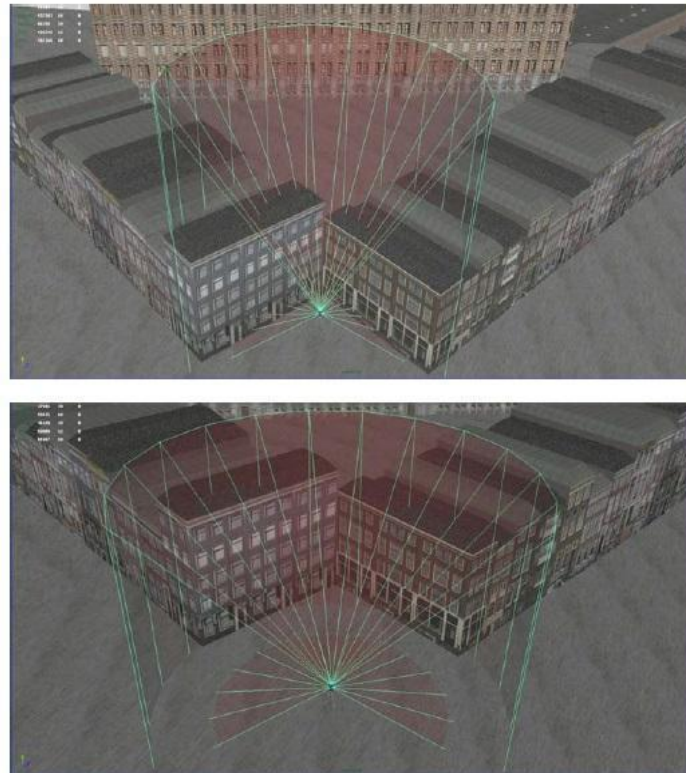


Figura 3.37: Mal posicionamiento del escáner presenta ángulos muy inclinados (arriba).
Buen posicionamiento del escáner (abajo). (Fuente: J. Lerma, 2014)

Algunas recomendaciones para tener en cuenta cuando se trata de determinar la posición óptima del equipo son:

- Comprobar que las posiciones cubren la mayor área posible sin obstáculos en la línea de visión y que se producen menos sombras posibles.
- Comprobar que se cumplen los alcances mínimo y máximo para alcanzar la precisión requerida. Cuanto mayor sea la distancia al objeto, menor será la precisión y la resolución.
- Minimizar la aparición de pequeños ángulos de intersección. Con ángulos muy agudos el láser no se refleja tan bien, por lo que la precisión del escáner es menor.
- Intentar reducir el número de estaciones.

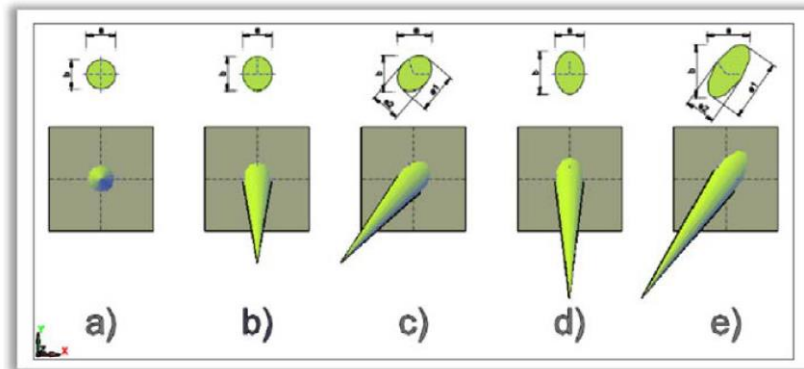


Figura 3.38: Elipses de error en relación con el ángulo de incidencia sobre la superficie a medir.
(Fuente: Faro, 2011)

Otros factores importantes que hay que tener en cuenta son:

- Seguridad y salud
- El entorno (vibraciones, movimientos, clima)
- Elevación del escáner sobre el suelo.
- Visibilidad de los puntos de referencia artificiales o naturales.

4. Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia

Junto a las posiciones óptimas del escáner, los tipos de puntos de referencia y sus posiciones, y/o configuración geométrica, también son importantes. Los puntos de referencia se suelen usar principalmente para registrar (vincular) los escaneos desde diferentes posiciones. Actualmente hay una gran variedad de objetivos disponibles: dianas reflectantes, esféricos, de papel, prismas, etc. (también se pueden usar puntos comunes entre escaneos del mismo objeto relevado, como ser vértices, aristas o puntos comunes). En el futuro, habrá dianas incluso con receptores GPS.

Uno de los puntos más importantes cuando se utilizan las dianas es que tienen que estar espaciadas o distribuidas lo más ampliamente posible, no solo en las direcciones de los ejes X e Y, sino también en la dirección del eje Z. Esto se olvida frecuentemente y todos los objetivos se colocan simplemente en el suelo.

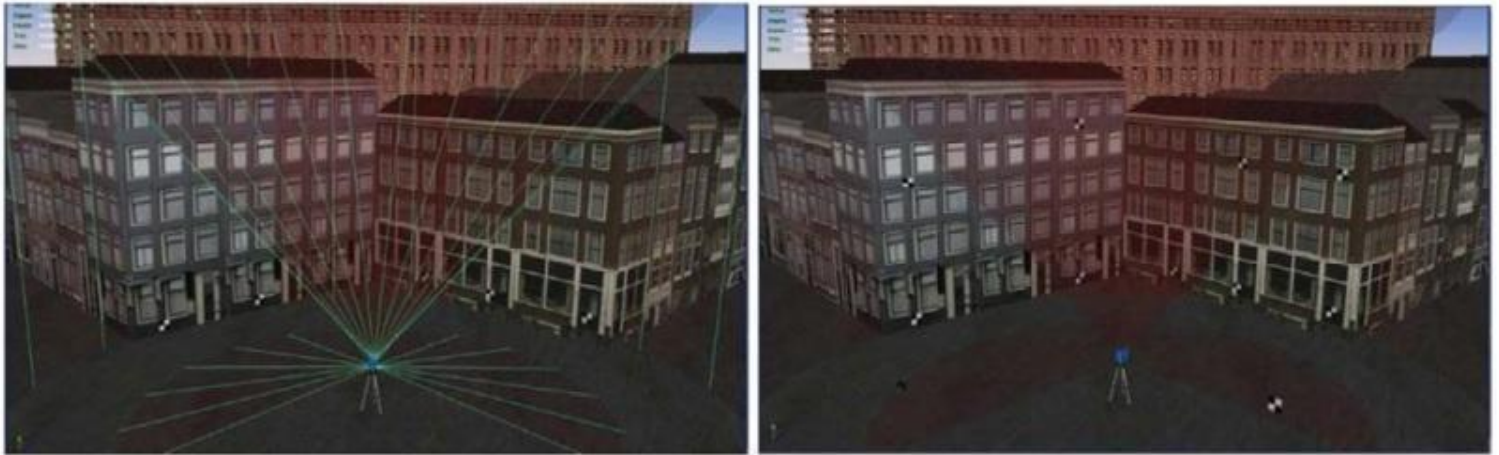


Figura 3.39: Posicionamiento de los puntos de referencia. (Fuente: J. Lerma, 2014)

Algunas configuraciones de los objetivos no producen una solución única cuando se realiza el registro. Por ejemplo, si todas las dianas están en una línea (como podemos ver en la imagen izquierda), tenemos un grado de libertad, la rotación en torno a esa línea.

Frecuentemente las empresas fabricantes y comerciales de los escáneres proporcionan objetivos especiales, como dianas reflectantes o esferas. Estas dianas están diseñadas para reflejar la mayor parte del haz láser. El escáner puede entonces, detectar automáticamente estas dianas y, tras un escaneo de mayor resolución, determinar el centro exacto, ajustando una superficie primitiva a la nube de puntos medida.



Figura 3.40: Ejemplos de puntos de referencia. (Fuente: A. Contreras, 2014)

Dependiendo de la técnica de registro, del equipo utilizado y de las características del elemento escaneado, debe haber al menos 4 puntos de referencia bien distribuidos en cada escaneo.

5. Gestión de los datos

La correcta gestión de los datos debe ser considerada cuando empieza la planificación del relevamiento. Un escáner láser típico captura miles de puntos por segundo (hasta 1.000.000 p/s) por tanto, los conjuntos de datos se hacen muy grandes en poco tiempo. Por esto se necesita un equipo informático adecuado, capaz de almacenar, procesar y archivar los datos.

Para entender el almacenamiento de los datos, es necesario conocer los formatos de fichero más comunes. Los formatos de ficheros determinan la precisión y la cantidad de información que se puede almacenar en el archivo. Algunos formatos guardan coordenadas con precisión simple en punto flotante (32 bits), mientras otros lo hacen con precisión doble en punto flotante (64 bits). Cuando se almacenan las coordenadas euclídeas relativas o absolutas de los puntos, esto puede no ser importante, pero en algunos escáneres almacenan sus datos en coordenadas polares. Con este tipo de coordenadas, un incremento de ángulo de 0.01 grados significa un incremento de 1 cm a una distancia de 50m. En este caso, la precisión del punto flotante es muy importante. Estas diferencias se deben tener en cuenta cuando se realiza una conversión entre diferentes formatos.

Algunos formatos solo contienen la información del punto (coordenadas x, y, z), mientras otros añaden más información como el color o reflectividad, las normales de los puntos, la precisión del escáner, etc.

Los formatos más comunes para almacenamiento de puntos son:

- Formatos CAD: *.dxf*, *.dwg*
- Formatos nativos de Trimble, son formatos que contienen las coordenadas x, y, z, la reflectividad y el color, así como la posición del escáner.

.rwp (Real Works Project, proyecto de nube de puntos creado desde el software de Trimble).

.fls (Escaneos separados realizados con equipos Trimble)

- Formatos nativos de Leica:

.ptx: formato de texto ordenado que contiene las coordenadas x, y, z, la reflectividad y el color.

.pts: formato de texto no ordenado, contiene las coordenadas x, y, z, la reflectividad y el color.

- Formatos nativos Lidar: *.las* y *.laz*, archivos con información de las coordenadas de los puntos de la nube de punto así como la reflectividad y el color de los mismos.

Como el escáner láser captura grandes cantidades de datos, se toman muchos más puntos de los realmente necesarios, aunque estos pueden utilizarse más tarde. Por lo tanto, es de suma relevancia archivar los datos y mantenerlos accesibles por un largo periodo de tiempo. El hecho de archivar los datos se ha convertido, en sí mismo, en un problema importante no solo en el caso de los escaneos láser.

Cuando se archiva, es muy importante añadir metadatos para saber qué es lo que se ha escaneado y como se ha almacenado o procesado.

El medio y el formato en que se almacenan los datos para uso posterior determina si los datos podrán ser leídos en 10 años o incluso 50. Medios de almacenamiento actuales como los discos duros externos, CD's, incluso el *Blu Ray* tienen la posibilidad de almacenar grandes cantidades de datos, pero la duración de su vida es incierta. El formato debería ser lo más simple posible y contener la máxima información posible, lo que implica archivos de gran tamaño.

3.4.2. Trabajo previo en campo

1. Estacionamiento del escáner

El estacionamiento de un escáner sigue generalmente un procedimiento similar al de una ET. Por lo que se llevan a cabo los siguientes pasos:

Montaje sobre el trípode: Se abre el trípode y extienden sus patas; hay que asegurarse de que el trípode esté en un suelo estable. Normalmente el escáner se coloca a una altura cercana a la de los ojos. Cuando la superficie del suelo tiene que ser escaneada es mejor una posición más alta porque proporciona un mejor ángulo de inclinación.

Sujetar el escáner al trípode colocándolo sobre él y anclándolo.

Dependiendo de la técnica de registro, el escáner se deberá poner sobre un punto de referencia.

Nivelar el escáner: Variando la longitud de dos de las patas del trípode, se nivela la superficie superior utilizando niveles tóricos o esféricos, dependiendo del equipo. La burbuja debe estar dentro del círculo interior. Cuando se estaciona sobre un punto de referencia, este procedimiento no debe alterar el punto sobre el que hemos estacionado.

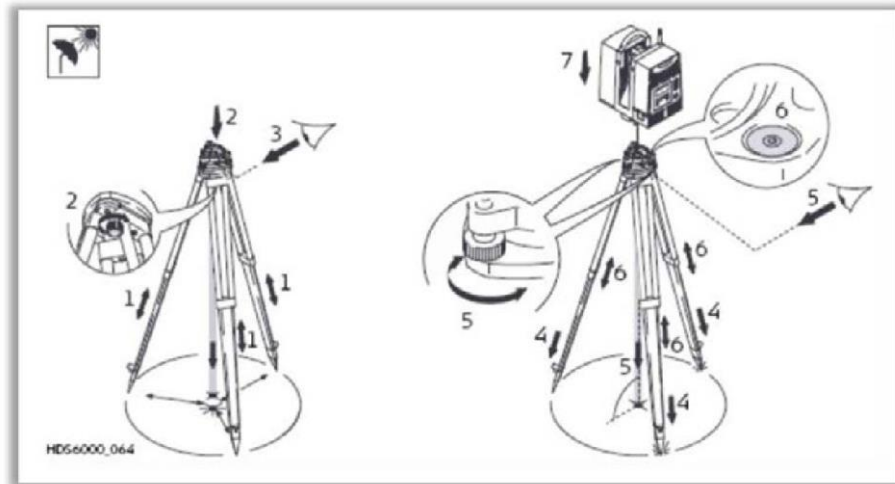


Figura 3.41: Estacionamiento del equipo sobre trípode. (Fuente: R. Buron, 2014)

2. Ajustes del escáner

Una vez estacionado el equipo hay que especificar los parámetros que se van a usar en el proceso de escaneo.

2.1. Definición del área a escanear

Aunque la mayoría de los escáneres actuales pueden escanear 360° totalmente, esto no siempre es necesario. Por tanto, necesitamos definir el área a escanear. Para ello existen varias opciones.

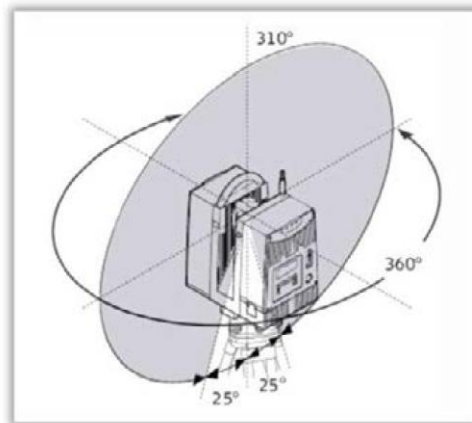


Figura 3.42: Campo visual del láser escáner.
(Fuente: R. Buron, 2014)

Algunos escáneres tienen un panel de control integrado que puede definir el área a escanear. Esta forma es aproximada, pero muy rápida. Conviene seleccionar de más para no perder zonas que realmente interesen.

En otros escáneres se debe conectar a una computadora y el área a escanear se define mediante un programa asociado al escáner. Con este método primero se captura una imagen de la escena y luego seleccionamos sobre la imagen el área a escanear.

Hoy en día los equipos más modernos llevan cámaras o videocámaras integradas que muestran al usuario lo que se está escaneando en tiempo real.

Muchos de los escáneres basados en medida de fase no llevan cámara a causa de su diseño técnico. Sin embargo, estos escáneres pueden tomar tantos puntos por segundo que crear un escaneo a baja resolución tarda lo mismo que otro escáner en tomar fotografías. Este escaneo a baja resolución se puede utilizar para seleccionar el área a escanear.

2.2. Resolución

Otro punto muy importante al planear un trabajo con TLS es definir una correcta resolución. La resolución se define como la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, y de esta manera determina la densidad de puntos de la nube (Lerma y Biosca, 2008). La mayoría de los sistemas de medición poseen especificaciones técnicas con respecto a la resolución y al concepto de precisión. La exactitud también denominada margen de error se puede definir como la proximidad de coincidencia entre

el resultado de la medición y un valor real de la magnitud concreta que se está midiendo (Faro, 2004). En la realidad nunca se puede conocer el valor verdadero de la magnitud medida. Con estas dos definiciones, aunque tienen cierta relación, se da por cierto que no se puede confundir resolución con exactitud. El detalle de menor tamaño que se necesita evidenciar o registrar en el resultado final determina la resolución.

Un escaneo puede contener varios millones de puntos, en especial si se registraron con altas resoluciones, aumentando el tiempo de toma y tamaño de los datos. *“Lo que define el valor del giro para la medición en cada punto es la resolución configurada por el usuario. La resolución se determina por el espacio horizontal (H) y vertical (V) entre los puntos medidos en una determinada distancia (D) estandarizada. Por lo tanto, para definir la precisión posicional de un equipo de escáner láser terrestre no es suficiente saber la precisión lineal, sino también la precisión angular”* (Lerma y Biosca, 2008).

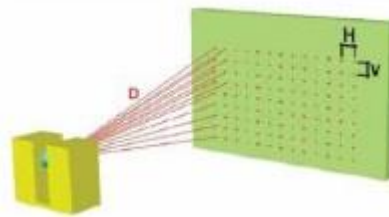


Figura 3.43: Resolución espacial (Horizontal y vertical).
(Fuente: J. Lerma, 2008)

Al utilizar los equipos de escáner lo primero que se debe hacer entonces es definir los parámetros de escaneo (resolución y calidad). Estos se establecen para garantizar que los objetos de interés sean capturados en acuerdo con los resultados esperados. La resolución del escáner está definida para una cierta distancia desde él, hasta al punto. Los parámetros de escaneo requeridos para la adquisición adecuada de objetivos pueden exceder las necesidades de los parámetros requeridos para capturar el objeto de interés en ciertos casos, por lo tanto, es fundamental que los objetivos se ubiquen a distancias adecuadas relativas a su entorno (con luz solar, nublada, en interiores, etc.) y a la resolución especificada. Cuando se escanean puntos a distancias grandes generan una resolución menor, mientras que los puntos más cercanos tendrán una resolución más alta. Se pueden lograr distancias más grandes fácilmente aumentando el tamaño del objetivo o escaneando con una resolución mayor.

La resolución del escaneo es medida de fracciones de la máxima resolución. Los parámetros de calidad influyen respectivamente en la calidad del ruido de los datos de escaneo. El ruido es el nivel de desviación de una nube de puntos respecto de una superficie real, provocado por el ángulo de inclinación, el tamaño de la huella del punto, la reflectividad, las condiciones atmosféricas, etc. (Lerma y Biosca, 2008).

2.3. Calidad

La calidad es una característica que interactúa con la de resolución. Los equipos TLS permiten equilibrar las necesidades de calidad y velocidad mediante las configuraciones. Aumentar la calidad, reduce el ruido de los datos de escaneo lo que provocará un mayor tiempo de relevamiento. Al optar por niveles de calidad menores, se reducirá el tiempo de escaneo y aumentará la eficiencia en el manejo del tiempo. El deslizador de calidad establece niveles de calidad, ya sea por medio de diversas frecuencias de medición, o mediante la aplicación de compresión de ruido adicional. El escaneo contiene varios millones de puntos, en especial si los escaneos se registraron con resoluciones altas.

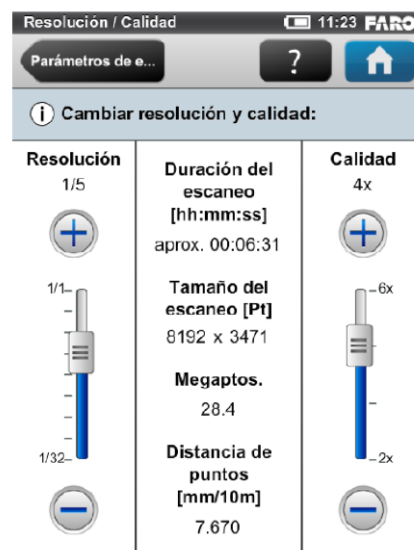


Figura 3.44: Configuraciones de resolución y calidad.
(Fuente: Propia)

2.4. Clinómetro

El escáner utiliza un clinómetro que activa o desactiva el uso automático de la medición de la inclinación del compensador de eje doble incorporado para el registro de escaneos. Los datos de medición obtenidos por este sensor siempre se adjuntan a cada escaneo. Para obtener los datos más confiables del compensador de eje doble, hay que asegurarse que la inclinación del escáner sea inferior a 5°.

2.5. Brújula

Del mismo modo que con el clinómetro, los datos de la brújula siempre se miden y se adjuntan a cada escaneo y se utilizan en forma automática para el registro.

2.6. Altimetro

Como en el clinómetro y en la brújula, los datos obtenidos por el altímetro siempre se miden y se adjuntan a cada escaneo, utilizándose luego de forma automática para el registro. Se puede ingresar una altura de referencia antes de comenzar el proyecto, esta altura de referencia luego será base de todas las mediciones que se realicen.

3.4.3. Toma de datos

1. Definición del objeto a escanear

Una vez determinadas las configuraciones del equipo y seleccionada la resolución que se desea trabajar se puede comenzar a escanear. El proceso de escaneo es totalmente automático. Luego de dar inicio al programa de control del escáner, o directamente en el escáner, este se mueve a la posición de partida y comienza a tomar puntos. Estos puntos se almacenan en el ordenador portátil o en la memoria interna del escáner, dependiendo con el equipo que se esté trabajando.

Según la resolución elegida y el área escaneada, el proceso de escaneo puede durar desde 2 minutos hasta horas. Durante este tiempo es apropiado tomar notas del relevamiento, hacer un croquis del entorno, o incluso del elemento escaneado (en caso de que ya no se haya hecho). El croquis y las notas deberán mostrar y describir el o los objetos escaneados,

las posiciones de las dianas, esferas u objetivos numerados, y los estacionamientos del escáner, así como las condiciones externas específicas que puedan influenciar el escaneo y los ajustes establecidos.

2. Escaneo de los puntos de referencia

Cuando se utilizan puntos de referencia, artificiales o naturales, para registrar las nubes de puntos, dependiendo también del equipo que se esté utilizando para el escaneo, dichos puntos se deben medir en escaneos específicos y con otra resolución.

Generalmente dichos puntos se relevan después de escanear el objeto, aunque cuando se trabaja al aire libre se suele realizar al revés para evitar el movimiento de estos. Con los equipos más nuevos este paso se omite, ya que escanean a muy alta resolución en muy poco tiempo y en ese mismo escaneo las referencias están incluidas.

3. Comprobación de la captura de datos

Es muy importante comprobar que el escaneo está completo una vez que este haya terminado. Para el caso de los equipos que trabajan con un ordenador portátil una vista simplificada puede ser útil a este fin.

3.4.4. Preparación de los datos

Una vez completa la captura de datos, se trabajará en el software adecuado para el procesamiento de los mismos.

El resultado del escaneo a través del equipo TLS es un conjunto de puntos tricoordenados, X, Y, Z, que muestra la distribución espacial del objeto en el sitio llamado “nube de puntos”. Para la generación de modelos tridimensionales a partir de los datos de escaneo, se requiere hacer un tratamiento especializado de la nube de puntos que consiste en varias etapas, entre las cuales se destaca el registro de los escaneos.

Es aconsejable empezar a trabajar con una copia de los escaneos originales y mantener los originales como copias de seguridad. Los diferentes tipos de escáneres almacenan las nubes de puntos de diferentes formas. En tareas de almacenamiento es importante que el formato del archivo sea fácilmente accesible y reconocible. Si se puede acceder a él

directamente, después se podrá convertir a cualquier otro formato legible con un programa adecuado.

3.4.5. Registro y georreferenciación de los escaneos

En la mayoría de los casos, el objeto escaneado es demasiado grande para que se escanee desde una única posición, por lo que son necesarios varios estacionamientos del escáner. Cada nube de puntos obtenida desde cada estacionamiento tiene un sistema de referencia diferente.

Para realizar el registro, que es la unión de las diferentes nubes de puntos, necesitamos transformar sus coordenadas a un sistema único y común. Para esta transformación, es necesario tener una serie de puntos homólogos en los sistemas de coordenadas implicados.

Para este proceso de transformación de coordenadas cada software dependiendo del fabricante utilizan distintos algoritmos para resolver y calcular las coordenadas.

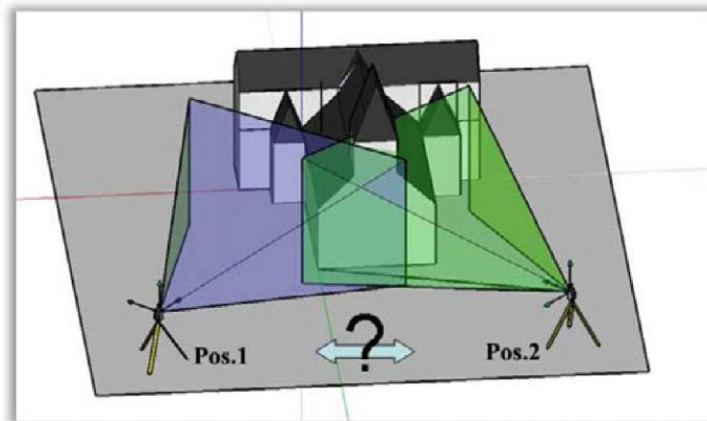


Figura 3.45: Situación relativa de los estacionamientos. (Fuente: J. Lerma, 2008)

Directamente vinculado con la alineación o registro, se encuentra la georreferenciación de todo el conjunto de datos.

El relevamiento y posterior registro para la mayoría de los casos y equipos, se realiza en sistemas de coordenadas locales, con lo cual para muchos proyectos será conveniente realizar la georreferenciación y pasar las coordenadas del relevamiento a coordenadas globales.

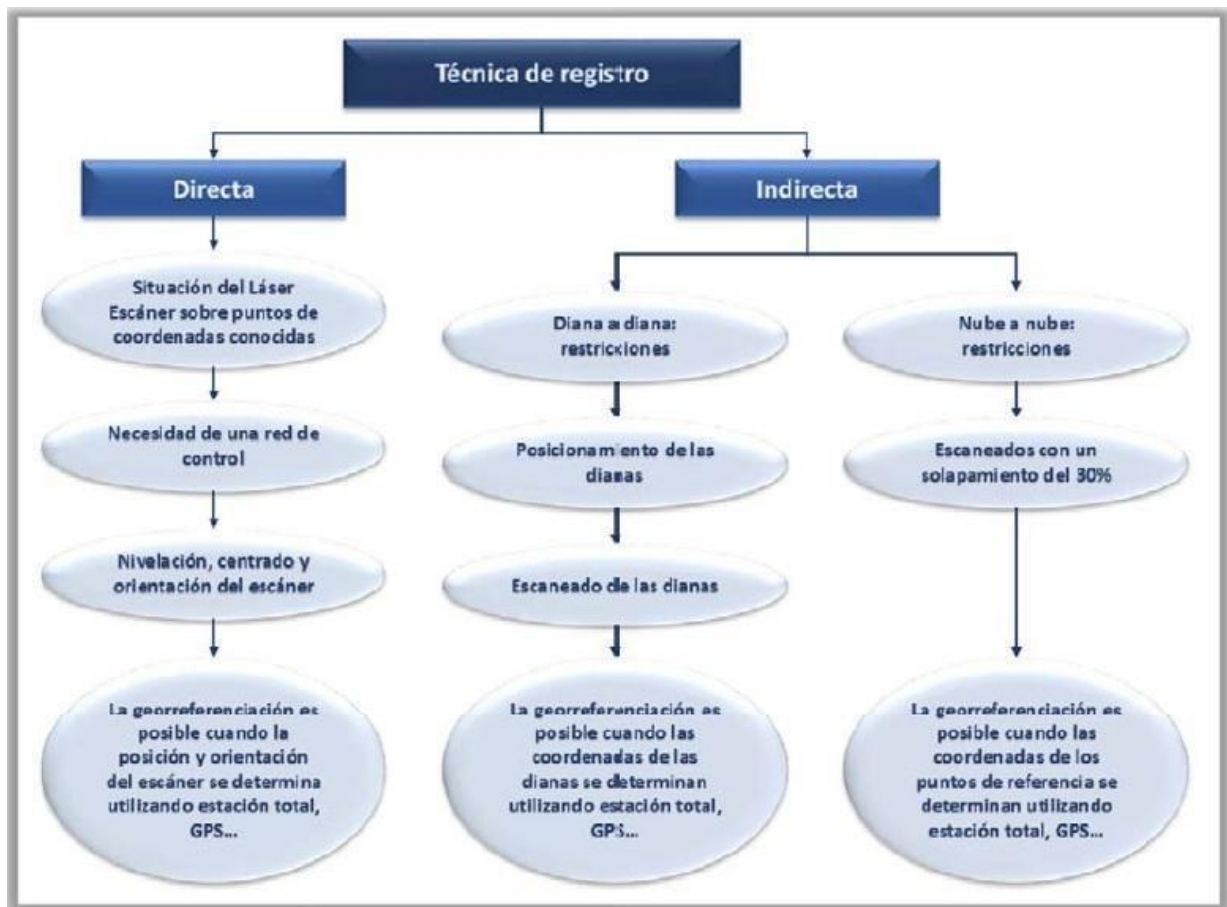


Figura 3.46: Clasificación de las técnicas de registro. (Fuente: F. Romeral, 2014)

1. Registro indirecto

El registro indirecto conlleva el uso de dianas, esferas o targets (artificiales o naturales) para alinear las nubes de puntos. Si se necesita georreferenciar se deben medir los puntos de referencia mediante técnicas topográficas o geodésicas y transformarlos a un sistema de coordenadas conocido.

Para llevar a cabo el registro indirecto se necesita, como mínimo, tres puntos de referencia presentes en las dos nubes de puntos a registrar. Sin embargo, siempre es mejor tener más de tres puntos, ya que de esta manera los errores se pueden minimizar mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

1.1. Registro objetivo a objetivo

Los objetivos pueden ser naturales o artificiales. Los objetivos artificiales pueden ser de formas muy variadas. Hay objetivos especiales suministrados por las propias compañías fabricantes de láser escáner, hechas de material altamente reflectante. No obstante, se pueden utilizar dianas o targets impresas en papel.

Cuando no hay objetivos artificiales, o cuando no se pueden colocar en zonas inaccesibles, se pueden utilizar entidades naturales. Estas entidades o blancos naturales son puntos de interés en la propia estructura a escanear que pueden ser identificados con alta precisión, como por ejemplo bordes de ventanas, marcos de puertas, letras en carteles, aristas de edificios.

Cuando se realizan escaneos muy inclinados se recomienda utilizar objetivos esféricos, evitando tener que elegir puntos comunes que pueden tener distinta incidencia del haz láser en las distintas posiciones de escaneo.

La identificación de entidades comunes puede ser automática o no. Para el caso de ser manual es bastante subjetiva, especialmente en escaneos muy inclinados.

1.2. Registro nube a nube

Otra forma de registrar dos nubes de puntos es usando el solape entre ellas. Si dos nubes de puntos tienen bastante solape (generalmente entre el 30% y 40%), se puede utilizar la técnica llamada ICP (*Iterative Closest Point*) para alinear ambos conjuntos de datos. En algunos casos se requiere que el usuario marque al menos tres pares de puntos correspondientes en las nubes de puntos. Como estos tres pares de puntos no serán exactamente los mismos, el algoritmo comprueba iterativamente las distancias entre todos los puntos de las nubes y estima la transformación para alinear ambos conjuntos de manera que minimice el error.

Esta técnica de registro se debe emplear con precaución. Cuando se escanean estructuras lineales muy largas en las que se necesitan varios estacionamientos, pequeños errores en el registro de cada par consecutivo de nubes de puntos se pueden propagar y producir errores globales grandes.

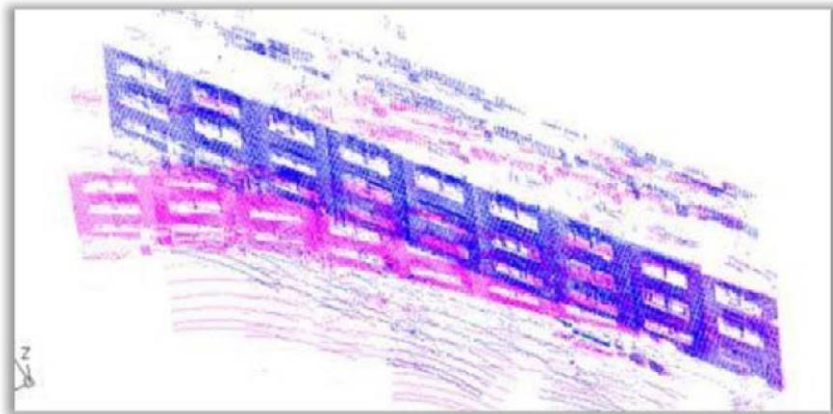


Figura 3.47: Ejemplo de propagación de errores entre pares consecutivos de nubes de puntos. (Fuente: J. Lerma, 2008)

1.3. Registro superficie a superficie

En 2006, A. Gruen publicó una nueva técnica para alinear nubes de puntos por medio de ajuste de superficies geométricas de dos escaneos. Su algoritmo estima la distancia euclídea entre dos fragmentos de superficies por medio de mínimos cuadrados e intenta minimizar estas distancias de forma iterativa, al igual que el algoritmo ICP. Este método ofrece una alta flexibilidad para cualquier tipo de problema de correspondencia en superficies 3D, así como herramientas estadísticas para el análisis de la calidad del resultado final.

El registro superficie a superficie es especialmente útil cuando algunas nubes contienen ruido sustancial. En este caso, es mejor limpiarlas primero y triangularlas por separado de manera que cada una se procese con los ajustes más adecuados. Cuando todas las nubes se han transformado en superficies, se puede emplear el registro superficie a superficie para alinear los distintos escaneos.

2. Registro directo

El registro directo significa que la posición y orientación del escáner se calculan directamente. Esto se puede realizar de dos maneras.

Una forma es utilizando un escáner láser con algunas funciones de ET, donde el escáner se puede estacionar directamente sobre un punto conocido utilizando una plomada láser. La orientación se puede determinar escaneando el único punto de referencia en el emplazamiento siguiente del escáner. Estos escáneres también tienen un compensador de doble eje que

los nivela dentro de ciertos límites. Esta nivelación implica una tercera restricción en la orientación del escáner.

Otra forma de determinar el emplazamiento del escáner es colocando un receptor GPS sobre el escáner. Esta técnica reduce el número de objetivos a considerar y, por tanto, evita los requerimientos en cuanto a la configuración. Además, no necesita que las nubes de puntos se solapen. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, esta técnica es normalmente más rápida que el registro indirecto.

3.4.6. Procesamiento de los datos

El procesamiento de una nube de puntos hace referencia a la transformación de la nube “cruda” (datos directos de la observación) registrada, en un resultado final. El resultado final puede adoptar varios formatos: nube de puntos limpia, planos 2D estándar (planos, elevaciones, secciones transversales, entre otros), modelos 3D totalmente texturados para animaciones y navegación virtual.

Generalmente, el procesamiento de una nube de puntos 3D, se puede dividir en dos categorías. Los resultados finales se pueden extraer directamente de la nube de puntos sin más procesamiento, o creando primero un modelo 3D de la superficie a partir de la nube de puntos y extrayendo los resultados de este modelo. El método elegido dependerá de los resultados pedidos. Por ejemplo, cuando solo se piden un número limitado de secciones transversales, es mejor extraerlas directamente de la nube de puntos. Sin embargo, cuando se necesita un mayor número de secciones (más de 50 por ejemplo), el segundo método es más eficiente porque hay herramientas automáticas para generar múltiples secciones a partir de un modelo triangulado. Además, el modelo de la superficie en general añade más valor y compensación que solo la nube de puntos registrada.

1. Representaciones de las nubes de puntos

El resultado de una captura de un escáner es una gran cantidad de puntos en el espacio, cada uno con coordenadas X, Y, Z y, normalmente, un valor de reflectividad. Algunos escáneres proporcionan incluso información del color en forma de valores RGB (rojo, verde y azul).

La mayoría de los equipos actuales vienen con una cámara integrada con la cual captura el color del punto, facilitando la visualización en escritorio de la nube de puntos.

Además, los softwares tienen la capacidad de mostrar de distintas maneras los puntos además del color real, por escaneo, por estación, por intensidad, por elevación. Dependiendo del objeto y del usuario convendrá una u otra opción para la visualización.

2. Modelización 2D directa a partir de las nubes de puntos

Hacer modelos 2D directamente de las nubes de puntos es una cuestión de interpretación humana. La mayoría de los programas en esta área son programas de dibujo CAD. Una interfaz especial permite al usuario cargar grandes nubes de puntos para procesarlas con herramientas CAD estándar.

Las secciones transversales, planos y elevaciones se pueden generar tomando un corte fino de la nube de puntos proyectando todos estos puntos sobre un plano. Luego se tendrá que dibujar manualmente o conectar los puntos creando líneas, arcos, etc.

3. Modelado 3D

Generalmente, el producto final de un proceso de modelado 3D es una malla de superficie del objeto. Conectando todos los puntos de la nube con pequeños triángulos, se genera un modelo de superficie o malla. Esta malla es una interpolación de los puntos tridimensionales que crea una representación completa de la superficie.

Para crear un modelo de calidad, se deben seguir ciertos pasos.

3.1. Filtrado de ruido

Un primer paso en el proceso de mallado es la eliminación del ruido de los datos de la nube de puntos. Si el ruido se ha introducido a causa del viento, superficie de reflexión mala u otras causas, el modelo contendrá triángulos que conecten los puntos con ruido a los puntos correctos. Esto produce una malla llena de picos; por tanto, es importante eliminar este ruido desde el primer momento.

En general, el operador puede identificar fácilmente algunas partes escaneadas que no son necesarias en los resultados finales. Por tanto, es

necesario que se lleve a cabo un primer análisis de la nube de puntos y se eliminen a mano todos los puntos que no sean necesarios.

Los algoritmos automáticos que eliminan el ruido se basan, principalmente, en dos principios. El primero es el hecho de que los puntos que tengan a su alrededor otros pocos puntos o ninguno son considerados ruido. Probablemente son originados por personas y otros obstáculos que se mueven por delante del escáner mientras este está en funcionamiento. Estos puntos se identifican fácilmente utilizando un número limitado de parámetros de ajuste y, por tanto, eliminados de la nube de puntos.

Otro principio de eliminación es mover ligeramente los puntos para alcanzar una suavidad óptima de la superficie. Estos algoritmos intentan ajustar localmente planos a puntos de la nube. Cuando el punto central queda muy lejos del plano ajustado, se mueve hacia el plano de manera que proporcione una mejor consistencia a sus vecinos.

Existen otros filtros de ruido, algunos especializados según el tipo de escáner, que eliminan puntos con errores sistemáticos. Por supuesto, se debe tener cuidado cuando se elimina puntos ruidosos ya que pueden perderse entidades cuando se suaviza en exceso o cuando se eliminan demasiados puntos.

3.2. Remuestreo

Cuando se crea una malla, el número de triángulos es más del doble del número de puntos. Un modelo de una nube de puntos de un escáner por fase puede tener más de 20 millones de triángulos. Esta cantidad hace que sea difícil trabajar con programas estándar. Generalmente, se necesita reducir el número de triángulos antes de crear el modelo.

3.3. Triangulación

Existen diferentes algoritmos para crear mallas a partir de nubes de puntos. Las conexiones entre puntos se realizan normalmente mediante triángulos. La técnica más popular de modelización con triángulos es el criterio de triangulación de Delaunay. Este criterio establece que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo.

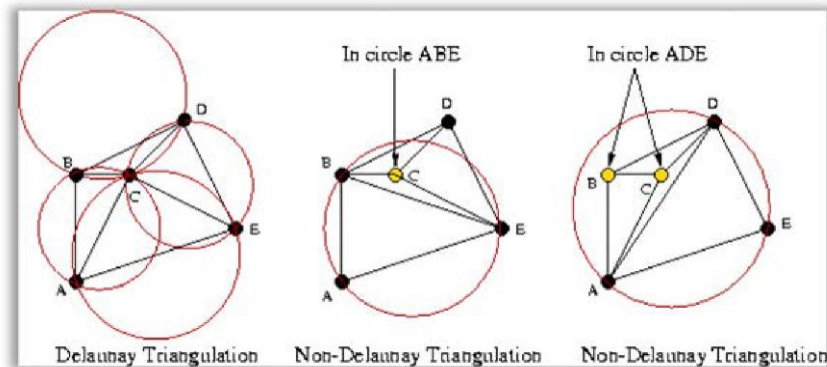


Figura 3.48: Triangulación de Delaunay. (Fuente: Apuntes de Topografía 3, 2016)

3.4.7. Control de calidad

La calidad de los relevamientos mediante escáneres láser necesita una consideración cuidadosa durante todo el proceso de medición y procesamiento. Cada vez que se estaciona el equipo para tomar datos (antes, durante y después) ciertos elementos de los datos deberían inspeccionarse y contrastarse con los resultados por separado. La mayoría de los aspectos técnicos que pueden influenciar la calidad de los datos están detallados. Además de estos factores, el operador del escáner debe comprobar otros factores, como la existencia de recubrimiento suficiente, o que la distribución de los puntos tenga la resolución requerida, que las fotografías estén correctamente tomadas o que la adquisición de los objetivos sea correcta.

La calidad empieza con un completo conocimiento de las especificaciones del proyecto. Este conocimiento permite la correcta elección del escáner, de la resolución, del método apropiado de registro, etc.

3.5. Análisis de los errores

Las compañías que producen escáneres láser publican las precisiones de sus equipos de manera que ilustran las ventajas de su producto en particular. Sin embargo, la experiencia demuestra que algunas veces esto no se debería tomar como valor real y que la precisión de los instrumentos,

que se fabrican en series limitadas, varía de un instrumento a otro y depende de la calibración individual y del cuidado que se tenga en su uso.

Cada nube de puntos producida por un escáner láser contiene un considerable número de puntos que presentan errores groseros. Si el producto entregado es una nube de puntos, la precisión no se puede garantizar de la misma manera que con instrumentos topográficos tradicionales.

Podemos dividir en cuatro categorías las fuentes de error en el escaneo láser: errores instrumentales, errores relacionados con el objeto, errores por el entorno y errores metodológicos.

3.5.1. Errores instrumentales

Los errores instrumentales pueden ser sistemáticos o aleatorios y se deben al diseño del escáner. Los errores aleatorios afectan principalmente a la precisión de la medida y localización del ángulo en los sistemas de medición de tiempo de vuelo basados en pulsos. Los errores sistemáticos pueden ser generados por la no linealidad de la unidad de medición del tiempo o por la deriva de temperatura en la electrónica de medición del tiempo provocando deriva en la distancia entre otros problemas.

1. Propagación del haz láser

La divergencia del haz es la anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida. La divergencia del haz tiene una fuerte influencia con la resolución de la nube, así como en la ambigüedad posicional del punto medido. La divergencia del haz se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$w(\rho_w) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot \rho_w}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2}$$

dónde:

ρ_w = la distancia respecto de la circunferencia del haz.

w = radio del haz.

w_0 = radio mínimo del haz (en el punto inicial) = circunferencia del haz.

Se entiende que la reflexión del haz tiene una forma gaussiana. Para largas distancias, la divergencia es aproximadamente lineal y el diámetro del haz se expresa como la posición que engloba el 86% de toda la energía del haz con una distribución de irradiancia gaussiana.

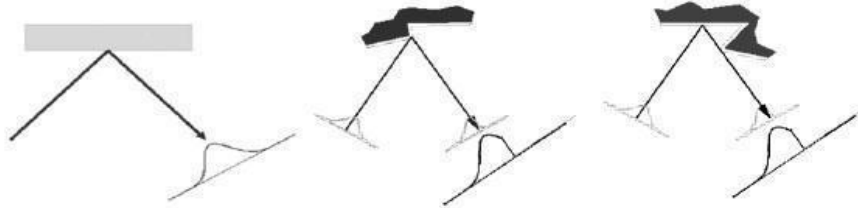


Figura 3.49: Reflexión ideal, iluminación parcial, oclusión parcial.

(Fuente: Lichti, Stewart, Tsakiri, Snow, 2000)

En la práctica, la divergencia del haz tiene efecto en la localización del punto medido. La aparente localización del punto observado está en la línea central del haz emitido. Sin embargo, la localización real está en algún lugar de la huella del haz proyectada. Según Lichti y Gordon (2004), la ambigüedad del haz es aproximadamente igual a un cuarto del diámetro del haz láser.

2. Problema del borde partido

Una de las consecuencias más importante de la divergencia del haz es el problema del borde partido. Cuando un haz láser choca con un borde de un objeto, el haz se divide en dos. Una parte se refleja en la primera parte del salto del borde mientras que la otra parte va más lejos hasta que alcanza otra superficie. El resultado de ello es que la información de un pulso láser que llega al receptor proviene desde dos puntos diferentes en el espacio. Las coordenadas de este punto, en relación con la posición del escáner, se calculan tomando la media de todas las señales recibidas para un mismo pulso y, por tanto, el punto se ubicará en un lugar incorrecto.

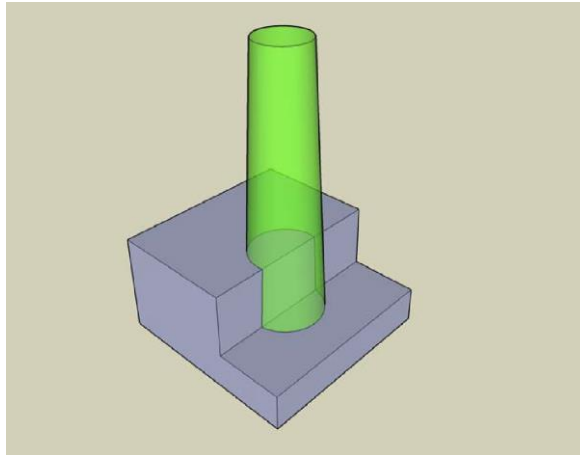


Figura 3.50: Problema del borde partido.
(Fuente: Lichti, Stewart, Tsakiri, Snow, 2000)

Cuando se utiliza un escáner de alta resolución en un objeto, la probabilidad de que el haz de en un borde aumenta y los datos resultantes mostrarán ruido justo detrás de los bordes del objeto. Los escáneres con una anchura de haz menor ayudan a solucionar este problema, pero el alcance se mantiene mientras la anchura del haz aumenta con la distancia.

3. Ambigüedad en la distancia

La ambigüedad en la distancia se puede expresar en función de un número de parámetros según el tipo de escáner láser y su principio de funcionamiento. A continuación, se resumen las ambigüedades en la distancia tomadas de Beraldin et al., 2003:

Para un escáner por triangulación, la ambigüedad en la distancia se puede expresar como:

$$\delta_z \approx \frac{Z^2}{f \cdot D} \delta_p$$

dónde:

- f es la posición efectiva de la huella láser (longitud focal efectiva).
- D es la base de la triangulación.
- δ_p es la ambigüedad en la posición láser. Depende del tipo de huella del sensor láser, del algoritmo para detectar picos, la razón señal ruido y la forma de la huella del láser en la imagen.

- Z es la distancia a la superficie.

Para un escáner basado en tiempo de vuelo, la precisión en la distancia depende del mecanismo del reloj. Esto nos lleva a la siguiente ecuación:

$$\delta_z \approx \frac{c \cdot T_t}{2 \cdot \sqrt{SNR}}$$

dónde:

- T_t es el tiempo de lanzamiento del pulso.

- SNR es la razón señal ruido.

La mayoría de los escáneres terrestres de medio y largo alcance proporcionan una ambigüedad en la distancia de entre 5mm y 50mm para una distancia de 50m. En la fase de modelado, estos errores son minimizados al hacer la media o al ajustar formas primitivas a la nube de puntos.

Los escáneres de onda continua evitan la necesidad de contar con mecanismos de relojes de alta velocidad modulando la señal láser. La ambigüedad en la distancia en los escáneres láser de amplitud modulada depende únicamente de la longitud de onda modulada y de la razón señal ruido. Se puede describir como:

$$\delta_z \approx \frac{\lambda_m}{4\pi \cdot \sqrt{SNR}}$$

Un ejemplo de comparación de la ambigüedad en la distancia para los diferentes tipos de escáner láser se ilustra en el siguiente gráfico:

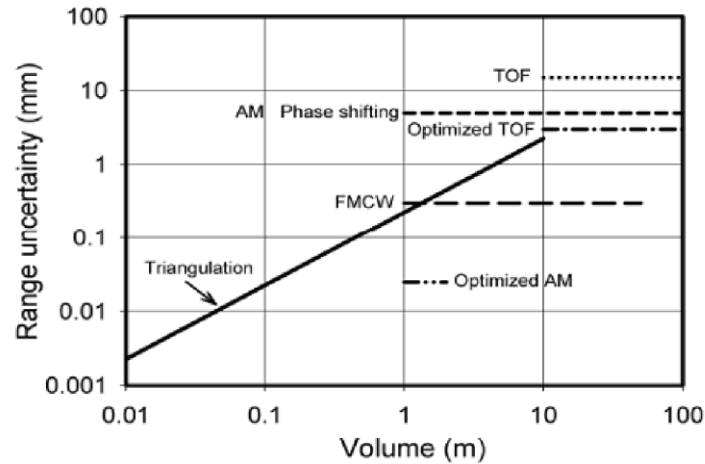


Figura 3.51: Ambigüedad en la distancia para diferentes tipos de escáner láser. (Fuente: Blais, 2016)

4. Ambigüedad angular

La mayoría de los escáneres láser utilizan espejos rotatorios para guiar la señal láser hacia una dirección determinada. Una diferencia angular pequeña puede provocar un error considerable en las coordenadas cuando la distancia al escáner aumenta. La precisión angular depende de cualquier error en la posición de los espejos y la precisión en la medición de los ángulos. Como la posición de puntos aislados es difícil de verificar, se conocen pocas investigaciones acerca de este problema. Como se describe en Boehler et al. 2003, los errores se pueden detectar midiendo distancias horizontales y verticales cortas entre objetos (por ejemplo, esferas) situadas a la misma distancia del escáner y comparando estas mediciones con otras realizadas con métodos topográficos más precisos.

5. Errores en los ejes de un TLS

En el desarrollo de los procesos de calibración de un escáner láser, se necesita un modelo geométrico del escáner. Por lo tanto, definiremos los siguientes ejes:

Eje vertical: Es el eje que permite al escáner mover el haz láser de forma horizontal. Dependiendo del tipo de escáner, panorámico o escáner de cámara, este es el eje de rotación de la cabeza del escáner o el eje ortogonal a los ejes de oscilación de los espejos.

Eje de colimación: Es el eje que pasa por el centro del espejo de escaneo y el centro de la huella del láser sobre la superficie del objeto escaneado.

Eje horizontal: Es el eje de rotación del espejo de escaneo.

Debido a las tolerancias en la fabricación, estos ejes no están alineados perfectamente, lo que nos lleva a un error en la colimación y a un error en el eje horizontal.

3.5.2. Errores relacionados con los objetos

Como los escáneres miden la reflexión del haz láser sobre la superficie, debemos tratar con las leyes físicas de la reflexión y las propiedades ópticas de los materiales. La reflexión de la luz monocromática normalmente muestra rayos reflejados en muchas direcciones. Este tipo de reflexión isotrópica (difusa) se puede describir mediante la ley del coseno de Lambert:

$$I_{reflejada}(\lambda) = I_i(\lambda) * k_d(\lambda) * \cos(\theta)$$

con:

- $I_i(\lambda)$ la intensidad de la luz incidente como función de una longitud de onda (color, es absorbida cuando viaja por el aire).
- $k_d(\lambda)$ el coeficiente de reflexión difusa que también es función de la longitud de onda.
- θ el ángulo entre la luz incidente y el vector normal a la superficie.

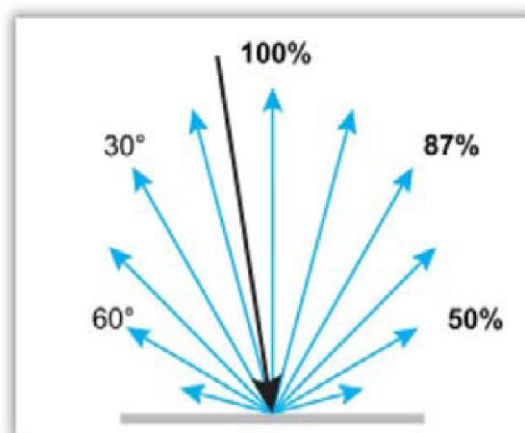


Figura 3.52: Reflexión sobre una superficie lambertiana. (Santana, 2008)

Esta fórmula nos muestra que el haz láser está afectado por la absorción de la señal que viaja por el aire, la reflexión del material sobre el que se mide y el ángulo de incidencia entre el haz láser y la superficie medida. Esto significa que para superficies muy oscuras (negras) que absorben la mayor parte del espectro, la señal reflejada será muy débil, por lo que la precisión del punto estará afectada por el ruido. Superficies con alta reflectividad (superficies brillantes, por ejemplo) resultan en mediciones más fiables y precisas. Sin embargo, si la reflectividad del objeto es demasiado alta (superficies metálicas, cintas reflectivas, etc.) el haz láser es desviado totalmente y dará en otras superficies o se propagará por el aire libre. Esta desviación provoca que el punto medido no sea el deseado originalmente por el láser, sino otro, o ninguno. Este tipo de ruido se le denomina ruido *speckle*.

El registro de superficies con reflectividad diferente también ocasiona errores sistemáticos en la distancia, algunas veces incluso de varias veces la desviación estándar de una simple medición.

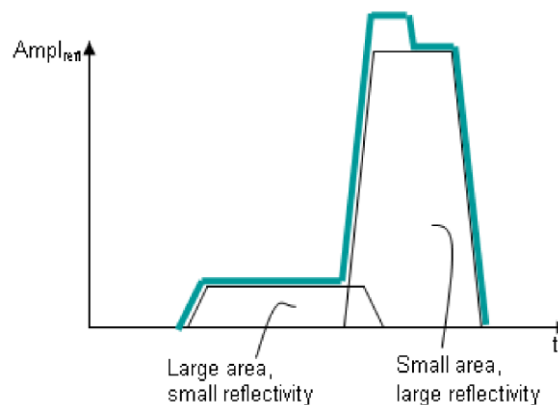


Figura 3.53: Respuesta de la señal cuando se escanean superficies con diferente reflectividad. (Fuente: Blais, 2006)

Al igual que las propiedades de la reflexión de la superficie, las propiedades del color también afectan a la precisión. Existen discrepancias sistemáticas significativas en la distancia que, en términos generales, se pueden relacionar con el color de cada superficie en relación con la longitud de onda del láser utilizado.

Aparte de los efectos de reflectividad, numerosos materiales presentan una capa semitransparente que permite pasar el haz láser refractándose y reflejándose en el propio material. Por ejemplo, la madera, el mármol o el poliestireno expandible. Estos efectos nos conducen a añadir una constante en las mediciones de la distancia, que debe ser considerada en su cálculo.

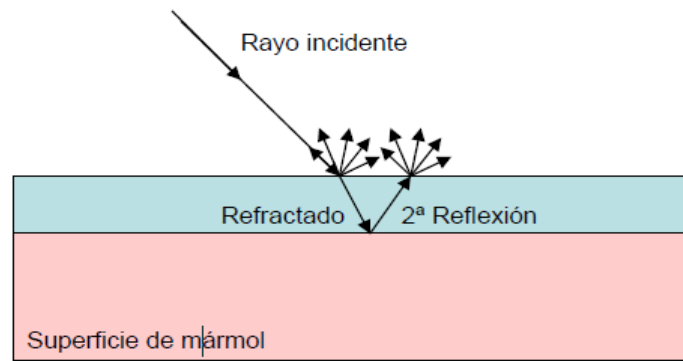


Figura 3.54: Efectos de la refracción en materiales semitransparentes no homogéneos. (Fuente: Santana, 2008)

3.5.3. Condiciones ambientales

1. Temperatura

Se destaca que la temperatura dentro del escáner puede ser bastante más alta que la temperatura de la atmósfera de alrededor del equipo debido al calor interno, o al calor resultante de la radiación externa (por ejemplo, el sol). Esta fuente de radiación externa podría calentar un lado del trípode o del escáner, provocando que ese lado se dilate, distorsionando lentamente los datos tomados con el escáner.

No solo la temperatura del equipo es importante, sino la temperatura de la superficie escaneada. Cuando se escanea algo a alta temperatura, por ejemplo, en un entorno industrial, la radiación causada por las superficies calientes de fondo reduce la razón señal ruido y, por tanto, la precisión de las mediciones.

Los escáneres láser solo funcionan adecuadamente cuando se utilizan dentro de un cierto rango de temperatura. Incluso dentro de este rango se pueden observar desviaciones en las distancias.

2. *Atmósfera*

Como en todas las operaciones de medición de distancias, los errores naturales provienen principalmente de las variaciones atmosféricas de temperatura, presión y humedad, lo que afecta al índice de refracción y modifica la longitud de onda electromagnética. Esto significa que la velocidad de la luz del láser depende en gran medida de la densidad del aire.

La mayoría del software de escaneo láser proporciona una corrección del índice de refracción al establecer un parámetro de refracción. Generalmente, los escáneres están preparados para usar los parámetros atmosféricos del estándar ISO (15°C; 1013,25 hPa).

Cuando se trabaja bajo diferentes condiciones atmosféricas, estos parámetros se deben adaptar. Una diferencia de temperatura de 10°C o de una presión de 35 hPa produce un error en la distancia de 1mm/100m.

Cuando se trabaja en aplicaciones terrestres, este efecto no debería afectar seriamente a los resultados para cortas y medias distancias. Para distancias largas o mediciones de alta precisión es obligatorio aplicar los parámetros de corrección atmosférica.

Cuando se trabaja, por ejemplo, en una región montañosa, el descenso de temperatura se puede estimar en 0.65°C/100m y el descenso de presión en 10hPa/100m. Para un escáner estacionado a una altitud de 2000m, el error en la distancia vendría a ser de unos 8mm/100m.

3. *Interferencia de radiación*

Como los escáneres láser trabajan en una banda de frecuencia muy estrecha, la precisión en la distancia puede estar influenciada por una radiación externa, como por ejemplo las fuentes fuertes de iluminación externa. Se pueden aplicar filtros especiales de interferencia óptica para permitir que sólo las frecuencias correctas alcancen el receptor.

4. *Distorsión por movimiento*

La mayoría de los escáneres láser escanean a una velocidad de 2.000/1.000.000 puntos por segundo. Aunque son muy rápidos, escanear a alta resolución puede llevar entre 20 y 30 minutos en el caso de los escáneres basados en el tiempo de vuelo y sobre 10 minutos en los escáneres basados en fase. Durante este tiempo el escáner es susceptible

de vibraciones a su alrededor que produzcan movimientos. Esto es lo que llamamos distorsión por movimiento.

Como cada punto se toma en un tiempo diferente, cualquier movimiento distorsionará los datos tomados. Por tanto, el escáner necesita estar montado en una plataforma estable para minimizar las vibraciones. El objeto escaneado debe permanecer estático también.

Hay que tener en cuenta que el escáner también se mueve por cambios de temperatura. Por ejemplo, si el sol da sobre un lado del escáner, las patas del trípode de ese lado se podrán expandir y distorsionar lentamente los datos escaneados. Los últimos escáneres láser, incorporan un compensador de eje dual integrado que compensa cualquier movimiento del escáner durante el proceso de escaneo.

3.5.4. Errores metodológicos

Los errores metodológicos se deben al método topográfico elegido o a la inexperiencia de los usuarios de esta tecnología. Por ejemplo, si el usuario establece una densidad de malla (resolución) más alta que la precisión por punto del escáner, el escaneo estará sobremuestreado. Entonces, se genera mucho ruido extra y los tiempos de procesamiento se incrementarán de manera considerable. Otra causa de error puede ser la incorrecta elección del escáner, tomando un escáner con un alcance máximo próximo a la distancia máxima a la que se encuentra el objeto escaneado, los escaneos contendrán mediciones menos precisas y un posible ruido.

Los posibles errores generados durante la fase de registro también se encuentran en esta categoría. Dependiendo de la técnica empleada para registrar las diferentes nubes de puntos, se introducen errores. Estos errores ocurren tanto con el método automático, como con el método manual de registro, como se detallará más adelante.

4. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realizará un repaso de los antecedentes de la tecnología láser escáner aplicada a la arquitectura patrimonial y conservación del patrimonio en Uruguay, y para algunos casos del resto del mundo.

4.1. Antecedentes y aplicaciones de esta tecnología en Uruguay

Existen pocos antecedentes de uso de la tecnología láser escáner en Uruguay. Entre ellos si podemos encontrar la aplicación específica a la arquitectura patrimonial o cultural y a la conservación del patrimonio construido; y al escaneo de piezas históricas y arqueológicas.

En cuanto al uso específico en arquitectura patrimonial y conservación de esta, cabe destacar quienes fueron los pioneros en la utilización e importación de esta tecnología para el uso de esta técnica a nuestro país. Hacemos referencia a los Ingenieros Agrimensores Rafael Tornini, Miguel Gavirondo y Antonio Villaluenga.

Comenzaron a incursionar en la materia entre los años 2010 y 2011 con una Estación Total escáner, capaz de relevar hasta 15 puntos por segundo en forma automática, generando en ese momento una revolución en cuanto a los métodos tradicionales de relevamiento utilizados en el país. Luego fueron avanzando en el uso de esta tecnología con diferentes equipos, logrando realizar escaneos con equipos que registran hasta 960.000 puntos por segundo.

Se pueden citar algunos trabajos realizados con dichos equipos como ser, el escaneo de la Capilla de la Calera de las Huérfanas, en Carmelo-Colonia; el hall central de la sucursal de ciudad vieja del Banco República, en Montevideo, y más recientemente la Iglesia Cristo Obrero del Ingeniero Eladio Dieste ubicada en Estación Atlántida, Canelones.

A su vez se tiene registro del uso de esta tecnología en otras áreas, como ser el cálculo de volúmenes complejos (acopios de chip, de rolos de madera, de pedregullo, arena, etc.), control de deformaciones de estructuras complejas, control de los taludes en canteras, calibración de tanques de almacenamiento, relevamiento y documentación de piezas

arqueológicas, entre otras; pero nos enfocaremos en los antecedentes con fines relacionados al patrimonio y la arquitectura.

4.1.1. La Calera de las Huérfanas

Dicha construcción es un sitio patrimonial ubicado en las cercanías de la ciudad de Carmelo, en el departamento de Colonia (al SW del Uruguay). Construida en la época de la colonia (siglos XVIII y XIX) y semi restaurada a mitad del siglo XX, es una de las edificaciones más representativas del entorno.

Con el escaneo láser se buscó generar insumos para la conservación y posible reconstrucción de la Capilla, logrando con el mismo modelar la construcción en 3 dimensiones para obtener planos, cortes y fachadas.

“El relevamiento constó de escaneos desde el exterior e interior de la Capilla, en el cual se capturaron aproximadamente 1.500.000 puntos tricoordenados obtenidos de más de 30 escaneos en más de 15 estaciones con una densidad aproximada de 1punto / 2cm y unas 400 fotografías digitales color, integrando todo en un único proyecto.” (Aplicación de tecnologías de escaneo topográfico láser 3D en Arquitectura Patrimonial. El caso de las Ruinas Jesuíticas Calera de las Huérfanas - Uruguay. Ing Agrim. Rafael Tornini, Ing Agrim. Miguel Gavirondo, 2012).

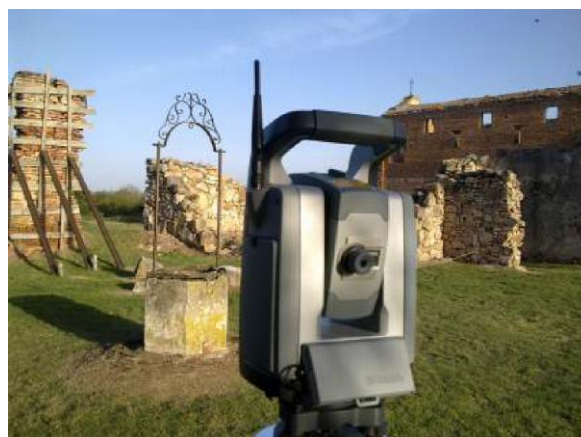


Figura 4.1: Relevamiento Calera de las Huérfanas.
(Fuente: Tornini-Gavirondo, 2012)

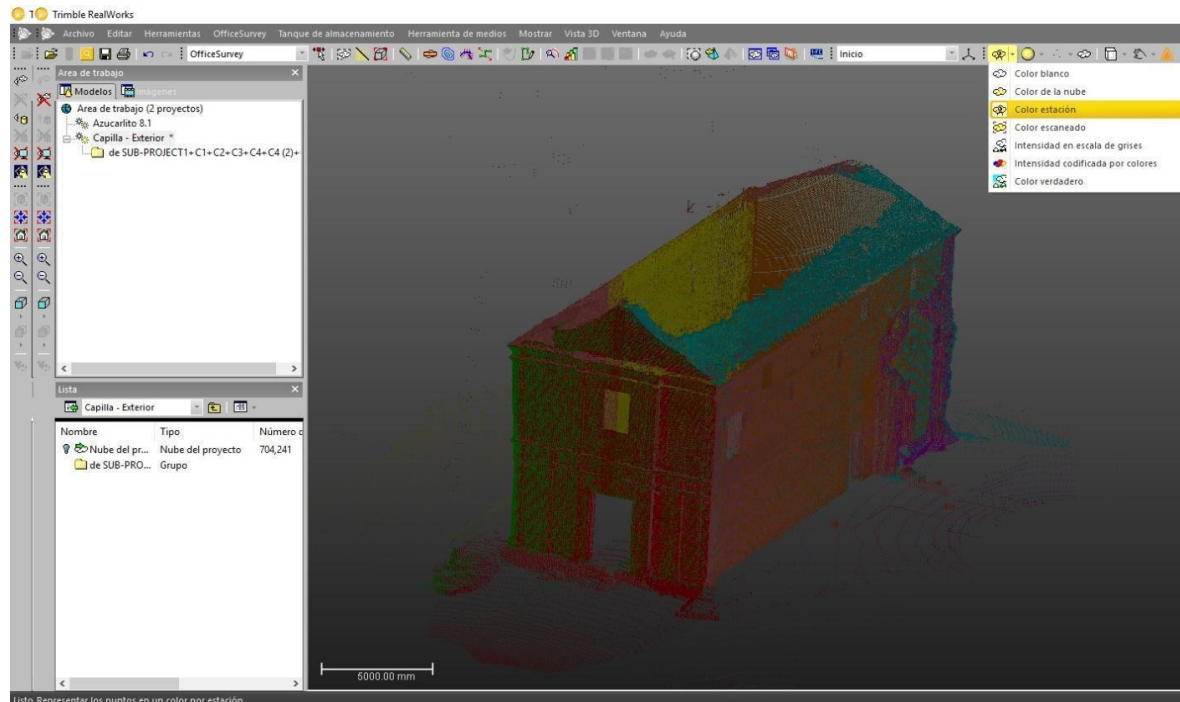


Figura 4.2: Nube de puntos integrada, Calera de las Huérfanas. (Fuente: Tornini-Gavirondo, 2012.)

4.1.2. Iglesia de Cristo Obrero – Estación Atlántida

Construida entre 1958 y 1960, es la obra más conocida con el sistema de cerámica armada desarrollado por el ingeniero uruguayo Eladio Dieste. Por estos años Dieste había desarrollado un sistema constructivo en láminas de ladrillo reforzado, curvadas de manera que adquirieran resistencia, aplicándolo a galpones y naves industriales. En la Iglesia utiliza los mismos principios estructurales y constructivos para un problema similar, las soluciones de cubiertas de “sheds” que Dieste había utilizado en otros proyectos son superadas por el tratamiento de la estructura y la luz que hace en esta iglesia.

La lámina curvada de los muros adquiere resistencia a medida que se eleva, para finalmente unirse solidariamente a la cubierta. Como explica Dieste en una entrevista: *“Yo creo que lo que debemos procurar es eso: dentro de lo posible, resistir con forma, y no con acumulación de material, porque es lo que supone un respeto por el material y un respeto por el prójimo, en último caso, que es el que ha hecho la materia”*.

La iglesia completa es la respuesta a un encargo modesto, donde el cliente, empresario que donaría la iglesia a la comunidad, no quería contratar un arquitecto por considerarlo innecesario para una población pobre que no sabría apreciar la belleza y el costo extra que esta suponía. Dieste respondió proyectando un galpón barato, rápido y a la vez, profundamente bello.

El relevamiento consistió en escaneos desde el interior, exterior y desde la cubierta de la Iglesia. En total se relevaron más de 200 millones de puntos tricoordenados, obtenidos de más de 15 escaneos en más de 10 estaciones, con una densidad aproximada de 1punto / 1cm; y unas 300 fotografías digitales color, integrando todo en un único proyecto.

El objetivo del relevamiento fue lograr planos conforme a obra de la construcción, logrando planos, cortes, anchos de muros, cotas, etc., comparando con los planos originales que se tenían de la época de la construcción de esta.



Figura 4.3: Relevamiento Iglesia Cristo Obrero - Dieste. (Fuente: Propia).

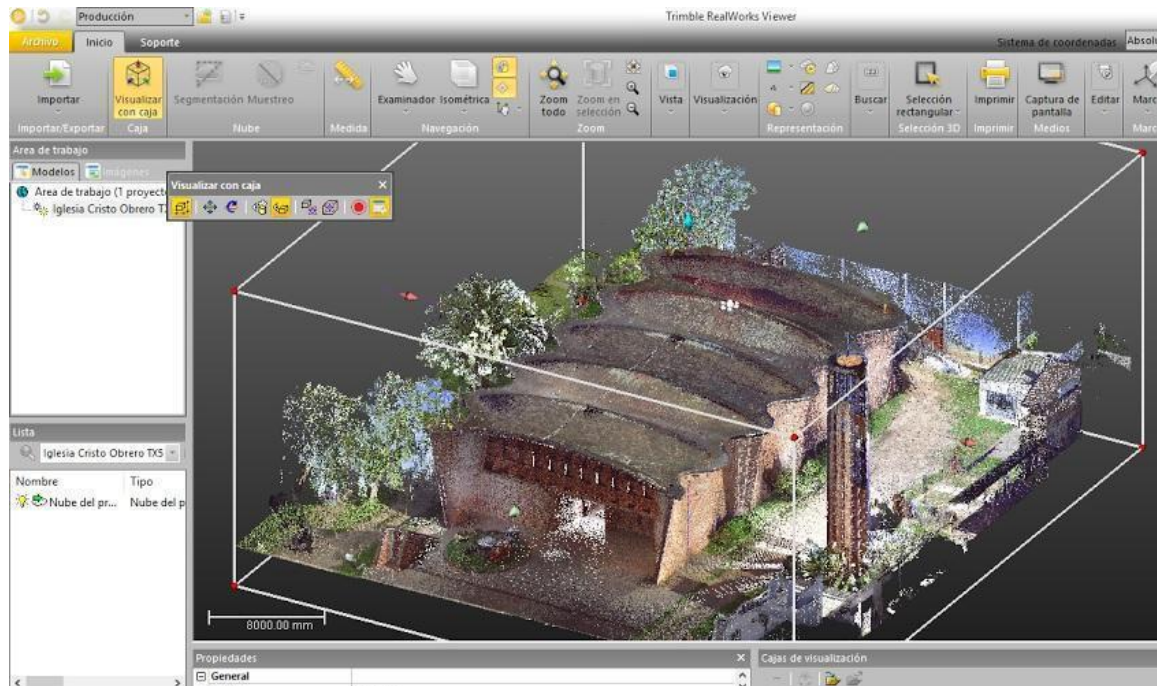


Figura 4.4: Iglesia Cristo Obrero modelada por más de 200 millones de puntos. (Fuente: Propia).

4.2. Antecedentes y aplicaciones de esta tecnología en el mundo

En contraste con la cantidad de antecedentes encontrados en Uruguay y al tiempo que hace que se utilizan los equipos TLS aquí, en el mundo hay muchos países que utilizan la tecnología y los equipos de medición láser escáner para muchas aplicaciones en distintas áreas desde hace varios años.

En España esta tecnología es la elegida para el registro y documentación del patrimonio construido hace también varios años. Los equipos y software de escaneo láser aplicados a la arquitectura son muy usados para estudiar casos particulares y presentarlos como proyectos de final de carrera o tesis de doctorado en la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad de Salamanca, en la Universidad del País Vasco, entre otras.

En especial, es interesante contar la dedicación y alguno de los trabajos realizados por el Arqueólogo y profesor de la Universidad del País Vasco, España, Agustín Azkarate Garai-Olaun.

Catedrático de Arqueología en la Universidad del País Vasco, compagina en su labor docente con la investigación artística y la dirección de diversos proyectos. En los últimos años se ha centrado en el patrimonio edificado, destacando la importante labor realizada en la restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz y los estudios histórico - arqueológicos que se están llevando a cabo sobre el casco histórico en la ciudad de Vitoria. Ha sido también director de GATMAA (Unidad Asociada al Consejo Superior de Investigaciones Científicas), director del grupo de investigación arqueología de la arquitectura (GIAA) de la Universidad del País Vasco, entre otras tareas relacionadas con el estudio de la arquitectura, restauración y memoria del patrimonio construido.

4.2.1. Patrimonio Cultural

Según Agustín Azcárate en su publicación “El patrimonio arquitectónico” define al patrimonio cultural de la siguiente manera:

“En su sentido más amplio el patrimonio es el conjunto de bienes heredados del pasado y, en consecuencia, el patrimonio arquitectónico puede definirse como el conjunto de bienes edificados, de cualquier naturaleza, a los que cada sociedad atribuye o en los que cada sociedad reconoce un valor cultural. Esta es una definición dinámica, pues los valores culturales son cambiantes, lo que implica que el concepto mismo de patrimonio se encuentra en permanente construcción y que los objetos que integran el patrimonio forman un conjunto abierto, susceptible de modificación y, sobre todo de nuevas incorporaciones.

De la aceptación de que el patrimonio cultural, y de modo más específico el patrimonio arquitectónico, debe representar a toda la sociedad, del pasado en su integridad histórica, se ha derivado también el reconocimiento progresivo de que el patrimonio debe ser accesible a toda la sociedad del presente. Garantizar el derecho a este acceso tiene una dimensión positiva de alcance individual en cuando que la experiencia del patrimonio puede favorecer el desarrollo personal a través del conocimiento, pero también tiene múltiples dimensiones colectivas. Por un lado, el patrimonio es un vehículo de integración social, como obra o legado del pasado en la que una comunidad se reconoce y con la que se identifica, por otro el patrimonio es también un capital del que esta comunidad tiene derecho a servirse para promover su propio desarrollo, bien como objeto de disfrute de sus propios

ciudadanos como símbolo de promoción de su propia imagen hacia el exterior o bien como recurso económico dinamizador.” (El Patrimonio Arquitectónico, Agustín Azcárate; Vitoria-Gasteiz, 2003).

4.2.2. Catedral San Miguel Arcángel (Vitoria)

La iglesia de San Miguel Arcángel es un templo gótico-renacentista construido mayormente en el siglo XIV, emplazado en el lado sur del Casco Viejo de la ciudad de Vitoria, (Álava, País Vasco, España)

Fue levantada a finales del siglo XIV en la ladera meridional de la colina de la primitiva Vitoria, fuera de sus muros y de la puerta de San Bartolomé. Ocupa seguramente el mismo lugar de la iglesia juradera dedicada también a San Miguel, que cita y sitúa a las puertas de la villa el documento del fuero fundacional concedido por el rey navarro Sancho VI el Sabio en 1181.

Formalmente, San Miguel es un templo de planta rectangular con tres naves de cuatro tramos cada una, cabecera ochavada y dos capillas absidales laterales. En su costado norte, se abren otros tres oratorios y una antigua sacristía de dos plantas; al sur, se localizan las dependencias de la actual sacristía de dos plantas y las oficinas de la parroquia, el pórtico y la capilla de la Purísima. La fábrica en su conjunto ocupa una superficie aproximada de 2100 m². El hueco interior, incluyendo naves y capillas laterales, tiene 43 m de longitud y 45 de ancho. La nave mayor tiene 19.6 m de alto.



Figura 4.5: Aspectos interior y exterior de San Miguel de Vitoria-Gasteiz.
(Fuente Garcia, Fernandez, Mesanza, 2011)

Para su relevamiento se utilizó el FARO Focus 3D (equipo de similares características al Trimble TX5). Durante las tareas de relevamiento se realizaron un total de 90 escaneos, lo que equivale aproximadamente al registro del 80% del edificio. La unificación de todos ellos requirió el establecimiento de un sistema común de referencia.

Se emplearon dos tipos de referencia; un conjunto de esferas, fabricadas en un material blanco muy reflectivo, y una serie de dianas de cartón pluma con cuadros alternos blanco/negro.



Figura 4.6: Modelo formado por la nube de puntos, resultado del relevamiento. (Fuente Garcia, Fernandez, Mesanza, 2011)

“En fin, a lo largo de casi una década, aquellos que suscribimos el presente artículo tuvimos la oportunidad de trabajar con técnicas fotogramétricas en el proyecto de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz, y no dudamos en ningún momento de las virtudes del método de registro. Sin embargo, a nuestro juicio a la hora del análisis arqueológico sus limitaciones son bastantes con respecto a las posibilidades que nos brinda el láser escáner, y aunque estas aún están en gran medida por desarrollar, pensamos que merece la pena empezar a experimentar. Nuestro ensayo en San Miguel parte del ejemplo e Santa María; empleamos un instrumental diverso, pero los objetivos y la base metodológica siguen siendo los mismos.” (Láser escáner y nube de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. I. García-Gomez; M. F. López de Viñaspre; A. Mesanza Moraza; 2011.)

4.2.3. Modelización 3D de la fachada principal del Monasterio de Santiago de Uclés

Según lo redacta en su proyecto Rubén Burbon Fernández en su “proyecto Modelización 3D de la fachada principal del Monasterio de Santiago de Uclés, 2014”:

“El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es obtener la representación tridimensional de la fachada principal del Monasterio de Santiago de Uclés, monumento de interés histórico y artístico. En concreto se ha elegido la fachada principal construida por Pedro de Ribera por ser representativa del Monasterio y del estilo churrigueresco. Con la tecnología láser escáner, se va a obtener un modelo 3D sobre el que se pueden realizar las medidas necesarias para proyectos de conservación, así como obtener productos con una función divulgativa.

El día 14 de octubre de 2014, se realizó la toma de datos. El levantamiento se llevó a cabo con el equipo de láser escáner Trimble TX5, con la pre-señalización necesaria para realizar una posterior fusión de los mismos (dianas esféricas y cuadradas) y utilizando equipos GNSS Trimble modelos R10, R8 y R6 para la geo-referenciación del proyecto.”



Figura 4.7: Imagen del Monasterio de Uclés. (Fuente: Rubén Burón, 2014).

En el relevamiento se realizaron 15 escaneos con un promedio de 18 millones de puntos capturados por escaneo.

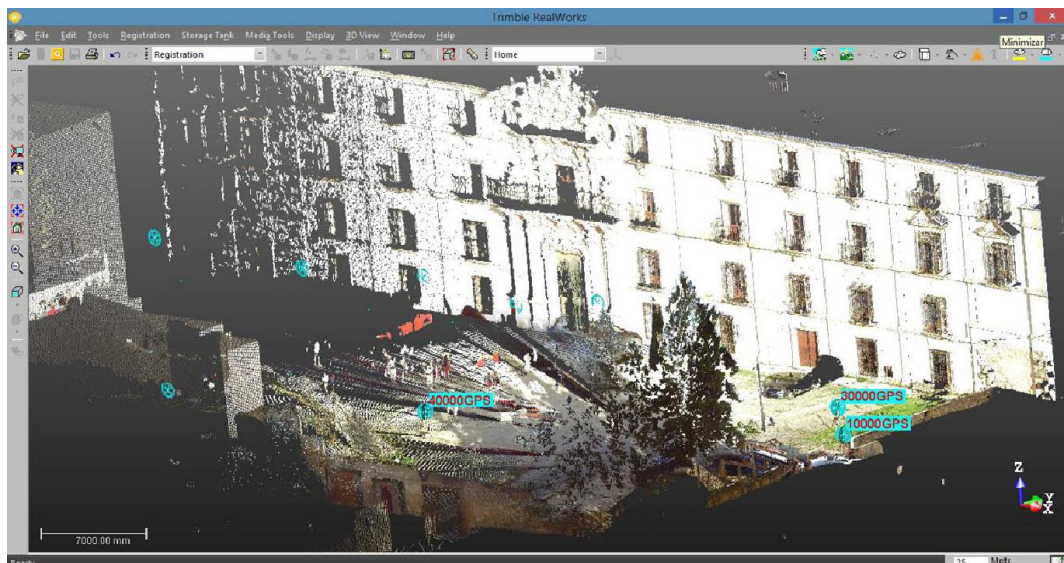


Figura 4.8: Escaneo formado por 15.663.388 puntos. (Fuente: Rubén Burón, 2014).

4.2.4. Obtención del modelo tridimensional de la puerta latina del S. XVI D.C. mediante equipo láser escáner terrestre

“El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera (PFC) es la obtención tridimensional de La Puerta de la Latina, ubicada en el aparcamiento delantero de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. El levantamiento se realiza en campo con el equipo láser escáner terrestre Riegl LMS-Z420i.

Tras la toma de datos se efectuará el tratamiento de la nube de puntos y se obtendrá una “Imagen realista” del modelo, entendiendo por imagen realista una representación final en la que, partiendo del modelo digital triangulado, se realiza una asignación de texturas a partir de imágenes obtenidas in situ.

Este proyecto pretende ser un ensayo de las posibilidades de esta tecnología en el proceso de la representación tridimensional de edificios de interés arquitectónico e histórico.”



Figura 4.9: Imagen de la Puerta de la Latina.
(Fuente: S. Carazo, E. Pardo, 2014).

Después de realizar todos los procesos, se obtiene el resultado final, que puede ser estudiado de distintas formas; se puede trabajar con una triangulación más o menos densa, o con un modelo con textura asociada, o con puntos de un color u otro.



Figura 4.10: Ortofotografía generada.
(Fuente: S. Carazo, E. Pardo, 2014).

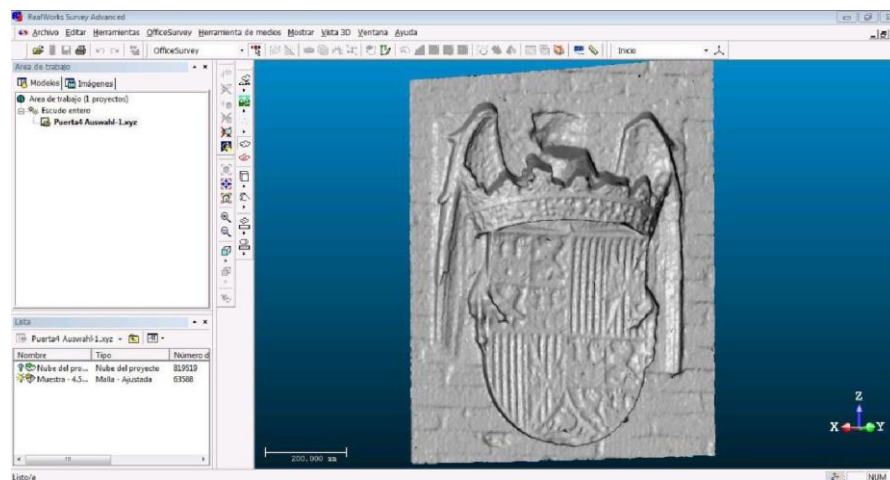


Figura 4.11: Escudo resultado de la edición de mallas. (Fuente: S. Carazo, E. Pardo, 2014).

5. ANÁLISIS PRÁCTICO Y PRUEBAS DE CAMPO

En este capítulo se detallarán las características, configuraciones y funcionamiento del Escáner Láser Topográfico 3D marca Trimble modelo TX5. Equipo utilizado para realizar los análisis prácticos de comparación de precisiones con una Estación Total marca Leica modelo 407; así como en la aplicación para la prueba de campo realizada en el “Caserío de los Negros”.

5.1. Equipo utilizado y sus características

5.1.1. Equipo utilizado en el relevamiento

Para los trabajos de relevamiento en campo se utilizó el equipo Trimble TX5, cedido a tal propósito por Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación de la Universidad de la República, en el marco del convenio vigente con Facultad de Ingeniería y el Instituto de Agrimensura con fines curriculares. El mismo funciona por medio del envío de un haz de láser infrarrojo hacia el centro de un espejo giratorio. El espejo desvía el láser en rotación vertical alrededor del entorno que se escanea, y luego la luz dispersa de los objetos circundantes se refleja en el escáner.



Figura 5.1: Escáner Trimble TX5.
(Fuente: Manual SCENE, 2018)

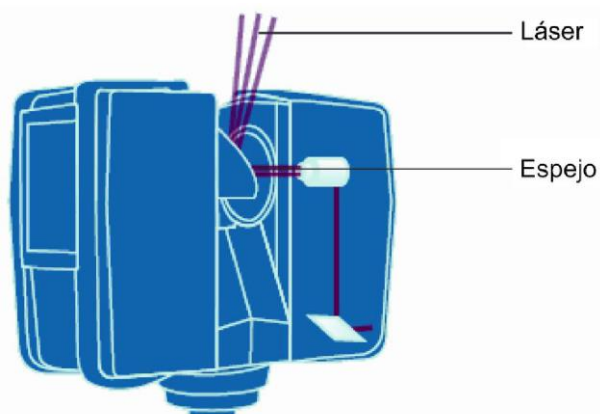


Figura 5.2: Deflexión del láser en el escáner.
(Fuente: Manual SCENE, 2018)

5.1.2. Características

El láser que utiliza este equipo pertenece a la clase 3R, según el estándar europeo IEC 60825-1. Para medir las distancias, el equipo utiliza la tecnología de desfasaje. Esto significa que el haz del láser es modulado mediante ondas constantes de diferente longitud. La distancia del escáner al objeto se determina con exactitud al medir los desfasajes en las ondas de luz infrarroja. Las coordenadas X, Y, Z de cada punto se calculan utilizando codificaciones de ángulos para medir la rotación del espejo y la rotación horizontal del escáner. Estos ángulos se codifican simultáneamente con la medición de la distancia. A partir de la distancia, el ángulo vertical y el ángulo horizontal se formarán las coordenadas polares (δ , α , β), que luego se transforman en coordenadas cartesianas (x,y,z). El escáner cubre un campo de visión de $300^\circ \times 360^\circ$.

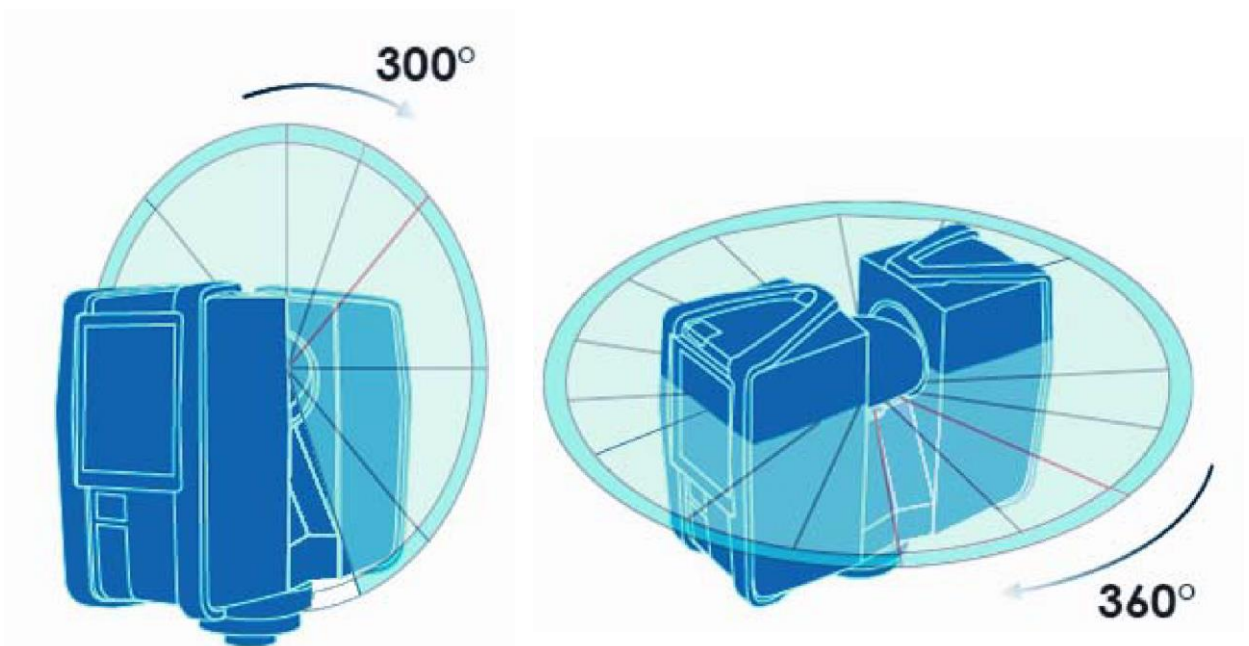


Figura 5.3: Rotación vertical y horizontal. (Fuente: Manual SCENE, 2018)

El equipo puede medir a velocidades de hasta 960.000 puntos por segundo a una distancia de hasta 120 metros. El sistema incluye también una cámara a color integrada con superposición de color sin paralaje de 70 megapíxeles y automática. Como resultado de estas características se obtienen detalladas imágenes tridimensionales en color con realismo fotográfico compuestas por millones de medidas.

Este equipo permite que los escaneos se puedan registrar en una tarjeta de memoria SD extraíble y se pueden transferir fácilmente a cualquier software de manipulación de nube de puntos.

5.1.3. Configuración de los parámetros de escaneo

El equipo permite capturar datos con diferentes perfiles de escaneo, que son conjuntos predefinidos de parámetros de escaneo. Del mismo modo que una cámara fotográfica, se pueden seleccionar parámetros predefinidos según la escena y/o calidad de escaneo deseada. También se pueden cambiar temporalmente la configuración del perfil de escaneo seleccionado.



Figura 5.4: Configuraciones de parámetros del escaneo. (Fuente: Manual SCENE, 2018)

Antes de capturar un escaneo, se deberá seleccionar el perfil de escaneo que se ajuste a las necesidades de la escena y a la calidad de escaneo deseada.

También dentro del perfil seleccionado o creado se deberá asignar la resolución y calidad deseada para el escaneo.



Figura 5.5: Perfiles predeterminados de escaneo.
(Fuente: Manual SCENE, 2018)

El equipo contiene perfiles predeterminados de fábrica, aunque permite la creación de nuevos perfiles.

1. Resolución

La resolución en un relevamiento con equipos que utilicen tecnología láser es básicamente la separación entre puntos que debe tener presente el equipo en la toma de datos de la nube de puntos; es decir si la resolución es de 1/4 se tomará una cuarta parte de los puntos escaneados en el sitio; el rango de resolución que maneja el TX5 varía desde una resolución máxima de 1/1 y una mínima de 1/32. Para tener una captura óptima de una esfera en cuanto a su registro, se debe tener en cuenta la distancia que hay entre ésta y el escáner apreciada en la tabla y el número de puntos capturados. En cuanto más lejos se encuentre el objeto del equipo, menos puntos se capturarán, y será más difícil obtener el cálculo del centro de la esfera para el programa, lo que podría generar error de precisión en el registro o luego en el propio modelado 3D del objeto.

Distancia (m)		Número de puntos capturados												
		3.10	5.60	7.70	10.10	12.50	14.70	17.20	19.70	22.40	24.70	27.20	30.00	32.80
Resolución	1/16	169	29	21										
	1/10	333	118	79	29									
	1/8	675	144	62	51	33								
	1/5	1 829	541	254	136	72	66	61	39	32				
	1/4	2 756	834	384	230	137	55	49	75	41	31			
	1/2	10 103	3 420	1 629	974	632	410	243	208	149	121			
	1/1					2 437	1 646	617	855	702	520	397	347	269

Figura 5.6: Número de puntos capturados en relación con la distancia de escaneo. (Fuente: Faro, 2016)

2. Calidad

La calidad de los datos obtenidos por estos equipos, se vincula con la cantidad de veces que el láser pasa por un punto de la superficie antes de obtener y almacenar información, es decir, el escáner láser Trimble TX5 que tiene rangos de calidad de 1x hasta 16x; pasa “x” cantidad de veces por el mismo punto para obtener la información de este hasta almacenarla y luego poder realizar el procesamiento de los datos.

3. Relación resolución – calidad

La resolución y la calidad están vinculadas de forma recíprocamente dependiente en este equipo, puesto que la resolución maneja la dispersión de puntos y la calidad maneja el número de veces que se transita por los mismos puntos. Definir una determinada dispersión nos condiciona a trabajar con determinada calidad y viceversa.

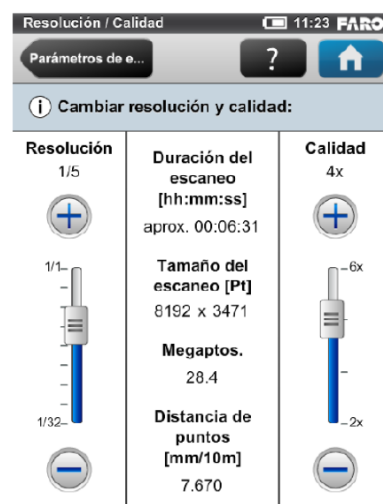


Figura 5.7: Configuraciones de resolución y calidad. (Fuente: Manual SCENE, 2018)

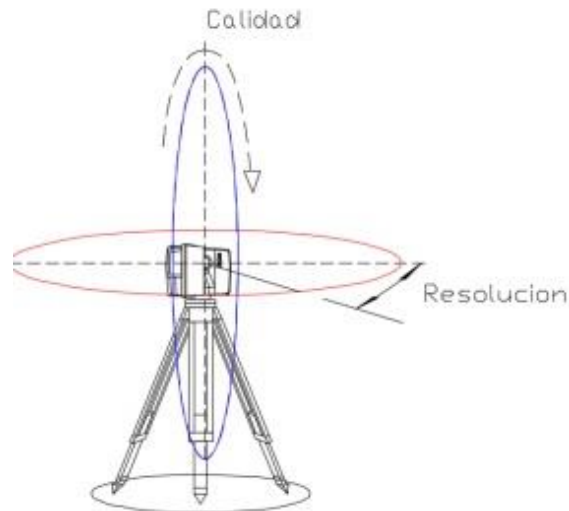


Figura 5.8: Relación resolución y calidad.
(Fuente: Manual SCENE, 2018)

En la siguiente tabla se muestra cómo el escáner, para una calidad fija de 4x y modificando el nivel de resolución, variará la cantidad de puntos efectivos tomados y el tiempo que demorará en ello.

RESOLUCIÓN	PUNTOS		TOTAL PUNTOS	PUNTOS EFECTIVOS	TIEMPO	
	Horizontal	Vertical			Segundos	Minutos
1	40 000	20 000	800 000 000	700 000 000	6 666.67	111.11
½	20 000	10 000	200 000 000	175 000 000	1 666.67	27.78
¼	10 000	5 000	50 000 000	43 750 000	416.67	6.94
1/5	8 000	4 000	32 000 000	28 000 000	266.67	4.44
1/8	5 000	2 500	12 500 000	10 937 500	104.17	1.74
1/10	4 000	2 000	8 000 000	7 000 000	66.67	1.11
1/16	2 500	1 250	3 125 000	2 734 375	26.04	0.43
1/32	1 250	625	781 250	683 594	6.51	0.11

Figura 5.9: Número de puntos capturados según la resolución, para una calidad de 4x.
(Fuente: Faro, 2016)

4. Clinómetro

Para obtener los datos más confiables del compensador de eje doble, se debe marcar la inclinación del escáner inferior a 5°.

5. Brújula

Del mismo modo que con el clinómetro, los datos de la brújula siempre se miden y se adjuntan a cada escaneo durante el mismo y se utilizan en forma automática para el registro de escaneos.

6. Altimetro

La altura configurada como de referencia será luego la base de todas las mediciones que se realicen con el altímetro.

5.2. Software

Para la descarga de los datos del escáner y tratamiento de los mismos se trabajó con el software SCENE. El mismo está especialmente diseñado para el equipo FARO modelo Focus 3D (modelo homólogo al Trimble TX5). SCENE procesa y administra datos de escaneo de forma sencilla y eficiente, empleando el reconocimiento automático de objetos, registro de escaneos y posicionamiento de estos.

Una vez que el software descarga y reconoce los datos de los escaneos, puede comenzar inmediatamente su análisis y procesamiento. Además, tiene a su disposición una completa gama de funciones de fácil uso, desde sencillas mediciones y visualizaciones 3D, hasta la unión de escaneos y la exportación a diversos formatos CAD y de manipulación de nube de puntos.

Este software fue utilizado para la visualización de la nube de puntos, la unión de los escaneos tomados en las diferentes posiciones y para obtener las coordenadas de los puntos con los que se hará la comparación con la ET.

5.3. Análisis previo

Como se ha comentado los equipos TLS se han popularizado gracias a su gran versatilidad, rapidez y precisión, estando presentes en diversos campos tales como el patrimonio, arqueología, estudios arquitectónicos, instalaciones industriales, cálculos de volúmenes, BIM, entre otros.

Su gran ventaja radica en el volumen de datos capturados frente a la mayoría de las otras técnicas, permitiendo modelizaciones detalladas gracias a la densidad de información recogida.

No obstante, y al igual que en cualquier ámbito científico resulta imperativo contar con un instrumental totalmente carente de sistematismos, ya sean estos, fruto de imperfecciones en su fabricación, desgaste o impactos; y poder conocer los errores propios del equipo con el que se está trabajando.

En las disciplinas clásicas, tales como la fotogrametría o la topografía, antes de proceder a realizar cualquier medición es necesario contar con la modelización de los posibles errores junto con su estimación *a priori*, para poder corregir las observaciones de campo. En la fotogrametría, esto se traduce en poseer el modelo de calibración de la cámara utilizada; mientras que en la topografía consiste en conocer el modelo de errores sistemáticos. Esta situación no se da en el caso de los equipos TLS para los cuales no existe un proceso de calibración estandarizado ni es posible estimar los posibles errores instrumentales.

Debido a la falta de estándares, las especificaciones de precisión proporcionadas por los fabricantes de láser terrestres en sus folletos y publicaciones no son comparables (Staiger, 2005). Asimismo, (Boehler et al., 2003) indica que estos datos de precisión no son reales, en tanto los equipos TLS se fabrican en pequeñas series, variando de instrumento a instrumento y siendo necesario calibraciones individuales.

Según (Xu y Chi, 1993) la calibración de un sensor TLS implica los siguientes pasos:

- ✓ Modelado: Es necesario un modelo de error para describir las relaciones entre las fuentes de error y las medidas del sensor, el cual se basa en el conocimiento del diseño del equipo.
- ✓ Medidas: La identificación de los parámetros está basada en los datos experimentales. Las medidas se realizarán en laboratorio bajo condiciones controladas.
- ✓ Identificación: de los parámetros desconocidos.
- ✓ Corrección: Con el modelo desarrollado se pueden corregir los datos del sensor, a su vez los datos corregidos permiten verificar la validez de dicho modelo y refinarlo.

La literatura existente en cuanto a la evaluación de errores y calibración en la última década se ha focalizado en dos objetivos principales:

- descripción cuantitativa de la precisión alcanzable con un instrumento particular. La evaluación del rendimiento es un aspecto importante y esencial para entender las limitaciones

y características de los láseres escáner, a la vez que sirven para establecer comparaciones entre equipos. Sin embargo, la evaluación del rendimiento no analiza en detalle los sistematismos o errores metodológicos, siendo necesarias investigaciones y calibraciones

- identificación de los errores sistemáticos (parámetros de calibración) más relevantes del instrumento. Estos parámetros constituyen el modelo de calibración, el cual puede usarse para corregir los errores instrumentales.

El procedimiento de calibración puede llevarse a cabo como una calibración del sistema (auto-calibración) o una calibración de los componentes (Schulz, 2007).

En la calibración de los componentes se llevan a cabo procesos de calibración específicos para cada uno de los elementos individuales (distanciómetro, mecanismo de deflexión, etc.) por separado, bajo condiciones controladas. La auto-calibración se basa en considerar todos los componentes de un láser escáner en conjunto. Pudiéndose así modelar tanto los errores de los elementos individuales, como los derivados de las relaciones entre los diferentes componentes (por ejemplo: falta de alineamiento entre ejes).

Según D. García, J.L. Lerma y S. Navarro, en su publicación “Calibración geométrica de escáner láser terrestre mediante software específico, 2003”, destacan: *“La calibración de equipos de escaneo láser ha sido tratada por diversos autores obedeciendo a distintos modelos de error.”*

Para el caso de los modelos basados en cambio de fase, Reshetyuk, (2009) reconoce dos tipos de calibraciones citando a diversos autores que le han dado tratamiento:

Calibración basada en puntos (mediante el uso de elementos de puntería cuyos centroides pueden ser extraídos para el proceso de calibración).

- Lichti ha realizado múltiples experimentos de auto-calibración con el equipo FARO 880 (Lichti y Franke, 2005), (Lichti y Licht, 2006) y (Lichti, 2007). El modelo de error utilizado se basa en el modelo de error de una ET, al cual se le han añadido errores instrumentales que han sido identificados y modelados de forma empírica a partir del análisis de los residuos de la calibración. En algunos de dichos

parámetros se apreció una dependencia con el instrumento utilizado. Adicionalmente han estudiado el comportamiento temporal de los parámetros de calibración.

- Parian presentó un modelo de error extendido al uso de cámaras panorámicas (Parian y Gruen, 2005 y Parian, 2007). El modelo matemático se basó en la transformación proyectiva y la calibración se realizó para el equipo Zoller+Fröhlich Imager 5003.

Calibración basada en planos (mediante la extracción de las coordenadas láser de puntos de la superficie de dianas o tarjetas planas).

- Rietdorf expuso un método de registro usando planos idénticos (Gielsdorf et al., 2004 y Rietdorf, 2005). Para ello dispuso un campo de test “indoor” con planos calibrados y usó un láser escáner construido en laboratorio y el modelo comercial Imager 5003. Los parámetros de transformación entre las diferentes posiciones de escaneo y el campo de pruebas se calcularon en un único ajuste.
- En el caso de Lichti, también se probó una calibración con un número reducido de parámetros de calibración (Bae y Lichti, 2007), aunque con resultados diferentes al caso de la calibración basada en puntos, ya que el patrón de los residuos difería sustancialmente dificultando así la identificación de posibles sistematismos. En vez de utilizar paneles específicamente colocados se emplearon las paredes, suelo y techo de una habitación.
- Otras investigaciones se han centrado en la estimación in-situ de los errores cíclicos o periódicos en la medida de distancias, usando elementos planos (Dorninger et al., 2008 y Molnár et al., 2009). Las medidas originales del láser escáner son corregidas mediante funciones cuyos parámetros se obtienen a partir de los datos del proyecto. En estas investigaciones se calibró el equipo Faro LS880.

Otros análisis de esta clase de equipos en el campo de la calibración son los realizados por:

- Bohler et al. (2003) desarrolló una serie de procedimientos para evaluar la calidad de las medidas obtenidas con diferentes láseres terrestres. Usó esferas para las determinaciones de distancias y tableros planos para investigar el comportamiento de superficies de diferentes reflectividades y el ruido en la medida de distancias. Además, construyó objetos especiales para otros análisis

complementarios, por ejemplo: estrella de Siemens tridimensional para evaluar la resolución del láser (tamaño del spot). Una de las mayores limitaciones del acercamiento de Bohler es que no se analizan los errores sistemáticos ni metodológicos en detalle.

- Schulz y Ingensand (2004) obtuvieron los parámetros que representaban la estabilidad mecánico-óptica, la geometría de los ejes, así como la excentricidad o constante aditiva para el equipo Z+F Imager 5003.
- Mechelke et al. (2007) presentó una investigación sobre el comportamiento del láser escáner mediante múltiples tests: precisión en la medida de distancias en comparación con una referencia, influencia del compensador, influencia del ángulo de incidencia en la posición 3D o la variación en la medida de distancias según el color del objeto. Para el análisis empleó cuatro equipos diferentes.

El modelo de calibración de un TLS expresa la relación entre las observables (distancia, ángulo horizontal y cenital) y los errores instrumentales sistemáticos. Aunque el sistema láser está basado en el mismo principio de medición polar de las estaciones totales sin prisma, su comportamiento no es exactamente el mismo, en tanto los equipos TLS incorporan la unidad de deflexión y una plataforma rotatoria para la medición de los ángulos verticales y horizontales respectivamente. El modelo basado inicialmente en el comportamiento de los instrumentos topográficos se adapta, en base a la experimentación y el análisis, al comportamiento de los sistemas TLS. Con el modelo de auto-calibración se puede determinar de forma simultánea los parámetros de calibración y los parámetros de orientación externa del sistema láser respecto al sistema de referencia, el cual es definido mediante un sistema de topografía de alta precisión.

5.4. Pruebas de campo y análisis de los resultados

En base a lo anteriormente citado referente a calibración o auto-calibración de los sistemas láser escáner terrestres, a las condiciones necesarias para la realización de mediciones extremadamente precisas, a los sistemas y marcos de referencia dependientes de condiciones, lugares, laboratorios, entre otras condicionantes para lograr los parámetros del equipo y que en

su mayoría no están disponibles en Uruguay; se puede concluir que no es posible lograr correctamente la calibración.

Por no considerarse como tema central de estudio de este trabajo, se decidió que el análisis referente a la calibración se remitirá a la comparación entre coordenadas de puntos relevados con TLS y una ET.

Para ello se realizaron dos pruebas, una dentro del Instituto de Agrimensura, la otra en el exterior, fuera del edificio de Facultad de Ingeniería.

5.4.1. Prueba interior - Instituto de Agrimensura

En la primera de las pruebas, realizada en el interior del Instituto de Agrimensura (IA) de la Facultad de Ingeniería, se comenzó colocando 7 dianas, 6 targets, y 4 esferas en distintos lugares del instituto. Se instaló la ET en el pilar ubicado en el departamento de Geodesia instalado al final del pasillo (en primera instancia) y se realizaron cinco series de observaciones a cada uno de los diferentes objetivos colocados. Para esta instancia se sustituyeron las esferas por el mini prisma reflector.

Dichos datos se descargaron de la ET y se calculó el promedio de las observaciones para cada punto, tomando dichos valores como coordenadas de los puntos.

En el proceso de medición con ET se tomaron los recaudos necesarios para tratar de minimizar los errores implícitos del relevamiento. Se estacionó sobre el pilar fijo del instituto evitando la inestabilidad del trípode, se relevó con el modo sin reflector (láser) las dianas y targets, así como los mini-prismas que estaban colocados sobre soportes fijos para que los errores a considerar sean solo de puntería y de apreciación del instrumento. A su vez se realizó giro y tránsito, para evitar errores internos o falta de calibración del equipo, además de realizar cinco series de observaciones a cada punto.



Figuras 5.10 y 5.11: Diana reflectante y esfera. (Fuente: Propia)

Dado que las estaciones totales son equipos de los cuales se conocen los recaudos que se deben tener, habiendo estudiado en varias asignaturas de la carrera los errores asociados al proceso de medición con ET, conociendo su comportamiento y sus posibles valores (magnitud y signo), tomaremos como válidos las coordenadas obtenidas para su posterior comparación.

Punto	X	Y	Z
T1	98.907	193.726	12.677
T2	101.143	196.178	12.168
T3	95.136	200.93	11.859
T4	87.517	200.588	11.697
T5	72.744	199.508	10.307
T6	72.774	198.759	12.258
D0	96.06	199.698	11.716
D1	100.859	193.831	10.819
D2	98.298	200.156	12.261
D3	87.229	199.607	12.295
D4	80.276	200.251	11.320
D5	72.743	199.526	11.175
D6	68.998	198.866	10.325
M1	101.144	196.433	12.012
M2	90.397	199.349	12.188
M3	81.224	198.913	10.24
M4	73.853	199.953	11.234

Figura 5.12: Coordenadas obtenidas con ET dentro del IA.



Figura 5.13: Escáner estacionado sobre el pilar del Instituto de Agrimensura. (Fuente: Propia)

Con el escáner láser, se realizaron escaneos en dos posiciones distintas, en ambos casos con resoluciones de $1/2$, $1/8$ y $1/32$.

Para trabajar más ágilmente, se separó en dos partes el relevamiento, primero se escaneó el departamento de geodesia, y luego el pasillo del IA.

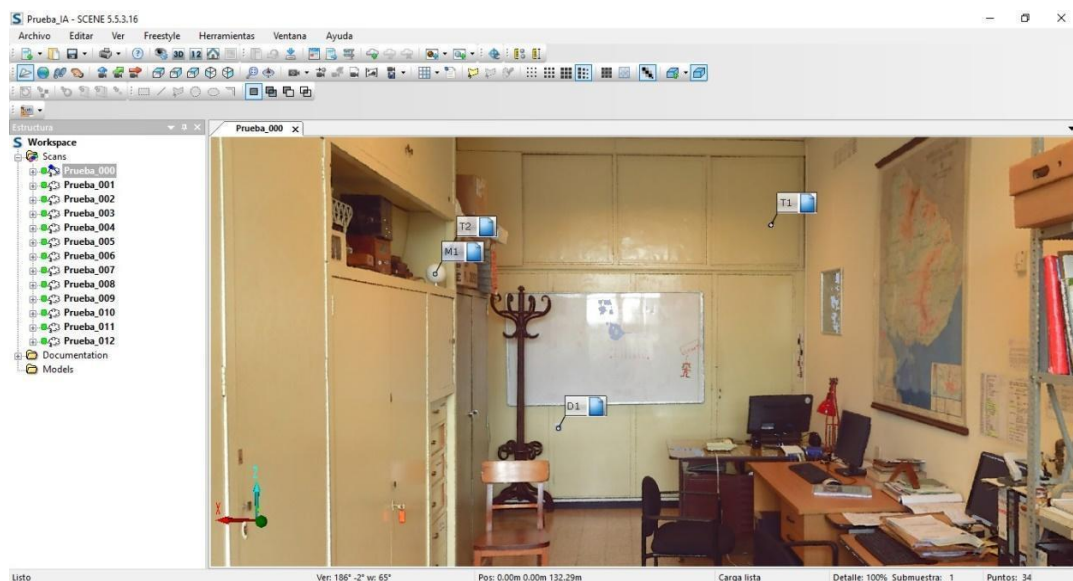


Figura 5.14: Escaneo departamento geodesia (Topografía). (Fuente: Propia)

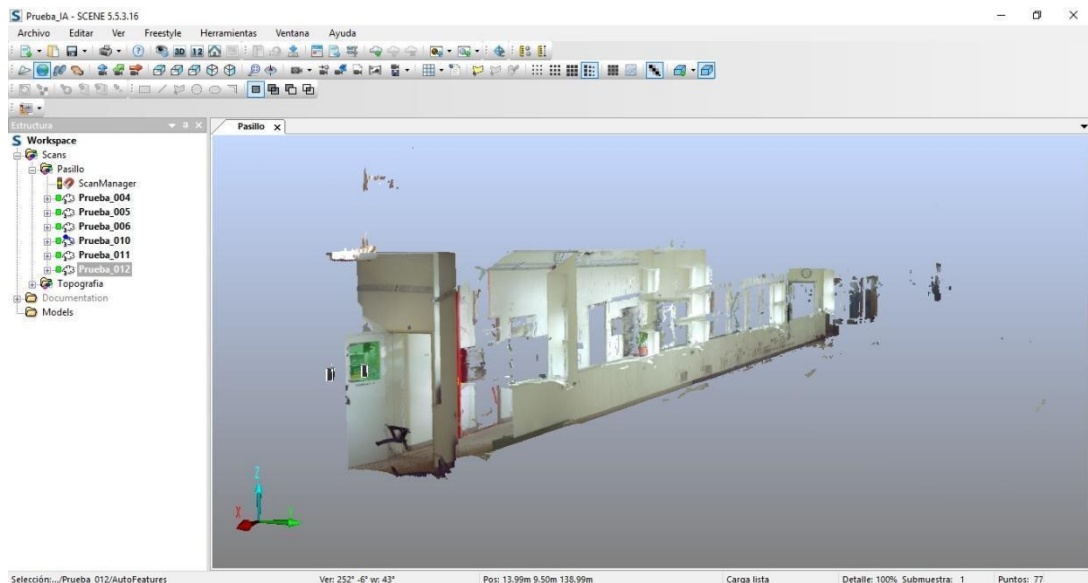


Figura 5.15: Escaneo pasillo del instituto de Agrimensura. (Fuente: Propia)

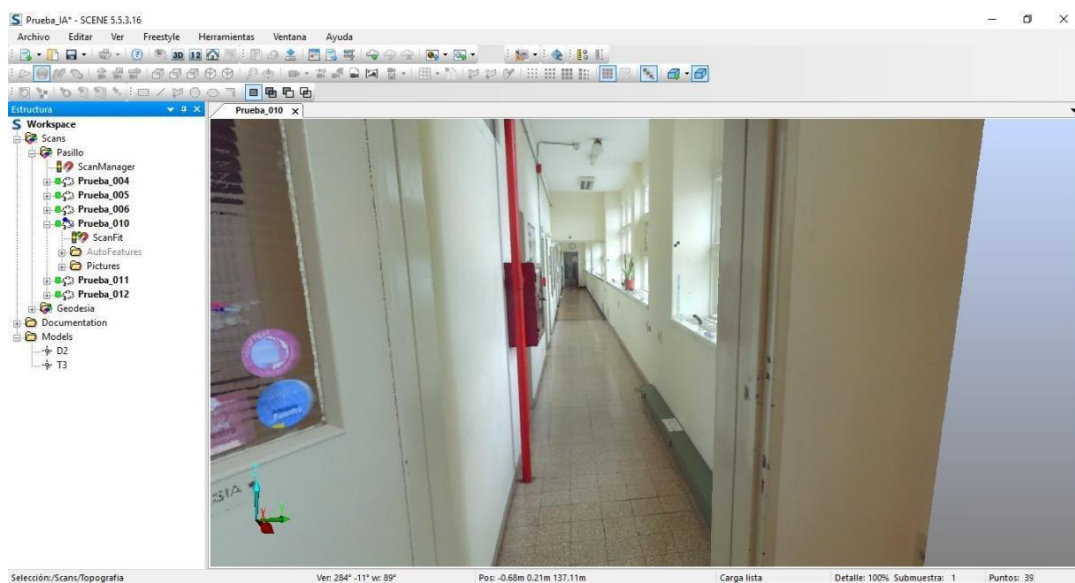


Figura 5.16: Escaneo pasillo del instituto de Agrimensura. (Fuente: Propia)

Una vez terminado el trabajo de campo, se continuó descargando los escaneos de la tarjeta de memoria del equipo a una PC.

Luego se cargaron los archivos de puntos en el software SCENE, donde se procedió a obtener las coordenadas de los puntos de referencia.

Punto	X	Y	Z
T1	-1.8315	-6.1023	133.2546
T2	0.6777	-3.9326	132.7417
T3	-4.7327	1.4768	137.2638
T4	-12.3398	1.9963	137.1072
T5	-27.1392	2.60974	135.7091
T6	-27.1956	1.8633	137.6912
D0	-4.9634	0.1795	137.1221
D1	0.1167	-6.2286	131.3894
D2	-1.6772	0.3447	137.6584
D3	-12.7384	1.0586	137.7089
D4	-19.5723	2.4969	136.734
D5	-27.1389	2.6297	136.5987
D6	-30.9351	2.4077	135.7365
M1	0.6988	-3.6491	132.5385
M2	-9.9456	0.4125	137.6179
M3	-18.8073	1.0603	135.6185
M4	-25.9524	2.9193	136.599

Figura 5.17: Coordenadas obtenidas con TLS dentro del IA.

Con el fin de poder comparar y obtener diferencias entre las mediciones de ambos equipos, se transformaron las coordenadas obtenidas con el escáner al mismo sistema de coordenadas que el utilizado por la ET.

Para realizar dicha transformación se utilizó el método de ajuste de mínimos cuadrados de las magnitudes, desarrollado en la asignatura Teoría de Errores II, para lograr determinar los 4 parámetros de la transformación entre ambos sistemas: tres traslaciones (ΔX , ΔY , ΔZ) y la rotación sobre el eje Z (θ). Con este método se van a expresar las ecuaciones de condición de la siguiente manera:

$$v + B\Delta = f$$

Donde v es el vector de los residuales que usaremos para ajustar las coordenadas de la ET. La matriz Δ contendrá los valores de corrección de los parámetros iniciales ΔX , ΔY , ΔZ , θ . La matriz B y el vector f contendrán coeficientes numéricos.

Para aplicar el método se utilizaron 7 puntos distribuidos por toda el área de relevamiento dentro del IA. Uno de los puntos elegidos, además, se tomó como centro de rotación (punto D6) para el cálculo de los

parámetros iniciales. Los otros 5 puntos se utilizaron para control, calculando las diferencias entre las coordenadas originales con ET, con las transformadas TLS. El resto de los puntos no se tomaron en cuenta por no poder determinar las coordenadas con TLS correctamente debido a que no existían puntos en común entre los escaneos para el registro.

Luego de aplicar el algoritmo de resolución e iterar 3 veces (ver anexo A) se determinaron los parámetros de transformación. Con estos valores se calcularon las coordenadas obtenidas con escáner, transformadas al sistema de la ET.

Recordemos que el algoritmo de resolución para el método aplicado es el siguiente:

$$\begin{aligned} v + B\Delta &= f \\ W \\ N &= B'WB \\ t &= B'Wf \\ \Delta &= N^{-1}t \end{aligned}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Punto	X	Y	Z
T3	95.1324	200.9387	11.8649
T5	72.7435	199.4999	10.3102
T6	72.7729	198.7519	12.2923
D2	98.2974	200.1637	12.2595
D6	68.9957	198.8648	10.3376
M4	73.8871	199.9433	11.2001
M3	81.198	198.9142	10.2196
T4	87.5159	200.5842	11.7083
D0	95.0517	199.6235	11.7232
D3	87.2272	199.6071	12.31
D4	80.2736	200.2538	11.3351
D5	72.7415	199.5198	11.1998

Figura 5.18: Coordenadas transformadas de TLS dentro del IA.

5.4.2. Prueba exterior - Fuera de Facultad de Ingeniería

Para la prueba fuera del Instituto, se procedió de manera similar a lo detallado en el punto 5.4.1.

Se colocaron 3 dianas, 4 targets y 3 esferas en distintos lugares fuera del ala sur de Facultad de Ingeniería. Se midieron con ET (en primera instancia) realizando cinco series de observaciones a cada uno de los objetivos. Al igual que en el interior, para esta instancia se cambiaron las esferas por el mini prisma reflector.

De igual manera que en la primera prueba se descargó la información de la ET y se calculó el promedio de las observaciones para cada punto, tomando dichos valores como coordenadas de los puntos.

Se estacionó sobre un trípode y se relevó con “láser” las dianas y targets, los prismas estaban colocados sobre soportes fijos para que los errores a considerar sean solo de puntería y de apreciación del instrumento. Siempre tomando los recaudos necesarios durante el proceso de medición para minimizar errores.

También en esta instancia se realizó giro y tránsito, para evitar errores internos o falta de calibración del equipo, además de realizar cinco series de observaciones a cada punto.

Punto	X	Y	Z
T7	97.204	493.178	11.262
T8	91.436	491.481	12.481
T9	110.584	481.851	11.565
T10	113.952	483.200	11.729
D7	93.363	492.047	11.374
D8	107.014	481.157	11.726
D9	108.969	494.494	11.370
M5	89.501	490.865	11.585
M6	103.380	480.865	10.540
M7	112.712	482.916	11.548

Figura 5.19: Coordenadas obtenidas con ET fuera de la FING.

Al igual que para el interior del IA, con el escáner láser, se realizaron escaneos en dos posiciones distintas, en ambos casos con resoluciones de 1/2, 1/8 y 1/32.



Figura 5.20: Escáner fuera de la Facultad de Ingeniería. (Fuente: Propia)

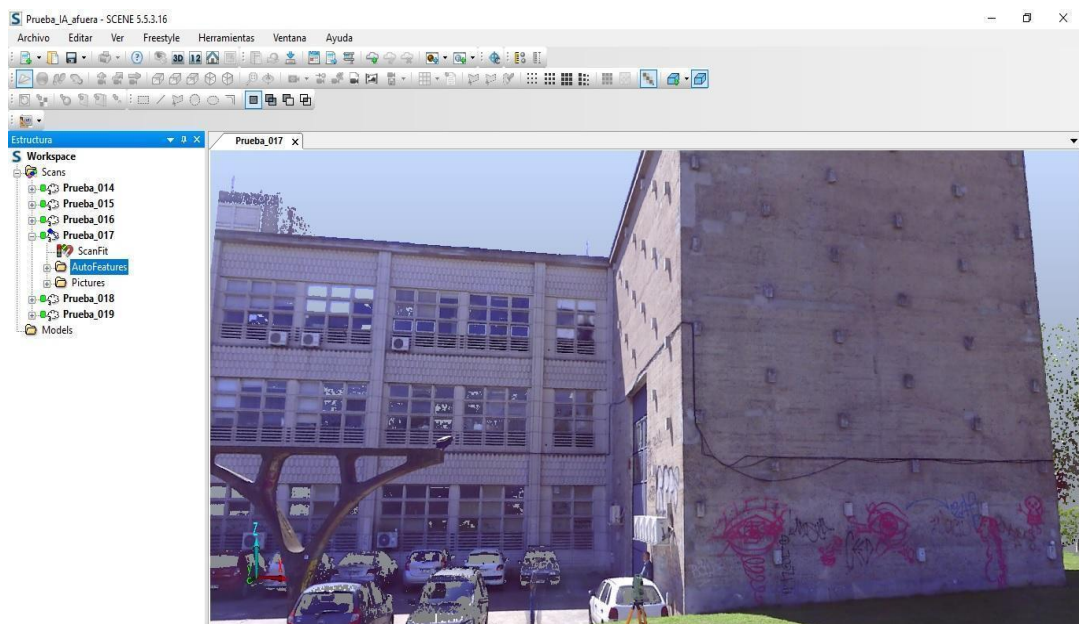


Figura 5.21: Escaneo fuera de la Facultad de Ingeniería. (Fuente: Propia)

Una vez terminado el trabajo de campo se pasó a descargar los escaneos del escáner láser de la tarjeta de memoria del equipo a una PC.

Luego se cargaron los archivos de puntos en el software SCENE, donde se procedió a obtener las coordenadas de los puntos de referencia.

Puntos	X	Y	Z
T7	4.5779	5.674	20.278
T8	10.4993	4.658	21.497
T9	-2.4501	21.733	20.571
T10	-6.0828	22.007	20.735
D7	8.5194	4.997	20.390
D8	1.0673	20.785	20.735
D9	-6.5567	9.669	20.371
M5	12.4946	4.358	20.600
M6	4.4526	19.413	19.547
M7	-4.83	21.696	20.558

Figura 5.22: Coordenadas obtenidas con TLS fuera de la FING.

Nuevamente se pasaron las coordenadas obtenidas con el escáner al mismo sistema de coordenadas que el de la ET. De esta forma se podrán comparar y obtener las diferencias buscadas entre ambos equipos.

De igual forma de lo realizado con la prueba interior, se calcularon los parámetros de transformación y las coordenadas del TLS transformadas.

Se realizó el mismo procedimiento que para el caso interior con el fin de transformar las coordenadas del TLS al sistema de la ET. Para aplicar el método se eligieron 7 puntos distribuidos por toda el área de relevamiento fuera de la facultad. Uno de los puntos elegidos, además, se tomó como centro de rotación (punto D9) para el cálculo de los parámetros iniciales.

Los resultados obtenidos para esta transformación se presentan en la siguiente tabla:

Punto	X	Y	Z
T7	97.2038	493.1769	11.2679
T8	91.4394	491.4837	12.4871
T9	110.582	481.8499	11.5606
T10	113.964	483.2029	11.7253
D7	93.3664	492.0506	11.3803
D8	107.006	481.1535	11.7248
D9	108.96	494.4901	11.3608
M5	89.5156	490.8751	11.59
M6	103.362	480.8955	10.5371
M7	112.703	482.9304	11.5479

Figura 5.23: Coordenadas transformadas de TLS fuera de la FING.

5.4.3. Comparación de coordenadas obtenidas en las pruebas

Con los valores obtenidos para las coordenadas transformadas de TLS, se calcularon las diferencias respecto de las coordenadas relevadas con la ET:

Punto	DX	DY	DZ
T3	0.0036	-0.009	-0.006
T5	0.0005	0.0081	-0.003
T6	0.0011	0.0071	-0.034
D2	0.0006	-0.008	0.0015
D6	0.0023	0.0012	-0.013
M3	0.026	-0.001	0.0204
M4	-0.034	0.0097	0.0339
T4	0.0011	0.0038	-0.011
D0	1.0083	0.0745	-0.007
D3	0.0018	-7E-05	-0.015
D4	0.0024	-0.003	-0.015
D5	0.0015	0.0062	-0.025
T7	-2E-04	-0.001	0.0059
T8	0.0034	0.0027	0.0061
T9	-0.002	-0.001	-0.004
T10	0.0123	0.0029	-0.004
D7	0.0034	0.0036	0.0063
D8	-0.008	-0.004	-0.001
D9	-0.009	-0.004	-0.009
M5	0.0146	0.0101	0.005
M6	-0.018	0.0305	-0.003
M7	-0.009	0.0144	-7E-05

Figura 5.24: Diferencias entre coordenadas de ET con coordenadas transformadas de TLS.

Se realizó una prueba de hipótesis para la media de las diferencias de las observaciones, con el fin de probar que los valores obtenidos tienden a cero. Si se logra probar que la media tiende a cero, podremos afirmar que no existen errores sistemáticos y que las coordenadas obtenidas con TLS son comparables con las de la ET, y por ende que los resultados obtenidos con el TLS son confiables.

Para las pruebas de hipótesis se utilizaron todos los puntos de ambas pruebas juntos, previa depuración de valores atípicos (equivocaciones detectadas). Fue descartado el punto D0, al detectar que la diferencia en la coordenada X era mayor al metro. La muestra está construida a partir de 21 observaciones.

Para realizar la prueba de hipótesis de la media, vamos a realizar un test de t de Student. Se aplica esta distribución cuando la muestra estudiada es demasiado pequeña (menor a 30 observaciones) y cuando la población estudiada está distribuida de forma Normal, pero el tamaño de la muestra es pequeño como para que el estadístico en que está basada la inferencia esté normalmente distribuido. Además, no conocemos la desviación estándar de la población σ^2 con lo cual utilizaremos una estimación, la desviación estándar de la muestra s^2 .

La forma de la distribución t de Student depende de un parámetro llamado número de grados de libertad. El número de grados de libertad es igual al tamaño de la muestra (número de observaciones independientes) menos 1 ($n - 1$). La tabla asociada a la distribución muestra áreas y valores de t solo para algunos porcentajes; además la misma no se concentra en la probabilidad de que el parámetro de la muestra que se está eliminando se encuentre dentro del intervalo de confianza, sino que en lugar de ello mide la probabilidad de que este parámetro este fuera del mismo.

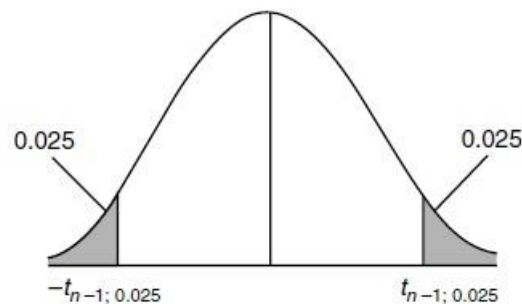


Figura 5.25: Distribución t de Student para un 95% de confianza.

El intervalo de confianza estará construido de la siguiente manera:

$$\bar{X} - t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Donde t_{n-1} es el valor crítico de la distribución con $n - 1$ grados de libertad, y será obtenido a partir de la tabla de distribución t Student.

Se planteará que $H_0: \mu=0$. (La misma hipótesis nula se planteará para μ_x , μ_y , μ_z).

Para un 95% de confianza, con 20 grados de libertad, de la tabla de Student se desprende un valor de estadístico $t_{n-1} = 2.086$.

Seguidamente, presentamos los resultados del test realizado:

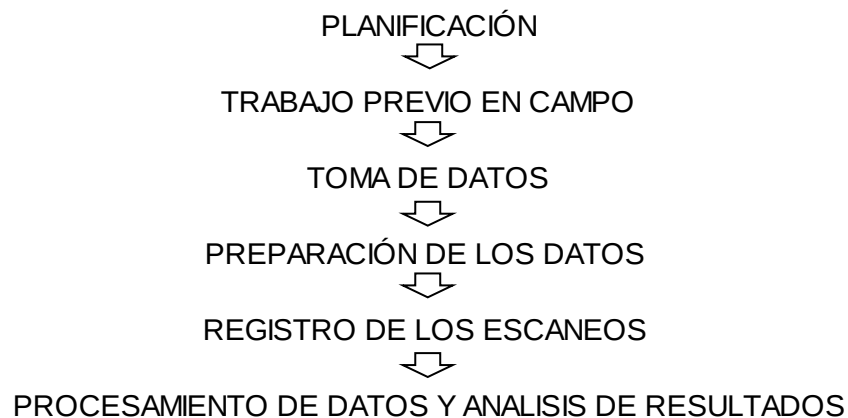
	DX	DY	DZ
Promedio	-0.00026	0.00334	-0.00305
s	0.01182	0.00858	0.01451
n	21		
confianza	95%		
t_{n-1}	2.086		
intervalos			
t min.	-0.00538	-0.00391	-0.0066
t máx.	0.00538	0.00391	0.0066

Figura 5.26: Resultados de la prueba de hipótesis.

Como resultado del testeo se pudo comprobar que los promedios se encuentran dentro de los intervalos calculados. Por ende, se acepta la hipótesis nula, pudiendo afirmar que las diferencias entre ambas coordenadas tienden a cero. Se concluye entonces que los resultados obtenidos con ambos instrumentales y que las diferencias observadas entre los mismos están dentro de un margen tolerable.

5.5. Metodología propia

Luego del estudio y análisis de otras metodologías generales de trabajo referentes a la utilización de equipos con tecnología TLS, se definieron los siguientes pasos como los que conforman la metodología que se describirá como aplicable para este tipo de trabajos:



La utilización de los equipos Escáner Láser Terrestres 3D implica mucho más que simplemente dejar trabajar al equipo. Es por ello que se dedicó gran parte del tiempo de trabajo a conocer mejor el funcionamiento del equipo, realizando pruebas, consultando manuales y videos así como buscando información en otros proyectos relacionados a esta tecnología.

5.5.1. Planificación

Antes de comenzar el proceso de escaneo propiamente dicho con el equipo, se debe planificar correctamente el o los objetos a escanear y su entorno.

1. Determinar los objetivos del trabajo

El objetivo de los escaneos realizados será utilizarlo como insumo para determinar la correcta posición y ayudar a determinar el estado de los restos de las construcciones de lo conocido como el Caserío de los Negros.

2. Análisis del área a relevar

Estudios arqueológicos realizados revelaron que tramos del muro perimetral de la Escuela N° 47 y el jardín de infantes contiguo, presentan evidencias de pertenecer al muro exterior del Caserío. Actualmente delimitado por la calle Capurro, Juan María Gutiérrez y en el linde entre los ambos centros educativos y el Parque Capurro.

Como lo especifican López Mazz y Bracco en su publicación “El Caserío de Filipinas de Montevideo”:

“Los mampuestos del muro y sus pilares son ladrillos de color naranja con núcleo reducido, son del tipo de “ladrillo de campo”; presentado dentro de la forma prismática, curvaturas e irregularidades en bordes y vértices. Sus dimensiones promedio son de 36 cm de largo, 17 cm de ancho y 5 cm de espesor. Aunque no se dispone de una tipología de ladrillos para el período colonial las características tecnológicas y dimensiones son consistentes con los utilizados en construcciones de la época.”

En la siguiente imagen se puede apreciar claramente las características y forma irregulares de los ladrillos.



Figura 5.27: Imagen de parte del muro. (Fuente: Propia)

Es posible apreciar en algunos tramos del muro perimetral de la escuela el ensanche de este, lo que hace suponer que dichos tramos fueron parte de la construcción del Caserío.

“El muro tiene un ancho promedio de 40 cm. Actualmente su altura no es mayor a un metro. Posiblemente, al cambiar la función del recinto, fue desmontado en forma parcial para permitir visibilidad desde fuera y para dentro del predio. También sufrió reparaciones en su revoque y en múltiples oportunidades fue pintado. Presenta contrafuertes de 60 cm por 60 cm, distribuidos cada 4 varas (=un estadal). El aparejo es muy singular, integrando lineadas a tizón, a soga con liga de cal y arena, y a sardinel con liga de barro.”

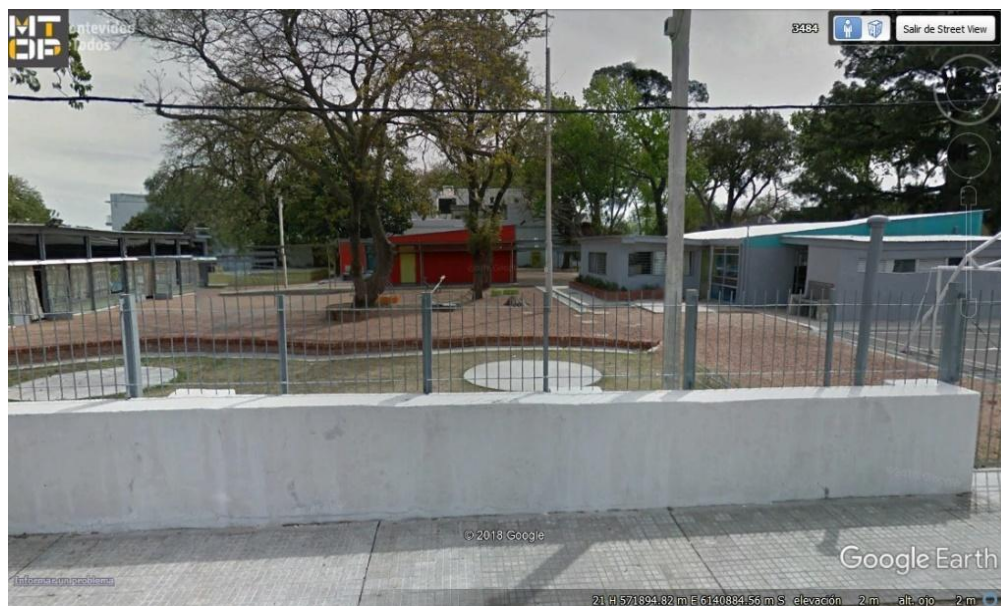


Figura 5.28: Muro perimetral de la Escuela donde se pueden apreciar los contrafuertes. (Fuente: Google Earth)

Para complementar el relevamiento del muro, se buscará incluir la captura de la entrada de la Escuela donde se localiza una circunferencia que se diferencia del pavimento general; López Mazz y Bracco en su publicación “El Caserío de Filipinas de Montevideo” la describen:

“Una estructura cilíndrica vertical de aproximadamente 2.40m de diámetro, de piedra, ladrillo y argamasa de cal y arena, con una restricción en su parte superior lograda por medio de una disposición inclinada de los ladrillos (“a modo de cúpula”). Los ladrillos son análogos en dimensiones, forma, pasta, y cocción a los ladrillos del muro perimetral. Presentó una boca de 1.47m de diámetro. Se interpretó como un trozo de caño cerámico horizontal que podría haber funcionado como conductor del agua proveniente de las azoteas de las edificaciones del caserío que se encontraban en esa dirección. Un sondeo en su parte externa permitió observar que alcanza

más de 1.50m de profundidad. Al hallarse esta estructura en el lugar donde se replanteo la construcción de la nueva entrada de la escuela, con un piso de hormigón armado. Se ejecutaron medidas cautelares para asegurar su integridad y su accesibilidad en vista de futuras intervenciones arqueológicas. Se dispuso a colocar una camada de arena entre ella y la planchada. Asimismo, se dividió la planchada de hormigón en dos lajas removibles, que apoyan en un marco de cemento que se desarrolla por fuera del perímetro de la estructura arqueológica. Asimismo, se dispuso que, en el piso terminado, como evocador, se representará la circunferencia de la boca de la estructura.”



Figura 5.29: Puerta de acceso a la Escuela. (Fuente: Google Earth)

Para ubicar el espacio geográfico del que estamos hablando, podemos identificar el padrón 56.536 de Montevideo, según la numeración actual.



Figura 5.30: Vista aérea del área a relevar. (Fuente: Google Earth)



Figura 5.31: Padrón N° 56.536 y posible ubicación del predio del Caserío. (Fuente: Google Earth)

Inicialmente se analizó la zona a través de las vistas que nos proporciona la aplicación Google Earth, para luego visitar y recorrer el lugar. Con las primeras impresiones de la estructura general del predio, se decidió relevar toda la manzana por fuera y las partes internas de ella a las que se obtuviera acceso, para poder así lograr todas las vistas de los restos del muro.

Se obtuvieron fotografías del lugar y se evaluaron las posibles posiciones para el escáner. Uno de los problemas que se identificaron se vincula con la cantidad de árboles existentes y el tamaño de los mismos. Esto podría aumentar el número de “estaciones” necesarias. La forma de resolverlo se determinará al momento del relevamiento según las áreas efectivamente escaneadas.

3. Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser

Las posiciones óptimas para el estacionamiento del equipo deben ser elegidas de tal manera que garanticen una máxima cobertura del objeto a relevar tratando de minimizar el número de escaneos. Para este caso se planificaron las posiciones de estacionamiento de manera de tener en cuenta las interferencias que existen y la extensión del área a relevar. Creyendo conveniente posicionar las estaciones para el relevamiento exterior del muro; de la siguiente manera:



Figura 5.32: Ubicaciones donde se buscará colocar el equipo para escanear en el exterior. (Fuente: Google Earth)

De esta forma se podrá abarcar toda la extensión del muro perimetral, y a su vez podrán enlazarse los escaneos, logrando también buenas precisiones una vez que se registren los mismos.

Para el relevamiento de la parte interior del muro, en la primer visita al lugar no se tuvo acceso al interior de la escuela; recorriéndose por fuera y pudiendo apreciar las posibles interferencias (árboles y construcciones principalmente). Para complementar el análisis se utilizaron las vistas proporcionadas por Google Earth para así planear los posibles lugares para las estaciones, las que podrán cambiar cuando se tenga acceso a la escuela; definiendo primeramente los siguientes puntos:



Figura 5.33: Ubicaciones donde se buscará colocar el equipo para escanear en el interior del predio de la Escuela. (Fuente: Google Earth)

4. Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia

Para el relevamiento se utilizará como puntos de referencia objetivos esféricos que se colocarán en el lugar, tratando de que sean visibles desde escaneos contiguos. La elección de los lugares óptimos se definirán el día del relevamiento, analizando las condiciones propias del lugar ese día; pero también se utilizarán otros objetos que se encuentran en la zona como los son las construcciones, restos del muro, bancos, entre otros elementos.

5. Gestión de los datos

El equipo con el que se trabajará, Trimble TX5, es capaz de capturar hasta 960 mil puntos por segundo, logrando obtener grandes conjuntos de datos en muy poco tiempo. Con lo cual se hace necesario trabajar con una buena fuente de almacenamiento, así como tener un equipo informático capaz de almacenar, procesar y archivar los datos.

Los archivos se descargan y almacenan en formato “.fls” (formato de escaneos nativos de equipos Faro y Trimble), a un dispositivo SD de 32 Gb de capacidad, los cuales serán base para los procesamiento y análisis que se harán en el software SCENE. Luego dichos datos se podrán compartir en distintos formatos, teniendo varias opciones para para su visualización o posible edición si se requiriera.

5.5.2. Trabajo previo en campo

A continuación, se detallará el proceso de posicionamiento y configuraciones del equipo antes de comenzar con el relevamiento.

1. Estacionamiento del escáner

Comenzamos por estacionar el equipo en la posición E1, ubicada en la esquina sur del jardín de infantes, sobre la calle Juan María Gutiérrez.



Figura 5.34: TX5 estacionado en la posición E1. (Fuente: Propia)

2. Ajustes del escáner

Los ajustes del escáner para los casos interior y exterior fueron los mismos, ya que luego se juntarán todos los escaneos. Manteniendo las mismas condiciones y parámetros en el equipo, se hará más fácil esta tarea.

2.1. Definición del área a escanear

Para cada posición del escáner se intenta abarcar la mayor cantidad de construcción posible y lograr el correcto solape entre escaneos contiguos, buscando una mejor solución para los registros. Si bien se podría haber definido que escaneara en toda su amplitud, no tenía sentido ya que consumiría mucho tiempo y se obtendría información que luego se descartaría.

Se definieron entonces los parámetros a utilizarse en el proceso de escaneo, tomándose como ángulo horizontal de 0° a 180° , y como ángulo vertical de -90° a 60° .

2.2. Resolución

Se definió la resolución para los escaneos de $1/8$ considerando la más conveniente en base a la relación tiempo-resolución-calidad.

2.3. Calidad

Como ya se dijo, la calidad está relacionada con la resolución elegida, para la resolución definida de $1/8$ se va a usar una calidad de $4x$.

Para los parámetros definidos, se espera que cada escaneo demore entre 10 y 15 minutos, y el equipo releve entre 10 y 12 millones de puntos.

2.4. Clinómetro

Se dejó el nivel esférico lo más centrado posible, buscando que la inclinación del equipo sea menor a 5° .

2.5. Brújula

El equipo guarda información de la brújula automáticamente, no fue necesario modificar configuraciones.

2.6. Altimetro

Al igual que la brújula, el equipo guarda información que será utilizada para los registros, en este caso no se le ingresó ninguna altura de referencia.

5.5.3. Toma de datos

Por temas de permisos y acceso al predio, el relevamiento se dividió en dos partes, interior de la escuela, y exterior; cada una realizada en días distintos.

El primer día de relevamiento se trabajó en la parte exterior del muro y se recorrió enteramente la manzana.

El segundo día (un mes después de relevar el exterior) se relevó la parte interior del muro desde dentro del predio de la Escuela.

Se trabajó en la primera visita en marcar como referencias ciertos lugares donde se colocarían esferas que luego servirían para el registro tanto del exterior como el interior. De esta forma se tendrá también un nexo entre ambas campañas de relevamiento (además de contar con edificios, construcciones y otras referencias que podrán ser usadas para ligar y registrar todos los escaneos entre sí).

Adicionalmente a la primera planificación realizada; y dado que la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación junto a la Intendencia de Montevideo realizaron excavaciones en el predio sobre el muro límite del Jardín de infantes contra el Parque Capurro en busca de cimientos, restos, y con el fin de buscar la mejor manera de conservar los mismos; se realizó una tercer visita para relevar las partes excavadas del muro. Nombraremos a este relevamiento de aquí en más como el “escaneo de las excavaciones”.

1. Relevamiento del objeto definido a escanear

1.1 Objeto definido a escanear

El objeto a escanear en nuestro caso son los restos del muro perimetral de lo que se conocía como el “Caserío de los Negros”, y dada su extensión y ubicación se debió relevar toda la manzana. Para cada día de relevamiento, que en total fueron tres (uno para cada etapa), se siguió el proceso previo del trabajo en campo descripto anteriormente. A continuación, se detalla por separado cada una de las etapas de relevamiento y sus escaneos.

1.2 Relevamiento

1.2.1 Escaneo exterior

Una vez completado el trabajo previo al relevamiento, se comenzó con el proceso de escaneo. Para asegurarnos de que el equipo estaba en condiciones, realizamos un escaneo previo al trabajo para chequear el funcionamiento del equipo, definiendo parámetros que permitan trabajar con mayor rapidez (este escaneo no fue utilizado luego para el registro y los posibles resultados). Luego de realizado el “escaneo prueba”, cambiamos las configuraciones para ajustarlas a las planificadas y comenzamos con el trabajo.

Una vez iniciado cada trabajo de escaneo, se debe tener especial atención en el cruce de elementos o personas que se interpongan entre el equipo y el objeto, ya que el funcionamiento del equipo es totalmente automático. Al finalizar cada escaneo se genera una imagen 2D del área escaneada que se puede visualizar en pantalla. Según la resolución y el área escaneada, el trabajo de escaneo puede durar desde minutos hasta horas; para nuestro caso se eligieron configuraciones que permiten que el tiempo de cada escaneo varíe desde los 10 a 15 minutos.

En esta etapa se colocaron las esferas de forma que se puedan identificar en los siguientes escaneos.



Figura 5.35: Imagen generada luego de terminado el escaneo. (Fuente: Propia)

Además de contar con las esferas como los elementos de referencia para “ligar” los escaneos, en el lugar se contaban con varias otras opciones que

se podrán usar como referencias, como las construcciones, columnas, carteles, entre otros.



Figura 5.36: Posición del escáner y las esferas desde E3. (Fuente: Propia)

Las estaciones se hicieron respetando los lineamientos planificados y del análisis previo realizado.

De esta forma se fueron realizando los distintos escaneos avanzando y tratando de respetar el orden preestablecido.

Entre cada escaneo no se variaron los parámetros del escáner, buscando mantener los mismos criterios definidos y decisiones tomadas en el análisis previo al comienzo del relevamiento.



Figura 5.37: Posición del escáner en E4. (Fuente: Propia)



Figura 5.38: Posición del escáner en E9. (Fuente: Propia)

En total se realizaron 12 estaciones en el relevamiento exterior, para las cuales se estableció una disposición de 4 esferas detrás y 4 esferas delante del escáner de forma tal que su posición no fuese colineal entre las mismas y el equipo, permitiendo una visión completa de ellas. Por otro lado, la distancia entre las esferas y el equipo se mantuvo en un rango definido siempre menor a 25 metros. Además, para cada captura que significaba un movimiento del equipo escáner láser se mantenían fijas las esferas colocadas primeramente como delanteras pasando a ser las esferas que quedarían por detrás del equipo.

1.2.2 Escaneo interior

Como ya se dijo para la parte interior al predio de la Escuela, los criterios fueron los mismos que para la parte exterior. Además, antes de comenzar con los escaneos se colocaron los objetivos esféricos en las posiciones marcadas en el relevamiento exterior.

Luego de llevar las configuraciones del equipo a las mismas que las fijadas para el relevamiento exterior, se procedió a estacionar el escáner en la posición I1.



Figura 5.39: Vista desde I1 (Fuente: Propia)

En esta segunda instancia de relevamiento, surgieron inconvenientes que obligaron a cambiar la planificación de estacionamiento que se había definido.

Se encontraron varios arbustos crecidos, que no eran problema al momento de realizar la planificación, por lo que se cambiaron varios puntos de estacionamiento. Además, durante el primer escaneo del interior comenzó a llover, variando nuevamente algunos de los puntos de estacionamiento a lugares más resguardados para conservar el equipo; igualmente se pudo relevar todo lo planificado para esa visita.

Una vez terminado el relevamiento en I1, posicionamos el equipo bajo el techo de la entrada de la Escuela.

Luego de cesada la lluvia comenzamos a escanear en I2.

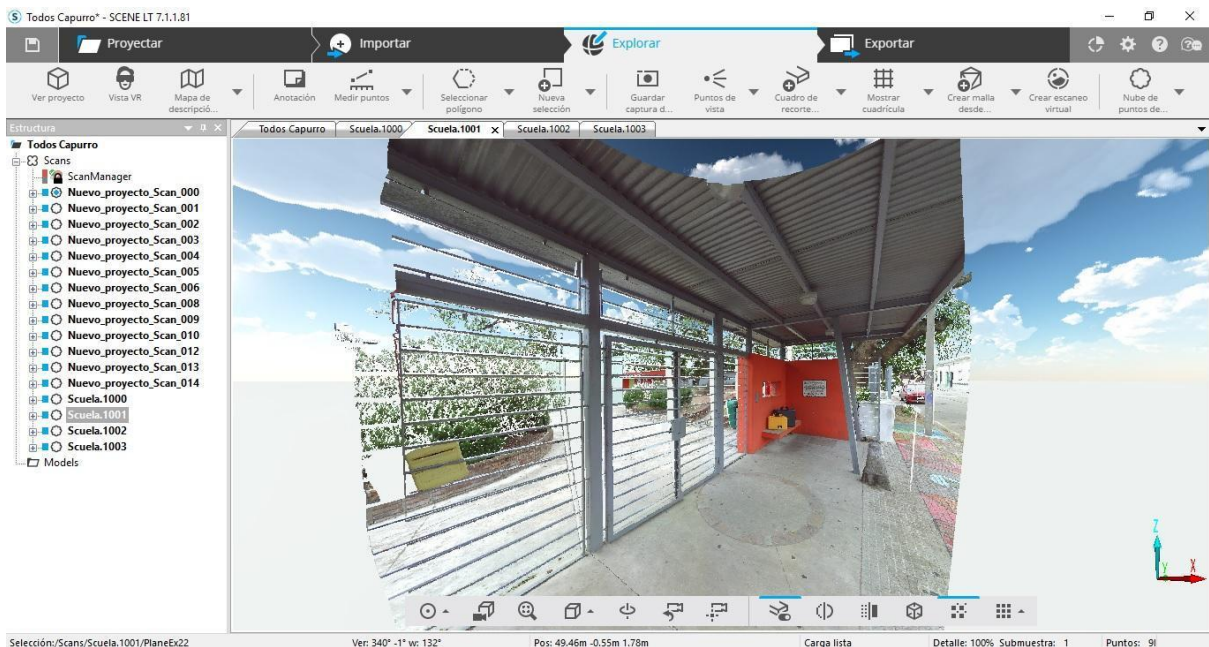


Figura 5.40: Vista desde I2 (Fuente: Propia)

De esta forma se logró tener captura a la “circunferencia” de la que hablábamos en el punto 5.5.1.2 identificada por López Mazz y Bracco.

Terminado el escaneo en I2 seguimos con el punto I3, teniendo que variar la posición planificada en pequeña medida, y comenzamos con el escaneo. En pleno proceso de escaneo comenzó nuevamente a llover, lo que provocó que más de la mitad del escaneo se hiciera bajo paraguas y con lluvia intensa.

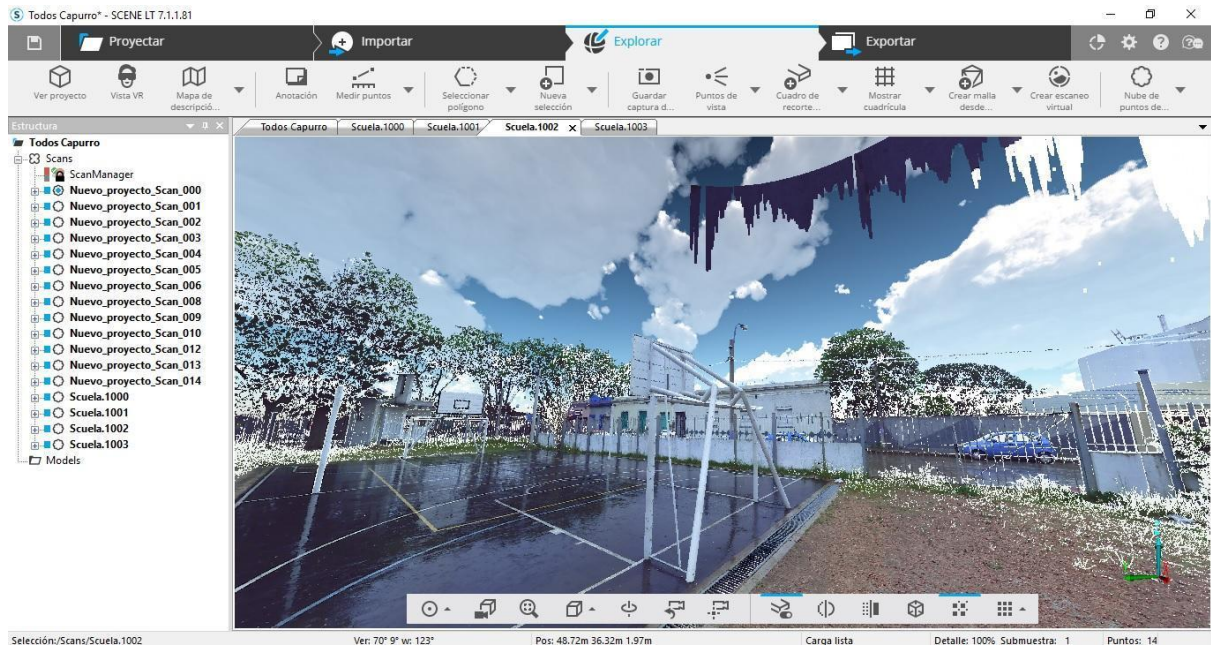


Figura 5.41: Vista desde I3 (Fuente: Propia)

Terminado el escaneo en la posición I3, nos estacionamos bajo el techo del pasillo junto a la escuela y realizamos el último relevamiento desde la nueva I4.

Las posiciones finales desde las que se realizaron los escaneos se pueden ver en la siguiente imagen:



Figura 5.42: Ubicación efectivas del relevamiento interior. (Fuente: Google Earth)

1.2.3 Escaneo de las excavaciones

Como se comentó, el relevamiento de las excavaciones fue muy posterior a los relevamientos “interior” y “exterior”, no pudiendo haber planificado correctamente las referencias comunes. Resultará interesante el proceso de registro entre el relevamiento de las excavaciones con los anteriores.

Las excavaciones se realizaron en puntos específicos buscando cimientos y tramos de muro de ladrillo de la época del Caserío de los Negros.



Figura 5.43: Ubicación de las excavaciones. (Fuente: Google Earth)

Para los escaneos de los tramos de muros encontrados como resultado de las excavaciones, se usaron parámetros distintos a los usados en los anteriores. Para cada tramo se hizo un escaneo de gran detalle con resolución 1/2 y calidad 4x, buscando obtener mayor detalle de las partes de muro descubiertas. Además, se hicieron escaneos con menor detalle para lograr luego buenos resultados en el registro, y tener referencias comunes con los escaneos “interno” y “externo”.



Figura 5.44: Tramo de muro con base descubierta de piedra. (Fuente: Propia)

Los escaneos se hicieron de oeste a este, intentando cubrir todos los tramos de muros descubiertos y abarcando zonas escaneadas en las etapas anteriores para lograr el enlace con los otros relevamientos.



Figura 5.45: Ubicación de los escaneos. (Fuente: Google Earth)

En total se realizaron 6 estaciones y 11 escaneos, intercalando escaneos con resolución 1/2 y calidad 4x, con escaneos con resolución 1/8 y calidad 4x, estos últimos siguiendo lo planteado en etapas anteriores.

Las esferas se colocaron de manera que se pudieran registrar los escaneos entre sí de buena manera, ubicándose algunas cercanas o sobre los muros descubiertos y otras en posiciones más lejanas.

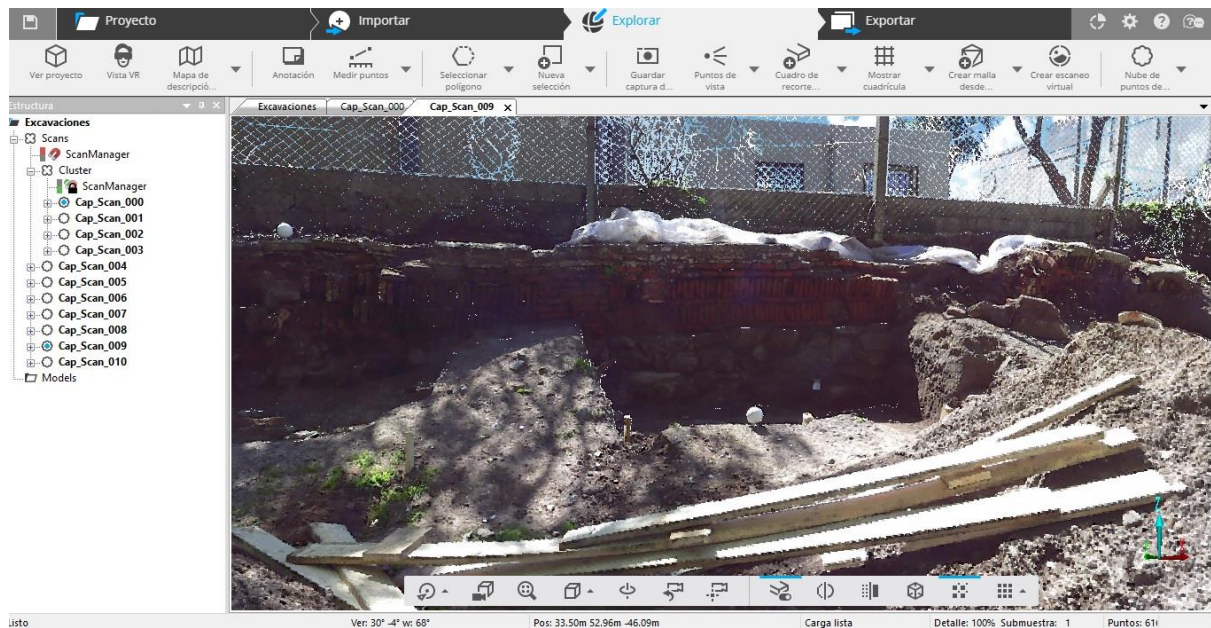


Figura 5.46: Ubicación de alguna de las esferas. (Fuente: Propia)

2. Escaneo de los puntos de referencia

Para estos relevamientos se decidió no realizar escaneos específicos de las esferas, ya que se logró un buen resultado con los escaneos generales, además se cuenta con otros objetos preexistentes como referencia.

3. Comprobación de la captura de datos

Es muy importante comprobar que el escaneo fue completado exitosamente en oportunidad del relevamiento en campo. Detectar un escaneo fallido luego de bajar los datos, implicaría volver a realizar las tareas de escaneo. Por lo que finalizado cada uno de los escaneos, se comprobó que estuvieran correctamente guardados y completos.

5.5.4. Preparación de los datos

Una vez completa la captura en campo, se trabajará en el software SCENE para el procesamiento de los escaneos. Primero copiamos de la tarjeta de memoria del escáner a la computadora los datos, para luego poder abrirlos en el SCENE.

El resultado del escaneo a través del TLS es un conjunto de puntos tri-coordenados, X, Y, Z, que muestra la distribución espacial del objeto en el sitio llamado “nube de puntos”. Para cada punto se obtendrá también información del color capturado por la cámara del equipo. Para la generación de modelos tridimensionales a partir de los datos de escaneo, se debe dar tratamiento especial a la nube de puntos consistente en varias etapas, entre las cuales se destaca el registro.

Previo a la etapa de registro, el SCENE despliega una ventana llamada “Procesando” donde se seleccionan diferentes parámetros antes del pasar al registro. En las configuraciones se muestran las siguientes opciones:

Configurar procesamiento

Establecer la configuración para el procesamiento. Los valores predeterminados de esta página se pueden cambiar en la configuración.
Escaneos seleccionados: 7

General

☐ Colorear escaneos

☒ Crear nubes de puntos de escaneo

Esta selección contiene nubes de puntos de escaneo. Las nubes de puntos de escaneo se crearán para su selección a fin de asegurar la uniformidad de los datos.

☒ Saltar los escaneos totalmente procesados

Filtros

☐ Filtro de punto de escaneo oscuro ?

Configuración

☐ Filtro de distancia ?

Configuración

☐ Filtro de puntos dispersos ?

Configuración

☒ Filtro de artefacto de bordes ?

Buscar objetivos

☐ Buscar tableros cuadriculados

☐ Buscar planos

☐ Buscar esferas

Radio de la esfera activa: ?

0.0700 m. Agregar nuevo

Radio de la esfera inactiva:

Agregar nuevo

Registro automático

☐ Realizar registro automático

Figura 5.47: Configuración de procesamiento. (Fuente: Propia)

Colorear escaneos: Para los casos en que los escaneos se hayan tomado con un equipo con opción de color, los archivos resultantes también contendrán las imágenes que el escáner tomó de forma automática. Estas imágenes se aplicarán para colorear los escaneos si se selecciona la opción colorear.

Crear nubes de puntos de escaneo: Las nubes de puntos de escaneo se generarán si se selecciona esta opción.

Filtro para punto de escaneo oscuro: El filtro de punto de escaneo oscuro elimina los puntos basado en un valor de reflectancia. El umbral de reflectancia indica el valor mínimo de reflectancia que un punto de escaneo debe tener. El rango del umbral de reflectancia es de 0 a 2048.

Filtro de distancia: Este filtro simplemente elimina todos los puntos de escaneo que están fuera de un cierto rango de distancia. Todos los puntos con una distancia inferior a la distancia mínima definida se eliminarán, así como también todos los puntos ubicados a distancias mayores que la determinada como máxima.

Filtro para puntos dispersos: Este filtro verifica si la celda cuadrícula 2D de un punto de escaneo contiene un porcentaje suficiente de puntos con una distancia similar al punto de escaneo en sí.

Filtro de artefacto de borde: Es especialmente útil para eliminar artefactos en los bordes de los objetos.

Buscar objetivo: Permite buscar objetivos como tableros cuadriculados, planos y esferas de forma automática.

Registro automático: Si se selecciona esta opción se pasará a registrar los escaneos seleccionados.

Luego que los procesamiento hayan terminado, se mostrará un cuadro de diálogo que muestra los resultados.

El cuadro de diálogo distinguirá los escaneos por colores (Manual de SCENE 2018): verde, para el caso que todos los escaneos se hayan procesado correctamente; amarillo, si alguno de los escaneos no se pudo procesar correctamente y necesita un tratamiento específico; y rojo, si no se pudo procesar ninguno de los escaneos.

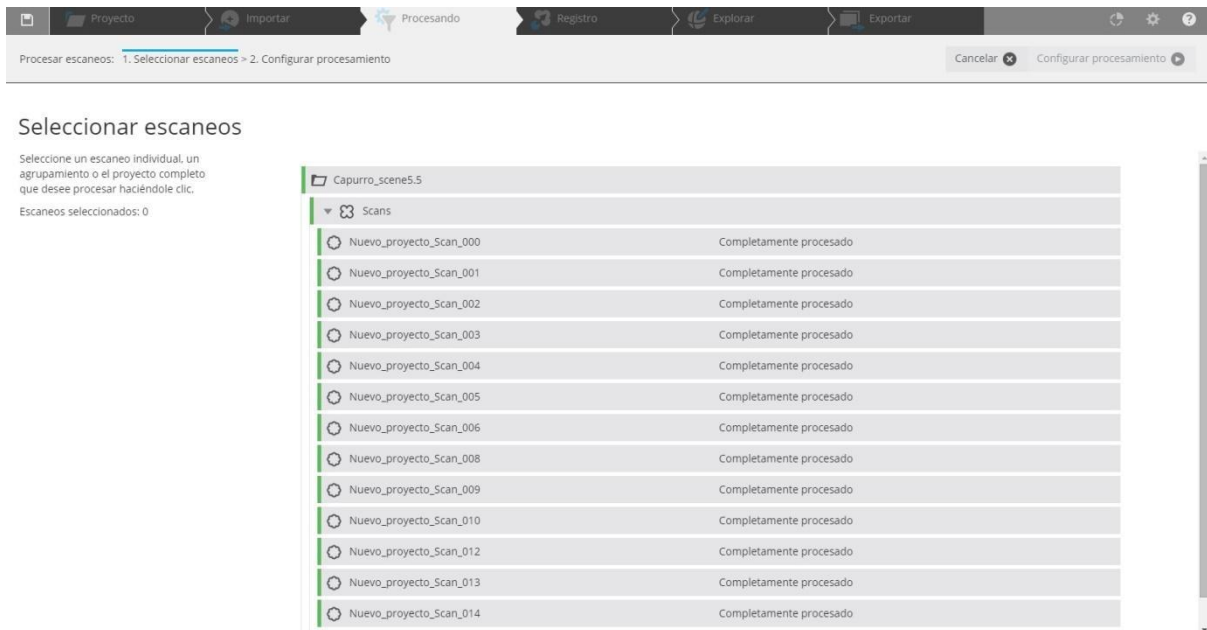


Figura 5.48: Resultado del procesamiento. (Fuente: Propia)

5.5.5. Registro de los escaneos

En la mayoría de los casos, y este no fue la excepción, el objeto es demasiado grande para que se escanee desde una única posición. Por lo que como ya se mencionó fueron necesarios varios estacionamientos del escáner además de haberse realizado en distintos días. Cada nube de puntos obtenida desde cada estacionamiento tiene un sistema de referencia propio, por lo tanto, la representación primaria de todas las nubes de puntos cargadas en forma simultánea resulta caótica y tiene poco sentido gráfico.

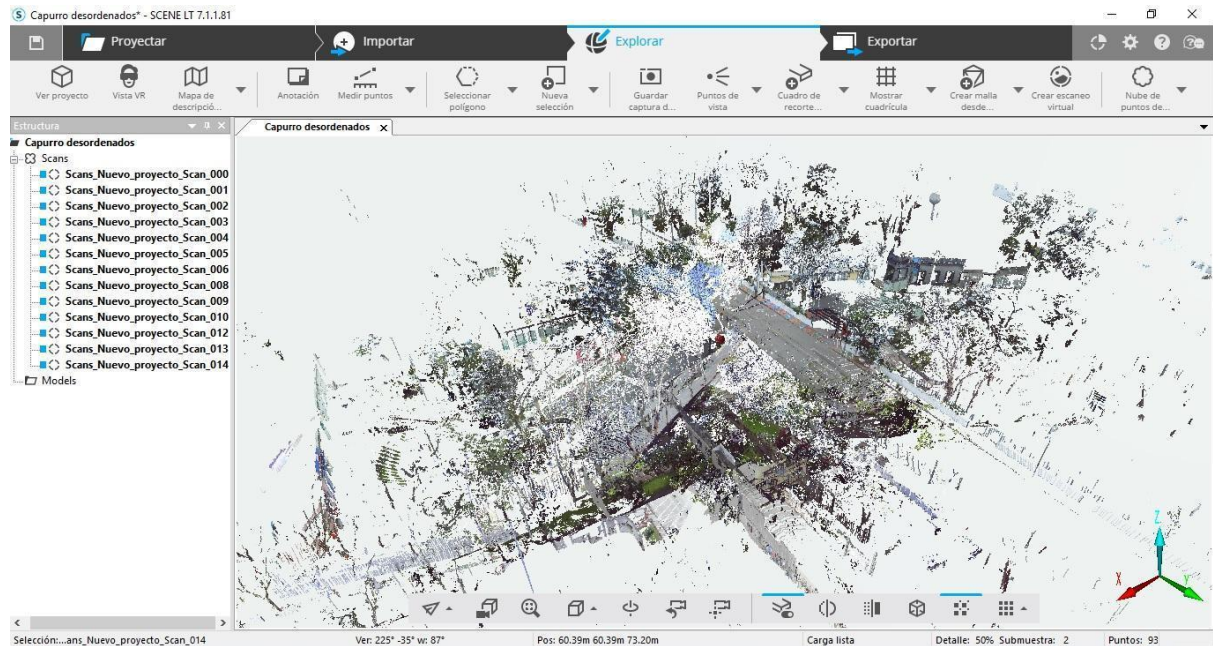


Figura 5.49: Vista de escaneos importados y cargados. (Fuente: Propia)

En la imagen anterior se pueden ver todos los escaneos de la parte exterior juntos en donde cada punto está representado por su color real.

Se puede cargar y ver en el software cada escaneo por separado. También se puede tener una vista de cada una de las fotos que sacó el equipo en el escaneo seleccionado.

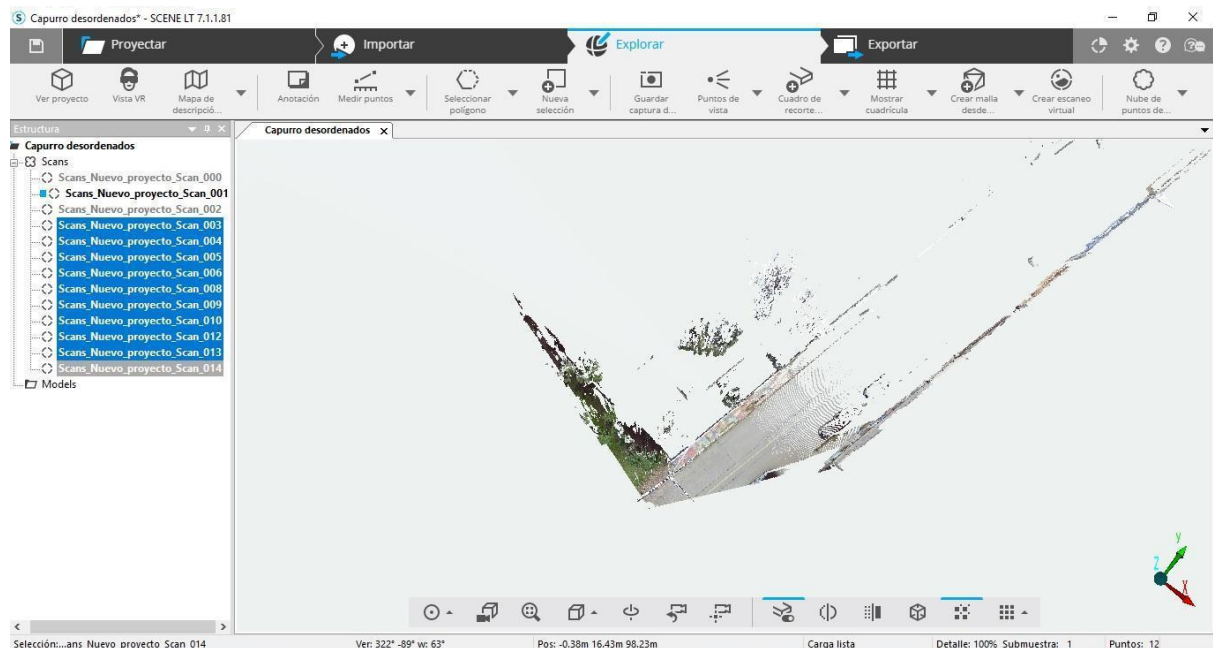


Figura 5.50: Vista desde E1. (Fuente: Propia)

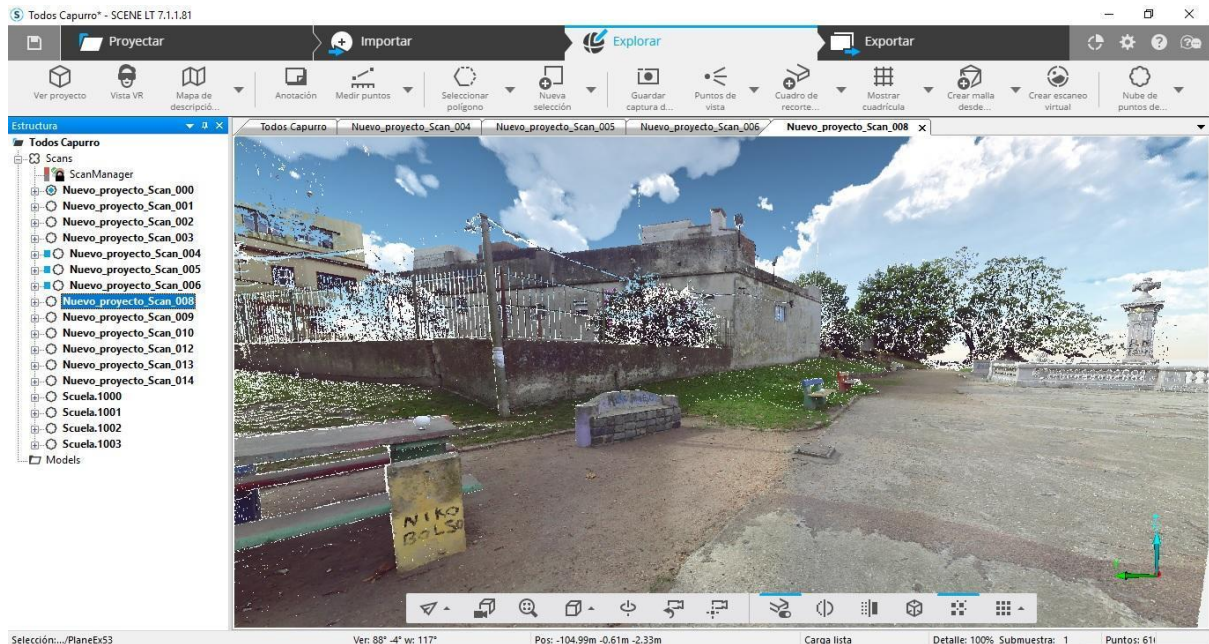


Figura 5.51: Vista desde E6. (Fuente: Propia)

En primera instancia y teniendo en cuenta que los escaneos se hicieron en días y condiciones distintas, aunque con referencias similares; se resolvió realizar el registro de cada set de datos por separado y luego juntar las nubes de puntos resultantes. Igualmente, al tener edificaciones, construcciones y algunas referencias en común se buscó registrar todos los escaneos juntos entre sí, mezclando interiores, exteriores y excavaciones. Luego se detallarán los resultados de ambos procedimientos y se verá cuál proceso muestra mejores precisiones.

Para cada caso de registro se realizó el mismo procedimiento.

1. Registro de los escaneos en software SCENE

El software SCENE es bastante amigable e intuitivo.

En el panel de registro se muestra una vista jerárquica de los objetos de registro relevantes: agrupamientos y escaneos. Para los agrupamientos, incluye el estado de registro actual por colores y permite realizar acciones de registro.

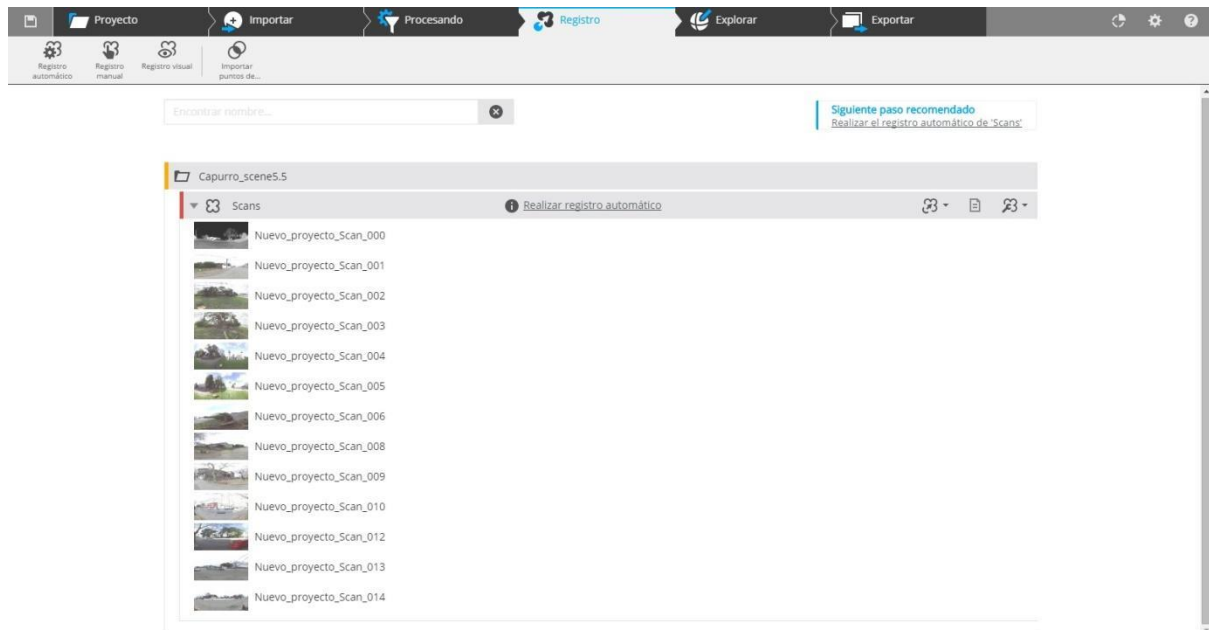


Figura 5.52: Panel de registro. (Fuente: Propia)

Un agrupamiento o *cluster* normalmente recolecta escaneos que comparten características, por ejemplo, escaneos que se registraron en el mismo piso de un edificio o escaneos que se realizaron en la misma habitación. Los grupos de escaneo, creados durante el relevamiento, también se colocan automáticamente en los agrupamientos cuando se importan a SCENE. (Manual de SCENE, 2018)

Para cada *cluster*, también se muestra el estado de registro actual mediante líneas de colores. Los colores indican que tan bien los escaneos o agrupamientos están registrados entre sí.

Los siguientes son los colores posibles (Manual de SCENE, 2018):

Verde:

Se realizó un registro exitoso y el usuario verificó el resultado.

Amarillo:

- Se realizó un registro correctamente, pero no se verificó el resultado.
- Se realizó un registro y fue verificado por el usuario, pero se recomienda una optimización mediante el método de registro utilizado.

Rojo:

- a) Este agrupamiento no está registrado.
- b) Se realizó un registro, pero se produjo un error.

El software permite tres métodos de registro:

- Registro nube a nube.
- Registro basado en la vista superior.
- Registro basado en objetivos.

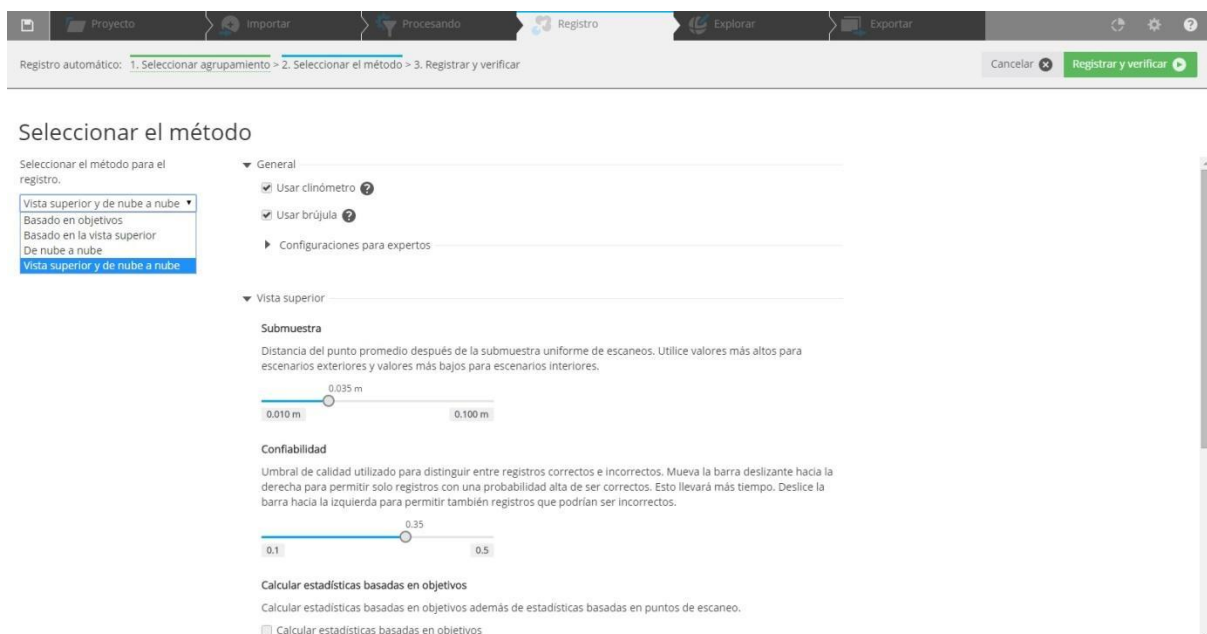


Figura 5.53: Métodos de registro. (Fuente: Propia)

Los objetivos para realizar el registro son objetos físicos en el área escaneada; pueden ser detectados automáticamente por el software o identificados manualmente por el usuario. Un objetivo puede ser un plano, vértices o puntos aislados, que ocurren en forma natural, u objetos adicionales que funcionen específicamente como objetivos, esferas, tableros cuadrículados y marcadores. A su vez los registros pueden hacerse en forma manual o automática.

Para el caso del registro automático, el software busca geometrías y objetos similares entre escaneos. Para ellos se deben seleccionar o dejar en un mismo agrupamiento los escaneos que se quieran registrar. Luego de que el software realice el registro se muestra una vista 3D y requiere

una verificación por parte del usuario, el software solicita siempre aprobación de los resultados obtenidos.

Para el registro manual, se ofrece la posibilidad de identificar puntos y planos homólogos entre escaneos, seleccionando específicamente dichos elementos para realizar el registro. Tan pronto como haya elementos de escaneo correspondientes suficientes, el software registrará los dos escaneos. Se puede ver y evaluar el resultado en la vista correspondencia.

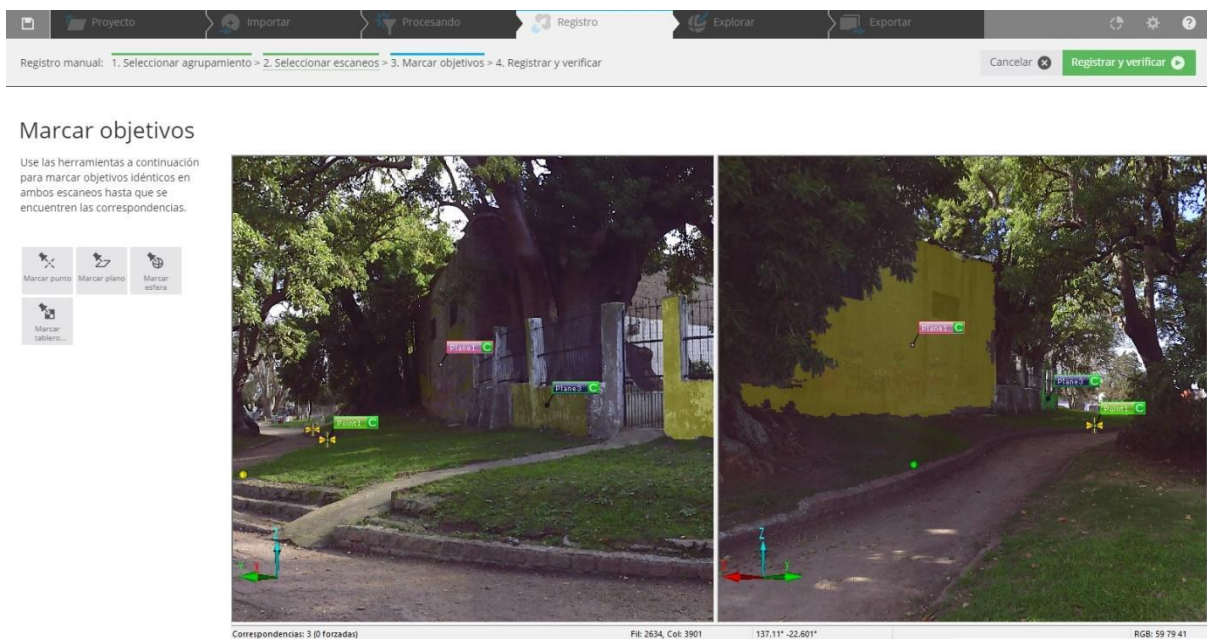


Figura 5.54: Vista correspondencia de escaneos. (Fuente: Propia)

Para todos los casos de registro de un agrupamiento de escaneos SCENE prevé la opción de generar un informe, donde se muestran los resultados asociados a los registros y a los elementos u objetos utilizados en los mismos; incluyendo la comparación de los resultados con valores umbrales predeterminados, o configurados por el usuario. De esta forma los valores que se muestren por encima del primer umbral se mostrarán en verde y los valores que se encuentran por debajo del segundo umbral se muestran en color rojo y los valores intermedios se muestran de color amarillo.

Para el caso del registro mediante el método “objetivo a objetivo” se mostrarán los resultados asociados a los objetos elegidos para el registro, puntos, esferas, planos. Allí se diferenciarán los errores en distancia, mostrando el error máximo y el error medio entre objetivos; y los errores angulares, como también el error máximo y el error medio entre los objetivos.

Para el resto de los casos, en el informe de registro se muestra el error máximo y error medio en la distancia entre puntos homólogos, y la superposición mínima entre escaneos.

Como se mencionó anteriormente el registro de los escaneos se realiza por agrupamientos; cada agrupamiento (conjunto de escaneos) tendrá su tratamiento propio y el software mostrará los resultados y precisiones de registro para cada uno. Se pueden encontrar varias formas de agrupar los escaneos y realizar el registro; para la realización de este trabajo se optó por obtener el registro de todos los escaneos mediante dos tipos de agrupamientos.

Una de las formas fue juntar todos los escaneos en un solo *cluster* y registrarlo.

La otra, consiste en tomar dos escaneos, formar un agrupamiento y registrarlo. Así se obtendrá el informe de registro de los dos escaneos. Luego se vuelve a formar un nuevo agrupamiento con tres escaneos, incluyendo los dos escaneos que formaron parte del primer *cluster* trabajado; obteniendo el informe de registro de los tres escaneos. Y de esta manera continuar generando agrupamientos. A este modo se le denominará registro de “n más 1” escaneos (siendo $1 \leq n \leq 26$). Esta forma de registro busca hacer un proceso de control similar al usado en una poligonal cerrada. Además, para cada registro se revisarán los resultados, para determinar si se sigue con el próximo agrupamiento o se realiza nuevamente el registro.

Para cada *cluster* el proceso de registro será similar. La primera opción que muestra el software para el registro es la automática, pero dicho proceso requiere que el software busque similitudes entre escaneos sin tener ninguna referencia previa indicada manualmente, esta forma de registro consume mucho tiempo y recursos internos de la computadora. Los equipos informáticos con los que se contaba para realizar los registros no permitirían al software arrojar buenos resultados de la manera automática. Sin embargo si primero se comienza de forma manual “objetivo a objetivo” y luego se realiza una optimización del registro de forma automática se “ayuda” al software, ya que las nubes de puntos estarán previamente “colocadas”. Así el software deberá mejorar automáticamente la aproximación de los puntos homólogos de los escaneos, proporcionando mejores precisiones y mejores resultados. Para realizar el registro de todos los agrupamientos primero se realizará el registro de forma manual “objetivo a objetivo” y luego se optimizará el resultado mediante la opción

automática. Adicionalmente se volverá a re-optimizar el registro mediante la optimización automática “nube a nube” para obtener los informes de registro correspondientes a cada método de optimización.

2. Registro de los escaneos exteriores

En el relevamiento se obtuvieron 12 escaneos (sin contar el escaneo de prueba), cada escaneo quedó nombrado de la siguiente manera, “Nuevo_proyecto_Scan_00m”, con m natural y consecutivos, partiendo de m=0. Luego de importar los 12 escaneos al SCENE debimos cargarlos y procesarlos como se explica en el punto 5.5.4. Una vez que todos los escaneos estén correctamente cargados y procesados, se da comienzo al proceso de registro.

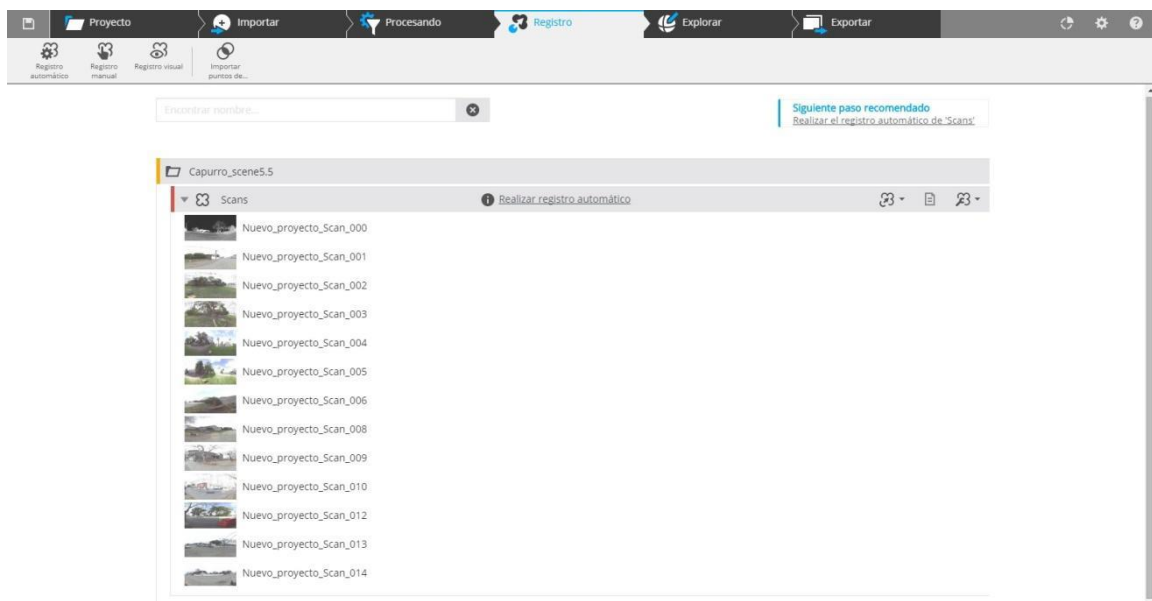


Figura 5.55: Registro de todos los escaneos en un solo agrupamiento. (Fuente: Propia)

Como se explicó anteriormente, se realizó el registro de un solo agrupamiento conteniendo todos los escaneos. Los mismos se fueron registrando manualmente, “objetivo a objetivo”, luego se optimizó mediante el mismo método de forma automática, y también de la forma automática “nube a nube”.

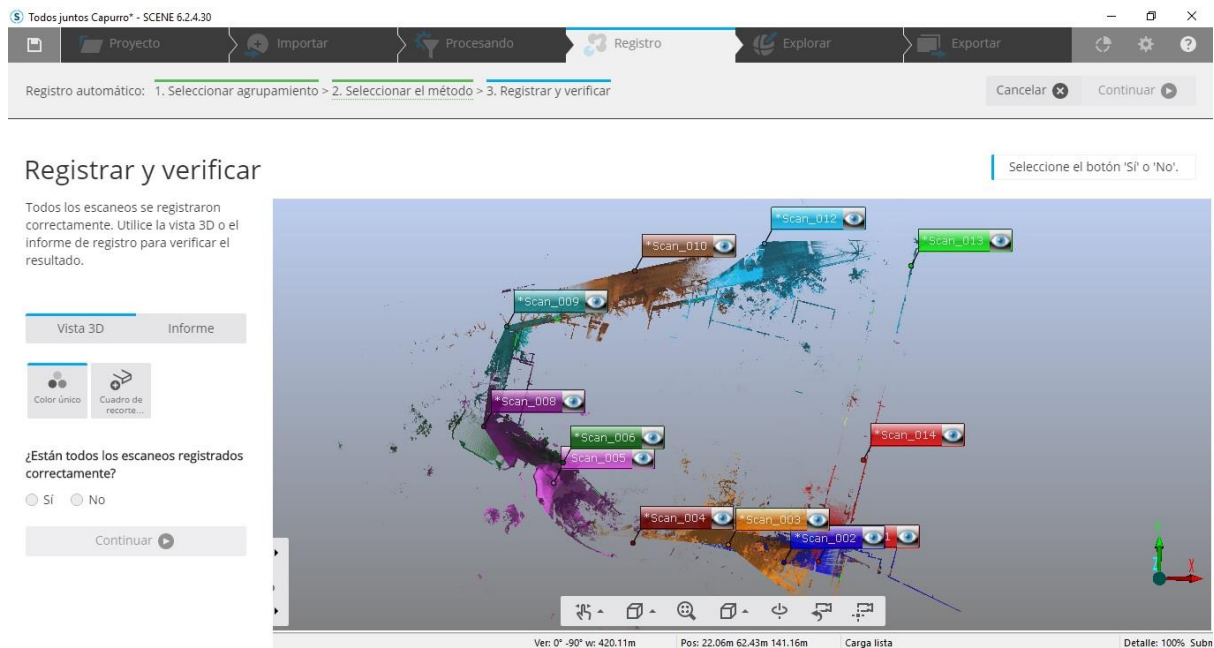


Figura 5.56: Escaneos exteriores luego del registro. (Fuente: Propia)

Los resultados para el primer proceso de registro, aplicando el método “objetivo a objetivo”, y optimizando automáticamente también “objetivo a objetivo”; fueron de un error máximo entre objetivos homólogos de 74.2 mm, y de error medio entre objetivos de 10.3 mm. Mientras que el error angular máximo arrojado fue de $1^{\circ}09'36''$, y el error medio fue de $0^{\circ}21'36''$.

Luego aplicando la re-optimización, “nube a nube”, arrojó un resultado de error máximo entre puntos de 48 mm, y un error medio de 16.2 mm.

Posteriormente se procedió a formar agrupamientos del modo de “n más 1” escaneos. Se formó un agrupamiento con dos escaneos, se registró mediante el método manual “objetivo a objetivo”, se optimizó mediante el mismo método de forma automática, re-optimizando luego de la forma automática “nube a nube”.

Se repitieron los pasos hasta obtener los informes de registro del agrupamiento que contenga todos los escaneos.

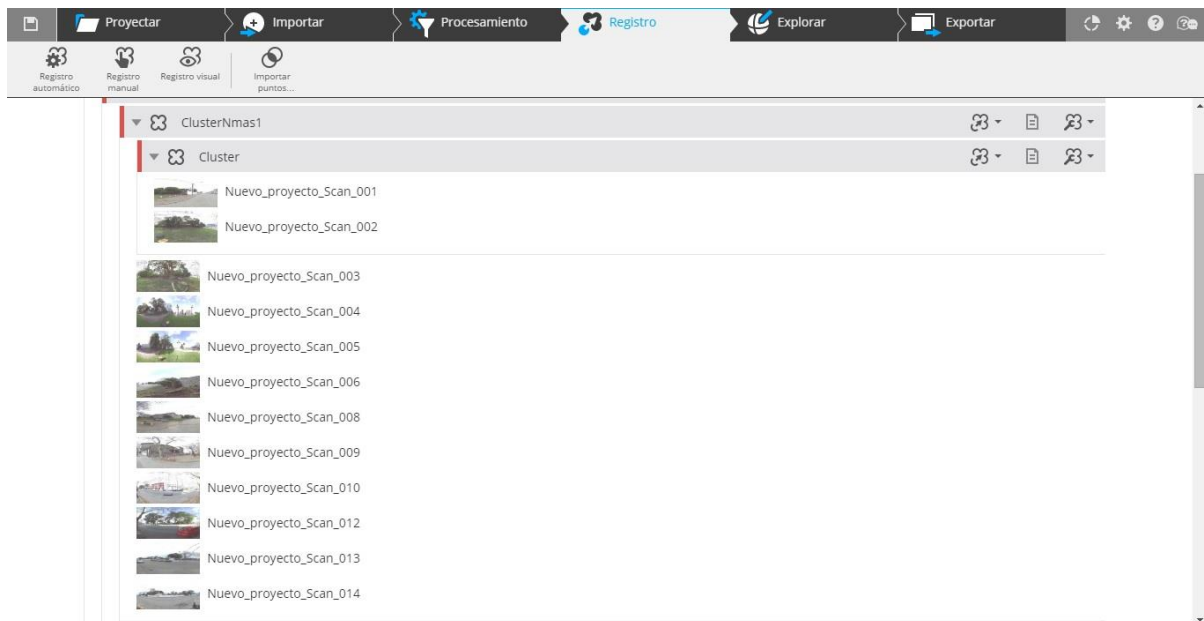


Figura 5.57: Registro de los escaneos agrupándolos de a $n + 1$. (Fuente: Propia)

De esta forma obtendremos un control del proceso, ya que se tendrá acceso a los resultados parciales.

Los resultados luego de incluir uno a uno los escaneos e ir realizando los registros con los agrupamientos “n más 1”, mediante el método “objetivo a objetivo”, optimizados automáticamente también “objetivo a objetivo”, fueron de un error máximo entre objetivos homólogos de 58.6 mm, y el error medio entre objetivos de 12.1 mm. A su vez el error angular máximo arrojado fue de $1^{\circ} 21' 36''$, y el error medio fue de $0^{\circ} 21'$.

Luego aplicando la re-optimización, “nube a nube”, arrojó un resultado de error máximo entre puntos de 37.1 mm, con un error medio de 11.7 mm.

3. Registro de los escaneos interiores

En el relevamiento interior se obtuvieron 4 escaneos, cada escaneo quedo nombrado de la siguiente manera, “Scuela.100m”.

Al igual que para el registro de los escaneos exteriores, luego de cargados y procesados los escaneos al software se comienza el proceso de registro.

A continuación se muestra la vista que proporciona el software de todos los escaneos juntos, luego de registrados:

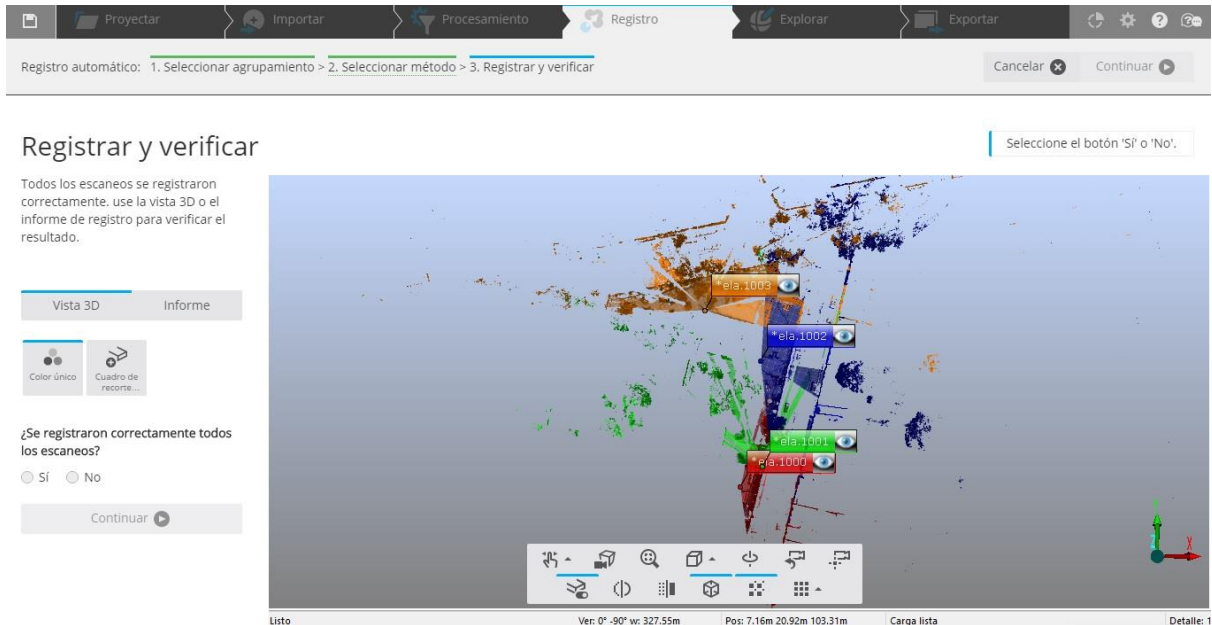


Figura 5.58: Escaneos del interior registrados. (Fuente: Propia)

Los resultados para este registro, posterior a la primera optimización, fueron de un error máximo en distancia entre objetivos homólogos de 48.2 mm, y error medio de 9.4 mm. El error angular máximo arrojado fue de $1^{\circ} 19' 12''$, y el error medio de $0^{\circ} 21'$.

Luego de aplicar la re-optimización “nube a nube”, los resultados obtenidos fueron: error máximo entre puntos de 30 mm, y un error medio de 16.7 mm.

En este caso los resultados luego de incluir uno a uno los escaneos e ir realizando los registros con los agrupamientos “n más 1”, mediante el método “objetivo a objetivo”, optimizados automáticamente también “objetivo a objetivo”, fueron de un error máximo entre objetivos homólogos de 53.2 mm, y el error medio entre objetivos de 8.9 mm. A su vez el error angular máximo arrojado fue de $1^{\circ} 19' 12''$, y el error medio fue de $0^{\circ} 16' 48''$.

Luego aplicando la re-optimización, “nube a nube”, arrojó un resultado de error máximo entre puntos de 38.4 mm, y un error medio de 21.2 mm.

4. Registro de los escaneos de las excavaciones

En el relevamiento de las excavaciones, se obtuvieron 11 escaneos, cada escaneo quedo nombrado de la siguiente manera, “Cap_Scan_00m”.

El proceso de registro de los escaneos de las excavaciones no pudo realizarse exactamente igual a los procesos descritos para el registro de los escaneos interiores y exteriores.

Mediante el método de registro “objetivo a objetivo”, el software SCENE no podía registrar el escaneo nombrado “Cap_Scan_006” ya que no reconocía las referencias comunes que se marcaban. La causa podría deberse a que al momento del relevamiento se hayan interpuesto personas entre el equipo y las partes relevadas dado que se estaban realizando en el momento algunas de las tareas de excavación; así como también porque el ángulo de escaneo configurado haya sido muy pequeño lo que no permitió incluir muchas referencias para luego ligar el escaneo a otros.

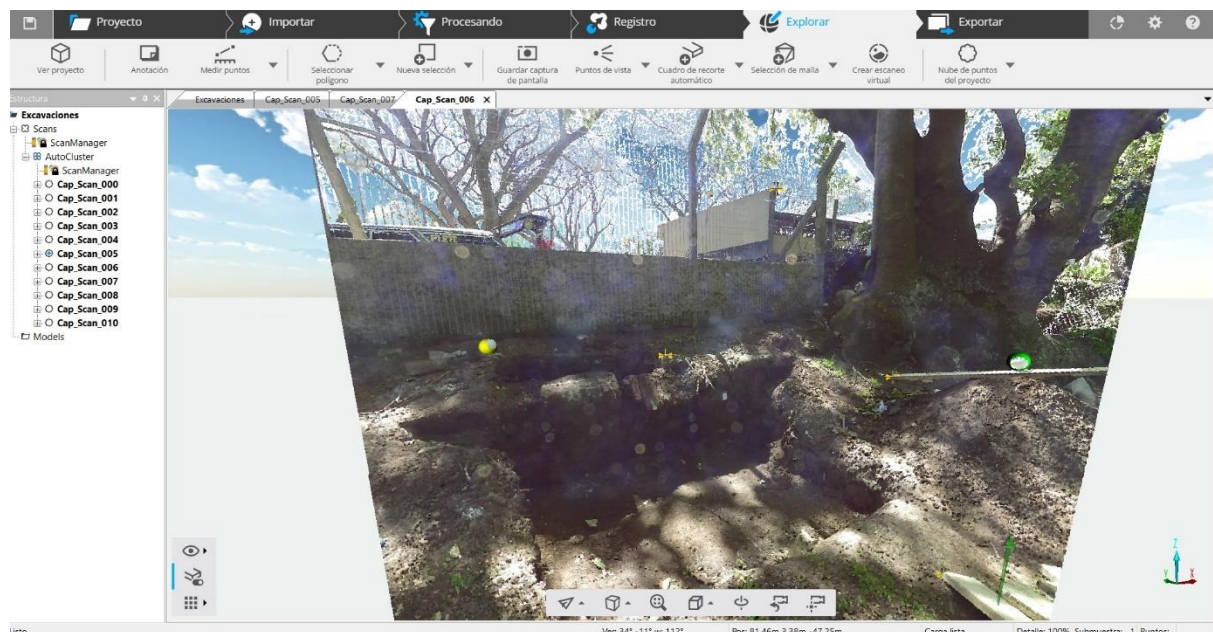


Figura 5.59: Imagen de la vista del escaneo número 6. (Fuente: Propia)

También se intentó ligar mediante el método de registro “nube a nube” y nos encontramos ante el mismo problema.

Por lo que se pasó a utilizar el tercer método de registro que permite el software, “basado en la vista superior”. Consistente en realizar una aproximación manual mediante la visualización del escaneo, para lograr

“colocar” el escaneo “Cap_Scan_006” en la posición más cercana a la que se debería registrar.

De esta forma si se logró que el SCENE ligara el escaneo con el resto de la nube.

Optimizando el resultado anterior “nube a nube” automáticamente, se logró registrar correctamente y obtener un informe de registro para todo el agrupamiento de escaneo de las excavaciones. Los resultados obtenidos fueron de un error máximo entre puntos 24.2 mm, y 7.3 mm el error medio.

Habiendo logrado que el escaneo “Cap_Scan_006” formara parte de un agrupamiento, se procedió a realizar el mismo procedimiento que se venía siguiendo para los otros casos.

El resultado de registrar manualmente y optimizar “objetivo a objetivo” fue de 30.6 mm para el error máximo en la distancia, 12 mm el error medio. Los errores angulares máximo $1^{\circ}38'24''$, y el error medio $28'48''$.

Por último, luego de aplicar re-optimización nube a nube los resultados fueron de 14.7 mm el error máximo entre puntos, y el error del punto medio de 6.9 mm.

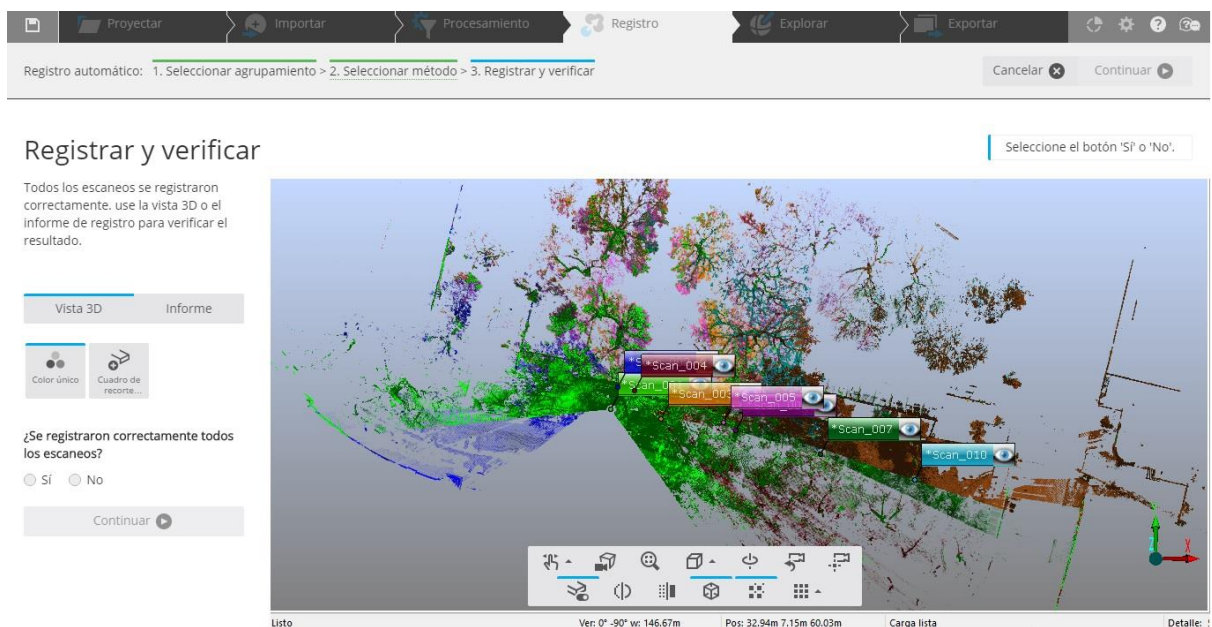


Figura 5.60: Imagen de los escaneos de las excavaciones luego del registro. (Fuente: Propia)

Seguidamente, realizamos el proceso de registro agrupando los escaneos uno a uno de la forma “n más 1” como ya hemos explicado, mediante el método “objetivo a objetivo” y optimizando automáticamente también “objetivo a objetivo”, los resultados obtenidos en esta ocasión fueron: error máximo en la distancia de 30.6 mm, error medio 12 mm. Y para los ángulos los errores máximo y medio fueron $1^{\circ}38'24''$ y $28'48''$ respectivamente.

Re-optimizando el registro automático “nube a nube” nos arrojó un resultado de error máximo entre puntos de 14.5 mm, con un error medio de 6.5 mm.

5. Registro de las nubes “interior” y “exterior”

Una vez que se realizaron los registros de los escaneos de cada día de relevamiento por separado, procedimos a juntarlos, estudiando los resultados y con el objetivo de lograr una única nube de puntos integrada del proyecto que contenga los puntos de todos los escaneos.

Primero se juntaron los escaneos de los proyectos “interior” con los de “exterior”. El proceso de formación de los agrupamientos y de registro de estos siguen la misma lógica de lo descrito hasta aquí con cada caso por separado.

Con lo cual luego de registrar los escaneos en un solo *cluster* en forma manual mediante el método basado en objetivos y optimizando automáticamente también mediante el método basado en objetivos, el error máximo en distancia entre objetivos fue 62.4 mm, y el error medio entre ellos 13.6 mm. Los errores de los ángulos máximo y medio fueron $3^{\circ}33'36''$ y $24'$ respectivamente.

Luego aplicando una nueva optimización por el método “nube a nube” automáticamente, se obtuvo un error máximo de distancia entre puntos de 34.3 mm, y un error medio de 11.3 mm.

Cuando asociamos los escaneos en agrupamientos de a “n más 1”, registrando en forma manual, después automáticamente por el método “objetivo a objetivo”, obtuvimos un error máximo de distancia entre objetivos de 59.7 mm y un error medio en distancia entre objetivos de 10.7 mm. Para los ángulos los resultados fueron $3^{\circ}33'36''$, error angular máximo, y el error angular medio fue $25'12''$.

Por último, re-optimizando automáticamente “nube a nube”, se obtiene para el error máximo de distancia un valor de 33 mm, y un valor de 9.7 mm para el error medio en distancia.

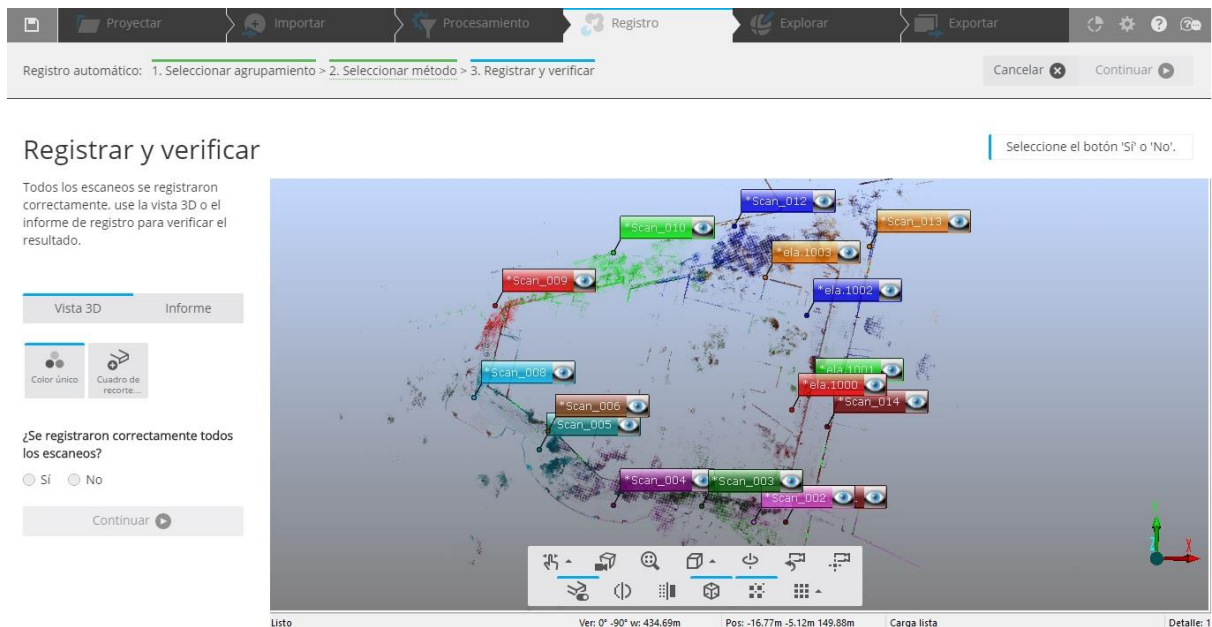


Figura 5.61: Imagen de los escaneos interior y exterior juntos. (Fuente: Propia)

6. Registro de todos los escaneos juntos

En esta instancia agruparemos todos los escaneos en un mismo *cluster*, los escaneos obtenidos del exterior, los del interior y los de las excavaciones, con el fin de obtener una única nube de puntos.

En esta etapa de trabajo con el software y del aprendizaje adquirido, habiendo hecho muchos procesos de registro, destacamos la importancia de la correcta elección de los pares de escaneos y del orden de estos durante el proceso de registro. Para todos los casos, debemos asegurarnos de que el siguiente par de escaneos elegido va a tener suficientes objetivos en común para lograr el correcto registro. Una vez que logremos identificar un número suficiente de objetivos en ambos escaneos, el software automáticamente ligará el nuevo escaneo con todos los que conforman el agrupamiento.

A continuación se listan los pares de escaneos entre los que se lograron más y mejores coincidencias:

Nuevo_proyecto_Scan_001 con Nuevo_proyecto_Scan_002
Nuevo_proyecto_Scan_002 con Nuevo_proyecto_Scan_003
Nuevo_proyecto_Scan_003 con Nuevo_proyecto_Scan_004
Nuevo_proyecto_Scan_004 con Nuevo_proyecto_Scan_005
Nuevo_proyecto_Scan_005 con Nuevo_proyecto_Scan_006
Nuevo_proyecto_Scan_005 con Nuevo_proyecto_Scan_008
Nuevo_proyecto_Scan_008 con Nuevo_proyecto_Scan_009
Nuevo_proyecto_Scan_009 con Nuevo_proyecto_Scan_010
Nuevo_proyecto_Scan_010 con Nuevo_proyecto_Scan_012
Nuevo_proyecto_Scan_001 con Nuevo_proyecto_Scan_014
Nuevo_proyecto_Scan_014 con Nuevo_proyecto_Scan_013
Nuevo_proyecto_Scan_014 con Escuela.1001
Nuevo_proyecto_Scan_001 con Escuela.1000
Escuela.1000 con Escuela.1002
Escuela.1002 con Escuela.1003
Nuevo_proyecto_Scan_001 con Cap_Scan_009
Cap_Scan_009 con Cap_Scan_007
Cap_Scan_009 con Cap_Scan_010
Cap_Scan_007 con Cap_Scan_008
Cap_Scan_007 con Cap_Scan_006
Cap_Scan_007 con Cap_Scan_001
Cap_Scan_001 con Cap_Scan_000
Cap_Scan_001 con Cap_Scan_002
Cap_Scan_001 con Cap_Scan_003
Cap_Scan_001 con Cap_Scan_004
Cap_Scan_003 con Cap_Scan_005

Se completó el agrupamiento de todos los escaneos y se procedió a registrarlos en forma manual y automática mediante el método basado en objetivos; el error máximo en distancia entre objetivos obtenido fue 69.5 mm, y el error medio entre ellos 12.6 mm. Los errores de los ángulos máximo y medio fueron 3°33'36" y 25'12" respectivamente.

Como se hizo en todos los demás procesos de registro, se re-optimizó "nube a nube" automáticamente, obteniéndose un error máximo de distancia entre puntos de 37.4 mm, y un error medio de 10.7 mm.

Como se ha mencionado, agrupamos los escaneos de la forma a "n más 1" teniendo la posibilidad de realizar un control parcial en cada registro para cada agrupamiento intermedio. Primero registrando en forma manual, y después optimizando automáticamente utilizando el método "objetivo a objetivo", obtuvimos un error máximo en distancia entre objetivos de 67.1 mm y un error medio en distancia entre objetivos de 10.8 mm. Los resultados intermedios de los registros y la evolución de los errores se pueden apreciar en el siguiente gráfico:

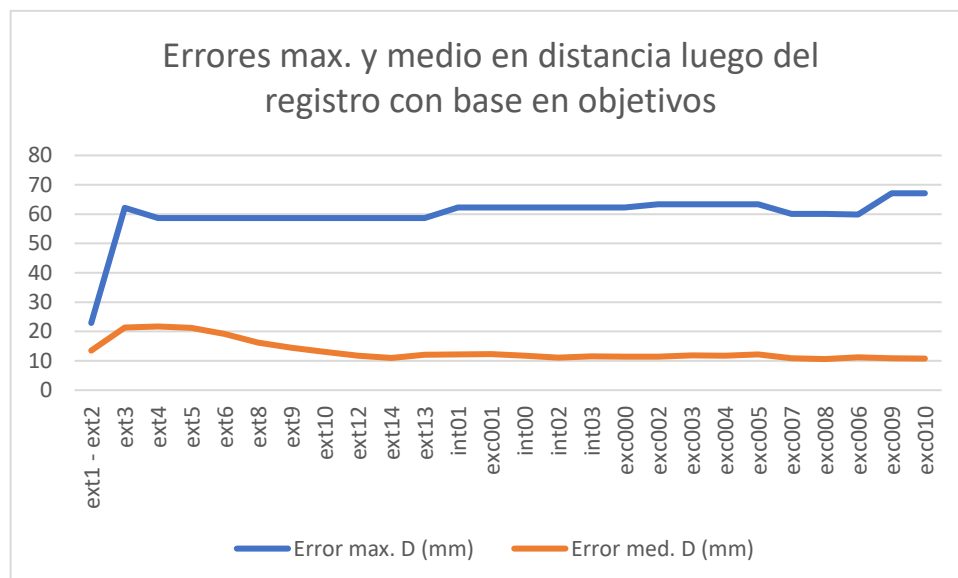


Figura 5.62: Resultados de los errores en distancia graficados. (Fuente: Propia)

Para los ángulos los resultados fueron 3°33'36" el error angular máximo, y el error angular medio fue 24'36". El gráfico que muestra los resultados angulares es el siguiente:

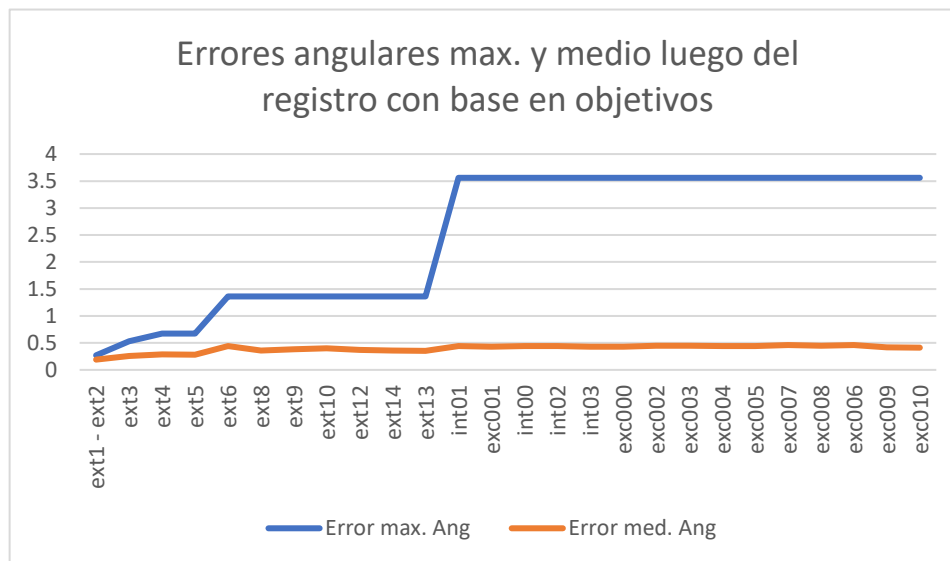


Figura 5.63: Resultados de los errores en ángulos graficados. (Fuente: Propia)

Por último, cuando aplicamos la optimización automática de la forma “nube a nube”, se obtiene para el error máximo de distancia un valor de 28.5 mm, y un valor de 9.2 mm para el error medio en distancia.

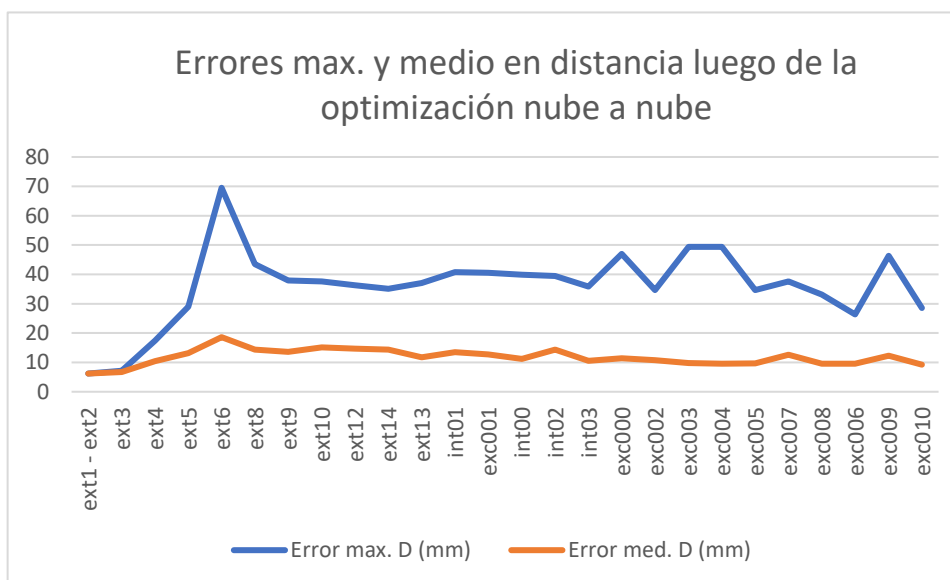


Figura 5.64: Resultados de los errores en distancia graficados para el caso nube a nube. (Fuente: Propia)

Para los tres gráficos anteriores, el eje de las abscisas muestra el nombre del escaneo agregado al agrupamiento “n más 1” para realizar el registro (comenzando con el *cluster* formado por los escaneos exteriores 1 y 2). En

el eje de las ordenadas, el primer grafico representa los errores en las distancias en mm, el segundo grafico los errores en los ángulos expresados en grados decimales ya que de esta forma los expresa automáticamente el software SCENE en el informe de registro; y en el tercer grafico nuevamente se muestran en mm los errores luego de optimizar por el método “nube a nube”.

Seguidamente, se muestran todos los escaneos posicionados luego del registro.

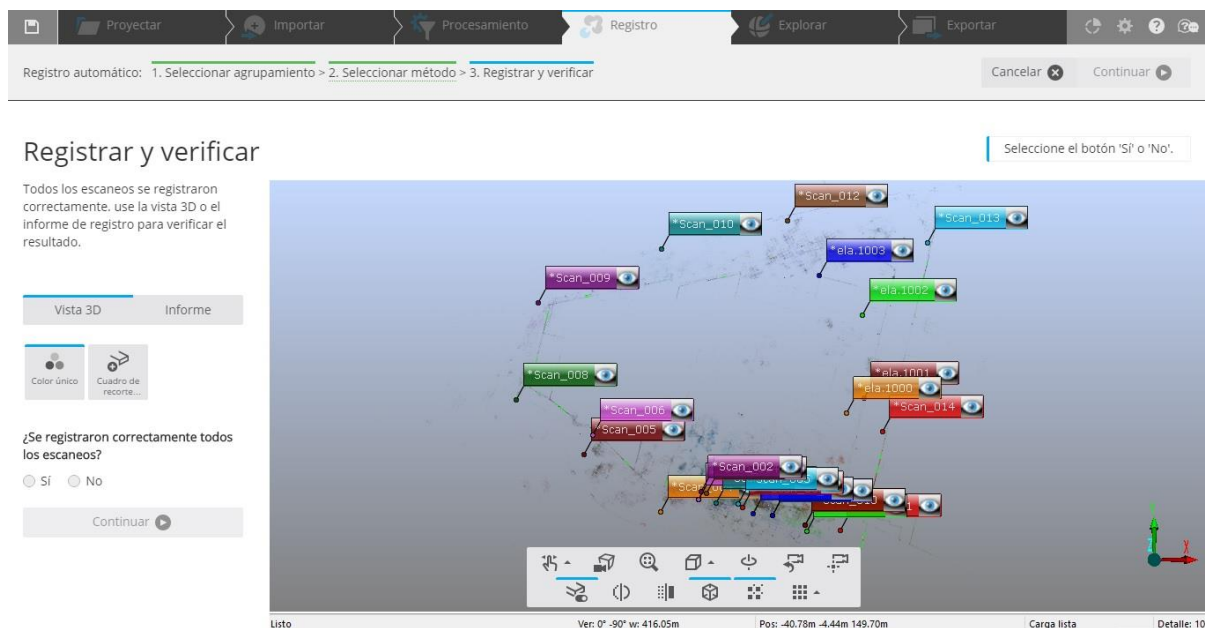


Figura 5.65: Imagen todos los escaneos juntos luego del registro. (Fuente: Propia)

5.5.6. Procesamiento de los datos y análisis de los resultados

El resultado de un proyecto de escaneo en SCENE es la nube de puntos del objeto escaneado. En este caso el resultado será la nube de puntos de toda la manzana que incluye los restos del muro de lo que se conoció como el Caserío de los Negros.

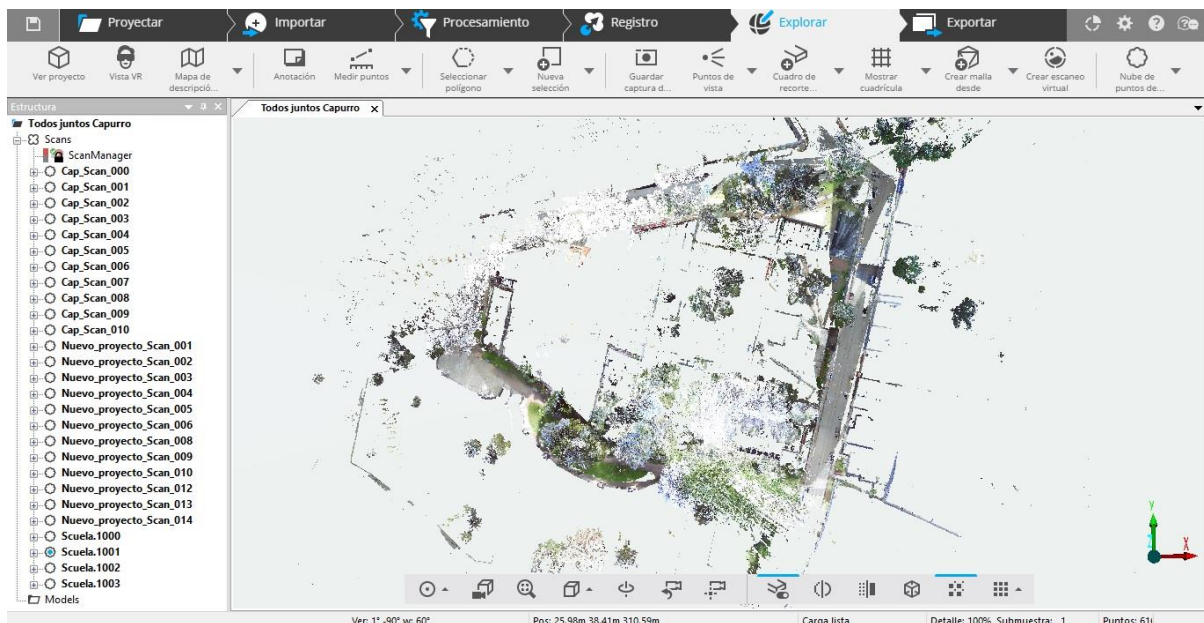


Figura 5.66: Imagen de la nube de puntos del proyecto. (Fuente: Propia)

La nube de puntos del proyecto estará formada siempre por todos los puntos de los escaneos del objeto del proyecto, considerándose como una nube de puntos integral del proyecto de escaneo completo. Creándose a partir de todos los escaneos individuales una vez procesados, coloreados y registrados.

La nube de puntos del proyecto es el primer resultado del trabajo de escaneo. En la misma se representan todos los puntos escaneados, luego del proceso de registro, es decir que cada punto se encuentra en su posición relativa correcta respecto a todos los puntos escaneados.

Algunos de los beneficios de lograr la nube de puntos integral del proyecto mediante la tecnología láser escáner 3D son:

- ✓ Ágil visualización de grandes cantidades de escaneos y de puntos al mismo tiempo.
- ✓ Una única estructura de datos espaciales optimizada para todos los puntos de escaneo en un proyecto.
- ✓ Acceso a los escaneos individuales asociados con el proyecto.
- ✓ Facilidad para obtener medidas rápidamente del espacio de trabajo.

En este proyecto se obtuvo una nube de puntos integrada por casi 365 millones de puntos (364.885.459 exactamente) provenientes de los 27 escaneos realizados. Con un error medio entre puntos de 10.7 mm.

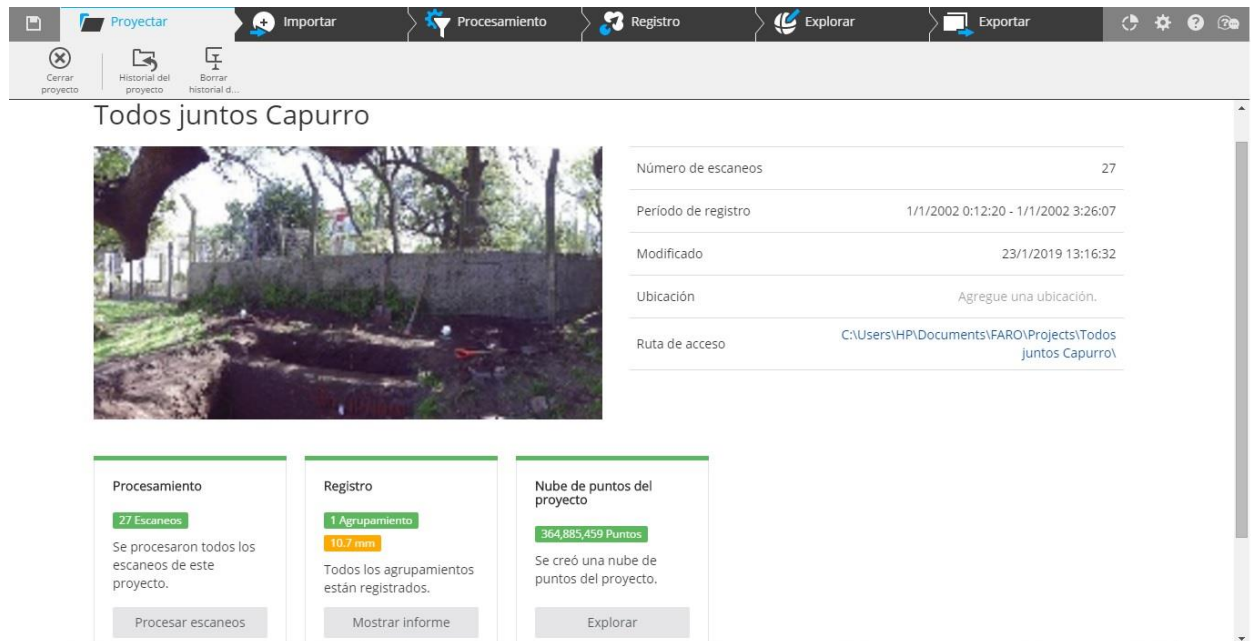


Figura 5.67: Imagen del proyecto luego de obtener los resultados. (Fuente: Propia)

A partir de la nube de puntos podemos obtener información rápidamente, por ejemplo, dibujando encima de la imagen de la nube de puntos de la manzana podemos determinar fácilmente la geometría de esta y del padrón donde se encuentran emplazados la escuela y el jardín de infantes.



Figura 5.68 y 5.69: A la izquierda el contorno de la manzana sobre la nube de puntos del relevamiento. A la derecha la manzana dibujada sobre la foto de Google Earth.

Otro resultado rápido que se puede obtener es la ubicación de las construcciones dentro del predio.



Figuras 5.70 y 5.71: A la izquierda el contorno del predio y algunos contornos de construcciones sobre la nube de puntos del relevamiento. A la derecha la imagen del artículo de López Mazz y Bracco detallando las construcciones.

Es importante aclarar que para el interior del predio no se tomó relevamiento de todo lo que podría haberse escaneado. De haber sido así, se hubiera obtenido un nivel mucho mayor de detalle sobre todo de las construcciones que no necesariamente eran relevantes para este proyecto. Sumado a esto, y para visualizar mejor límites de las construcciones, se depuró la nube manualmente quitando una gran cantidad de puntos correspondientes a árboles y otras interferencias.

Nos enfocaremos ahora en dos zonas del predio en particular. La primera, la parte sur del jardín de infantes contra el parque Capurro, donde se realizaron las excavaciones. En las mismas el equipo de arqueólogos dejó al descubierto tramos de muro que estaban bajo tierra, incluso tramos con piedras, posibles fundaciones de las construcciones de la época. Resulta interesante de analizar resultados con las nubes de puntos, ya que al haber realizado relevamientos antes y después de las excavaciones, permiten conocer exactamente las partes que se descubrieron, además de poder obtener medidas reales en cualquier momento.

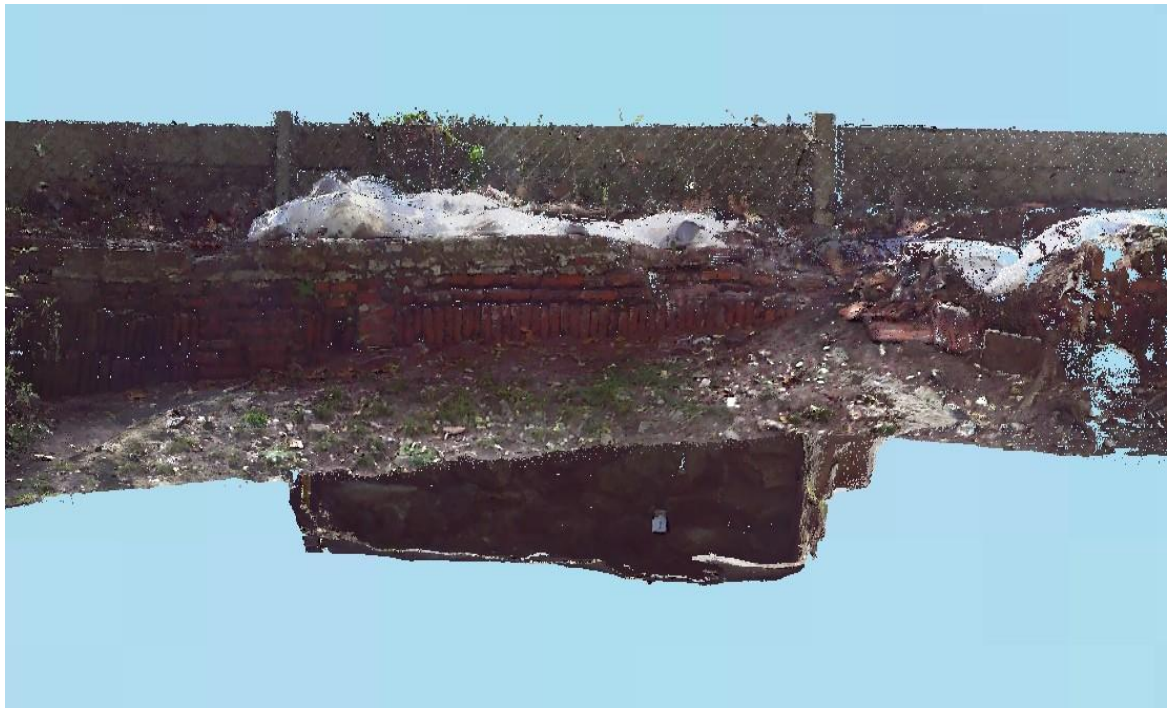


Figura 5.72: Tramo de muro, incluido parte de lo descubierto en las excavaciones. (Fuente: Propia)



Figura 5.73: Tramo de muro, donde se puede ver la parte que se descubrió. (Fuente: Propia)

Las imágenes anteriores son resultados directos de la nube de puntos del proyecto, se combinaron los puntos de escaneo de fechas distintas, gracias a las referencias en común que se registraron y permiten dicha visualización. Este resultado es un excelente recurso para documentar las distintas etapas en la vida de una construcción, y por ejemplo determinar patologías que afecten a la misma a lo largo del tiempo.

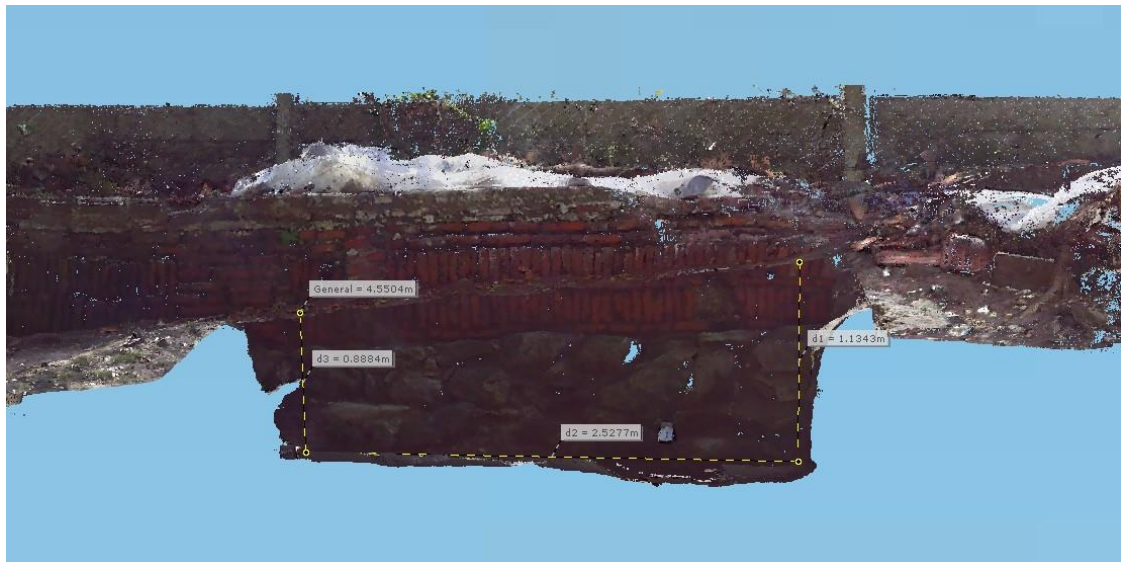


Figura 5.74: Profundidad y tamaño del pozo de excavación. (Fuente: Propia)

Podemos hacer el mismo análisis para otros tramos; obteniendo para todos resultados precisos y con una visión de dos momentos distintos de un mismo lugar.



Figura 5.75: Tramo de muro, donde se puede ver la parte que se descubrió. (Fuente: Propia)



Figura 5.76: Tramo de muro, donde se puede ver la parte que se descubrió. (Fuente: Propia)

La segunda zona en la que nos enfocaremos es la del muro sobre el lado noreste de la escuela.

Retomando lo ya comentado en la introducción de este trabajo, los especialistas en antropología Roberto Bracco Boksar y José M. López Mazz, indicaban que: “El muro tiene un ancho promedio de 40 cm. Actualmente su altura no es mayor a un metro. Posiblemente, al cambiar la función del recinto, fue desmontado en forma parcial para permitir visibilidad desde fuera y para dentro del predio. También sufrió reparaciones en su revoque y en múltiples oportunidades fue pintado. Presenta contrafuertes de 60 cm por 60 cm, distribuidos cada 4 varas (= un estadal).”



Figura 5.77: Tramo de muro, se pueden apreciar los contrafuertes. (Fuente: Propia)

A partir de la nube de puntos obtenida desde el SCENE, podemos ratificar las medidas de los contrafuertes y la distancias entre ellos.



Figura 5.78: Distancia entre contrafuertes. (Fuente: Propia)

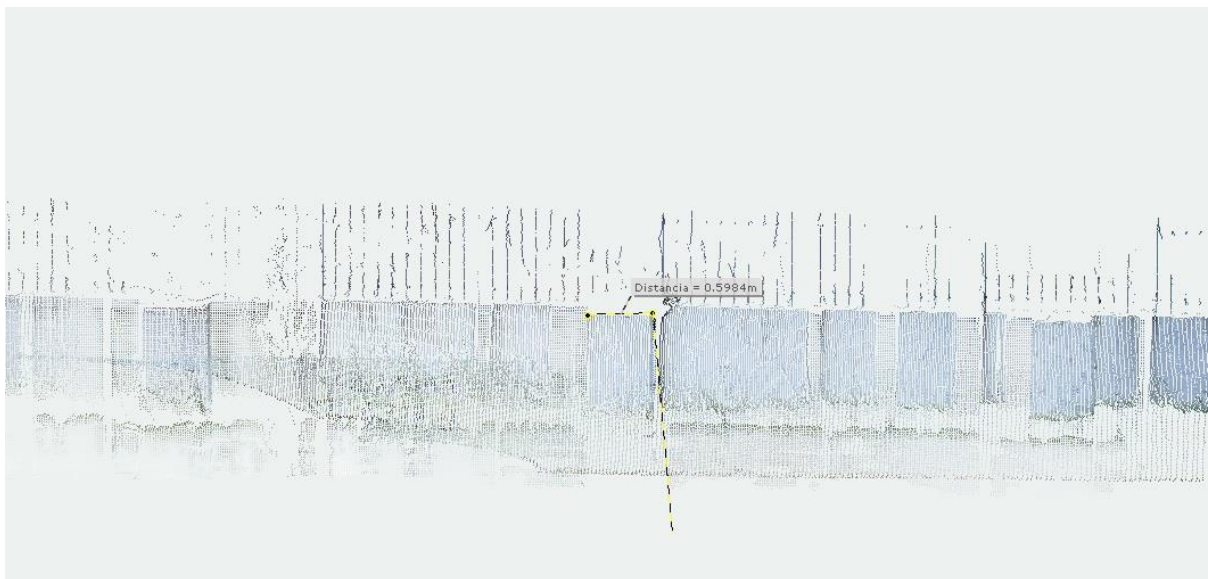


Figura 5.79: Medida sobre el contrafuerte. (Fuente: Propia)

Se puede apreciar en las imágenes creadas desde el software a partir de los puntos relevados, que las distancias entre los contrafuertes resultante es de 3.3428 metros, y que el ancho de los contrafuertes es 0.5984 m. Recordemos que una vara equivale a 0.8359 metros, entonces 4 varas equivalen a 3.3436 metros; por lo que la diferencia entre la medida obtenida y la medida indicadas en el artículo de Bracco y López Mazz es del entorno de los 2 mm.

Cuanto mayor grado de detalle se desee obtener, más exhaustivo deberá ser el relevamiento, es decir que requerirá una mayor resolución y mejor calidad, teniendo como resultado una nube de puntos muy densa. Para este tramo del muro, no se buscó conseguir que relevamiento fuera tan detallado al punto de poder profundizar en el análisis de las precisiones de las distancias obtenidas.

Otro producto que podemos obtener a partir de las nubes de puntos, requiriendo más trabajo y procesamiento, es la malla texturada de algunos tramos de muro.

Seguidamente, presentamos ejemplos de las imágenes con textura añadida obtenidas desde el software a partir del relevamiento.

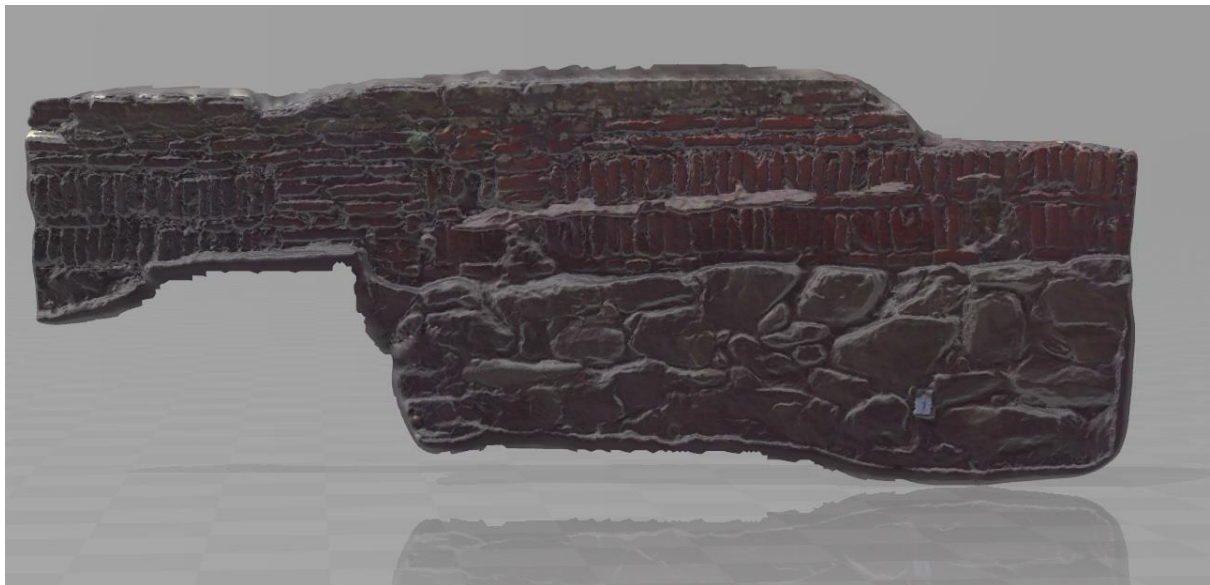


Figura 5.80: Modelo texturizado, usando puntos de parte del muro. (Fuente: Propia)

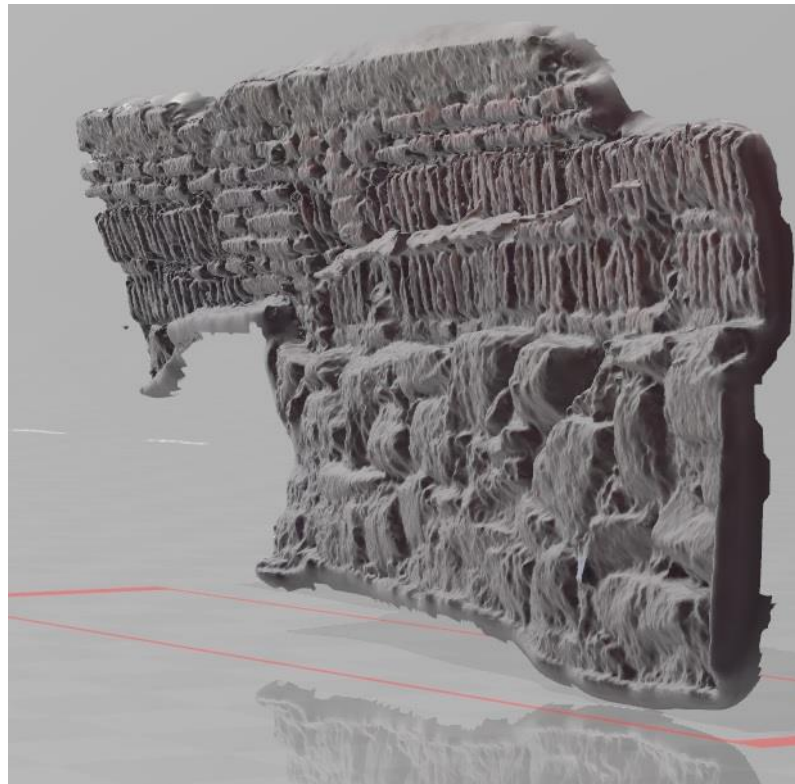


Figura 5.81: Modelo texturizado, usando puntos de parte del muro. (Fuente: Propia)



Figura 5.82: Modelo texturizado, usando puntos de parte del muro. (Fuente: Propia)

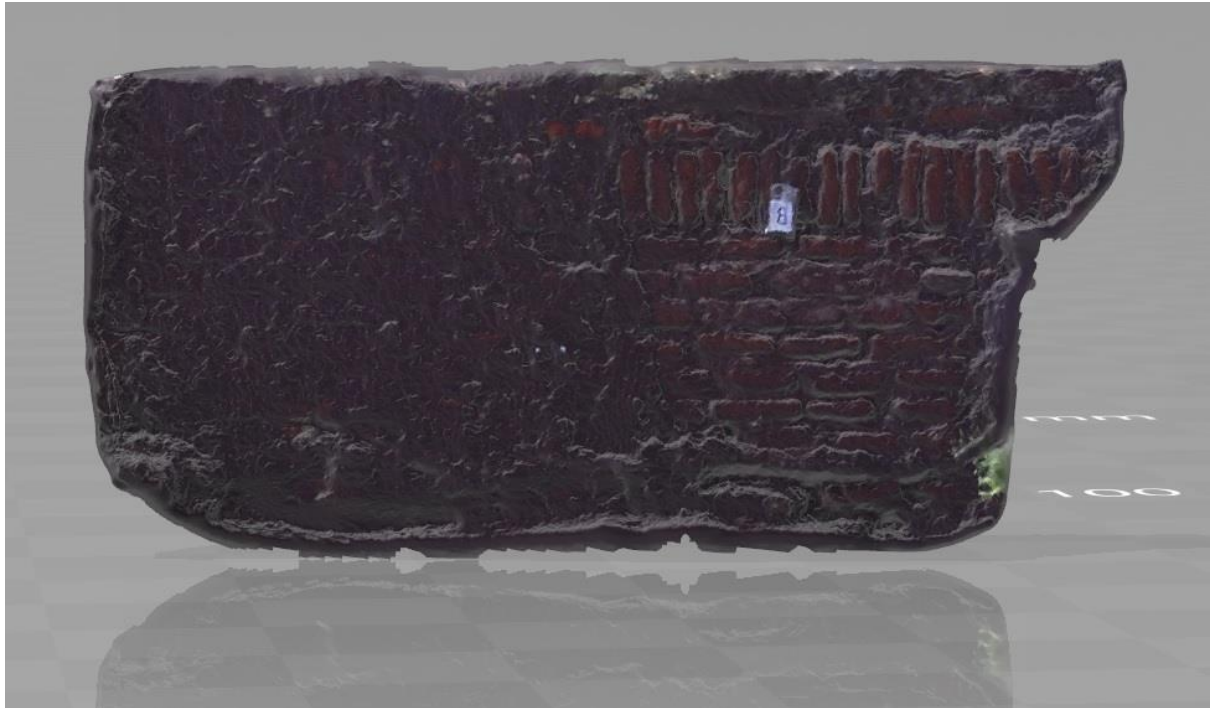


Figura 5.83: Modelo texturizado, usando puntos de parte del muro. (Fuente: Propia)

Podemos obtener resultados similares para el tramo de muro donde se encuentran los contrafuertes.



Figura 5.84: Modelo texturizado, usando puntos de parte del muro sobre los contrafuertes. (Fuente: Propia)

Otra forma existente de poder visualizar el modelo 3D generado por la nube de puntos es de forma “on line”, sin necesidad de poseer la licencia de ningún software. Accediendo a la página web o reservorio de archivos en internet llamado Sketchfab, que es un sitio web utilizado para visualizar y compartir contenido 3D online. La plataforma proporciona un visualizador de modelos 3D basado en tecnología WebGL que permite reproducir modelos 3D tanto en páginas móviles como de escritorio.

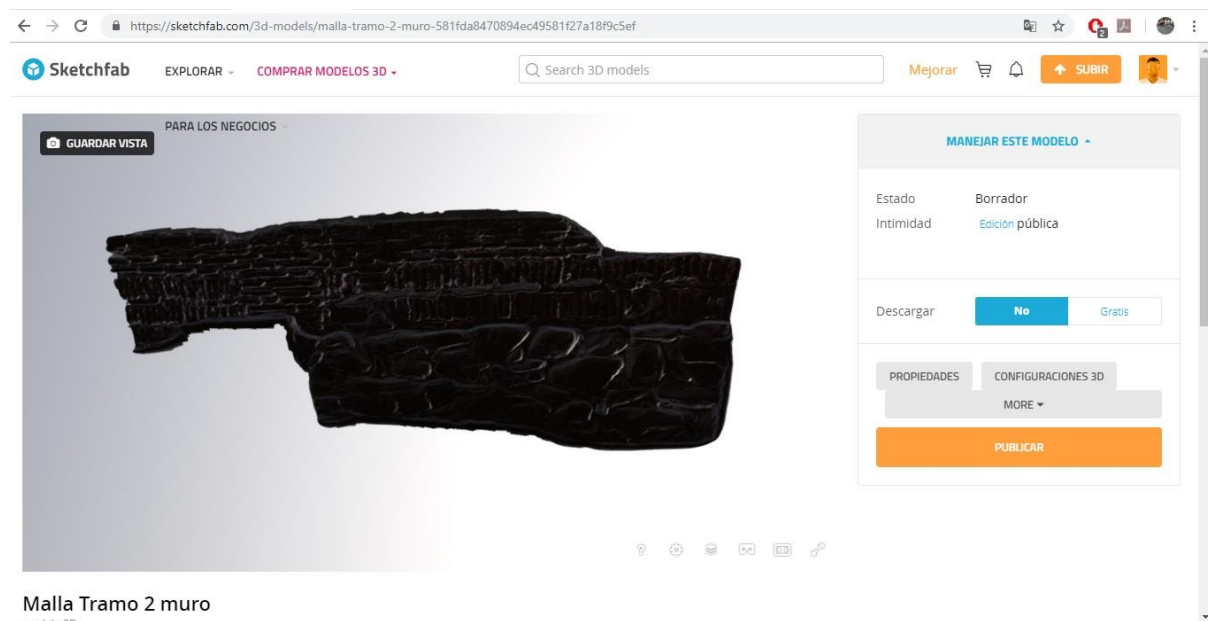


Figura 5.85: Modelo texturizado subido a la plataforma de *Sketchfab*. (Fuente: Propia)

De esta forma se hace más sencillo compartir, acceder, visualizar y analizar modelos 3D sin necesidad de tener ningún software específico instalado ni consumir recursos de la computadora.

El link para acceder al archivo del modelo 3D de la nube de puntos obtenida subido es:

<https://sketchfab.com/3d-models/malla-tramo-2-muro-581fda8470894ec49581f27a18f9c5ef>

6. CONSEDERACIONES FINALES

Para este proyecto solo se tuvieron en cuenta algunos de los posibles productos obtenibles a partir de una nube de puntos. Sin contar con que la propia nube de puntos en sí es un producto del trabajo realizado.

Se han generado superficies y modelos 3D de algunos tramos de los restos del muro que nos compete que permitieron por ejemplo comparar el estado del mismo antes y después de las excavaciones.

Se dibujó rápidamente sobre la nube para representar las construcciones del lugar y comparar con fotos aéreas y planos existentes. También como parte del proyecto, se utilizó la nube de puntos para comparar precisiones con las de una Estación Total.

Pero existen muchos otros resultados que se pueden obtener a partir de la misma nube de puntos; la tecnología láser escáner topográfica 3D puede ser utilizada para crear nubes de puntos con distintos y variados destinos.

Un resultado es generar archivos de formato *.dwg* o *.dxf* para trabajar con programas de dibujos CAD, (muy utilizados por los profesionales del área de la agrimensura, la arquitectura la ingeniería civil y estructural, entre otros) imprescindibles para la tarea diaria ya que permiten generar por ejemplo, planos y cortes de la construcción, cálculos de volúmenes, generación de superficies, etc.

Podemos decir aún más, los resultados obtenibles a partir de la nube de puntos son de gran insumo y muy útiles para aquellas edificaciones que requieran la constitución del modelo BIM (*Building Information Modeling*). Como ya se mencionó BIM, es un proceso inteligente basado en modelos 3D que brinda a las personas que trabajan en el ramo de la arquitectura, ingeniería y construcción, la visión y las herramientas para planificar, diseñar, construir y administrar edificios e infraestructura de manera más eficiente (<https://www.autodesk.com/solutions/bim>). Cuando algo se convierte en BIM empieza con un modelo digital 3D del edificio. Este modelo no es más que pura geometría y algunas texturas colocadas sobre el para su visualización (https://www.graphisoft.es/archicad/open_bim/about_bim/).

Es así que se desprende de la propia definición de BIM que la materia prima principal son las nubes de puntos generadas a partir de relevamientos con equipos láser escáner 3D de las diferentes edificaciones.

Otro tipo de producto obtenido a partir de la nube de puntos son archivos de intercambio en formato *.las* o *.laz*, archivos que contienen además de las coordenadas de los puntos, información de la reflectividad y color de los mismos. Estos archivos pueden ser abiertos y trabajados por varios programas de modelado 3D, mediante los cuales se puede generar modelos del objeto relevado con gran facilidad, precisión y exactitud. A partir de los mismos y en conjunto con softwares y equipamiento adecuado se pueden lograr impresiones 3D a escala del objeto.

A raíz de todos los puntos y conceptos tratados, se consideró relevante e interesante incluir en el Anexo C algunos párrafos de la publicación *“Point Clouds and Smart Cities”*, en el que se trata el tema de la generación de una “ciudad inteligente” a partir de las nubes de puntos y los relevamientos con equipos de escaneo 3D.

Reconociendo que la tecnología láser escáner 3D permite un sinnúmero de usos, se deja la puerta abierta a la posibilidad de que en futuros proyectos de grado se estudie e investigue más sobre la tecnología, usos y aplicaciones relacionadas incluso con otras áreas.

7. CONCLUSIONES

Uno de los objetivos de este trabajo era la obtención de una metodología técnica, clara y ordenada que pueda servir como referencia para futuros trabajos que apliquen la tecnología láser escáner. En este sentido, es importante aclarar que este documento muestra las pautas y directivas generales de trabajo para la aplicación de una metodología con TLS aplicada a la conservación y documentación de la arquitectura patrimonial y el patrimonio construido. En particular, sobre los restos de lo conocido como el “Caserío de los Negros”. Sin dudas la metodología descripta intenta ser una guía, y puede no aplicar a toda la diversidad de situaciones a la que podemos enfrentarnos; por ello las personas encargadas de la realización de cada plan de relevamiento deberán ser capaces de resolver situaciones particulares.

Otro de los objetivos implícitos, era lograr la identificación y documentación aplicando la metodología construida de los restos del muro perimetral del “Caserío de los Negros”. Para ello se estudiaron los pasos y las formas de otras metodologías de uso de la tecnología láser escáner, así como sus aplicaciones en Uruguay y en el mundo. Se comprobó la escasez de trabajos y artículos existentes en Uruguay sobre esta temática. No así en el resto del mundo, donde por ejemplo en España desde hace años se trabaja fuertemente con esta tecnología en conjunto con otras, para la conservación y reconstrucción del patrimonio construido.

Antes de comenzar con el trabajo de campo que interesa a este documento, se quiso validar de alguna manera los resultados que arrojan los equipos TLS. Por lo que se realizaron diferentes mediciones con este tipo de equipo y se compararon con los obtenidos con una estación total (equipo del que hoy por hoy se conoce su precisión y confiabilidad). Del procedimiento aplicado se pudo comprobar que las diferencias en los resultados de ambos equipos no son significativas, permitiendo conocer más sobre las precisiones y la confiabilidad de los equipos TLS; reconociendo la utilidad del equipo.

Como objetivo específico se planteó analizar los errores en el registro de los escaneos aplicando los distintos métodos presentes en el software SCENE. Del análisis realizado, se constató la obtención de mejores resultados en cuanto a errores, mediante la elección de agrupamientos de la forma que se denominó “n más 1” y mediante su registro progresivo.

Se cree que la explicación de la mejora en los errores obtenidos a través de la utilización de este procedimiento se debe a que, tener el control intermedio de los informes de registro permitía decidir si seguir agregando otro escaneo al agrupamiento o volver a realizar el registro en base a otras referencias.

Se apreció una tendencia creciente de los errores en los primeros registros, a través del procedimiento “n más 1”. Posteriormente a medida que la cantidad de escaneos en el agrupamiento va creciendo, el nivel de error se estabiliza, con variaciones pequeñas, inclusive notándose para los errores medios una leve disminución.

Los equipos que utilizan la tecnología láser escáner 3D capturan mucha información en poco tiempo, generando nubes de puntos que significan para la computadora la acumulación y manipulación de gran cantidad de datos. Se destaca entonces que si el manejo de los equipos TLS no se acompaña debidamente con equipos informáticos adecuados, puede significar que el trabajo realizado en campo no concluya en los resultados deseados.

Se remarca también la necesidad de fijar desde el comienzo del proyecto de escaneo, y principalmente en el momento de la planificación del relevamiento, cual o cuales van a ser los productos finales deseados. Ya que, si definimos erróneamente la resolución y/o la calidad de los escaneos, puede que luego de procesar los datos no lleguemos a las precisiones o al grado de detalle que queríamos. Siendo posible que tengamos que realizar todo el trabajo nuevamente.

Es de suma importancia detallar algunas ventajas y desventajas de trabajar con la tecnología láser escáner 3D que se desprenden de las vivencias del trabajo realizado:

Ventajas:

- ✓ Toma integrada de datos en el mismo proceso de relevamiento, en el que incluye datos planimétricos, altimétricos y de color.
- ✓ Gran velocidad en la captura de datos, sumando productividad y automatización en el mismo proceso. Capacidad de relevar hasta 1 millón de puntos por segundo, el mismo tiempo que con una estación total estándar se demora en relevar 1 punto.
- ✓ No necesidad de luz para trabajar. La mayoría de los equipos TLS son capaces de relevar en la oscuridad en forma automática.

- ✓ Como resultado final del proceso de trabajo se obtendrá un modelo 3D denso y detallado, con el cual se podrá generar áreas, volúmenes y superficies precisas y ajustadas a la realidad del objeto medido.

Desventajas:

- ✓ Alto costo. Los precios de los equipos láser escáner topográficos 3D a la fecha, pueden oscilar entre los 20 mil, y los 400 mil dólares americanos. En general el software de procesamiento de los datos está incluido en el precio del equipo, y en algunos casos incluye una PC adecuada.
- ✓ Capacidad de procesamiento y manejo de grandes volúmenes de datos limitado por: tipo de hardware, programas específicos, capacitación del personal y disponibilidad de capacidad de almacenamiento.
- ✓ Tiempos de procesamiento lentos. En general cada etapa de procesamiento lleva días, dependiendo de la cantidad de datos y de la capacidad del hardware.

Por último, en este proyecto se ha trabajado con una parte de las aplicaciones de la tecnología y equipos láser escáner 3D, ya que sus usos y aplicaciones son cada vez son mayores. Día a día surgen nuevos artículos y proyectos que no hacen más que potenciar y dar más valor a esta tecnología. Pero no hay que olvidar que detrás de los métodos que utilizan los equipos, se encuentra la topografía como base, y que a partir de ella surgen todas las metodologías y métodos utilizados. A su vez, y aunque la evolución de la tecnología permite que los equipos sean cada vez más rápidos, independientes, polifuncionales y precisos; siempre será necesario que los resultados sean controlados por profesionales, los equipos no generan resultados por si solos ni tampoco son infalibles.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Alonso Aransay, Diana - “Modelización 3D y visualización mediante Realidad Aumentada del Monasterio de Santa María de la Valldigna (Valencia)” –LABORATORIO DE DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRIMONIO - Grupo de Investigación en Patrimonio Construido -GPAC- (UPV-EHU)
- ❖ AZKARATE GARAI- OLAUN, AGUSTÍN – 2008- “La Arqueología de la Arquitectura en el siglo XXI” - Universidad del País Vasco.
- ❖ Azkarate Garai-Olaun, A.– 2010 - “Arqueología aplicada al estudio e interpretación de edificios históricos - Últimas tendencias metodológicas” - Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
- ❖ Azkarate, Agustín (Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea), Ruiz de Ael, Mariano J. (Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea), Santana, Alberto (Universidad Nacional de Educación a Distancia) - “EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO”
- ❖ Azkarate, Agustín, Cámara, Leandro, Lasagabaster, Juan Ignacio, Latorre, Pablo - “CATEDRAL DE SANTA MARIA VITORIA-GASTEIZ, Plan Director de Restauración.”
- ❖ Bracco Boksar, Roberto y López Mazz, José M., 2014 - “EL CASERÍO DE FILIPINAS DE MONTEVIDEO, THE “CASERÍO DE FILIPINAS” IN MONTEVIDEO”, Revista de Arqueología Histórica Argentina y Latinoamericana Número 8.
- ❖ Burón Fernández, Rubén - “MODELIZACIÓN 3D DE LA FACHADA PRINCIPAL DEL MONASTERIO DE SANTIAGO DE UCLÉS”.
- ❖ Carazo Almazán, Sergio y Pardo Sánchez, Enrique - “OBTENCIÓN DEL MODELO TRIDIMENSIONAL DE LA PUERTA DE LA LATINA DEL S. XVI D.C. MEDIANTE EQUIPO LÁSER ESCÁNER TERRESTRE” .
- ❖ Cardenal Escarcena, Javier, Mata de Castro, Emilio, Pérez García, José Luis, Mozas Calvache, Antonio, Fernández del Castillo, Tomás, Delgado García, Jorge, Ureña Cámara, Manuel, Castillo Armenteros, Juan Carlos - “TÉCNICAS FOTOGRAMÉTRICAS Y DE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE APLICADAS A LA DOCUMENTACIÓN Y VALORACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO”.

- ❖ Casas Aranda, Sofia Doralice - “MODELIZACION 3D LASER ESCANER DE UN YACIMIENTO CELTA EN ROCA FOSILIZADA DEL PERIODO TRIASICO”.
- ❖ Contreras Echebarria, Ainara - “OBTENCIÓN DEL MODELO 3D DE LA AZOTEA DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, MEDIANTE TECNOLOGÍA ESCÁNER 3D”.
- ❖ De Fuentes, Andrés Fernando - “Detección de límites arquitectónicos en edificios históricos combinando imágenes digitales con nubes de puntos.” –LABORATORIO DE DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRIMONIO - Grupo de Investigación en Patrimonio Construido -GPAC- (UPV-EHU)
- ❖ Duque Martínez, Javier y De Francisco Rodríguez, Sara - “ARQUEOLOGÍA TRIDIMENSIONAL. LAS TÉCNICAS 3D APLICADAS AL REGISTRO PALEOLÍTICO” .
- ❖ Farjas, Mercedes, Moreno, Ernesto y García Lázaro, Francisco J. - “La realidad virtual y el análisis científico: De la nube de puntos al documento analítico”
- ❖ GARCÍA MOLINA, DIEGO FRANCISCO y DE PAULA MONTES TUBÍO, FRANCISCO - “El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje”. Universidad de Córdoba.
- ❖ García-Gómez, Ismael (Enklabe Koop. S.T.), Fernández de Gorostiza López de Viñaspre, Miren (Enklabe Koop. S.T.), Mesanza Moraza, Amaia (Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea) - “Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios.”
- ❖ González, Pablo Rodríguez - “Automatización en el procesamiento de datos adquiridos mediante láser escáner 3D”.
- ❖ Gutiérrez Alonso, Sergio - 2011- “Estudio comparativo del láser escáner aplicado a patrimonio.” –LABORATORIO DE DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRIMONIO - Grupo de Investigación en Patrimonio Construido -GPAC- (UPV-EHU)
- ❖ Hernández Gonzales, Fco. Javier - “Análisis de la métrica en los sistemas de medida láser escáner 3D en medio y largo alcance”.
- ❖ “Iglesia de la Parroquia de Cristo Obrero y Nuestra Señora de Lourdes – Plan de Conservación y Manejo” - 2017 - Ministerio de Educación y Cultura, Comisión del Patrimonio Cultural de la Nación, Intendencia de Canelones.

- ❖ Lerma García, José Luis y Biosca Tarong, Josep Miquel, Traductores - Setiembre 2008 - "Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas".
- ❖ Lerma J. L. y García-San-Miguel, D "SELF-CALIBRATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNERS: SELECTION OF THE BEST GEOMETRIC ADDITIONAL PARAMETERS".
- ❖ Lerma J. L., García-San-Miguel y Navarro Tarín, S. - "Calibración geométrica de escáner laser terrestre mediante software específico".
- ❖ Lichti, D. D., Stewart, M. P., Tsakiri M. y Snow A. J., 2000 - "CALIBRATION AND TESTING OF A TERRESTRIAL LASER SCANNER".
- ❖ LICHTI, Derek D. y GORDON, Stuart J. – FIG Working week, 2004 - "Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording".
- ❖ "Manual del FARO Laser Scanner Focus 3D X 130" - FEBRERO DE 2014.
- ❖ MAÑANA-BORRAZÁS, PATRICIA, RODRÍGUEZ PAZ, ANXO, BLANCO-ROTEA, REBECA. - "Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)." - LaPa = Laboratorio de Patrimonio, CSIC. Santiago de Compostela
- ❖ Mogahed, Y.M., Selim, M. "Ability of Terrestrial Laser Scanner Trimble TX5 in Cracks Monitoring at Different Ambient Conditions".
- ❖ Mostaza Pérez, Teresa, Zancajo Jimeno, J. Julio, López Quiroga, Jorge, Martínez Tejera, Artemio - "APLICACIÓN DEL ESCÁNER LÁSER 3D A LA DOCUMENTACIÓN ESPACIAL DE YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS"
- ❖ Mtnez-Espejo, Isabel - Zaragoza - "PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO".
- ❖ Ojeda-Pardo, Fabián R., Belete-Fuentes, Orlando, Batista-Legrá, Yordanis E. - "Elaboración del modelo digital de elevaciones mediante tecnología 3D láser escáner"
- ❖ Quimbay López, Carlos Andrés y Leiva Fonseca, Edgar Fernando - "GENERACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE TERRENO GEORREFERENCIADO CON EL ESCÁNER LASER FARO FOCUS 3D EN EL LOTE B DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO

JOSÉ DE CALDAS FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES”

- ❖ Ramos L., Marchamalo M., Rejas J. G, Martínez, R. - “Aplicación del Láser Escáner Terrestre (TLS) a la modelización de estructuras: precisión, exactitud y diseño de la adquisición de datos en casos reales”.
- ❖ Rodríguez Juárez, Alicia - “Estudio de captura de datos con escáner laser terrestre (TLS) para aplicación en el Modelado de Información para la Edificación (BIM)”.
- ❖ Romeral Pérez, Fabio - “FLUJO DE TRABAJO EN PROYECTOS DE MODELIZACIÓN 3D CON EQUIPOS LÁSER ESCÁNER”.
- ❖ “SCENE 2018 MANUAL DEL USUARIO” - JUNIO DE 2018 - <https://www.faro.com/es-es/>
- ❖ Sabalsagaray, Stela, Romay, Carola, Mussio, Gianella y Aulet, Alina - 2017- “La Iglesia de Cristo obrero de Eladio Dieste. Caracterización y evaluación de los morteros y cerámicos empleados” - Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República, Uruguay
- ❖ Sánchez Mora, Anderson Fabián, Osorio Sánchez, Ana María - “COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS TOPOGRÁFICOS APLICADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES, UTILIZANDO EL MÉTODO CONVENCIONAL Y LA TECNOLOGÍA ESCÁNER LASER 3D (ELT)”.
- ❖ Santana M, Van Genechten B, De Bruyne M, Poelman R, Hankar M, Barnes S, Biosca J, 2008 - “3D Risk Mapping – Herramientas de aprendizaje para el levantamiento tridimensional avanzado en la conciencia de riesgos”.
- ❖ TORNINI LENZI, Ing. Agrimensor OSCAR RAFAEL, GAVIRONDO CARDOZO, Ing. Agrimensor MIGUEL ALEJANDRO, 2011 - “APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ESCANEEO TOPOGRÁFICO LASER 3D ARQUITECTURA PATRIMONIAL. EL CASO DE LAS RUINAS JESUÍTICAS “CALERA DE LAS HUÉRFANAS – URUGUAY”.
- ❖ “User Guide Trimble TX5 3D Laser Scanner”.
- ❖ Velasteguí Cáseres, Julia Désirée y Guerrero Narváez, Francisco Manuel – Setiembre 2013 - “USO Y PROCESAMIENTO DEL SISTEMA ESCANER LASER PARA EL MODELAMIENTO 3D DE DATOS GEOESPACIALES EN LAS AREAS DE LA CONSTRUCCION, PATRIMONIO CULTURAL Y ESPEOLOGIA”.

ANEXO A

En este anexo se mostrarán los resultados intermedios y algoritmos de la transformación de coordenadas. Primero para el caso de la prueba interior, y luego para el caso de la prueba exterior.

PRUEBA INTERIOR

COORDENADAS ESTACION

T3	95.136	200.930	11.859
T5	72.744	199.508	10.307
T6	72.774	198.759	12.258
D2	98.298	200.156	12.261
D6	68.998	198.866	10.325
M4	73.853	199.953	11.234
M3	81.224	198.913	10.240

COORDENADAS ESCANER

T3	-4.733	1.477	137.264
T5	-27.139	2.610	135.709
T6	-27.196	1.863	137.691
D2	-1.677	0.345	137.658
D6	-30.935	2.408	135.737
M4	-25.952	2.919	136.599
M3	-18.807	1.060	135.619

PARAMETROS INICIALES

Delta X	99.93	m
Delta Y	196.46	m
Delta Z	-125.41	m
Tita 3	0.11439	rad

matriz B

-1	0	0	0.92695
0	-1	0	4.87033
0	0	-1	0
-1	0	0	-0.505
0	-1	0	-27.26
0	0	-1	0
-1	0	0	-1.253
0	-1	0	-27.231
0	0	-1	0
-1	0	0	0.15101
0	-1	0	1.70558
0	0	-1	0
-1	0	0	-1.139
0	-1	0	31.0077
0	0	-1	0
-1	0	0	-0.062
0	-1	0	26.116
0	0	-1	0
-1	0	0	-1.0933
0	-1	0	18.8054
0	0	-1	0

matriz f

-0.0763
-3.543
-0.0052
-0.0737
-3.553
-0.0079
-0.0745
-3.552
0.0232
-0.0736
-3.545
-0.0126
-0.0757
-3.545
0.0015
-0.039
-3.555
-0.045
-0.0994
-3.5463
-0.0315

ALGORITMO

$N = Bt * B$
$t = Bt * f$
$D = \text{inv } N * t$

RESULTADOS:

PRIMERA ITERACIÓN:

-16.715
15.4556
-18.02
-0.0002

SEGUNDA ITERACIÓN:

0.00151
0.00068
-4E-15
-0.0001

TERCERA ITERACIÓN:

0.00082
0.00037
-5E-16
-7E-05

CUARTA ITERACIÓN:

0.00045
0.0002
-5E-16
-4E-05

PARÁMETROS:

Delta X	99.93
Delta Y	196.46
Delta Z	-125.41
Tita 3	0.11439

100.003
200.009
-125.4
0.11447

100.003
200.01
-125.4
0.11454

99.9236
197.771
-125.4
0.11444

PARAMETROS FINALES:

Delta X	99.9236	m
Delta Y	197.771	m
Delta Z	-125.4	m
Tita 3	0.11444	rad

PRUEBA EXTERIOR

COORDENADAS ESTACION

T7	97.204	493.178	11.262
T8	91.436	491.481	12.481
T9	110.584	481.851	11.565
T10	113.952	483.200	11.729
D7	93.363	492.047	11.374
D8	107.014	481.157	11.726
D9	108.969	494.494	11.370

COORDENADAS ESCANER

T7	4.578	5.674	20.278
T8	10.499	4.658	21.497
T9	-2.450	21.733	20.571
T10	-6.083	22.007	20.735
D7	8.519	4.997	20.390
D8	1.067	20.785	20.735
D9	-6.557	9.669	20.371

PARAMETROS INICIALES

Delta X	115.53	m
Delta Y	484.83	m
Delta Z	9.01	m
Tita 3	3.59775	rad

matriz B

-1	0	0	-7.1107
0	-1	0	1.61031
0	0	-1	0
-1	0	0	-8.8066
0	-1	0	-7.374
0	0	-1	0
-1	0	0	-18.432
0	-1	0	11.7729
0	0	-1	0
-1	0	0	-17.077
0	-1	0	-15.155
0	0	-1	0
-1	0	0	-8.2388
0	-1	0	5.4472
0	0	-1	0
-1	0	0	-19.13
0	-1	0	-8.1974
0	0	-1	0
-1	0	0	-5.7921
0	-1	0	-10.145
0	0	-1	0

matriz f

16.7157
-15.459
18.026
16.72
-15.458
18.0262
16.7189
-15.453
18.0157
16.7327
-15.447
18.0164
16.7198
-15.456
18.0264
16.7134
-15.457
18.0189
16.7064
-15.456
18.0109

ALGORITMO

$N = Bt * B$
$t = Bt * f$
$D = \text{inv } N * t$

RESULTADOS:

PRIMERA ITERACIÓN:

-16.715
15.4556
-18.02
-0.0002

SEGUNDA ITERACIÓN:

0.00151
0.00068
-4E-15
-0.0001

TERCERA ITERACIÓN:

0.00082
0.00037
-5E-16
-7E-05

CUARTA ITERACIÓN:

0.00045
0.0002
-5E-16
-4E-05

PARÁMETROS:

Delta X	98.8147
Delta Y	500.286
Delta Z	-9.0101
Tita 3	3.59752

98.8162
500.286
-9.0101
3.59739

98.817
500.287
-9.0101
3.59732

98.8174
500.287
-9.0101
3.59729

PARAMETROS FINALES:

Delta X	98.8174	m
Delta Y	500.287	m
Delta Z	-9.0101	m
Tita 3	3.59729	rad

ANEXO B

En este anexo se mostrarán 4 informes de registro sacados directamente del software SCENE.

Primero se mostrarán los resultados para el caso del registro de los escaneos en un solo agrupamiento en forma manual y automática, “objetivo a objetivo”. Luego el resultado de registrar mediante el método “nube a nube”.

Por otro lado, se adjuntarán dos informes más correspondientes a agrupar los escaneos en forma “N más 1”; primero para el registro en forma manual y automática, aplicando el método “objetivo a objetivo”; el restante resultado de aplicar el método “nube a nube”.

Caso 1. Un solo agrupamiento, registro manual y automático mediante objetivos:

Codificación de colores

Error de distancia	< 20 mm	> 40 mm
Error horizontal	< 20 mm	> 40 mm
Error vertical	< 20 mm	> 40 mm
Error angular	< 0.5 deg	> 1.0 deg

Descripción general

Estadísticas del objetivo

Iteraciones Error de distancia	69.5 mm
Error de distancia medio	12.6 mm
Iteraciones Error horizontal	69.2 mm
Error horizontal medio	10.1 mm
Iteraciones Error vertical	59.5 mm
Error vertical medio	4.2 mm
Iteraciones Error angular	3.56 deg
Error angular medio	0.42 deg

Errores de escaneo

Estadísticas del objetivo

Agrupamiento/escaneo	Conexiones	Iteraciones Dist. [mm]	Dist. media [mm]	Iteraciones Horizontal [mm]	Horizontal medio [mm]	Iteraciones Vertical [mm]	Vertical medio [mm]	Iteraciones Ángulo [deg]	Ángulo medio [deg]
Cap_Scan_000	3	22.2	14.3	22.2	13.5	6.9	2.9	1.67	1.16
Cap_Scan_006	2	28.4	22.0	26.5	13.9	27.3	13.2	-	-
Cap_Scan_001	10	24.2	9.3	23.2	7.8	22.5	3.3	1.27	0.43
Cap_Scan_002	3	22.2	12.5	22.2	11.8	7.1	2.5	1.24	1.08
Cap_Scan_003	4	28.6	15.5	28.6	12.1	22.5	6.8	0.71	0.57
Cap_Scan_004	8	14.5	7.0	14.0	6.1	7.6	2.0	0.71	0.34
Cap_Scan_005	3	28.6	18.5	28.6	16.2	16.2	5.8	-	-
Cap_Scan_007	11	40.0	13.5	39.8	10.4	27.3	5.6	1.67	0.50
Cap_Scan_008	2	27.5	12.7	11.0	5.8	25.2	10.5	0.05	0.05
Cap_Scan_009	8	38.8	10.8	38.7	10.3	12.6	2.0	0.82	0.33
Cap_Scan_010	2	20.6	7.7	18.0	6.7	9.9	2.6	0.78	0.22
Nuevo_proyecto_Scan_001	5	61.8	16.7	38.7	11.4	59.5	7.5	3.56	0.68
Nuevo_proyecto_Scan_002	7	35.4	7.7	35.2	7.7	4.0	0.6	0.87	0.33
Nuevo_proyecto_Scan_003	6	69.5	17.1	69.2	17.0	6.3	1.3	1.04	0.45
Nuevo_proyecto_Scan_004	7	69.5	13.6	69.2	13.5	6.3	0.9	1.27	0.53
Nuevo_proyecto_Scan_005	3	19.9	10.5	18.5	9.1	18.7	2.7	1.06	0.40
Nuevo_proyecto_Scan_006	2	19.9	10.7	9.9	6.2	18.7	7.6	1.06	0.90
Nuevo_proyecto_Scan_008	3	24.1	10.4	24.0	10.0	6.5	1.2	0.83	0.28
Nuevo_proyecto_Scan_009	2	24.1	8.9	24.0	8.9	2.4	0.4	0.83	0.36
Nuevo_proyecto_Scan_010	2	14.3	5.0	13.7	4.8	4.0	1.0	0.33	0.17
Nuevo_proyecto_Scan_014	3	61.8	19.0	44.1	11.2	59.5	10.6	3.56	0.69
Nuevo_proyecto_Scan_013	1	44.1	15.6	44.1	15.6	1.4	0.8	0.52	0.36
Nuevo_proyecto_Scan_012	1	14.3	7.9	13.7	7.6	4.0	1.6	0.28	0.17
Scuela.1001	3	61.3	19.9	17.9	9.3	59.1	14.1	0.36	0.26
Scuela.1000	2	60.2	16.2	10.3	5.2	59.4	13.2	1.32	0.50
Scuela.1002	3	61.3	16.2	53.4	9.9	59.4	7.9	1.32	0.29
Scuela.1003	2	53.4	15.3	53.4	15.3	0.1	0.1	0.36	0.21

Errores detallados

Estadísticas del objetivo

Agrupamiento/escaneo 1	Destino 1	Agrupamiento/escaneo 2	Destino 2	Dist. [mm]	Horizontal [mm]	Vertical [mm]	Ángulo [deg]
Cap_Scan_000	PlaneEx1	Cap_Scan_007	PlaneEx1	12.2	12.2	0.0	1.67
Cap_Scan_000	Sphere19	Cap_Scan_001	Sphere19	19.8	18.6	6.9	-
Cap_Scan_000	PlaneEx1	Cap_Scan_001	PlaneEx1	8.0	8.0	0.0	0.55
Cap_Scan_006	Point3d49	Cap_Scan_007	Point3d49	15.4	8.3	13.0	-
Cap_Scan_006	Sphere1	Cap_Scan_007	Sphere1	26.5	26.5	0.4	-
Cap_Scan_006	Point3d1	Cap_Scan_007	Point3d1	28.4	20.7	19.5	-
Cap_Scan_006	Point3d1	Cap_Scan_008	Point3d1	12.4	11.0	5.7	-
Cap_Scan_001	Sphere12	Cap_Scan_003	Sphere12	23.8	7.7	22.5	-
Cap_Scan_001	Point3d52	Cap_Scan_003	Point3d52	11.1	9.1	6.3	-
Cap_Scan_001	Point1	Cap_Scan_003	Point1	19.4	15.5	11.7	-
Cap_Scan_001	PlaneEx1	Cap_Scan_007	PlaneEx1	2.8	2.8	0.0	1.20
Cap_Scan_001	Plane2	Cap_Scan_007	Plane2	0.8	0.8	0.0	0.19
Cap_Scan_001	Point1	Cap_Scan_007	Point1	14.8	13.6	5.8	-
Cap_Scan_001	PlaneEx3	Cap_Scan_007	PlaneEx3	1.4	1.4	0.0	0.24
Cap_Scan_001	Sphere13	Cap_Scan_004	Sphere13	12.6	10.8	6.4	-
Cap_Scan_001	Plane2	Cap_Scan_004	Plane2	2.1	2.1	0.0	0.04
Cap_Scan_001	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_004	Plane2	10.5	10.5	0.1	0.36
Cap_Scan_001	Sphere8	Cap_Scan_002	Sphere8	11.0	8.4	7.1	-
Cap_Scan_001	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_002	Plane2	5.8	5.8	0.0	0.23
Cap_Scan_001	PlaneEx3	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx3	2.9	2.9	0.0	0.54
Cap_Scan_001	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_003	Plane2	10.5	10.5	0.1	0.29
Cap_Scan_001	PlaneEx3	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx3	5.6	5.6	0.1	0.20
Cap_Scan_001	PlaneEx3	Cap_Scan_009	PlaneEx3	0.9	0.9	0.0	0.25
Cap_Scan_001	PlaneEx2	Cap_Scan_009	PlaneEx2	0.6	0.6	0.0	0.17
Cap_Scan_001	Sphere21	Cap_Scan_000	Sphere21	5.9	3.7	4.7	-
Cap_Scan_002	PlaneEx1	Cap_Scan_007	PlaneEx1	10.0	10.0	0.1	1.24
Cap_Scan_002	Sphere19	Cap_Scan_001	Sphere19	5.8	4.3	4.0	-
Cap_Scan_002	PlaneEx1	Cap_Scan_001	PlaneEx1	9.3	9.3	0.0	0.75
Cap_Scan_002	Sphere21	Cap_Scan_001	Sphere21	10.0	10.0	0.7	-
Cap_Scan_002	Sphere19	Cap_Scan_000	Sphere19	20.2	20.0	3.0	-
Cap_Scan_002	PlaneEx1	Cap_Scan_000	PlaneEx1	22.2	22.2	0.1	1.24
Cap_Scan_002	Sphere21	Cap_Scan_000	Sphere21	11.3	9.9	5.4	-
Cap_Scan_003	Sphere13	Cap_Scan_004	Sphere13	14.2	11.9	7.6	-
Cap_Scan_003	PlaneEx63	Cap_Scan_004	PlaneEx63	6.6	0.7	6.6	0.43
Cap_Scan_003	Sphere13	Cap_Scan_001	Sphere13	22.0	22.0	1.2	-
Cap_Scan_003	Point1	Cap_Scan_007	Point1	8.9	6.8	5.9	-
Cap_Scan_004	PlaneEx65	Cap_Scan_003	PlaneEx65	2.7	1.0	2.5	0.71
Cap_Scan_004	PlaneEx72	Cap_Scan_001	PlaneEx72	4.4	4.4	0.0	0.42
Cap_Scan_004	PlaneEx67	Cap_Scan_001	PlaneEx67	1.8	1.8	0.0	0.15
Cap_Scan_004	PlaneEx2	Cap_Scan_001	PlaneEx2	5.9	5.9	0.1	0.49
Cap_Scan_004	PlaneEx2	Cap_Scan_009	PlaneEx2	4.5	4.5	0.0	0.47
Cap_Scan_004	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_002	Plane2	3.8	3.8	0.0	0.22
Cap_Scan_005	Sphere13	Cap_Scan_003	Sphere13	25.7	25.4	3.6	-
Cap_Scan_005	Sphere12	Cap_Scan_003	Sphere12	7.8	4.5	6.4	-
Cap_Scan_005	Point3d52	Cap_Scan_003	Point3d52	28.6	28.6	0.7	-
Cap_Scan_005	Sphere13	Cap_Scan_004	Sphere13	14.5	14.0	4.0	-
Cap_Scan_005	Sphere12	Cap_Scan_001	Sphere12	17.5	6.8	16.2	-
Cap_Scan_005	Sphere13	Cap_Scan_001	Sphere13	11.5	11.2	2.4	-
Cap_Scan_005	Point3d52	Cap_Scan_001	Point3d52	24.2	23.2	7.0	-
Cap_Scan_007	Point4	Cap_Scan_006	Point4	27.4	3.0	27.3	-
Cap_Scan_007	Plane10	Cap_Scan_009	Plane10	7.9	7.9	0.1	0.68
Cap_Scan_007	Sphere16	Cap_Scan_009	Sphere16	35.1	33.9	9.0	-
Cap_Scan_007	Point3d1	Cap_Scan_008	Point3d1	27.5	11.0	25.2	-
Cap_Scan_007	PlaneEx4	Cap_Scan_008	PlaneEx4	9.4	1.4	9.2	0.05
Cap_Scan_007	Sphere2	Cap_Scan_008	Sphere2	5.1	4.0	3.1	-

Cap_Scan_007	Point3d2	Cap_Scan_008	Point3d2	9.3	1.4	9.2	-
Cap_Scan_007	Plane2	Cap_Scan_004	Plane2	2.8	2.8	0.0	0.16
Cap_Scan_007	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_002	Plane2	5.3	5.3	0.0	0.12
Cap_Scan_007	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_004	Plane2	11.4	11.4	0.1	0.30
Cap_Scan_009	Sphere	Cap_Scan_007	Sphere	27.1	24.0	12.6	-
Cap_Scan_009	PlaneEx3	Cap_Scan_007	PlaneEx3	0.8	0.8	0.0	0.33
Cap_Scan_009	Point3d3	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d3	38.8	38.7	1.5	-
Cap_Scan_009	Point3d3	Nuevo_proyecto_Scan_002	Point3d3	26.4	26.2	3.3	-
Cap_Scan_009	Sphere17	Cap_Scan_010	Sphere17	4.4	4.3	1.0	-
Cap_Scan_009	Point3d8	Cap_Scan_010	Point3d8	20.6	18.0	9.9	-
Cap_Scan_009	Sphere18	Cap_Scan_010	Sphere18	3.9	3.9	0.1	-
Cap_Scan_009	PlaneEx3	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx3	6.5	6.5	0.1	0.31
Cap_Scan_010	PlaneEx56	Cap_Scan_009	PlaneEx56	3.2	0.8	3.1	0.01
Cap_Scan_010	PlaneEx55	Cap_Scan_009	PlaneEx55	3.0	0.7	3.0	0.04
Cap_Scan_010	PlaneEx10	Cap_Scan_009	PlaneEx10	4.6	4.6	0.1	0.05
Cap_Scan_010	PlaneEx10	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx10	5.9	5.9	0.1	0.78
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx14	Cap_Scan_009	PlaneEx14	7.3	7.3	0.7	0.26
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx40	Cap_Scan_009	PlaneEx40	7.2	7.2	0.7	0.28
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx10	Cap_Scan_009	PlaneEx10	18.0	18.0	0.2	0.82
Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d8	Cap_Scan_009	Point3d8	34.0	33.3	6.7	-
Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d8	Cap_Scan_010	Point3d8	15.6	15.3	3.2	-
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx40	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx40	2.6	2.6	0.2	0.08
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx13	Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx13	5.9	5.9	0.2	0.24
Nuevo_proyecto_Scan_001	Plane6	Scuela.1000	Plane6	2.2	2.2	0.1	1.19
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx3	Cap_Scan_007	PlaneEx3	3.9	3.9	0.0	0.31
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx14	Cap_Scan_009	PlaneEx14	5.6	5.6	0.5	0.18
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx3	Cap_Scan_009	PlaneEx3	3.2	3.2	0.0	0.63
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx40	Cap_Scan_009	PlaneEx40	4.7	4.7	0.4	0.24
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx21	Cap_Scan_009	PlaneEx21	2.8	2.8	0.0	0.14
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx14	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx14	1.3	1.3	0.1	0.26
Nuevo_proyecto_Scan_002	Point3d3	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d3	13.9	13.8	1.8	-
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx3	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx3	3.5	3.5	0.0	0.35
Nuevo_proyecto_Scan_002	Sphere10	Nuevo_proyecto_Scan_003	Sphere10	35.4	35.2	4.0	-
Nuevo_proyecto_Scan_003	Sphere4	Cap_Scan_007	Sphere4	40.0	39.8	3.7	-
Nuevo_proyecto_Scan_003	Plane2	Cap_Scan_007	Plane2	9.2	9.2	0.1	0.42
Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx3	Cap_Scan_007	PlaneEx3	7.3	7.3	0.1	0.05
Nuevo_proyecto_Scan_003	Plane2	Cap_Scan_004	Plane2	12.8	12.8	0.1	0.30
Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx21	Cap_Scan_009	PlaneEx21	7.7	7.7	0.1	0.74
Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx21	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx21	5.0	5.0	0.0	0.87
Nuevo_proyecto_Scan_003	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_002	Plane2	18.7	18.7	0.1	0.51
Nuevo_proyecto_Scan_003	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_004	Plane2	24.1	24.1	0.2	0.33
Nuevo_proyecto_Scan_003	Point3d14	Nuevo_proyecto_Scan_004	Point3d14	13.1	11.8	5.7	-
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx47	Cap_Scan_001	PlaneEx47	3.9	3.9	0.0	1.27
Nuevo_proyecto_Scan_004	Plane2	Cap_Scan_004	Plane2	8.6	8.6	0.1	0.33
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx21	Cap_Scan_009	PlaneEx21	2.8	2.8	0.0	0.32
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx21	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx21	0.3	0.3	0.0	0.19
Nuevo_proyecto_Scan_004	Plane2	Nuevo_proyecto_Scan_002	Plane2	2.1	2.1	0.0	0.43
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx21	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx21	4.3	4.3	0.0	1.04
Nuevo_proyecto_Scan_004	Point3d12	Nuevo_proyecto_Scan_003	Point3d12	69.5	69.2	6.3	-
Nuevo_proyecto_Scan_004	Point3d15	Nuevo_proyecto_Scan_005	Point3d15	16.4	16.4	0.5	-
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx6	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx6	14.6	14.6	0.1	0.53
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx12	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx12	18.5	18.5	0.3	0.94
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx19	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx19	3.9	3.9	0.3	0.34
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx9	Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx9	10.1	10.1	0.0	0.11
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx20	4.9	4.9	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx8	Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx8	5.0	5.0	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_005	Point3d16	Nuevo_proyecto_Scan_008	Point3d16	13.4	11.7	6.5	-
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx24	Nuevo_proyecto_Scan_006	PlaneEx24	3.4	3.4	0.0	1.06
Nuevo_proyecto_Scan_005	Sphere9	Nuevo_proyecto_Scan_006	Sphere9	19.9	6.9	18.7	-
Nuevo_proyecto_Scan_006	Point3d16	Nuevo_proyecto_Scan_008	Point3d16	8.2	5.2	6.4	-
Nuevo_proyecto_Scan_006	Point3d16	Nuevo_proyecto_Scan_005	Point3d16	16.2	9.9	12.9	-
Nuevo_proyecto_Scan_006	PlaneEx23	Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx23	5.8	5.8	0.3	0.74
Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane13	Nuevo_proyecto_Scan_005	Plane13	11.5	11.5	0.3	0.34

Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane15	Nuevo_proyecto_Scan_005	Plane15	8.9	8.9	0.2	0.11
Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx22	Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx22	5.0	5.0	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_008	Point3d22	Nuevo_proyecto_Scan_009	Point3d22	24.1	24.0	2.4	-
Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane17	Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane17	13.5	13.5	0.1	0.44
Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane18	Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane18	17.6	17.6	0.2	0.16
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx30	Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx30	14.5	14.4	1.2	0.83
Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane14	Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane14	4.7	4.7	0.0	0.77
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx28	Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx28	8.7	8.7	0.1	0.13
Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane16	Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane16	5.3	5.3	0.0	0.21
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx26	Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx26	0.5	0.5	0.0	0.33
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx50	Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx50	0.1	0.1	0.0	0.03
Nuevo_proyecto_Scan_010	Point3d18	Nuevo_proyecto_Scan_009	Point3d18	0.0	0.0	0.0	-
Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx33	Nuevo_proyecto_Scan_012	PlaneEx33	6.2	6.2	0.0	0.28
Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx32	Nuevo_proyecto_Scan_012	PlaneEx32	2.3	2.3	0.0	0.14
Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx48	Nuevo_proyecto_Scan_012	PlaneEx48	3.6	3.6	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_010	Point3d19	Nuevo_proyecto_Scan_012	Point3d19	12.9	12.3	4.0	-
Nuevo_proyecto_Scan_010	Point3d28	Nuevo_proyecto_Scan_012	Point3d28	14.3	13.7	4.0	-
Nuevo_proyecto_Scan_014	Point3d5	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d5	61.8	16.7	59.5	-
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx16	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx16	3.7	3.7	0.2	0.23
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx11	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx11	12.6	12.6	0.1	3.56
Nuevo_proyecto_Scan_014	Plane11	Nuevo_proyecto_Scan_013	Plane11	10.9	10.8	0.9	0.52
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx37	Nuevo_proyecto_Scan_013	PlaneEx37	44.1	44.1	0.8	0.48
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx42	Nuevo_proyecto_Scan_013	PlaneEx42	0.8	0.8	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx35	Scuela.1001	PlaneEx35	5.8	5.8	0.0	0.20
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx36	Scuela.1001	PlaneEx36	5.4	0.1	5.4	0.23
Nuevo_proyecto_Scan_013	Point3d26	Nuevo_proyecto_Scan_014	Point3d26	6.8	6.6	1.4	-
Scuela.1001	Point3d31	Nuevo_proyecto_Scan_014	Point3d31	50.7	15.5	48.2	-
Scuela.1000	PlaneEx18	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx18	8.1	8.1	0.0	0.27
Scuela.1000	PlaneEx7	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx7	2.2	2.2	0.0	0.21
Scuela.1000	Point3d7	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d7	59.8	10.3	58.9	-
Scuela.1002	PlaneEx54	Scuela.1000	PlaneEx54	6.5	6.5	0.2	1.32
Scuela.1002	Point3d63	Scuela.1000	Point3d63	60.2	9.8	59.4	-
Scuela.1002	PlaneEx51	Scuela.1000	PlaneEx51	1.9	1.9	0.0	0.04
Scuela.1002	PlaneEx53	Scuela.1000	PlaneEx53	2.4	2.4	0.0	0.11
Scuela.1002	PlaneEx52	Scuela.1000	PlaneEx52	3.0	3.0	0.0	0.35
Scuela.1002	PlaneEx	Scuela.1001	PlaneEx	0.1	0.1	0.0	0.28
Scuela.1002	Plane5	Scuela.1001	Plane5	13.6	13.6	0.1	0.16
Scuela.1002	Point3d	Scuela.1001	Point3d	61.3	16.3	59.1	-
Scuela.1002	Plane3	Scuela.1001	Plane3	4.8	4.8	0.0	0.34
Scuela.1002	PlaneEx	Scuela.1003	PlaneEx	18.8	18.8	0.1	0.10
Scuela.1003	PlaneEx	Scuela.1001	PlaneEx	17.9	17.9	0.1	0.36
Scuela.1003	PlaneEx59	Scuela.1002	PlaneEx59	3.1	3.1	0.0	0.26
Scuela.1003	PlaneEx57	Scuela.1002	PlaneEx57	2.6	2.6	0.0	0.14
Scuela.1003	Point3d45	Scuela.1002	Point3d45	53.4	53.4	0.1	-
Scuela.1003	PlaneEx62	Scuela.1002	PlaneEx62	3.4	3.4	0.1	0.26
Scuela.1003	PlaneEx61	Scuela.1002	PlaneEx61	8.2	8.2	0.0	0.15

Errores de coincidencia del inclinómetro

Agrupamiento/escaneo	Escaneo	Error de coincidencia [deg]
Nuevo_proyecto_Scan_001	Nuevo_proyecto_Scan_001	0.0015
Nuevo_proyecto_Scan_012	Nuevo_proyecto_Scan_012	0.0000
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_006	0.0000
Scuela.1003	Scuela.1003	0.0001
Cap_Scan_009	Cap_Scan_009	0.0001
Cap_Scan_007	Cap_Scan_007	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_010	Nuevo_proyecto_Scan_010	0.0000
Nuevo_proyecto_Scan_014	Nuevo_proyecto_Scan_014	0.0012
Scuela.1002	Scuela.1002	0.0004
Nuevo_proyecto_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_004	0.0000
Cap_Scan_005	Cap_Scan_005	0.0000
Cap_Scan_006	Cap_Scan_006	0.0001
Cap_Scan_000	Cap_Scan_000	0.0000
Cap_Scan_010	Cap_Scan_010	0.0001
Scuela.1001	Scuela.1001	0.0016
Cap_Scan_001	Cap_Scan_001	0.0002
Nuevo_proyecto_Scan_002	Nuevo_proyecto_Scan_002	0.0001
Cap_Scan_003	Cap_Scan_003	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_008	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_013	Nuevo_proyecto_Scan_013	0.0000
Cap_Scan_004	Cap_Scan_004	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_009	Nuevo_proyecto_Scan_009	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_005	Nuevo_proyecto_Scan_005	0.0000
Scuela.1000	Scuela.1000	0.0012
Cap_Scan_002	Cap_Scan_002	0.0000
Cap_Scan_008	Cap_Scan_008	0.0000
Nuevo_proyecto_Scan_003	Nuevo_proyecto_Scan_003	0.0000

Caso 2. Un solo agrupamiento, registro manual y automático “nube a nube”:

Codificación de colores

Error de punto	< 8 mm	> 20 mm
Superposición	> 25.0 %	< 10.0 %

Descripción general

Estadísticas del punto de escaneo

Error de punto máximo	37.4 mm
Error de punto medio	10.7 mm
Superposición mínima	2.7 %

Errores de escaneo

Estadísticas del punto de escaneo

Agrupamiento/escaneo	Conexiones	Iteraciones Error de punto [mm]	Error de punto medio [mm]	Distancia Superposición
Cap_Scan_000	4	11.1	6.5	24.1 %
Cap_Scan_006	4	10.4	8.7	18.1 %
Cap_Scan_001	6	13.3	6.6	22.1 %
Cap_Scan_002	2	5.1	4.6	24.1 %
Cap_Scan_003	6	13.8	6.9	11.1 %
Cap_Scan_004	4	14.3	9.7	17.3 %
Cap_Scan_005	3	11.1	7.5	36.7 %
Cap_Scan_007	6	13.3	9.0	17.3 %
Cap_Scan_008	4	13.8	9.5	9.4 %
Cap_Scan_009	3	12.4	10.8	36.0 %
Cap_Scan_010	3	10.0	8.3	8.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_001	2	6.8	4.6	14.3 %
Nuevo_proyecto_Scan_002	4	12.4	8.8	8.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_003	5	14.3	11.1	9.4 %
Nuevo_proyecto_Scan_004	2	13.3	12.6	10.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_005	3	11.9	7.2	10.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_006	2	3.8	3.4	17.6 %
Nuevo_proyecto_Scan_008	3	12.9	7.8	8.1 %
Nuevo_proyecto_Scan_009	1	12.9	12.9	8.1 %
Nuevo_proyecto_Scan_010	1	9.7	9.7	4.9 %
Nuevo_proyecto_Scan_014	2	23.1	17.2	7.5 %
Nuevo_proyecto_Scan_013	1	37.4	37.4	3.5 %
Nuevo_proyecto_Scan_012	3	37.4	21.5	3.5 %
Scuela.1001	2	36.0	29.5	2.7 %
Scuela.1000	3	14.6	9.4	9.6 %
Scuela.1002	2	21.8	18.2	8.3 %
Scuela.1003	3	36.0	25.1	2.7 %

Estadísticas del punto de escaneo

Agrupamiento/escaneo 1	Agrupamiento/escaneo 2	Error de punto [mm]	Superposición
Cap_Scan_000	Cap_Scan_001	3.4	89.8 %
Cap_Scan_000	Cap_Scan_003	6.3	31.9 %
Cap_Scan_000	Cap_Scan_002	5.1	24.1 %
Cap_Scan_006	Cap_Scan_008	8.7	51.3 %
Cap_Scan_006	Cap_Scan_003	6.8	24.3 %
Cap_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_003	10.4	18.1 %
Cap_Scan_001	Cap_Scan_002	4.1	44.2 %
Cap_Scan_001	Cap_Scan_004	6.5	40.9 %
Cap_Scan_001	Cap_Scan_003	5.2	44.0 %
Cap_Scan_003	Cap_Scan_008	13.8	11.1 %
Cap_Scan_003	Cap_Scan_004	4.8	23.2 %
Cap_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_003	14.3	20.8 %
Cap_Scan_005	Cap_Scan_000	11.1	36.7 %
Cap_Scan_005	Cap_Scan_001	6.9	42.6 %
Cap_Scan_005	Cap_Scan_003	4.3	63.5 %
Cap_Scan_007	Cap_Scan_006	8.8	20.7 %
Cap_Scan_007	Cap_Scan_004	13.3	17.3 %
Cap_Scan_007	Cap_Scan_008	3.7	20.4 %
Cap_Scan_007	Nuevo_proyecto_Scan_003	12.2	27.3 %
Cap_Scan_007	Cap_Scan_010	5.9	37.8 %
Cap_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_003	11.7	9.4 %
Cap_Scan_009	Cap_Scan_007	10.1	63.6 %
Cap_Scan_009	Cap_Scan_010	10.0	93.7 %
Cap_Scan_009	Nuevo_proyecto_Scan_002	12.4	36.0 %
Cap_Scan_010	Nuevo_proyecto_Scan_002	9.2	8.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_001	Nuevo_proyecto_Scan_002	6.8	14.4 %
Nuevo_proyecto_Scan_001	Scuela.1000	2.4	14.3 %
Nuevo_proyecto_Scan_002	Nuevo_proyecto_Scan_003	6.9	37.9 %
Nuevo_proyecto_Scan_004	Cap_Scan_001	13.3	22.1 %
Nuevo_proyecto_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_005	11.9	10.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_005	3.0	63.1 %
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_008	3.8	17.6 %
Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_005	6.8	35.7 %
Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_009	12.9	8.1 %

Nuevo_proyecto_Scan_014	Scuela.1001	23.1	7.5 %
Nuevo_proyecto_Scan_014	Scuela.1000	11.3	9.6 %
Nuevo_proyecto_Scan_012	Nuevo_proyecto_Scan_010	9.7	4.9 %
Nuevo_proyecto_Scan_012	Nuevo_proyecto_Scan_013	37.4	3.5 %
Nuevo_proyecto_Scan_012	Scuela.1003	17.4	9.3 %
Scuela.1002	Scuela.1000	14.6	13.7 %
Scuela.1003	Scuela.1001	36.0	2.7 %
Scuela.1003	Scuela.1002	21.8	8.3 %

Errores de coincidencia del inclinómetro

Agrupamiento/escaneo	Escaneo	Error de coincidencia [deg]
Nuevo_proyecto_Scan_001	Nuevo_proyecto_Scan_001	0.0754
Nuevo_proyecto_Scan_012	Nuevo_proyecto_Scan_012	0.4488
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_006	0.1552
Scuela.1003	Scuela.1003	0.2982
Cap_Scan_009	Cap_Scan_009	0.0965
Cap_Scan_007	Cap_Scan_007	0.0874
Nuevo_proyecto_Scan_010	Nuevo_proyecto_Scan_010	0.4048
Nuevo_proyecto_Scan_014	Nuevo_proyecto_Scan_014	0.1514
Scuela.1002	Scuela.1002	0.0719
Nuevo_proyecto_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_004	0.1352
Cap_Scan_005	Cap_Scan_005	0.1327
Cap_Scan_006	Cap_Scan_006	0.1984
Cap_Scan_000	Cap_Scan_000	0.1319
Cap_Scan_010	Cap_Scan_010	0.2156
Scuela.1001	Scuela.1001	0.0857
Cap_Scan_001	Cap_Scan_001	0.1214
Nuevo_proyecto_Scan_002	Nuevo_proyecto_Scan_002	0.0748
Cap_Scan_003	Cap_Scan_003	0.1452
Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_008	0.1747
Nuevo_proyecto_Scan_013	Nuevo_proyecto_Scan_013	0.4488
Cap_Scan_004	Cap_Scan_004	0.0166
Nuevo_proyecto_Scan_009	Nuevo_proyecto_Scan_009	0.4903
Nuevo_proyecto_Scan_005	Nuevo_proyecto_Scan_005	0.1408
Scuela.1000	Scuela.1000	0.0640
Cap_Scan_002	Cap_Scan_002	0.1613
Cap_Scan_008	Cap_Scan_008	0.2062
Nuevo_proyecto_Scan_003	Nuevo_proyecto_Scan_003	0.0980

Caso 3. N más 1 escaneos, registro manual y automático mediante objetivos:

Codificación de colores

Error de distancia	< 20 mm	> 40 mm
Error horizontal	< 20 mm	> 40 mm
Error vertical	< 20 mm	> 40 mm
Error angular	< 0.5 deg	> 1.0 deg

Descripción general

Estadísticas del objetivo

Iteraciones Error de distancia	67.1 mm
Error de distancia medio	10.8 mm
Iteraciones Error horizontal	66.8 mm
Error horizontal medio	9.7 mm
Iteraciones Error vertical	28.5 mm
Error vertical medio	2.5 mm
Iteraciones Error angular	3.56 deg
Error angular medio	0.41 deg

Errores de escaneo

Estadísticas del objetivo

Agrupamiento/escaneo	Conexiones	Iteraciones Dist. [mm]	Dist. media [mm]	Iteraciones Horizontal [mm]	Horizontal medio [mm]	Iteraciones Vertical [mm]	Vertical medio [mm]	Iteraciones Ángulo [deg]	Ángulo medio [deg]
Cap_Scan_000	3	22.9	15.5	22.9	14.7	6.9	2.9	1.51	1.09
Scuela.1003	1	45.4	19.3	45.4	19.3	0.2	0.1	0.25	0.16
Cap_Scan_001	10	24.2	9.5	23.2	8.1	22.6	3.2	1.20	0.40
Cap_Scan_002	3	22.9	12.2	22.9	11.5	7.1	2.5	1.22	1.03
Cap_Scan_003	4	28.3	14.4	28.3	11.2	22.6	6.3	0.71	0.46
Cap_Scan_004	8	16.8	6.5	16.8	5.7	7.8	1.9	0.71	0.34
Cap_Scan_005	3	28.3	18.5	28.3	16.1	16.2	5.8	-	-
Cap_Scan_007	11	37.9	9.9	36.4	8.7	20.5	3.1	1.51	0.46
Cap_Scan_008	2	8.6	4.9	6.6	3.5	5.5	3.4	0.05	0.05
Cap_Scan_009	8	38.8	10.9	38.8	10.5	10.6	1.9	0.82	0.31
Cap_Scan_010	2	20.5	7.7	18.0	6.7	9.8	2.6	0.78	0.22
Cap_Scan_006	2	36.2	20.9	33.6	15.7	20.5	11.6	-	-
Nuevo_proyecto_Scan_001	5	38.8	10.8	38.8	10.8	6.2	0.8	3.56	0.68
Nuevo_proyecto_Scan_002	7	26.9	7.0	26.8	7.0	1.7	0.2	0.69	0.30
Nuevo_proyecto_Scan_003	6	67.1	14.1	66.8	14.0	6.3	1.1	0.69	0.23
Nuevo_proyecto_Scan_004	7	67.1	16.1	66.8	16.0	6.3	0.9	1.20	0.48
Nuevo_proyecto_Scan_005	3	19.9	10.5	18.5	9.1	18.7	2.7	1.06	0.40
Nuevo_proyecto_Scan_006	2	19.9	10.7	9.9	6.2	18.7	7.6	1.06	0.90
Nuevo_proyecto_Scan_008	3	24.1	10.4	24.0	10.0	6.5	1.2	0.83	0.28
Nuevo_proyecto_Scan_009	2	24.1	8.9	24.0	8.9	2.4	0.4	0.83	0.36
Nuevo_proyecto_Scan_010	2	14.3	5.0	13.7	4.8	4.0	1.0	0.33	0.17
Nuevo_proyecto_Scan_012	1	14.3	7.9	13.7	7.6	4.0	1.6	0.28	0.17
Nuevo_proyecto_Scan_014	3	44.1	13.7	44.1	10.1	28.5	4.3	3.56	0.73
Nuevo_proyecto_Scan_013	1	44.1	15.6	44.1	15.6	1.4	0.8	0.52	0.36
Scuela.1001	1	28.8	14.9	3.8	1.9	28.5	14.3	0.50	0.36
Scuela.1000	2	7.9	3.0	7.9	3.0	0.4	0.1	1.32	0.50
Scuela.1002	2	45.4	10.6	45.4	10.6	0.4	0.1	1.32	0.33

Errores detallados

Estadísticas del objetivo

Agrupamiento/escaneo 1	Destino 1	Agrupamiento/escaneo 2	Destino 2	Dist. [mm]	Horizontal [mm]	Vertical [mm]	Ángulo [deg]
Cap_Scan_000	Sphere19	Cap_Scan_001	Sphere19	20.4	19.1	6.9	-
Cap_Scan_000	PlaneEx53	Cap_Scan_001	PlaneEx53	7.9	7.9	0.0	0.54
Scuela.1003	Plane3	Scuela.1002	Plane3	5.3	5.3	0.0	0.14
Scuela.1003	PlaneEx59	Scuela.1002	PlaneEx59	1.2	1.2	0.0	0.25
Scuela.1003	Point3d51	Scuela.1002	Point3d51	45.4	45.4	0.2	-
Cap_Scan_001	PlaneEx19	Cap_Scan_009	PlaneEx19	0.3	0.3	0.0	0.25
Cap_Scan_001	PlaneEx70	Cap_Scan_009	PlaneEx70	0.6	0.6	0.0	0.17
Cap_Scan_001	PlaneEx19	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx19	6.2	6.2	0.1	0.58
Cap_Scan_001	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx20	4.4	4.4	0.0	0.19
Cap_Scan_001	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx20	1.3	1.3	0.0	0.11
Cap_Scan_001	PlaneEx19	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx19	8.6	8.6	0.1	0.20
Cap_Scan_001	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx20	19.0	19.0	0.2	0.35
Cap_Scan_001	Sphere13	Cap_Scan_004	Sphere13	12.4	10.6	6.5	-
Cap_Scan_001	PlaneEx20	Cap_Scan_004	PlaneEx20	2.1	2.1	0.0	0.04
Cap_Scan_001	Sphere8	Cap_Scan_002	Sphere8	11.6	9.1	7.1	-
Cap_Scan_001	Point3d48	Cap_Scan_003	Point3d48	18.8	14.7	11.6	-
Cap_Scan_001	Sphere12	Cap_Scan_003	Sphere12	23.8	7.5	22.6	-
Cap_Scan_001	Point3d52	Cap_Scan_003	Point3d52	10.8	8.8	6.3	-
Cap_Scan_001	Point3d48	Cap_Scan_007	Point3d48	11.5	10.0	5.7	-
Cap_Scan_001	PlaneEx19	Cap_Scan_007	PlaneEx19	4.5	4.5	0.1	0.31
Cap_Scan_001	PlaneEx20	Cap_Scan_007	PlaneEx20	3.1	3.1	0.0	0.15
Cap_Scan_001	Sphere21	Cap_Scan_000	Sphere21	6.0	3.8	4.7	-
Cap_Scan_002	Sphere21	Cap_Scan_001	Sphere21	9.1	9.1	0.7	-
Cap_Scan_002	PlaneEx53	Cap_Scan_001	PlaneEx53	10.3	10.3	0.0	0.75
Cap_Scan_002	Sphere19	Cap_Scan_001	Sphere19	5.5	3.8	4.0	-
Cap_Scan_002	Sphere21	Cap_Scan_000	Sphere21	11.1	9.7	5.4	-
Cap_Scan_002	PlaneEx53	Cap_Scan_000	PlaneEx53	22.9	22.9	0.1	1.22
Cap_Scan_002	Sphere19	Cap_Scan_000	Sphere19	19.9	19.6	3.0	-
Cap_Scan_002	PlaneEx53	Cap_Scan_007	PlaneEx53	7.6	7.6	0.0	1.13
Cap_Scan_003	Sphere13	Cap_Scan_004	Sphere13	15.2	13.1	7.8	-
Cap_Scan_003	PlaneEx63	Cap_Scan_004	PlaneEx63	6.5	0.7	6.5	0.43
Cap_Scan_003	Sphere13	Cap_Scan_001	Sphere13	22.6	22.5	1.3	-
Cap_Scan_003	Point3d48	Cap_Scan_007	Point3d48	9.0	6.8	6.0	-
Cap_Scan_003	PlaneEx60	Cap_Scan_007	PlaneEx60	0.7	0.7	0.0	0.25
Cap_Scan_004	PlaneEx70	Cap_Scan_009	PlaneEx70	4.2	4.2	0.0	0.50
Cap_Scan_004	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx20	2.4	2.4	0.0	0.16
Cap_Scan_004	PlaneEx72	Cap_Scan_001	PlaneEx72	4.9	4.9	0.0	0.41
Cap_Scan_004	PlaneEx70	Cap_Scan_001	PlaneEx70	5.8	5.8	0.1	0.50
Cap_Scan_004	PlaneEx67	Cap_Scan_001	PlaneEx67	1.7	1.7	0.0	0.16
Cap_Scan_004	PlaneEx20	Cap_Scan_007	PlaneEx20	5.1	5.1	0.0	0.11
Cap_Scan_004	PlaneEx65	Cap_Scan_003	PlaneEx65	3.0	1.1	2.8	0.71
Cap_Scan_005	Sphere13	Cap_Scan_004	Sphere13	13.7	13.1	4.1	-
Cap_Scan_005	Sphere12	Cap_Scan_003	Sphere12	7.9	4.5	6.4	-
Cap_Scan_005	Point3d52	Cap_Scan_003	Point3d52	28.3	28.3	0.7	-
Cap_Scan_005	Sphere13	Cap_Scan_003	Sphere13	26.0	25.7	3.7	-
Cap_Scan_005	Sphere12	Cap_Scan_001	Sphere12	17.5	6.7	16.2	-
Cap_Scan_005	Point3d52	Cap_Scan_001	Point3d52	24.2	23.2	7.0	-
Cap_Scan_005	Sphere13	Cap_Scan_001	Sphere13	11.7	11.5	2.4	-
Cap_Scan_007	PlaneEx19	Cap_Scan_009	PlaneEx19	4.0	4.0	0.0	0.42
Cap_Scan_007	Sphere15	Cap_Scan_009	Sphere15	25.2	22.9	10.6	-
Cap_Scan_007	PlaneEx27	Cap_Scan_009	PlaneEx27	5.4	5.4	0.1	0.48
Cap_Scan_007	Sphere16	Cap_Scan_009	Sphere16	37.9	36.4	10.5	-
Cap_Scan_007	PlaneEx27	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx27	4.0	4.0	0.0	0.44
Cap_Scan_007	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx20	6.6	6.6	0.0	0.08
Cap_Scan_007	PlaneEx19	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx19	4.1	4.1	0.0	0.44

Cap_Scan_007	PlaneEx72	Cap_Scan_004	PlaneEx72	0.6	0.6	0.0	0.61
Cap_Scan_007	PlaneEx53	Cap_Scan_001	PlaneEx53	9.1	9.1	0.0	1.05
Cap_Scan_007	PlaneEx72	Cap_Scan_001	PlaneEx72	6.0	6.0	0.0	0.26
Cap_Scan_007	PlaneEx53	Cap_Scan_000	PlaneEx53	20.1	20.1	0.0	1.51
Cap_Scan_007	Point3d42	Cap_Scan_006	Point3d42	24.6	23.1	8.5	-
Cap_Scan_007	PlaneEx52	Cap_Scan_008	PlaneEx52	1.2	0.2	1.2	0.05
Cap_Scan_007	Point3d39	Cap_Scan_008	Point3d39	6.2	4.2	4.5	-
Cap_Scan_007	Sphere11	Cap_Scan_008	Sphere11	6.2	5.1	3.5	-
Cap_Scan_008	Point3d40	Cap_Scan_007	Point3d40	2.5	1.3	2.2	-
Cap_Scan_009	Point3d2	Nuevo_proyecto_Scan_002	Point3d2	26.9	26.8	1.7	-
Cap_Scan_009	PlaneEx19	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx19	9.0	9.0	0.1	0.08
Cap_Scan_009	PlaneEx54	Cap_Scan_007	PlaneEx54	3.6	3.6	0.1	0.68
Cap_Scan_009	Point3d2	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d2	38.8	38.8	1.1	-
Cap_Scan_009	Point3d8	Cap_Scan_010	Point3d8	20.5	18.0	9.8	-
Cap_Scan_009	Sphere17	Cap_Scan_010	Sphere17	4.4	4.3	1.1	-
Cap_Scan_009	Sphere18	Cap_Scan_010	Sphere18	3.9	3.9	0.0	-
Cap_Scan_010	PlaneEx10	Cap_Scan_009	PlaneEx10	4.5	4.5	0.1	0.05
Cap_Scan_010	PlaneEx56	Cap_Scan_009	PlaneEx56	3.3	0.8	3.2	0.01
Cap_Scan_010	PlaneEx55	Cap_Scan_009	PlaneEx55	3.1	0.7	3.0	0.04
Cap_Scan_010	PlaneEx10	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx10	5.9	5.9	0.1	0.78
Cap_Scan_006	Sphere1	Cap_Scan_007	Sphere1	36.2	33.6	13.4	-
Cap_Scan_006	Point3d39	Cap_Scan_007	Point3d39	14.0	9.8	10.0	-
Cap_Scan_006	Point3d49	Cap_Scan_007	Point3d49	21.2	5.4	20.5	-
Cap_Scan_006	Point3d39	Cap_Scan_008	Point3d39	8.6	6.6	5.5	-
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx40	Cap_Scan_009	PlaneEx40	7.5	7.5	0.7	0.28
Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d8	Cap_Scan_009	Point3d8	33.7	33.1	6.2	-
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx14	Cap_Scan_009	PlaneEx14	7.7	7.6	0.7	0.26
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx10	Cap_Scan_009	PlaneEx10	18.0	18.0	0.2	0.82
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx40	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx40	1.8	1.8	0.2	0.05
Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx13	Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx13	6.8	6.8	0.2	0.22
Nuevo_proyecto_Scan_001	Plane6	Scuela.1000	Plane6	2.2	2.2	0.1	1.20
Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d8	Cap_Scan_010	Point3d8	15.6	15.2	3.7	-
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx19	Cap_Scan_009	PlaneEx19	5.4	5.4	0.1	0.66
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx27	Cap_Scan_009	PlaneEx27	1.8	1.8	0.0	0.11
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx40	Cap_Scan_009	PlaneEx40	5.8	5.8	0.5	0.25
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx14	Cap_Scan_009	PlaneEx14	6.3	6.3	0.6	0.21
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx19	Cap_Scan_007	PlaneEx19	0.9	0.9	0.0	0.27
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx14	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx14	0.9	0.9	0.1	0.29
Nuevo_proyecto_Scan_002	Point3d2	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d2	13.4	13.3	0.6	-
Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx19	Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx19	2.2	2.2	0.0	0.69
Nuevo_proyecto_Scan_002	Sphere10	Nuevo_proyecto_Scan_003	Sphere10	22.4	22.4	0.3	-
Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx20	8.6	8.6	0.1	0.17
Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx20	20.0	20.0	0.2	0.25
Nuevo_proyecto_Scan_003	Point3d1	Nuevo_proyecto_Scan_004	Point3d1	21.6	20.8	5.7	-
Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx20	Cap_Scan_004	PlaneEx20	3.7	3.7	0.0	0.07
Nuevo_proyecto_Scan_003	PlaneEx20	Cap_Scan_007	PlaneEx20	0.0	0.0	0.0	0.10
Nuevo_proyecto_Scan_004	Point3d	Nuevo_proyecto_Scan_005	Point3d	16.4	16.4	0.5	-
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx27	Cap_Scan_009	PlaneEx27	2.8	2.8	0.0	0.41
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx27	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx27	1.0	1.0	0.0	0.30
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx20	Nuevo_proyecto_Scan_002	PlaneEx20	12.1	12.1	0.1	0.36
Nuevo_proyecto_Scan_004	Point3d12	Nuevo_proyecto_Scan_003	Point3d12	67.1	66.8	6.3	-
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx27	Cap_Scan_007	PlaneEx27	3.6	3.6	0.0	0.52
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx20	Cap_Scan_007	PlaneEx20	21.6	21.6	0.2	0.29
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx47	Cap_Scan_001	PlaneEx47	2.9	2.9	0.0	1.20
Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx20	Cap_Scan_004	PlaneEx20	16.8	16.8	0.2	0.32
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx12	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx12	18.5	18.5	0.3	0.94
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx2	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx2	3.9	3.9	0.3	0.34
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx6	Nuevo_proyecto_Scan_004	PlaneEx6	14.6	14.6	0.1	0.53
Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx5	Nuevo_proyecto_Scan_006	PlaneEx5	3.4	3.4	0.0	1.06

Nuevo_proyecto_Scan_005	Sphere3	Nuevo_proyecto_Scan_008	Sphere3	13.4	11.7	6.5	-
Nuevo_proyecto_Scan_006	Sphere3	Nuevo_proyecto_Scan_005	Sphere3	16.2	9.9	12.9	-
Nuevo_proyecto_Scan_006	PlaneEx4	Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx4	5.8	5.8	0.3	0.74
Nuevo_proyecto_Scan_006	Sphere3	Nuevo_proyecto_Scan_008	Sphere3	8.2	5.2	6.4	-
Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane15	Nuevo_proyecto_Scan_005	Plane15	8.9	8.9	0.2	0.11
Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane13	Nuevo_proyecto_Scan_005	Plane13	11.5	11.5	0.3	0.34
Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx22	Nuevo_proyecto_Scan_005	PlaneEx22	5.0	5.0	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane17	Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane17	13.5	13.5	0.1	0.44
Nuevo_proyecto_Scan_008	Point3d22	Nuevo_proyecto_Scan_009	Point3d22	24.1	24.0	2.4	-
Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane18	Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane18	17.6	17.6	0.2	0.16
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx26	Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx26	0.5	0.5	0.0	0.33
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx50	Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx50	0.1	0.1	0.0	0.03
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx24	Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx24	8.7	8.7	0.1	0.13
Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane16	Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane16	5.3	5.3	0.0	0.21
Nuevo_proyecto_Scan_009	Plane14	Nuevo_proyecto_Scan_008	Plane14	4.7	4.7	0.0	0.77
Nuevo_proyecto_Scan_009	PlaneEx30	Nuevo_proyecto_Scan_008	PlaneEx30	14.5	14.4	1.2	0.83
Nuevo_proyecto_Scan_010	Point3d18	Nuevo_proyecto_Scan_009	Point3d18	0.0	0.0	0.0	-
Nuevo_proyecto_Scan_010	Point3d15	Nuevo_proyecto_Scan_012	Point3d15	14.3	13.7	4.0	-
Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx33	Nuevo_proyecto_Scan_012	PlaneEx33	6.2	6.2	0.0	0.28
Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx48	Nuevo_proyecto_Scan_012	PlaneEx48	3.6	3.6	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_010	PlaneEx25	Nuevo_proyecto_Scan_012	PlaneEx25	2.3	2.3	0.0	0.14
Nuevo_proyecto_Scan_010	Point3d19	Nuevo_proyecto_Scan_012	Point3d19	12.9	12.3	4.0	-
Nuevo_proyecto_Scan_014	Plane11	Nuevo_proyecto_Scan_013	Plane11	10.8	10.8	0.9	0.52
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx37	Nuevo_proyecto_Scan_013	PlaneEx37	44.1	44.1	0.8	0.48
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx32	Nuevo_proyecto_Scan_013	PlaneEx32	0.8	0.8	0.0	0.09
Nuevo_proyecto_Scan_014	Point3d5	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point3d5	13.5	13.5	0.4	-
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx11	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx11	21.3	21.3	0.3	3.56
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx16	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx16	1.8	1.8	0.1	0.26
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx35	Scuela.1001	PlaneEx35	1.5	1.5	0.0	0.50
Nuevo_proyecto_Scan_014	PlaneEx36	Scuela.1001	PlaneEx36	14.3	0.4	14.3	0.22
Nuevo_proyecto_Scan_013	Point3d28	Nuevo_proyecto_Scan_014	Point3d28	6.8	6.6	1.4	-
Scuela.1001	Point3d31	Nuevo_proyecto_Scan_014	Point3d31	28.8	3.8	28.5	-
Scuela.1000	PlaneEx18	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx18	5.1	5.1	0.0	0.26
Scuela.1000	PlaneEx3	Nuevo_proyecto_Scan_001	PlaneEx3	0.5	0.5	0.0	0.22
Scuela.1000	Point1	Nuevo_proyecto_Scan_001	Point1	0.9	0.9	0.1	-
Scuela.1002	PlaneEx62	Scuela.1000	PlaneEx62	3.7	3.7	0.0	0.35
Scuela.1002	Plane4	Scuela.1000	Plane4	2.2	2.2	0.0	0.04
Scuela.1002	Plane7	Scuela.1000	Plane7	3.5	3.5	0.1	0.11
Scuela.1002	PlaneEx61	Scuela.1000	PlaneEx61	7.9	7.9	0.3	1.32
Scuela.1002	Point3d63	Scuela.1000	Point3d63	1.2	1.2	0.4	-
Scuela.1002	Plane2	Scuela.1003	Plane2	25.3	25.3	0.1	0.11

Errores de coincidencia del inclinómetro

Agrupamiento/escaneo	Escaneo	Error de coincidencia [deg]
Nuevo_proyecto_Scan_001	Nuevo_proyecto_Scan_001	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_012	Nuevo_proyecto_Scan_012	0.0000
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_006	0.0000
Scuela.1003	Scuela.1003	0.0000
Cap_Scan_009	Cap_Scan_009	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_010	Nuevo_proyecto_Scan_010	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_014	Nuevo_proyecto_Scan_014	0.0000
Scuela.1002	Scuela.1002	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_004	0.0001
Cap_Scan_005	Cap_Scan_005	0.0000
Cap_Scan_006	Cap_Scan_006	0.0001
Cap_Scan_000	Cap_Scan_000	0.0000
Cap_Scan_010	Cap_Scan_010	0.0001
Scuela.1001	Scuela.1001	0.0000
Cap_Scan_001	Cap_Scan_001	0.0002
Nuevo_proyecto_Scan_002	Nuevo_proyecto_Scan_002	0.0000
Cap_Scan_003	Cap_Scan_003	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_008	0.0001
Cap_Scan_007	Cap_Scan_007	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_013	Nuevo_proyecto_Scan_013	0.0000
Cap_Scan_004	Cap_Scan_004	0.0000
Nuevo_proyecto_Scan_009	Nuevo_proyecto_Scan_009	0.0001
Nuevo_proyecto_Scan_005	Nuevo_proyecto_Scan_005	0.0000
Scuela.1000	Scuela.1000	0.0000
Cap_Scan_002	Cap_Scan_002	0.0000
Cap_Scan_008	Cap_Scan_008	0.0000
Nuevo_proyecto_Scan_003	Nuevo_proyecto_Scan_003	0.0000

Caso 4. N más 1 escaneos, registro manual y automático “nube a nube”:

Codificación de colores

Error de punto	< 8 mm	> 20 mm
Superposición	> 25.0 %	< 10.0 %

Descripción general

Estadísticas del punto de escaneo

Error de punto máximo	28.5 mm
Error de punto medio	9.2 mm
Superposición mínima	5.5 %

Errores de escaneo

Estadísticas del punto de escaneo

Agrupamiento/escaneo	Conexiones	Iteraciones Error de punto [mm]	Error de punto medio [mm]	Distancia Superposición
Cap_Scan_000	4	10.1	6.5	24.5 %
Scuela.1003	3	28.5	18.1	5.5 %
Cap_Scan_001	6	13.3	6.7	22.1 %
Cap_Scan_002	2	5.4	5.2	24.5 %
Cap_Scan_003	6	12.7	6.8	23.3 %
Cap_Scan_004	4	14.6	9.7	19.4 %
Cap_Scan_005	3	10.1	6.9	24.7 %
Cap_Scan_007	6	12.3	9.6	19.4 %
Cap_Scan_008	4	12.7	10.1	26.9 %
Cap_Scan_009	3	12.8	10.4	45.0 %
Cap_Scan_010	3	9.2	8.5	29.9 %
Cap_Scan_006	4	12.3	9.7	26.9 %
Nuevo_proyecto_Scan_001	2	5.1	4.2	14.3 %
Nuevo_proyecto_Scan_002	4	12.8	9.5	29.7 %
Nuevo_proyecto_Scan_003	5	14.6	12.2	20.7 %
Nuevo_proyecto_Scan_004	2	13.3	12.5	10.3 %
Nuevo_proyecto_Scan_005	3	11.8	6.4	10.3 %
Nuevo_proyecto_Scan_006	2	5.5	4.3	14.8 %
Nuevo_proyecto_Scan_008	3	7.4	5.7	9.8 %
Nuevo_proyecto_Scan_009	1	7.4	7.4	9.8 %
Nuevo_proyecto_Scan_010	1	15.9	15.9	12.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_012	2	28.5	22.2	5.5 %
Nuevo_proyecto_Scan_014	2	9.8	7.6	7.8 %
Nuevo_proyecto_Scan_013	1	18.0	18.0	12.1 %
Scuela.1001	1	5.4	5.4	7.8 %
Scuela.1000	3	13.9	9.0	9.9 %
Scuela.1002	2	13.9	10.9	13.3 %

Errores detallados

Estadísticas del punto de escaneo

Agrupamiento/escaneo 1	Agrupamiento/escaneo 2	Error de punto [mm]	Superposición
Cap_Scan_000	Cap_Scan_001	3.7	89.2 %
Cap_Scan_000	Cap_Scan_002	5.4	24.5 %
Cap_Scan_000	Cap_Scan_003	7.0	32.0 %
Scuela.1003	Scuela.1002	7.8	14.9 %
Scuela.1003	Nuevo_proyecto_Scan_013	18.0	12.1 %
Cap_Scan_001	Cap_Scan_002	5.1	44.7 %
Cap_Scan_001	Cap_Scan_004	7.1	41.7 %
Cap_Scan_001	Cap_Scan_003	4.4	24.3 %
Cap_Scan_003	Cap_Scan_008	12.7	47.6 %
Cap_Scan_003	Cap_Scan_004	4.9	23.3 %
Cap_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_003	14.6	20.7 %
Cap_Scan_005	Cap_Scan_000	10.1	24.7 %
Cap_Scan_005	Cap_Scan_001	6.5	42.6 %
Cap_Scan_005	Cap_Scan_003	4.3	63.7 %
Cap_Scan_007	Cap_Scan_004	12.3	19.4 %
Cap_Scan_007	Cap_Scan_008	6.8	96.9 %
Cap_Scan_007	Nuevo_proyecto_Scan_003	11.8	33.3 %
Cap_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_003	11.4	35.2 %
Cap_Scan_009	Cap_Scan_007	9.6	67.6 %
Cap_Scan_009	Cap_Scan_010	8.8	95.2 %
Cap_Scan_009	Nuevo_proyecto_Scan_002	12.8	45.0 %
Cap_Scan_010	Cap_Scan_007	7.4	42.6 %
Cap_Scan_010	Nuevo_proyecto_Scan_002	9.2	29.9 %
Cap_Scan_006	Cap_Scan_003	7.3	60.2 %
Cap_Scan_006	Cap_Scan_007	9.7	43.1 %
Cap_Scan_006	Cap_Scan_008	9.5	26.9 %
Cap_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_003	12.3	37.0 %
Nuevo_proyecto_Scan_001	Nuevo_proyecto_Scan_002	5.1	32.7 %
Nuevo_proyecto_Scan_001	Scuela.1000	3.4	14.3 %
Nuevo_proyecto_Scan_002	Nuevo_proyecto_Scan_003	10.8	29.7 %
Nuevo_proyecto_Scan_004	Cap_Scan_001	13.3	22.1 %
Nuevo_proyecto_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_005	11.8	10.3 %
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_005	3.2	65.8 %
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_008	5.5	14.8 %

Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_005	4.2	36.5 %
Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_009	7.4	9.8 %
Nuevo_proyecto_Scan_012	Scuela.1003	28.5	5.5 %
Nuevo_proyecto_Scan_012	Nuevo_proyecto_Scan_010	15.9	12.2 %
Nuevo_proyecto_Scan_014	Scuela.1001	5.4	7.8 %
Nuevo_proyecto_Scan_014	Scuela.1000	9.8	9.9 %
Scuela.1002	Scuela.1000	13.9	13.3 %

Errores de coincidencia del inclinómetro

Agrupamiento/escaneo	Escaneo	Error de coincidencia [deg]
Nuevo_proyecto_Scan_001	Nuevo_proyecto_Scan_001	0.0480
Nuevo_proyecto_Scan_012	Nuevo_proyecto_Scan_012	0.1892
Nuevo_proyecto_Scan_006	Nuevo_proyecto_Scan_006	0.1516
Scuela.1003	Scuela.1003	0.0720
Cap_Scan_009	Cap_Scan_009	0.1582
Nuevo_proyecto_Scan_010	Nuevo_proyecto_Scan_010	0.1499
Nuevo_proyecto_Scan_014	Nuevo_proyecto_Scan_014	0.3290
Scuela.1002	Scuela.1002	0.0873
Nuevo_proyecto_Scan_004	Nuevo_proyecto_Scan_004	0.1080
Cap_Scan_005	Cap_Scan_005	0.0772
Cap_Scan_006	Cap_Scan_006	0.1355
Cap_Scan_000	Cap_Scan_000	0.0819
Cap_Scan_010	Cap_Scan_010	0.1178
Scuela.1001	Scuela.1001	0.4080
Cap_Scan_001	Cap_Scan_001	0.0895
Nuevo_proyecto_Scan_002	Nuevo_proyecto_Scan_002	0.0364
Cap_Scan_003	Cap_Scan_003	0.0828
Nuevo_proyecto_Scan_008	Nuevo_proyecto_Scan_008	0.1189
Cap_Scan_007	Cap_Scan_007	0.0509
Nuevo_proyecto_Scan_013	Nuevo_proyecto_Scan_013	0.1412
Cap_Scan_004	Cap_Scan_004	0.0592
Nuevo_proyecto_Scan_009	Nuevo_proyecto_Scan_009	0.0633
Nuevo_proyecto_Scan_005	Nuevo_proyecto_Scan_005	0.1109
Scuela.1000	Scuela.1000	0.0493
Cap_Scan_002	Cap_Scan_002	0.1156
Cap_Scan_008	Cap_Scan_008	0.1485
Nuevo_proyecto_Scan_003	Nuevo_proyecto_Scan_003	0.0652

ANEXO C

En este anexo se hará referencia al artículo “Point Clouds and Smart Cities” publicado en la revista GIM International el día 25 de octubre de 2018 por Mathias Lemmens. En el mismo se cuenta la importancia de los relevamientos y escaneos topográficos 3D para la generación de nubes de puntos y el armado de las mismas para la generación de “ciudades inteligentes”.

Nubes de puntos 3D y ciudades inteligentes

El concepto de “ciudad inteligente” se basa completamente en un flujo permanente de enormes cantidades de datos adquiridos por una gran variedad de sensores distribuidos por toda la ciudad. El uso inteligente de todos estos datos requiere la integración con mapas de ciudades en 3D para los cuales las nubes de puntos, adquiridas por escaneo láser o fotogrametría, son las fuentes principales. El autor de este artículo identifica las habilidades de las nubes de puntos para apoyar el concepto de ciudad inteligente.

Concepto de ciudad inteligente

La gente sigue moviéndose a las ciudades. El crecimiento de la población dentro de los límites limitados de una “megapolis” aumenta el tráfico, la vivienda, la densidad de servicios públicos y el riesgo de calamidades, y pone una tensión en los recursos escasos. Como resultado, los impactos económicos, sociales y ambientales son tremendos. Sumado a esto, casi mil millones de personas viven en ciudades que pueden ser afectadas por inundaciones, sequías, ciclones, terremotos u otros desastres naturales. Humanos, energía, agua, gas, aguas residuales, bits y bytes, todos se transportan a través de un laberinto de carreteras, túneles, tuberías y cables. Las inundaciones, incendios u otros choques pueden alterar estas arterias y venas de la ciudad. Para hacer frente a estas amenazas y optimizar el uso de recursos escasos, muchas autoridades de la ciudad quieren explotar las oportunidades que ofrece la tecnología actual; quieren que su ciudad se convierta en “inteligente”.

Mapas de la ciudad en 3D

Los mapas 3D incluyen la dimensión de altura, que es esencial para muchas aplicaciones de ciudades inteligentes, como el monitoreo del riesgo de inundación, la respuesta de emergencia, el análisis de puntos de vista y el cálculo del potencial de energía solar de parcelas y techos. Hacer que

una ciudad sea realmente inteligente comienza con la creación de un mapa 3D preciso que cubra toda la ciudad. Por supuesto, este mapa de ciudad en 3D debe ser preciso, detallado y actualizado. Las inexactitudes posicionales o temáticas y la caducidad afectarán la toma de decisiones adecuada. La naturaleza misma de la geo información significa que el daño originado por productos de calidad inferior puede no ser inmediatamente reconocible. Los errores cometidos hoy pueden, una o dos décadas más tarde, causar pérdidas significativas a la sociedad, no solo en términos de dinero, sino también en términos de lesiones, accidentes, casas demolidas y sufrimiento humano. El mapeo 3D preciso es por lo tanto un importante, Incluso esencial, activo que sustenta el concepto de ciudad inteligente. Capturar y representar el espacio 3D de una ciudad es un reto debido al nivel de detalle requerido. El mapeo 3D requiere los datos correctos, las herramientas de software correctas y los profesionales de la geomática con el conocimiento correcto.

Se sugiere revisar el siguiente link para acceder al artículo completo:

https://www.gim-international.com/content/article/point-clouds-and-smart-cities-2?utm_source=Newsletter+Superlist&utm_campaign=7dc7c2135a-EMAIL_CAMPAIGN_2019_01_24_Gim&utm_medium=email&utm_term=0_9bcc6040d6-7dc7c2135a-46238841&mc_cid=7dc7c2135a&mc_eid=5c3c11b837



Figura B.1: Mapa en 3D del centro comercial de Frankfurt, Alemania, creado a partir de datos Lidar gratuitos y de código abierto e imágenes de satélite; Los edificios, el suelo y las calles consisten en una malla texturizada (fuente: Turbosquid.com).