



MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS

ASIGNATURA

TRABAJO DE FIN DE MASTER (TFM)

TITULO

**DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO Y ESTUDIO
CONSTRUCTIVO DE UN EDIFICIO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MONTEVIDEO.**

AUTOR

RICARDO DANIEL YELICICH PELAEZ

TUTOR

JESÚS MARÍA GARCÍA GAGO

-SETIEMBRE DE 2019-

A Clara

Un agradecimiento especial a mi familia, amigos y colegas que hicieron posible este trabajo.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
PALABRAS CLAVE.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. GENERAL.....	4
2.2. ESPECÍFICOS.....	4
3. ESTADO DEL ARTE.....	5
3.1. SISTEMAS DE MAPEO MÓVIL.....	5
3.2. MODELADO 3D DEL PATRIMONIO.....	8
4. CASO DE ESTUDIO: MUSEO JUAN MANUAL BLANES.....	12
5. METODOLOGÍA.....	14
5.1. INSTRUMENTAL	14
5.1.1. Escaner ZEB-HORIZON.....	15
5.1.2. Escaner Trimble TX5.....	17
5.2. TRABAJO DE CAMPO.....	19
5.2.1. PRIMERA ETAPA: RELEVAMIENTO COMPLETO CON ZEB-HORIZON.....	19
5.2.2. SEGUNDA ETAPA: RELEVAMIENTO EXTERIOR CON TRIMBLE TX5.....	20
5.3. TRABAJO DE GABINETE.....	22
5.3.1. PROCESAMIENTO DE LAS NUBES:.....	22
5.3.2. INTEGRACIÓN DE NUBES DE PUNTOS.....	38
5.3.3. MODELADO DE LA NUBE.....	39
6. RESULTADOS.....	54
7. DISCUSIÓN.....	55
8. CONCLUSIONES.....	56
9. BIBLIOGRAFIA	57
10. ANEXOS.....	60

TABLA DE IMÁGENES

Imágen 1: Equipos escaner láser móviles (Nocerino, E. et al).....	7
Imágen 2: Detección de bordes (Kochi, N. et al).....	9
Imágen 3: Logo Museo Blanes (blanes.montevideo.gub.uy).....	12
Imágen 4: Ubicación del Museo Blanes (google.com/maps).....	12
Imágen 5: Fachada Principal del Mueso (blanes.montevideo.gub.uy).....	13
Imágen 6: Tabla de comparación de equipos (Fuente propia con datos de catálogos).....	15
Imágen 7: Escáner ZEB-HORIZON (Fuente propia).....	16
Imágen 8: Escaner Trimble TX5 (Fuente propia).....	17
Imágen 9: Especificaciones Trimble TX5 (Manual de usuario).....	18
Imágen 10: Esquema de recorrido con equipo móvil (Fuente propia).....	19
Imágen 11: Uso de ZEB-HORIZON (Fuente propia).....	20
Imágen 12: Overview map - SCENE (Fuente propia).....	20
Imágen 13: Escaner TX5 instalado en esquina posterior (Fuente propia).....	21
Imágen 14: Escaner TX5 instalado en fachada frontal (Fuente propia).....	21
Imágen 15: Nube en GeoSLAM HUB vista superior (Fuente propia).....	23
Imágen 16: Nube en GeoSLAM HUB vista superior cercana (Fuente propia).....	23
Imágen 17: Nube en GeoSLAM HUB vista frontal (Fuente propia).....	24
Imágen 18: Logfile del procesamiento con GeoSLAM HUB (Fuente propia).....	24
Imágen 19: Nube de puntos en RECAP (Fuente propia).....	25
Imágen 20: Nube de puntos depurada en RECAP (Fuente propia).....	25
Imágen 21: Vista de Correspondencia sin procesar - SCENE (Fuente propia).....	26
Imágen 22: Menú superior de opciones - SCENE (Fuente propia).....	27
Imágen 23: AutoCluster1 - SCENE (Fuente propia).....	27
Imágen 24: AutoCluster2 - SCENE (Fuente propia).....	28
Imágen 25: Registro manual en forma visual - SCENE (Fuente propia).....	28
Imágen 26: Registro manual con puntos homólogos - SCENE (Fuente propia).....	29
Imágen 27: Vista de correspondencia - SCENE (Fuente propia).....	29
Imágen 28: Vista de correspondencia en perspectiva - SCENE (Fuente propia).....	30
Imágen 29: Nube registrada y coloreada - SCENE (Fuente propia).....	30
Imágen 30: Resumen de proyecto - SCENE (Fuente propia).....	31
Imágen 31: Nube ZH en CloudCOMPARE (Fuente propia).....	32
Imágen 32: Nube ZH en CC limpia (Fuente propia).....	32
Imágen 33: Nube ZH en CC filtrada (Fuente propia).....	32
Imágen 34: Tabla comparación de procesamiento de nubes (Fuente propia).....	33
Imágen 35: Resultado de registro de nubes TX5 (Fuente propia).....	34
Imágen 36: Perspectiva de nube de puntos con TX5 - SCENE (Fuente propia).....	34
Imágen 37: Perspectiva de nube de puntos con ZEB-HORIZON - SketchUp (Fuente propia).....	35
Imágen 38: Detalle - ZEB-HORIZON (Fuente propia).....	35
Imágen 39: Detalle - TX5 (Fuente propia).....	35
Imágen 40: Densidad de puntos ZH (Fuente propia).....	36
Imágen 41: Densidad de puntos TX5 (Fuente propia).....	36
Imágen 42: Nubes importadas en CloudCOMPARE (Fuente propia).....	37
Imágen 43: Registro manual de ambas nubes.....	37
Imágen 44: Resultado de comparación (Fuente propia).....	38
Imágen 45: Nubes integradas y filtradas (Fuente propia).....	39

Imágen 46: Modelado en REVIT (Fuente propia).....	40
Imágen 47: Nube de puntos en SketchUp (Fuente propia).....	41
Imágen 48: Creación de líneas - SketchUp (Fuente propia).....	42
Imágen 49: Determinación de niveles - SketchUp (Fuente propia).....	42
Imágen 50: Modelo en construcción con nube de puntos - SketchUp (Fuente propia).....	43
Imágen 51: Modelo en construcción con detalle de escalera - SketchUp (Fuente propia).....	43
Imágen 52: Vista interior del modelo en construcción – SketchUp (Fuente propia).....	44
Imágen 53: Pilares iniciales y baranda - SketchUp (Fuente propia).....	45
Imágen 54: Pilar definitivo y barandas - SketchUp (Fuente propia).....	45
Imágen 55: Detalle de fachada lateral - SketchUp (Fuente propia).....	45
Imágen 56: Columna seccionada en CloudCOMPARE (Fuente propia).....	46
Imágen 57: Columna en SketchUp (Fuente propia).....	46
Imágen 58: Base (Fuente propia).....	47
Imágen 59: Cuerpo de la columna (Fuente propia).....	47
Imágen 60: Base con nube de puntos (Fuente propia).....	47
Imágen 61: Detalle superior en construcción (Fuente propia).....	48
Imágen 62: Columna completa (Fuente propia).....	48
Imágen 63: Nube y modelo en CloudCOMPARE (Fuente propia).....	49
Imágen 64: Resultado de comparación (Fuente propia).....	50
Imágen 65: Tramas diferentes en exterior - SketchUp (Fuente propia).....	51
Imágen 66: Material traslúcido en techo de jardín - SketchUp (Fuente propia).....	52
Imágen 67: Escena creada "Per Fro Cerc" - SketchUp (Fuente propia).....	52
Imágen 68: Lámina creada - LayOut (Fuente propia).....	53
Imágen 69: Lámina 5 Planta Baja - LayOut (Fuente propia).....	54

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es procurar la integración de productos geomáticos en sistemas de modelado 3D para elaborar modelos tridimensionales que permitan documentar un proyecto arquitectónico y su análisis constructivo, de un edificio con valor histórico patrimonial de la ciudad de Montevideo, en particular el Museo Juan Manuel Blanes. Los datos que se utilizan son obtenidos mediante la aplicación del escaner láser terrestre (TLS) con la integración de imágenes obtenidas por la cámara adosada al propio instrumento. Se utilizaron dos equipos distintos, uno móvil (ZEB-HORIZON) y otro estático (Trimble TX5). Se realizó previamente el estudio del estado del arte mediante búsqueda, lectura y análisis de bibliografía existente (libros, artículos científicos, conferencias, etc). Se halló material rico y abundante referido a equipos de escaneo láser y modelado 3D de edificios y construcciones con valor patrimonial.

Muchas son las metodologías propuestas para proyectos de escaneo, pero en general se pueden caracterizar cuatro etapas diferentes. La primera tiene que ver con la elección del sitio e instrumental. La segunda etapa representa el trabajo de campo. La tercera etapa conlleva el trabajo de gabinete donde se realiza el procesamiento de los datos obtenidos. La última etapa, asociada al trabajo de gabinete, refiere a la presentación de resultados y creación de entregables, como son la maqueta virtual, dibujos técnicos de plantas, alzados, etc, así como la generación de contenido audiovisual. Varios softwares fueron utilizados en todo el trabajo, tanto en la toma de datos como en el procesamiento y creación de entregables.

A modo de conclusión se cree que se logró el objetivo de manera aceptable, realizando la integración de distintas nubes de puntos y creación del modelo 3D. En particular la realización de este trabajo brindó la posibilidad de adquirir experiencia beneficiosa para el autor y contribuir al desarrollo de la tecnología y su utilización en el Uruguay.

PALABRAS CLAVE: Escaner Láser, Nube de Puntos, Modelado 3D.

1. INTRODUCCIÓN

El Modelado 3D es una herramienta esencial para la documentación, análisis, conservación y mantenimiento del patrimonio cultural tangible, en particular de edificios, construcciones y monumentos con valor histórico patrimonial. La fotogrametría terrestre mediante imágenes digitales y el escaneo láser terrestre son dos soluciones habitualmente requeridas a la hora de documentar el patrimonio cultural, especialmente arquitectónico y arqueológico (Cabrelles & Lerma, 2013). Las tecnologías no invasivas como la fotogrametría y el escaneo láser, permiten lograr resultados satisfactorios en poco tiempo, de gran calidad y con una infinita posibilidad de usos, como proyectos de recuperación y reacondicionamiento, evaluación de daños, maquetas virtuales, etc. El escaneo laser ha revolucionado la industria de relevamiento topográfico e ingeniería tanto como la documentación para preservación histórica, ya que prácticamente todas las superficies pueden ser medidas (Hughes, K. E., & Loudon, E. I., 2005).

El objetivo principal de este trabajo es procurar la integración de productos geomáticos en sistemas de modelado 3D para elaborar modelos tridimensionales que permitan documentar un proyecto arquitectónico y su análisis constructivo, de un edificio con valor histórico patrimonial de la ciudad de Montevideo. Por otra parte, se pretende estudiar y analizar la metodología para generación de maquetas virtuales así como lograr una primera aproximación al modelado de la información de la construcción (BIM, por sus siglas en inglés). Se hace hincapié en la utilización escaner láser terrestre (TLS) y la generación de entregables como planos de planta, alzados y cortes, analizando la capacidad de distintos software de generarlos en forma manual o automática. Por lo tanto, es necesario conocer el funcionamiento del instrumental para el escaneo así como de software específicos para cada etapa. Como resultado se pretende crear una maqueta virtual 3D y un video ilustrativo de la misma, además de planos de plantas, alzados, secciones, detalles constructivos y animaciones.

Este trabajo se realiza sobre un edificio con valor patrimonial de la ciudad de Montevideo, Uruguay, y se utiliza como modelo el edificio del Museo de Bellas Artes Juan Manuel Blanes, propiedad de la Intendencia de Montevideo, ubicado en el Prado, histórico barrio de casas-quinta de la ciudad. Según información publicada en la página web oficial (blanes.montevideo.gub.uy), el edificio fue proyectado en 1870 por el Ing. Juan Alberto Capurro como una villa palladiana para el Dr. Juan Bautista Raffo, propietario del predio. El museo fue fundado en 1930 siendo el edificio original adquirido por el gobierno municipal y ampliado con destino a museo. El edificio es Monumento Histórico Nacional desde 1975. En lo que respecta a este trabajo, por disposición de la administración no fue posible acceder, lamentablemente, al subsuelo, planta alta ni azotea del edificio, de todas formas se realiza el estudio de la planta baja y zona exterior del mismo.

Los datos que se utilizan son obtenidos mediante la aplicación del escaner láser terrestre (TLS) con la integración de imágenes obtenidas por la cámara adosada al propio instrumento. Se utilizaron dos equipos distintos, uno móvil y otro estático que se detallarán más adelante. La información recolectada por el escáner corresponde a un conjunto de puntos que representan las coordenadas XYZ de la superficie de cualquier objeto con respecto al sistema de referencia del escáner. El resultado del escaneo a través del TLS es un conjunto de puntos generalmente llamado

“nube de puntos”. La “nube de puntos” es un conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de referencia común, que muestra al espectador una comprensión de la distribución espacial de un objeto en el sitio. También puede incluir información adicional como un valor de intensidad o un valor RGB de color (Porrás Díaz et al, 2013). El valor RGB viene dado por la integración de las imágenes obtenidas por la cámara.

La metodología propuesta implica que a partir de los datos obtenidos por TLS del edificio, se obtiene la maqueta 3D mediante el empleo de software de modelado 3D. La maqueta 3D se logra a partir de la evaluación, análisis y edición de la nube de puntos obtenida con el TLS utilizando los softwares específicos para cada etapa. Para el trabajo de campo, se utilizó el escaner móvil ZEB-HORIZON de la marca GeoSLAM para la totalidad del edificio y el escaner terrestre estático modelo TX5 de la marca Trimble para la zona exterior (fachadas y galerías frontales). Para el procesamiento de los datos se utilizaron varios programas, entre ellos GeoSLAM Hub y Faro SCENE para el procesamiento de las distintas nubes de puntos, ReCAP y CloudCOMPARE para edición y procesamiento de una de las nubes, SketchUp para el modelado y maqueta virtual y Revit de AutoDESK para el estudio de la creación del modelo BIM, entre otros.

Respecto al concepto BIM, diversos autores lo definen como una poderosa tecnología emergente creada para unir a todas las disciplinas participantes en el diseño de nuevas construcciones, así como la creación de una base de datos que puede ser compartida por todos los participantes en dos y tres dimensiones incluyendo todos los hechos del proyecto (Skarmas, G., 2010). También se define BIM como el flujo de datos digitales que rodea el ciclo de vida de un activo o elemento del entorno construido, instigado a proporcionar una mejor gestión de la información para ayudar en la toma de decisiones (Thomson, C. & Boehm, J., 2015). En general, BIM está asociado al modelado 3D de la edificación, con el agregado de información aunque es un concepto mucho más amplio. BIM tiene también asociado además el concepto de LOD, Nivel de Desarrollo por sus siglas en inglés. Este concepto se introduce al BIM para permitir que todos los actores de la industria de Arquitectura, Ingeniería y Construcción puedan especificar y articular con un alto nivel de contenido y claridad así como confiabilidad de los modelos 3D en las distintas etapas. LOD está asociado con el nivel de detalle, como la cantidad de detalle incluido en los elementos del modelo de la construcción (Ahmad, A. et al, 2015). Existen 5 niveles de detalle actualmente utilizados según las especificaciones LOD Spec 2019 de BIMForum, una organización mundial que trata de explorar y publicar innovaciones tecnológicas a través de BIM. En estas especificaciones se describen cada uno de los 5 niveles (LOD 100, 200, 300, 350, 400) en todos sus aspectos, desde elementos geométricos básicos hasta elementos estructurales y modelado de materiales de construcción pasando por iluminación y revestimientos. En definitiva, BIM implica un modelo en 3D de información de la construcción, pero no todo modelo en 3D se considera BIM. En este trabajo se realizará el modelo 3D del edificio como una primera aproximación para la generación de BIM ya que apenas se pudo analizar una pequeña parte del software Revit de Autodesk, pero no se pudo crear el modelo BIM propiamente dicho por la complejidad que ello implica. La experimentación en el software y la lectura de diversos artículos científicos demuestran que es casi imposible ser autodidacta en lo que a BIM se refiere, siendo necesaria la capacitación y guía en cursos de alta dedicación.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Como objetivo general se pretende la integración de productos geomáticos en sistemas de modelado 3D para elaborar modelos tridimensionales que permitan documentar un proyecto arquitectónico y su análisis constructivo, de un edificio con valor histórico patrimonial de la ciudad de Montevideo, como es el Museo de Bellas Artes Juan Manuel Blanes.

Además, se procurará estudiar y analizar la metodología para generación de maquetas virtuales y procurar utilizarla en el modelado de la información de la construcción (BIM).

2.2. ESPECÍFICOS

- Estudio del estado del arte y fundamentos teóricos del modelado 3D.
- Utilización de escaner láser 3D móvil y aprendizaje de software asociados para edición y análisis de datos.
- Estudio de software de modelado 3D a partir de la nube de puntos y creación de maqueta virtual y planos de planta, alzada, cortes, etc.
- Lograr una introducción al concepto BIM.

3. ESTADO DEL ARTE

El estudio del estado del arte se realiza mediante búsqueda, lectura y análisis de bibliografía existente (libros, artículos científicos, conferencias, etc). Varios son los autores que describen en artículos científicos y libros los distintos procedimientos, análisis de datos y creación de modelados 3D de diferentes edificios en todo el mundo. Además, se comparan instrumentales y metodologías distintas. Por otra parte, se hará una breve descripción de los principales conceptos teóricos que se describen en este trabajo. Se establecerán algunas definiciones básicas para la comprensión del tema propuesto. Se agregarán conceptos de escaneo laser 3D y las distintas opciones en cuanto a equipamiento e instrumental. Además, se agregará bibliografía en base al escaneo y generación de modelado 3D de edificios con valor patrimonial.

Parte del material bibliográfico, fue consultado para entregas de sendos trabajos en otras asignaturas de este Máster Universitario. En particular, se transcribirá parte del trabajo entregado N° 1 de la asignatura Procesamiento y Gestión de Datos Laser y Radar, donde se realizó una revisión bibliográfica del tema *SISTEMAS BACKPACK MOBILE MAPPING*, desarrollada por este autor. Se cree pertinente utilizar ese trabajo como referencia, ya que uno de los instrumentos utilizados es un equipo de escaneo móvil manual, modelo ZEB-HORIZON. Por otra parte, se utilizó un equipo de escaneo estático, modelo TRIBME TX5, con el propósito de integrar datos obtenidos con ellos, pero también para intentar comparar ambos instrumentos. Por lo general, los equipos de escaneo móvil tienen menor precisión en la calidad de los puntos obtenidos que los equipos estáticos, pero son más versátiles en cuanto a su uso, entre otros aspectos que los diferencian.

3.1. SISTEMAS DE MAPEO MÓVIL

El Sistema de Mapeo Móvil (MMS por sus siglas en inglés) es una tecnología capaz de adquirir de manera eficiente datos tridimensionales que describen la geometría del ambiente con determinada precisión (Fissore, F. et al, 2017). Esta tecnología se ha estado investigando y desarrollando desde finales 1980s, inspirado en la disponibilidad del GPS para uso civil (LI, R. 1997). Además, el desarrollo estuvo restringido a aplicaciones que permitían la determinación de elementos de orientación externa a partir de puntos de control existentes en el terreno (Klaus & El-Sheimy, 2004). Los MMS son equipos integrados y sincronizados con diversos sensores montados en una única plataforma móvil: Unidad de Medición Inercial (IMU), Sistema de Posicionamiento Global Satelital (GNSS), técnicas de Localización y Mapeo Simultáneo (SLAM) y Sistemas de medición de distancia (por láser, sonar o visión). Existen MMS para mapeo en exterior y en interior, los primeros cuentan con GNSS para determinar la posición inicial y realizar correcciones al IMU, mientras que los de interior donde el GNSS no es efectivo por bloqueo o multicamino, utilizan el SLAM como principal fuente de posicionamiento (Holmgren, J. et al, 2017).

Las principales aplicaciones para los MMS tienen que ver con el modelado 3D del ambiente circundante, entre ellas, se destaca el Modelado de la Información de Edificación (BIM por sus siglas en inglés), tareas de rescate pos-sísmicas, modelado de realidad virtual o aumentada de monumentos de interés cultural (Maboudi, M. et al, 2017), así como inventario forestal (Tang, J. et al, 2015).

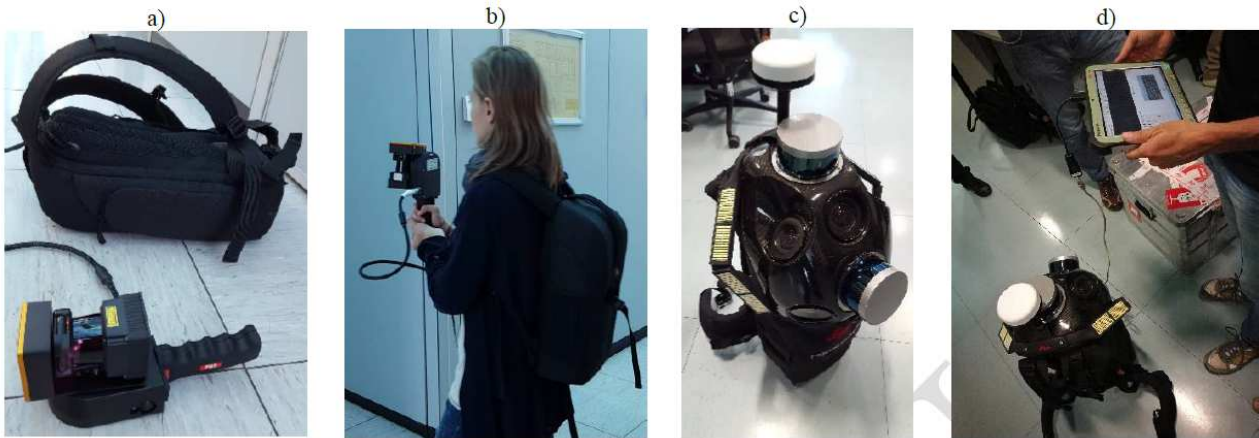
La tecnología SLAM se centra en el problema del mapeo de edificaciones en un ambiente desconocido por un robot, mientras que al mismo tiempo navega en ese ambiente utilizando el mapa creado (Riisgard, S. & Blas, M. R., 2005). Se trata de una serie de algoritmos que utilizan los datos del escáner láser de objetos circundantes para estimar la posición del sensor (Holmgren, J. et al, 2017). Los algoritmos presentan una serie de pasos que tiene como objetivo principal actualizar la posición del sensor. Se utilizan datos de odometría y datos del escáner láser, de donde se aplican algoritmos de extracción de objetos del ambiente y se reobserva cuando el sensor se mueve (Riisgard, S. & Blas, M. R., 2005). Los algoritmos y el sistema en general, se describen en el artículo *SLAM for summies* de los autores Riisgard, S. y Blas, M. R.

La mayoría de los MMS se basan en sensores de detección de luz y distancia (LiDAR) como unidades de mapeo 3D, aunque también se equipan con cámaras para tener información de color de la escena (Nocerino, E. et al, 2017) Cuando el sistema de medición de distancia es un escáner láser, el MMS se conoce como Sistema Móvil de Escaneo Láser (MLS). El MLS consiste de las siguientes unidades: sistema de posicionamiento, escáner láser y sistema computarizado de control y *data-logging* (Holmgren, J. et al, 2017). Los MLS viene a complementar o sustituir el escáner láser terrestre (TLS) para ciertas aplicaciones de escaneo de lugares difíciles de alcanzar gracias a su forma, peso, velocidad (Mandelli, A. et al, 2017) y movilidad. Uno de los principales problemas de los TLS es el cono de sombra (o de visibilidad) que produce el TLS, ya que desde un punto fijo puede escanear solamente lo que le es “visible”, debiendo aumentar el número de posiciones del escáner. Por otro lado, tampoco es posible escanear lugares estrechos, ya que el tamaño del equipamiento incluido el trípode (Mandelli, A. et al, 2017), al igual que la distancia mínima de medición de distancia láser no lo permite.

Por lo general, los MMSs se ajustan en vehículos como camionetas, autos, aviones, botes, etc, que permiten el relevamiento de grandes áreas, pero se dificulta al momento de relevar pasajes estrechos o escenarios de interior. Para solucionar estos inconvenientes, se diseñan MMSs adaptados para ser fácilmente transportados por personas a pie, que caminan sobre el ambiente de interés (Nocerino, E. et al, 2017). En el artículo *Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems* de Nocerino, E. et al, se describe los tres formatos más comunes para mapeo de interior:

1. MMSs portable de mochila: son sistemas (GNSS, IMU, LiDAR, cámaras) que se integran en una mochila que lleva el operador.
2. MMSs manuales: la diferencia con el anterior, es que el dispositivo de escaneo se lleva en la mano
3. MMSs de carrito: en esta configuración, los sensores se ajustan en un carro tipo carretilla y se utilizan principalmente para escaneo de interior.

En este mismo artículo, se comparan dos equipos MLS distintos: el *GeoSLAM ZEB-REVO* y *Leica Pegasus: Backpack*. El primero es un equipo de la marca GeoSLAM del tipo MMS manual, donde el dispositivo de medición láser se sostiene en la mano, mientras que el segundo es del tipo de mochila, de la empresa Leica Geosystems. En la siguiente imagen se pueden observar ambos equipos:



The devices under investigation: the GeoSLAM ZEB-REVO (a and b) and Leica Pegasus:Backpack (c and d).

Imágen 1: Equipos escaner láser móviles (Nocerino, E. et al)

Los autores realizan dos testeos con ambos equipos, uno interior y otro exterior, comparando los resultados de ambos, con un equipo de mayor precisión, como es el TLS Leica HDS7000 en el test de interior y el RIEGL VMX-450 para el ejemplo en exterior. El análisis se llevó a cabo para estimar la magnitud de los errores en medición de distancias y adquisición de datos 3D. En base a estos escaneos, se realizó un análisis estadístico de los errores y diferencias. Según sus conclusiones, ambos equipos trabajaron dentro de las tolerancias especificadas por los fabricantes, además, se marca el hecho de que el GeoSLAM ZEB-REVO generalmente superó los valores declarados de precisión mientras que los errores en el Leica Pegasus: Backpack se pueden mitigar al incluir puntos de control y restricciones en el ajuste del postproceso.

Existen diversos artículos donde se comparan diferentes sensores de escaneo móvil. Entre ellos, se puede destacar el artículo *Evaluation of indoor mobile mapping systems* de los autores Maboudi, M., Bánhidi, D. y Gerke, M., donde se comparan los sistemas Viametris iMS3D y Zeb-Revo en un ambiente controlado, usando el TLS Leica P20 como referencia. Se analizaron diferentes aspectos de calidad como ruido en distancia a planos, errores sistemáticos sobre planos, etc. Se presentan los resultados detallados del análisis realizado. Los autores concluyen que por lo general, las precisiones en las medidas son acorde a lo esperado y la desviación estandar de las nubes de puntos de aproximadamente 10 mm son razonables.

En el artículo *Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods*, los autores Lehtola, V. et al, realizan la comparación de cinco equipos comerciales de mapeo móvil de interior (Matterport, NavVis, Zebdee, Stencil y Leica Pegasus: Backpack) y tres prototipos de investigación (Aalto VILMA, FGI Slammer y Würzburg backpack).

Las pruebas se realizaron en tres sitios distintos, el primero representa un espacio estrecho como un corredor, el segundo es un estacionamiento cerrado de automóviles, que representa un espacio cerrado amplio, mientras que el último es el hall de una industria antiguo remodelado, con sus muebles y artefactos decorativos y de oficina, que representa un espacio cerrado con interferencias. Una vez realizadas las pruebas, en su discusión, los autores presentan tres grandes

problemas inherentes a la generación de nubes de puntos interiores. El primer problema refiere a los diferentes niveles de completitud de dos nubes de puntos que se comparan, en segundo lugar los valores atípicos (outliers) producidos por el propio método y por último, el hecho de que hay objetos de diversas escalas presentes en ambientes interiores. En este artículo, se trata de cuantificar el impacto de estos tres problemas, con el comportamiento de un error calculado a partir de las observaciones y de una serie de parámetros auxiliares. En sus conclusiones, los autores destacan de los resultados cuantitativos que los equipos con base fija, ya sea el equipo experimental Slammer y el comercial NavVis, logran mejores precisiones que el resto, aunque estos equipos tienen su base de aplicación en superficies planas, debido a su diseño de MMS en carro.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta en los MMS es la precisión y exactitud que se puede lograr en la representación de un ambiente y objeto a partir de una nube de puntos obtenida con esta tecnología. En el artículo *Accuracy evaluation of a Mobile Mapping System with advanced statistical methods* de los autores Toschi, I. et al, describe una metodología para evaluar la precisión y exactitud de MMSs comerciales con métodos estadísticos avanzados. En definitiva, el artículo se basa en el escaneo de una superficie con un escaner específico y contrastarlo contra otro escaneo y otro método (fotogramétrico por ejemplo) y realizar un análisis de parámetros estadísticos (diferencia, media, desviación estándar, mediana, Curtosis, etc) y en base a esto, obtener la metodología buscada. El análisis se basa en una distribución gaussiana de errores y procesamiento de valores atípicos, dando como resultado un valor menor a 10 mm para cada uno de los parámetros de precisión y exactitud calculados en diferentes circunstancias.

3.2. MODELADO 3D DEL PATRIMONIO

El modelado 3D es el proceso de desarrollo de una representación matemática de cualquier objeto tridimensional (ya sea inanimado o vivo) a través de un software especializado (wikipedia.org). Diversos son los autores que han descrito variantes a la generación de modelos 3D tanto en la metodología de relevamiento e instrumental, como a la metodología de creación del propio modelo. Además, son diversos también los algoritmos y ensayos para automatizar estos pasos. A continuación se transcribirá una pequeña selección de los diversos artículos hallados que refieren a la materia.

Respecto al equipamiento utilizado, como se mencionó antes tanto cámaras digitales para fotogrametría como equipos TLS son los más utilizados para la creación de modelos. Un escáner láser 3D de imágenes funciona como un digitalizador remoto que mide diferentes tipos de superficies. Las aplicaciones de preservación histórica implican registrar el estado y la forma existentes de los edificios, así como los componentes y materiales arquitectónicos (Hughes, K. E., & Loudon, E. I., 2005). Estos autores, en su trabajo *“Bridging the Gap - Using 3-D Laser Scanning in Historic-Building Documentation”* hacen también un recorrido histórico en la forma en que se generan los modelos 3D, haciendo especial hincapié en el desarrollo del escaner láser. Se pone el foco en las distintas disciplinas y distintos puntos de vista y utilidades para esta tecnología, desde términos de procesos de trabajo, entregables, costos asociados hasta los posibles clientes en cada una de las disciplinas que se involucran con la utilización de esta tecnología. En este artículo, se

trata de probar que el escaner láser ha sido una herramienta muy importante y necesaria para la documentación en instantes específicos del tiempo, proveyendo información de base muy precisa.

En el artículo *“3D modeling of architecture by edge-matching and integrating the point clouds of laser scanner and those of digital camera”* de Kochi, N. et al, los autores definen una metodología para la integración de datos de escaner láser con cámaras digitales y su utilización en la creación de modelos 3D a partir de la extracción de bordes de forma automática. Dada la complejidad en la recolección de datos y la cantidad enorme de datos adquiridos en poco tiempo, vieron la necesidad de crear un nuevo algoritmo capaz de procesar estos datos y generar modelos y encontrar bordes, logrando la automatización de varios procesos involucrados.

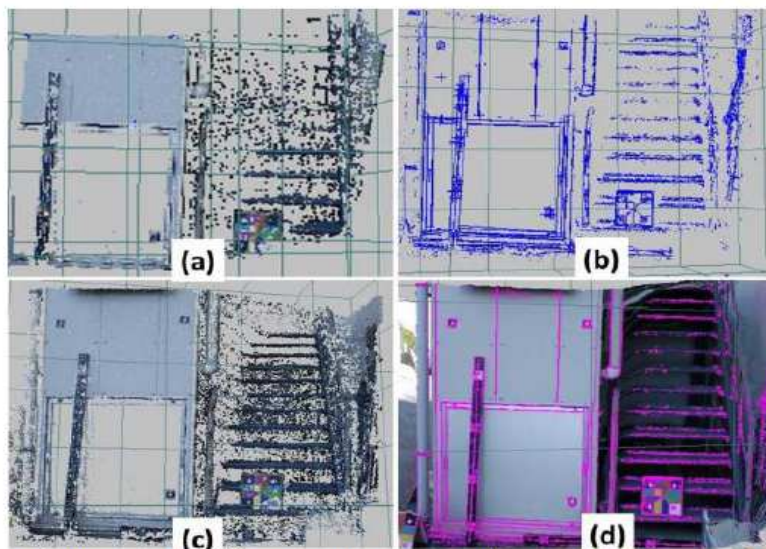


Figure 9. Matching Result (a) Only TIN-LSM method. (b) Edge-Matching (3D Edge). (c) Edge Surface-Matching. (d) Superposition of 3D Edge onto the texture-mapped Edge Surface-Matching result

Imágen 2: Detección de bordes (Kochi, N. et al)

Por otra parte, los autores Brashaw, B.K. et al en el trabajo *“Laser scanning technology as part of a comprehensive condition assessment for covered bridges”* refieren a la creación de modelos 3D de puentes peatonales cubiertos utilizando tecnología de escaner láser. El proceso utilizado implica también la utilización de TLS y su procesamiento así como la creación del modelo de este. Los autores además, presentan una serie de pasos metodológicos para la generalización de estos modelos en todo el territorio ya que entienden que el uso de esta tecnología debería ser incorporado en un protocolo comprensivo de inspección de estas construcciones.

Diversos autores además, coinciden en la utilización de esta tecnología para la creación de modelos de sitios patrimoniales como Barton, J. realizando el escaneo de Arquitectura de Tierra en Turkmenistan o Salerno, M.A. et al con su *“Modelado 3D del Cementerio de la misión salesiana Nuestra Señora de la Candelaria (Río Grande, Tierra del Fuego, Argentina)”* donde muestran el proceso de modelado de parte de un cementerio. En cuando a Iglesias y Templos, también son

diversos los autores como Gutierrez Baños et al, con la reconstrucción virtual 3D del Coro del Contengo Santa Clara de Toro en Zamora, en ese trabajo se hizo especial énfasis en la creación de productos divulgativos enfocados al público en general o especializado en las diversas disciplinas participantes.

El autor George C. Skarmeeas en su trabajo *“From HABS to BIM: Personal Experiences, Thoughts, and Reflections”* hace un análisis profundo y reflexivo de la evolución del modelado de la información de la construcción. En ese artículo realiza un recorrido desde la creación del programa *Historic American Buildings Survey (HABS)* del Servicio Nacional de Parques de EE.UU. para el relevamiento de edificaciones de ese país, hasta los días de hoy donde se destacan esfuerzos de varias disciplinas envueltas en proyectos colaborativos de preservación de la documentación de la edificación, en particular englobadas en el concepto BIM.

Por otra parte, el BIMForum aparece como un consorcio mundial que involucra a múltiples actores con el fin de promocionar, publicitar y analizar este concepto. Se puede encontrar entre sus recomendaciones anuales, las especificaciones BIMForum, algunas definiciones respecto al LOD (Nivel de Desarrollo por sus siglas en inglés), en particular un aspecto fundamental y es que el común de la gente tiende a confundir *Nivel de Desarrollo* con *Nivel de Detalle*. El texto de la BIMForum dice lo que sigue:

LOD a veces se interpreta como Nivel de detalle en lugar de Nivel de desarrollo. Esta especificación utiliza el concepto de nivel de desarrollo. Hay diferencias importantes El nivel de detalle es esencialmente la cantidad de detalle que se incluye en el elemento del modelo. El nivel de desarrollo es el grado en que se ha pensado la geometría del elemento y la información adjunta, el grado en que los miembros del equipo del proyecto pueden confiar en la información cuando usan el modelo. En esencia, el Nivel de detalle puede considerarse como una entrada al elemento, mientras que el Nivel de desarrollo es una salida confiable.

También se encuentran las definiciones fundamentales de los distintos Niveles de Desarrollo para cada tipo de modelo BIM:

LOD 100

El elemento del modelo puede representarse gráficamente en el modelo con un símbolo u otra representación genérica, pero no cumple con los requisitos para LOD 200. Se puede obtener información relacionada con el elemento del modelo (es decir, costo por pie cuadrado, tonelaje de HVAC, etc.) de otros elementos del modelo.

Interpretación de BIMForum: los elementos LOD 100 no son representaciones geométricas. Los ejemplos son información adjunta a otros elementos o símbolos del modelo que muestran la existencia de un componente pero no su forma, tamaño o ubicación precisa. Cualquier información derivada de elementos LOD 100 debe considerarse aproximada.

LOD 200

El elemento del modelo se representa gráficamente dentro del modelo como un sistema genérico, objeto o ensamblaje con cantidades, tamaño, forma, ubicación y orientación aproximados. La

información no gráfica también se puede adjuntar al Elemento Modelo.

Interpretación de BIMForum: en este LOD, los elementos son marcadores de posición genéricos. Pueden ser reconocibles como los componentes que representan, o pueden ser volúmenes para la reserva de espacio. Cualquier información derivada de elementos LOD 200 debe considerarse aproximada.

LOD 300

El elemento del modelo se representa gráficamente dentro del modelo como un sistema, objeto o ensamblaje específico en términos de cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación. La información no gráfica también se puede adjuntar al Elemento Modelo.

Interpretación de BIMForum: la cantidad, el tamaño, la forma, la ubicación y la orientación del elemento tal como se diseñó se pueden medir directamente desde el modelo sin hacer referencia a información no modelada, como notas o llamadas de dimensión. Se define el origen del proyecto y el elemento se ubica con precisión con respecto al origen del proyecto.

LOD 350

El elemento del modelo se representa gráficamente dentro del modelo como un sistema, objeto o conjunto específico en términos de cantidad, tamaño, forma, ubicación, orientación e interfaces con otros sistemas de construcción. La información no gráfica también se puede adjuntar al Elemento Modelo.

Interpretación de BIMForum. Se modelan las partes necesarias para la coordinación del elemento con elementos cercanos o adjuntos. Estas partes incluirán elementos tales como soportes y conexiones. La cantidad, el tamaño, la forma, la ubicación y la orientación del elemento tal como se diseñó se pueden medir directamente desde el modelo sin hacer referencia a información no modelada, como notas o llamadas de dimensión.

LOD 400

El elemento del modelo se representa gráficamente dentro del modelo como un sistema, objeto o ensamblaje específico en términos de tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación con información detallada, de fabricación, ensamblaje e instalación. La información no gráfica también se puede adjuntar al Elemento Modelo.

Interpretación de BIMForum. Un elemento LOD 400 se modela con suficiente detalle y precisión para la fabricación del componente representado. La cantidad, el tamaño, la forma, la ubicación y la orientación del elemento tal como se diseñó se pueden medir directamente desde el modelo sin hacer referencia a información no modelada, como notas o llamadas de dimensión.

LOD 500 [NO UTILIZADO]

El Elemento Modelo es una representación verificada en campo en términos de tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación. La información no gráfica también se puede adjuntar a los Elementos del modelo.

Interpretación de BIMForum. Como LOD 500 se relaciona con la verificación de campo y no es una indicación de progresión a un nivel más alto de geometría de elementos del modelo o información no gráfica, esta Especificación no la define ni ilustra.

Está claro entonces, que es necesario especificar en cada caso el Nivel de Desarrollo que se quiere lograr en cada representación BIM. En este caso de estudio el LOD para el modelo que se podría llegar a representar es el LOD300, ya que no se pretende generar tanto detalle de la construcción existente debido a la enorme cantidad de tiempo que insumiría llegar al desarrollo 400. Se entiende que este modelo será geométrico y representativo de la realidad pudiendo realizar medidas directamente sobre el, siempre y cuando se logre generar el modelo BIM.

Se destaca el hecho de que todos los autores descritos resaltan la necesidad y practicidad de la utilización de tecnologías no invasivas como el escaner láser o la fotogrametría terrestre para la creación de modelos 3D representativos del patrimonio histórico para propender a su conservación y documentación lo más fiel y precisa posible.

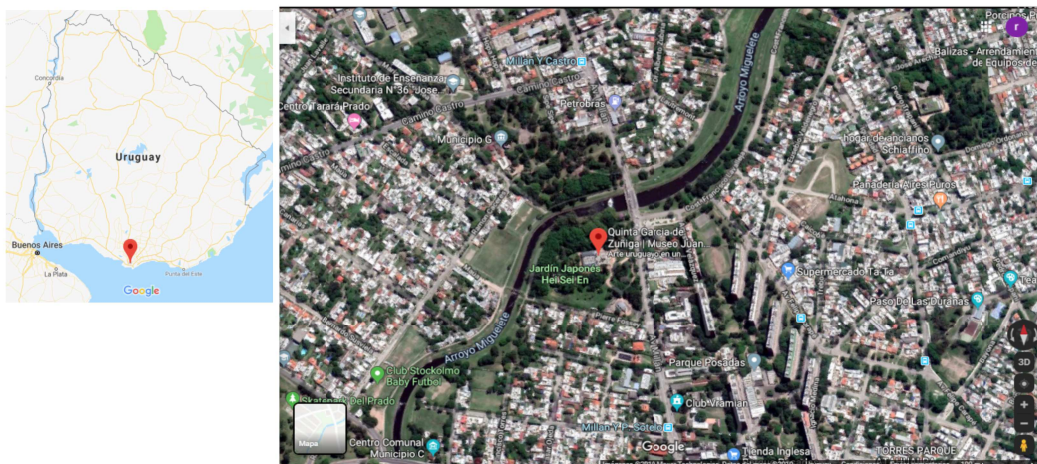
4. CASO DE ESTUDIO: MUSEO JUAN MANUEL BLANES



MUSEO JUAN MANUEL BLANES
Intendencia de Montevideo

Imágen 3: Logo Museo Blanes (blanes.montevideo.gub.uy)

Como se describe en el sitio web oficial del Museo, *el edificio que ocupa el Museo Blanes pertenece al período de desarrollo del siglo XIX de las quintas y villas del arroyo Miguelete de estilos historicistas. El Ingeniero Juan Alberto Capurro, formado en el Politécnico de Turín, proyecta en 1870 una villa para el Dr. Juan Bautista Raffo, propietario del predio. La quinta ocupa una manzana limitada por la Av. Millán, la calle Pierre Fossey y el arroyo Miguelete. Ésta se inspira en las villas italianas del Arq. Palladio y su jardín se organiza de acuerdo a las pautas de la paisajística francesa, en una indiscutible actitud ecléctica.*



Imágen 4: Ubicación del Museo Blanes (google.com/maps)

Pocos años después, en 1872, la quinta es adquirida por Clara García de Zúñiga. A partir de 1886 la quinta pasa por manos de distintos propietarios, siendo el último de ellos Augusto Morales. En 1929, el gobierno municipal de Montevideo la adquiere para destinarla a museo. Eugenio Baroffio es el arquitecto de las obras de reforma y ampliación. Baroffio mantiene y continúa el lenguaje ecléctico historicista del diseño original, dejando intacto el cuerpo frontal del edificio y construyendo dos grandes salas posteriores que rodean un claustro porticado.

El edificio es desde 1975 Monumento Histórico Nacional y testimonio vivo de aquellas villas de fines del siglo XIX, rodeado de un jardín con valiosas especies vegetales en él, que aún hoy están en pie. Este pequeño parque es denominado El Jardín de los Artistas. En 1991 la Asociación de Amigos del Museo Blanes crea el Espacio Cultural Barradas en las antiguas caballerizas de la villa, en el predio sobre la calle Pierre Fossey. En 2001 se construye el Jardín Japonés detrás del edificio del Museo. Este jardín es diseñado por el paisajista japonés Haruho Leda.

En la misma página, hay una pequeña reseña del barrio donde está situado y una cronología sobre la historia del predio y del edificio. Por otra parte, se describe el espacio interior y las distintas salas de exposición: *el Museo Blanes tiene 3476 metros cuadrados distribuidos en dos plantas. La planta baja cuenta con seis espacios de exposición: sala Juan Manuel Blanes, sala Pedro Figari, sala Dumas Oroño, dos salas/galerías y una sala de exposiciones temporarias. También cuenta con un espacio de recepción, un hall principal y un claustro semitechado. En la planta subsuelo se encuentran los depósitos donde está la colección del museo.*



Imágen 5: Fachada Principal del Museo (blanes.montevideo.gub.uy)

5. METODOLOGÍA

El planteo para la ejecución de este trabajo tiene varias etapas. Muchas son las metodologías propuestas para proyectos de escaneo, pero en general se pueden caracterizar cuatro etapas diferentes. La primera tiene que ver con la elección del sitio e instrumental. El sitio elegido se detalló en el apartado anterior y el instrumental utilizado se describe en el apartado siguiente. Como se mencionó antes, se utilizaron dos equipos diferentes con características y modos de trabajo distintos, uno móvil y el otro estático.

La segunda etapa representa el trabajo de campo. En esta etapa, se realiza el escaneo propiamente dicho. Dependiendo del instrumental, se debe elegir el modo a emplear. Con el equipo móvil se elige el punto o zona donde se comienza y finaliza el escaneo y el camino a seguir para completarlo, mientras que con el equipo estático se deben elegir los puntos de estación donde se instala el mismo. Es necesario que entre un punto de estación y otro exista cierto grado de solape para poder hacer el registro en gabinete correctamente. Una vez finalizada esta etapa, se pasa a la siguiente.

La tercera etapa conlleva el trabajo de gabinete donde se realiza el procesamiento de los datos obtenidos. En este caso en particular, ambos equipos tienen softwares distintos y modos distintos de procesamiento. El ZEB-HORIZON procesa los datos en forma automática utilizando el software GeoSlam HUB donde se hace el registro de toda la nube y el coloreo de los puntos. El escaneo realizado con el Trimble TX5 puede procesarse con varios programas, el utilizado en este caso es Faro SCENE. Este programa hace el registro en forma semi automática, ya que presenta varios pasos para hacerlo intercalando entre procesamiento manual y refinamiento automático.

La última etapa, asociada al trabajo de gabinete, refiere a la presentación de resultados y creación de entregables, como son la maqueta virtual, dibujos técnicos de plantas, alzados, etc, así como la generación de contenido audiovisual. Se utilizaron otros programas de modelado como SketchUp y la extensión Undet asociada al mismo. SketchUp tiene aplicaciones que permiten la creación de láminas para impresión, como Layout, con esto se crean los planos de plantas, fachadas y cortes, además de imágenes en perspectiva del modelo. El programa permite además, la generación de videos a partir de escenas que se obtienen de posicionar la imagen en distintos puntos del modelo, creando capturas de pantallas y uniendo todas las escenas para crear el video animado.

5.1. INSTRUMENTAL

Para la realización del escaneo se utilizaron dos equipos TLS distintos, como ya se ha mencionado. El primero es un equipo móvil, el modelo ZEB-HORIZON de la marca GeoSLAM. El segundo es un equipo estático modelo TX5 de la marca Trimble. La elección del instrumental corresponde en primer lugar a la disponibilidad de los mismos, siendo ambos cedidos a modo de préstamo por sus respectivos dueños; el primero de una empresa privada y el segundo de la Universidad de la República. Además, los dos equipos son distintos en su forma de uso y metodología de relevamiento, por lo que se pueden hacer distintas comparaciones y

comprobaciones. Una de las principales diferencias fácilmente reconocible entre ambos se destaca por el tiempo de toma de datos, mientras que con el equipo móvil se escaneó todo el edificio en 20 minutos, con el equipo fijo fueron necesarias 2 horas para completar el relevamiento exterior. Otras diferencias tienen que ver con la cantidad de puntos y calidad de las nubes, pero eso se aprecia luego del procesamiento.

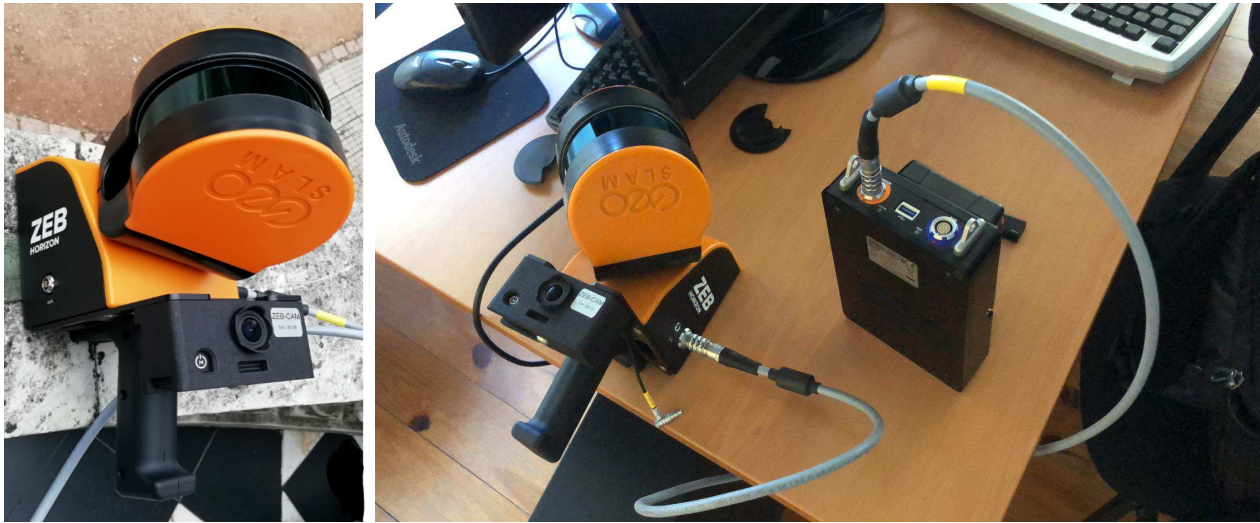
En la siguiente tabla se detallan las principales características técnicas de ambos equipos según datos extraídos de sus respectivos catálogos:

	ZEB-HORIZON	TRIMBLE TX5
Distancia de medición:	100m	0.6 a 120m
Clase de protección	IP54	N/A
Procesado	Post	Post
Almacenaje de datos	Memoria interna en mochila o correa lateral	SD, SDHC™, SDXC™; 32 GB tarjeta incluida
Peso	1.3kg	5.0kg
Nube de puntos coloreada	si	si
Intensidad	si	si
Referenciación de imágenes	si	si
Puntos escaneados por segundo	300.000	976.000
Número de sensores	16	Multi-Sensor
Comienzo de escaneo automático	si	no
Exactitud relativa	1 - 3cm*	±2 mm a 10 m y 25 m, a 90% y 10% de reflectancia
Tamaño de archivo de datos crudos	100-200MB un minuto	N/A

Imagen 6: Tabla de comparación de equipos (Fuente propia con datos de catálogos)

5.1.1. Escaner ZEB-HORIZON

El equipo móvil consta del emisor láser que emite y recibe el haz de luz que rota sobre un soporte con empuñadura, donde se adosa una cámara digital de video. En el soporte, se encuentran los dispositivos IMU que permiten la navegación inercial cuyos datos utiliza el algoritmo de registro de la nube de puntos. Una vez realizado el escaneo, a través de un cable se conecta al disco duro externo que graba los datos recolectados, que luego se descargan utilizando un *pendrive* USB.



Imágen 7: Escáner ZEB-HORIZON (Fuente propia)

Según indica el fabricante, el uso del escaner de 100m de distancia es bueno tanto para relevamientos en el exterior como en el interior de una edificación. ZEB-HORIZON es de uso simple; captura información en forma rápida y el procesamiento de los datos es fácil de realizar. Con su potente tecnología SLAM puede ser utilizado en áreas remotas con señales GPS pobres, como ser áreas subterráneas y ambientes forestados. Este equipo puede ser montado en distintos elementos (ej. bastones), siendo compatible con el uso de tecnología UAV. Con una velocidad de captura de datos de 300.000 puntos por segundo y una exactitud relativa (dependiendo del ambiente) de 1–3cm, el escaner ZEB-HORIZON es apto para una gran variedad de aplicaciones, dentro de las que se incluyen:

- generación de planos en 2D
- cálculos volumétricos 3D
- relevamientos de construcciones
- conversión de datos escaneados a datos BIM
- identificación de objetos

Dentro de las opciones para mejorar el relevamiento de datos, se puede colocar en un bastón extensible y así incrementar el rango de escaneo, así como acceder a espacios difíciles de alcanzar. Para un relevamiento aéreo más completo puede ser montada en un equipo UAV. Cuenta con la posibilidad de adherir una cámara para complementar el escaneo con imágenes de los objetos relevados. Se destaca el hecho de que el registro de la nube se realiza en postproceso, en gabinete, una vez culminado el relevamiento. El relevamiento se realiza de forma fácil, sencilla y cómoda ya que basta con caminar por el espacio que se quiere escanear y permite la toma de datos de manera dinámica sin necesidad de pensar la ubicación donde se instala el instrumento. Estos son algunos de los motivos por el que se eligió este equipo.

5.1.2. Escaner Trimble TX5

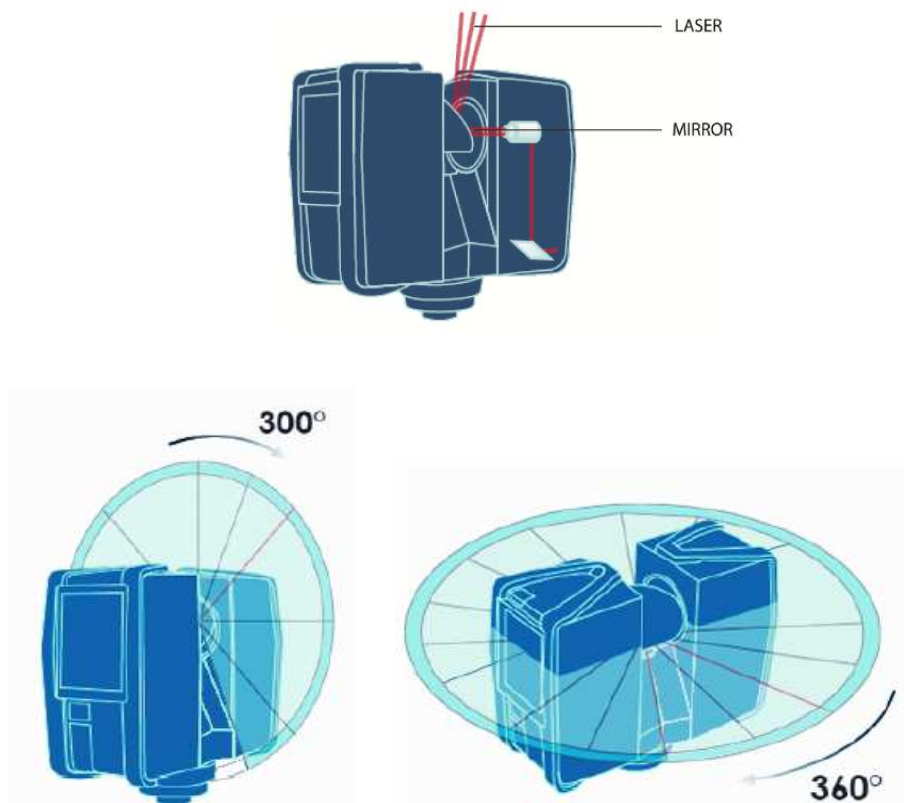
El escáner Trimble TX5 según su ficha técnica, tiene como principales características el ser una solución versátil y rentable, compacto y portátil, posee una cámara a color integrada para escaneo 3D y una pantalla táctil intuitiva.



Imagen 8: Escaner Trimble TX5 (Fuente propia)

Como indica el fabricante, el escáner Trimble TX5 es capaz de llevar a cabo una gran variedad de aplicaciones tales como la captura de información de la condición existente, modernización y renovación de proyectos, rediseño arquitectónico, inspecciones de diseño y comparaciones durante el proceso de construcción. El Trimble TX5 es capaz de medir a velocidades de hasta 976.000 puntos por segundo, a una distancia de 120 metros. El diseño compacto y ligero proporciona flexibilidad y portabilidad, aumentando la productividad en el campo. La intuitiva y sencilla interfaz incorporada permite a los nuevos usuarios convertirse rápidamente en expertos e integrar fácilmente en escaneo 3D en su negocio. Los datos de Trimble TX5 se procesan en el software SCENE. Estos datos son perfectamente importados en el software Trimble RealWorks, para la creación de entregas finales adicionales o transferidos a paquetes de CAD en 3D para su aplicación posterior. Este equipo, es similar a los modelos FARO Focus, siendo SCENE un software de la marca FARO. Esto se debe a que en un breve período de tiempo, Trimble fue propietaria de FARO pero luego se desvincularon, de ahí la similitud entre ambos equipos.

Este es un equipo fijo que se instala en un trípode, consta de un espejo rotatorio que refleja el láser emitido. Junto al emisor está el receptor que recibe el rebote. Tanto el espejo como el cuerpo del equipo giran como se muestran en las imágenes siguiente:



Imágen 9: Especificaciones Trimble TX5 (Manual de usuario)

Las configuraciones en el equipo pasan por crear la carpeta del proyecto, donde se guardan todos los escaneos realizados. En cada posición del escaner, se configuran parámetros de calidad y resolución, esto es, cantidad de puntos medidos y cantidad de rebotes que realiza el láser en cada punto. Estos son los principales parámetros que se modifican y tienen relación directa con el tiempo de toma de datos. A mayor calidad y resolución, más demora la adquisición. Además, se configura también la zona a escanear en grados tanto horizontales como verticales. Otro aspecto es el ajuste de color y luz de la imagen fotográfica, que puede ser distinta para cada imagen, o única para todas y puede variar como hace el ajuste también. El equipo tiene configuraciones predeterminadas que implican parámetros estándares, por ejemplo, para mediciones de interior con distancias menores o mayores a 10 metros o medición en el exterior para distancias menores o mayores a 20 metros.

5.2. TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se realizó en dos etapas, la primera utilizando el escaner móvil y la segunda el escaner fijo. Con el primero, se realizó el relevamiento completo del edificio, exceptuando las zonas de acceso restringido, mientras que con el segundo, para no interferir con demás actividades del Museo, se hizo el escaneo del exterior solamente.

Cabe destacar, que por disposición de la administración del Museo, no fue posible acceder a algunas zonas del edificio, como el subsuelo ni planta alta y azotea. En el subsuelo se encuentra el acervo del Museo, el cual tiene acceso restringido por distintas normas de seguridad e higiene. En la planta alta hay oficinas de administración, mientras que la azotea no es transitable y no se permite el acceso bajo ningún concepto. Pudo haber sido interesante contar con un vehículo aéreo no tripulado (VANT), ya sea con una cámara fotográfica o con un escaner móvil adosado para poder completar el relevamiento, pero no fue posible conseguirlo en el momento de realizar el trabajo de campo. Además, esto insumiría más tiempo y necesidad de aprendizaje de una nueva herramienta y su complemento con el escaner, lo cual podría llevar a la realización de un nuevo trabajo de fin de máster. De todas formas, se consideró que los datos obtenidos eran suficientes para poder completar los objetivos de este trabajo.

5.2.1. PRIMERA ETAPA: RELEVAMIENTO COMPLETO CON ZEB-HORIZON

Se utilizó en este caso el equipo descrito en el apartado anterior contando con la cámara de video adosada para la captura de color. Para lograr un correcto registro, es necesario tomar algunos recaudos al momento de la toma de datos, como por ejemplo, escanear algunas áreas en varias oportunidades, generar circuitos cerrados, empezar y terminar en el mismo sitio, entre otros. Esto es necesario para que el algoritmo SLAM sea más eficiente, de forma de poder registrar las distintas tomas de cada posición. Escaneando las mismas áreas se logra superabundancia de datos y por consiguiente mejorar el ajuste. Por otro lado, cada cierto tiempo se deben generar “loops” o vueltas en si mismo, con el objetivo de reajustar los giróscopos y acelerómetros del dispositivo.

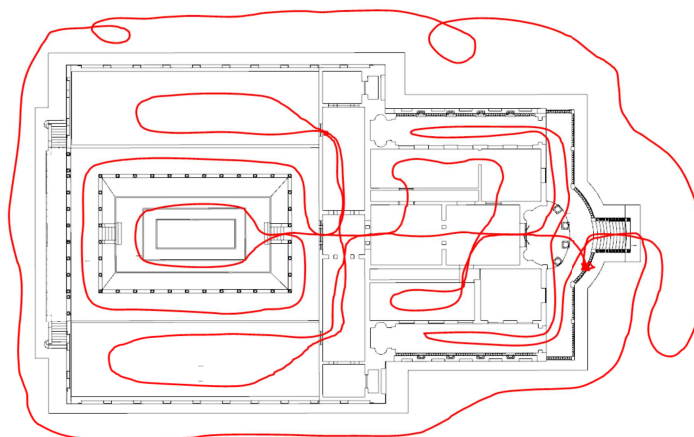


Imagen 10: Esquema de recorrido con equipo móvil (Fuente propia)

Se comenzó el escaneo en la puerta principal del edificio, apoyando el equipo sobre la baranda de la escalera para inicializarlo. Luego se realizó el recorrido por el interior, pasando por todas las salas disponibles y la galería del patio, volviendo a salir al porche del frente. A continuación se hizo el recorrido por las dos galerías exteriores laterales y por último un recorrido por todo el exterior terminando en el mismo sitio donde se comenzó, apoyando el equipo con la misma orientación del comienzo, como se muestra en la siguiente imagen.

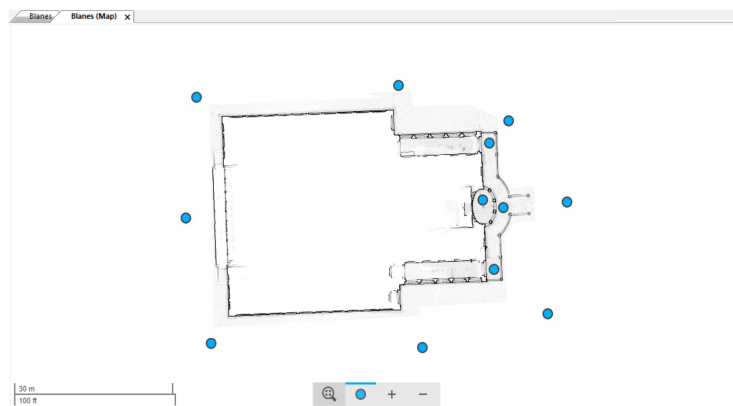


Imágen 11: Uso de ZEB-HORIZON (Fuente propia)

Si bien para el relevamiento basta con caminar por el sitio, cuando se utiliza la cámara para colorear se recomienda de cierta forma apuntar hacia el objeto que se quiere colorear, aunque no es estrictamente necesario ya que la cámara es gran angular y tiene un amplio campo de vista. Con este procedimiento se asegura abarcar todos los rincones del edificio con la cámara.

5.2.2. SEGUNDA ETAPA: RELEVAMIENTO EXTERIOR CON TRIMBLE TX5

Con este equipo solo se realizó el relevamiento del exterior del edificio, ya que no fue posible acceder al mismo debido a la agenda de actividades de la institución. El relevamiento exterior se realizó desde varias posiciones fijas del escaner como se muestra a continuación:



Imágen 12: Overview map - SCENE (Fuente propia)

La imagen corresponde al “overview map” generado por el software SCENE donde los puntos azules indican las posiciones del escaner una vez registrada la nube. Se puede observar las 8 posiciones en que se ubicó el equipo, asegurando el recorrido de todo el exterior, además de las 4 posiciones en la galería de la entrada, para obtener el escaneo completo de la fachada del edificio. Para todas las tomas, se utilizó el mismo juego de parámetros a ajustar en el equipo (calidad y resolución), variando los ángulos o zonas de toma de datos. Mientras que en la posición frontal se hizo el escaneo de 180° en horizontal, en las esquinas se escaneó una zona de 90°, previo correcto posicionamiento del mismo. Este proceso permitió agilizar el proceso de toma de datos, concentrándose en el edificio. El tiempo promedio de cada toma fue de 5 minutos aproximadamente, ya que el área a escanear así como la calidad y resolución de escaneo son factores condicionantes en el tiempo, por lo que las posiciones de las esquinas insumen menos tiempo que las frontales. A su vez, en la galería se hicieron escaneos de 360° en horizontal, lo que insumieron cerca de 10 minutos cada uno. Se destaca el hecho de que se utilizaron parámetros de calidad y resolución media.



Imagen 14: Escaner TX5 instalado en fachada frontal (Fuente propia)



Imagen 13: Escaner TX5 instalado en esquina posterior (Fuente propia)

La imagen 14 muestra la primera posición del escáner de frente al edificio. En este caso se configuró la medición de 360° para obtener toda el área circundante. En la imagen 13 se puede observar el equipo en una esquina posterior del edificio. En este caso se hizo la medición de 90° orientando el origen angular del equipo en la dirección de la posición anterior. Se debe tener en cuenta que desde las distintas posiciones es necesario escanear puntos en común. Estos puntos son la base para el correcto registro de los escaneos, esto es, lograr que todas las posiciones se

unan en un mismo sistema de referencia. En general, no son estrictamente puntos, sino que pueden ser planos o aristas. Este equipo cuenta con esferas objetivo calibradas de fábrica, pero para facilitar la toma de datos y hacerlo más rápido, no se tuvieron en cuenta. Esto es posible porque el edificio presenta elementos bien definidos (puntos, planos, etc). Distinto es el caso cuando se escanean objetos y paisajes más abstractos (sitios arqueológicos por ejemplo), donde no hay elementos bien definidos y se hace imprescindible la utilización de objetivos.

5.3. TRABAJO DE GABINETE

El trabajo de gabinete refiere a las tareas realizadas en la computadora, desde la descarga de datos hasta la presentación de resultados. El postprocesamiento de los datos escaneados requiere experiencia y habilidad para crear de manera rentable la documentación del “as-built” (Brashaw, B. K. et al, 2015). Se puede dividir esta parte en dos etapas diferentes, la primera es el procesamiento de las dos nubes de puntos obtenidas y la segunda etapa refiere a la utilización de éstas en programas de diseño y generación de modelos 3D. El procesamiento se realiza utilizando softwares distintos para cada equipo e implica el registro, limpieza, edición y exportación de las nubes, además se realiza una breve comparación de ambas nubes. Por último se creó el modelo 3D, los planos entregables en formato PDF y la animación audiovisual.

5.3.1. PROCESAMIENTO DE LAS NUBES:

En este caso, se procesó la nube obtenida con el ZEB-HORIZON usando el software propietario GeoSlam HUB, que se compra junto con el equipo. Al ser un equipo prestado, el procesamiento no fue realizado por este autor sino por el dueño del equipo. Una vez obtenido el archivo de la nube, se utilizó Recap de Autodesk para la edición y limpieza de la nube. La nube obtenida con el Trimble TX5 si fue procesada por este autor utilizando el software SCENE de FARO en versiones de demostración que se descargan de la página web. Por último se utilizó el software CloudCOMPARE para el procesamiento de las nubes además de la comparación entre ellas. Este último es un potente software libre para análisis de nube de puntos.

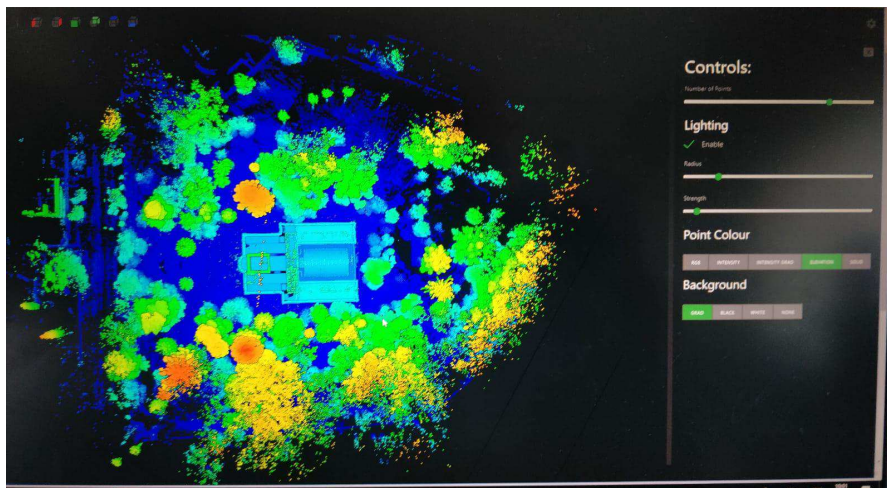
- GEOSLAM HUB (ZEB-HORIZON)

GeoSlam Hub es el software de post procesamiento de datos del escaner móvil ZEB-HORIZON. Es una potente herramienta de cálculo que permite el registro de la nube de puntos en cada posición del escaner. Se utiliza el proceso SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), que consiste en una serie de pasos con la meta de usar el ambiente para actualizar la posición de un robot (Riisgard, S. & Blas, M. R., 2005). Este proceso se realiza en forma automática, siendo el software el encargado de reconocer patrones y elementos del ambiente (puntos, líneas, planos, etc) en las distintas posiciones del escaner para realizar el registro, además de los datos de navegación inercial del equipo (IMU).

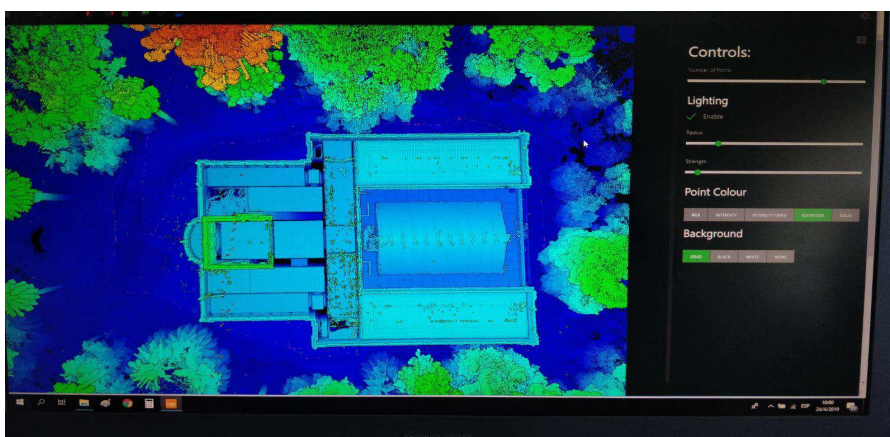
Una vez descargados los datos del disco duro externo del equipo, se importan al software y este hace el proceso en una interfaz sencilla e intuitiva. Si se cuenta con datos de imagen o filmación, este software también colorea la nube. Para este trabajo, se utilizó la cámara disponible

adosada en la parte frontal del equipo, por lo que fue posible colorear la nube. Para finalizar se exporta la nube de puntos del formato propietario a un formato de intercambio de datos de escaner. Este archivo tiene la extensión *.las* o *.laz*, que se lee en la mayoría de los programas de utilización de datos de escaner. En particular, el archivo obtenido en formato *.laz* tiene un tamaño de 1.89 GB.

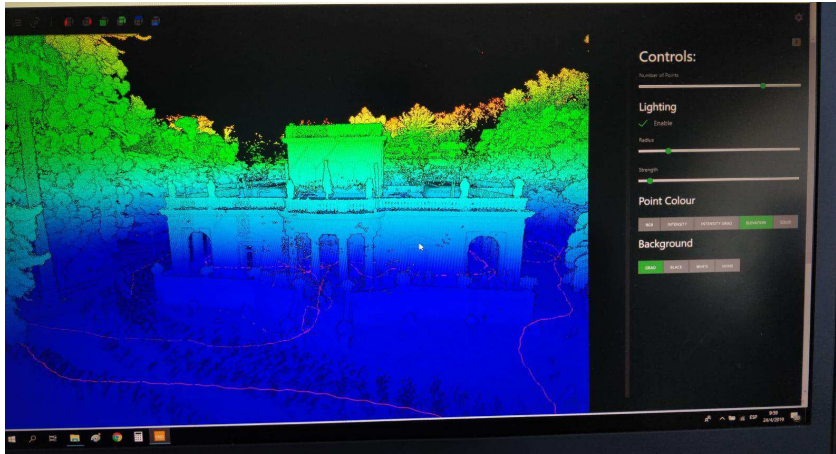
Las imágenes que siguen, son capturas de pantalla de la nube ya registrada y coloreada, aunque en la visualización se colorea según altura de puntos, correspondiendo el azul a los más bajo y el rojo los puntos más altos. Estos valores se pueden setear en el menú de configuraciones. La primera imagen es una vista en planta de toda la nube, la segunda es un acercamiento al edificio y la tercera es una vista frontal del edificio, además se puede observar parte del recorrido realizado (línea fina roja en la última imagen).



Imágen 15: Nube en GeoSLAM HUB vista superior (Fuente propia)



Imágen 16: Nube en GeoSLAM HUB vista superior cercana (Fuente propia)



Imágen 17: Nube en GeoSLAM HUB vista frontal (Fuente propia)

Este software tiene varias opciones de visualización de puntos en diversas paletas de colores, como ser por alturas, por intensidad, en blanco y negro, etc. Además hay opciones para el fondo y la iluminación, así como el tamaño de los puntos entre otras. Este software se complementa con otro del mismo fabricante llamado DRAW de GeoSLAM, que permite dibujar directamente sobre la nube generando planos en 2D, pero no fue posible acceder al mismo. GeoSALM HUB es un software intuitivo y de fácil manejo, lo que permite el postproceso de forma transparente y rápida. Respecto al resultado, no se encontró un informe final del mismo, pero si es posible acceder al logfile, donde se muestra el paso a paso en el procesamiento. Se transcribe a continuación parte de este archivo donde se muestra la cantidad de puntos procesados que asciende a 197.479.531 puntos:

```

Colour Viewer Generation: INDEXING: 195.000.000 points processed; 195.000.000 points written; 2.964,13 seconds passed
Colour Viewer Generation: INDEXING: 196.000.000 points processed; 196.000.000 points written; 2.967,05 seconds passed
Colour Viewer Generation: INDEXING: 197.000.000 points processed; 197.000.000 points written; 2.970,26 seconds passed
Colour Viewer Generation: closing writer
Colour Viewer Generation:
Colour Viewer Generation: conversion finished
Colour Viewer Generation: 197.479.531 points were processed and 197.479.531 points ( 100% ) were written to the output.
Colour Viewer Generation: duration: 3.058,295
Colour Viewer Generation: Viewer Data createdColour viewer Generation: Complete - nullcolourize complete: [ 'Created/Found pro
, timestamps: true, intensities: true, spatial_decimation: 0, enhance_colour: true, colour_neighbours: 3, c
EXPORT CLOUD: Ignored: 0/197479531
=====
\AppData\Local\geoslam-data\2019-04-12_15-51-48.geoslam' } ]EXPORT CLOUD: error: bad allocation
EXPORT CLOUD: Results: Created processing log,Export complete: 1EXPORT CLOUD: Error: 1EXPORT CLOUD:
EXPORT CLOUD: Results: Created processing log,Export complete: 0=====
dotgeoslam_file: 'C:\Users\Usuario\AppData\Local\geoslam-data\2019-04-12_15-51-48.geoslam' } ]EXPORT CLOUD: error: bad i
EXPORT CLOUD: Results: Created processing log,Export complete: 1EXPORT CLOUD: Error: 1=====
.laz', dotgeoslam_file: 'C:\Users\Usuario\AppData\Local\geoslam-data\2019-04-12_15-51-48.geoslam' } ]EXPORT CLOUD: er
EXPORT CLOUD: Results: Created processing log,Export complete: 1EXPORT CLOUD: Error: 1

```

Imágen 18: Logfile del procesamiento con GeoSLAM HUB (Fuente propia)

- RECAP

Una vez obtenida la nube de puntos procesada con el software anterior y luego de exportar la misma en formato *.laz*, se utilizó el software ReCAP de Autodesk para la limpieza de la misma. Este software tiene varias herramientas para edición de la nube de puntos como la visualización de distintas formas (en color RGB, en blanco y negro, por intensidad, etc), la selección de puntos (polígonos, rectángulos, etc), también herramientas de filtrado y tamaño de puntos, así como Cajas de Límites y transformación de sistemas de coordenadas, y demás herramientas comunes a otros

programas. En particular se destaca la transformación del sistema de coordenadas como una herramienta útil para cambiar el origen del sistema y adecuarlo al objeto, permitiendo que los planos de muros y pisos sean coincidentes con alguno de los ejes, lo que facilita bastante al momento de la creación de los modelos. En la siguiente imagen se puede ver la nube completa importada sin ningún tipo de edición:

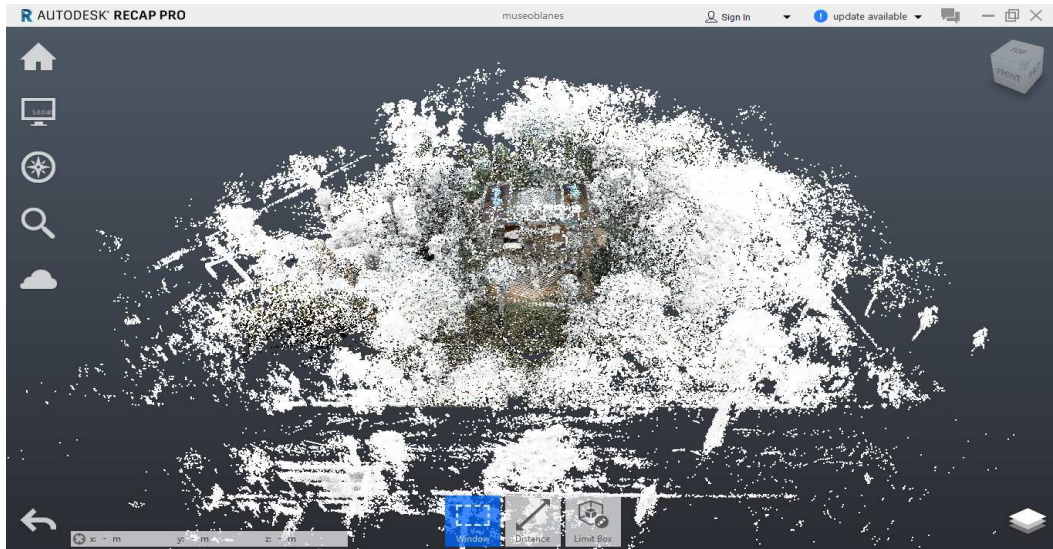


Imagen 19: Nube de puntos en RECAP (Fuente propia)

Se pueden observar en blanco puntos correspondientes a árboles y zonas distantes del recorrido del escáner, donde si bien el láser pudo encontrar el objeto, no así la imagen de la cámara, por lo que no se pudo colorear el punto. En el centro de la imagen se observa el edificio del Museo Blanes. En la imagen que se muestra a continuación, se puede ver la nube limpia, es decir, con puntos eliminados. Los puntos que se eliminan son los que se consideran ruido y no aportan información útil para la generación del modelo, como los puntos distantes y rebotes en árboles entre otros.

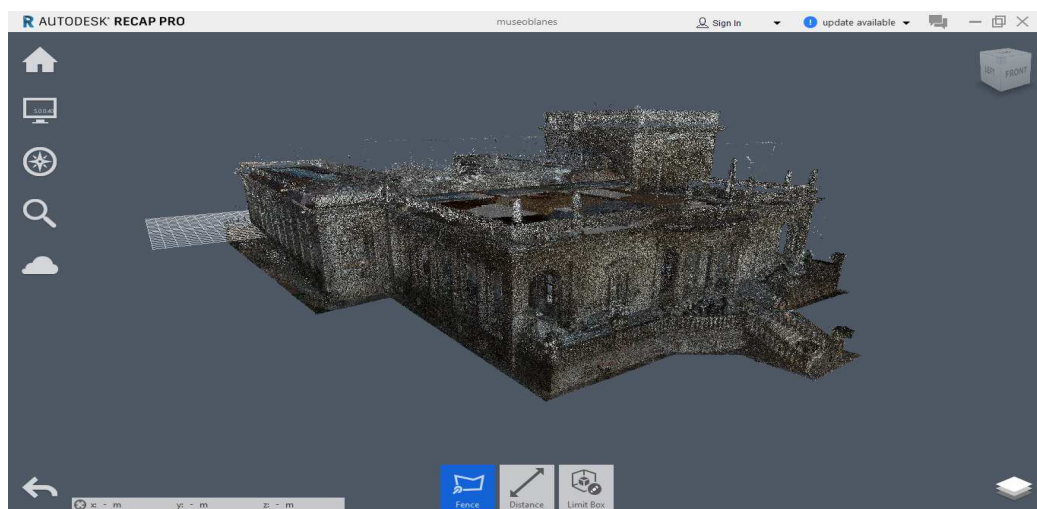


Imagen 20: Nube de puntos depurada en RECAP (Fuente propia)

Con la nube “limpia” no se aplicó ningún tipo de filtro, como para eliminar puntos repetidos o mejorar la visualización de los mismos, por lo que la calidad de la nube en este momento puede no ser la mejor. El archivo final tiene la extensión *.rcp* que puede ser utilizado en distintos programas como en este caso, Revit y SketchUp.

- SCENE

Este software se utilizó para el procesamiento de los datos de escaner obtenidos con el equipo Trimble TX5 en modo demostración por períodos de 30 días descargados desde la página web. El flujo de trabajo consiste en la creación del proyecto y la importación de los archivos crudos. Los archivos se pueden importar en forma manual, pero también hay una opción para importación automática al insertar la tarjeta de memoria SD en la ranura. Cuando se inicia el software, éste reconoce la tarjeta y comienza la descarga. Si el proyecto fue correctamente creado en su carpeta correspondiente en el trabajo de campo, todos los escaneos se muestran en un solo proyecto. De lo contrario, es necesario depurar los escaneos realizados en otros proyectos.

Como se mencionó antes, en el trabajo de campo todos los escaneos se realizan en forma independiente lo que resulta en nubes de puntos independientes por cada posición del escaner. En el software, estas nubes de puntos se muestran todas superpuestas en un mismo punto origen como se muestra en la imagen que sigue. La principal tarea en la primera etapa del procesamiento de la nube es realizar el correcto registro, esto es, colocar cada nube en su sitio correcto. La imagen muestra una de las vistas del software que se conoce como “vista de correspondencia” y se observa la posición espacial de cada escaneo con respecto al otro, coloreando de forma distinta cada uno. La imagen entonces, es una superposición de escaneos donde no se distingue la forma del edificio ni árboles, etc.

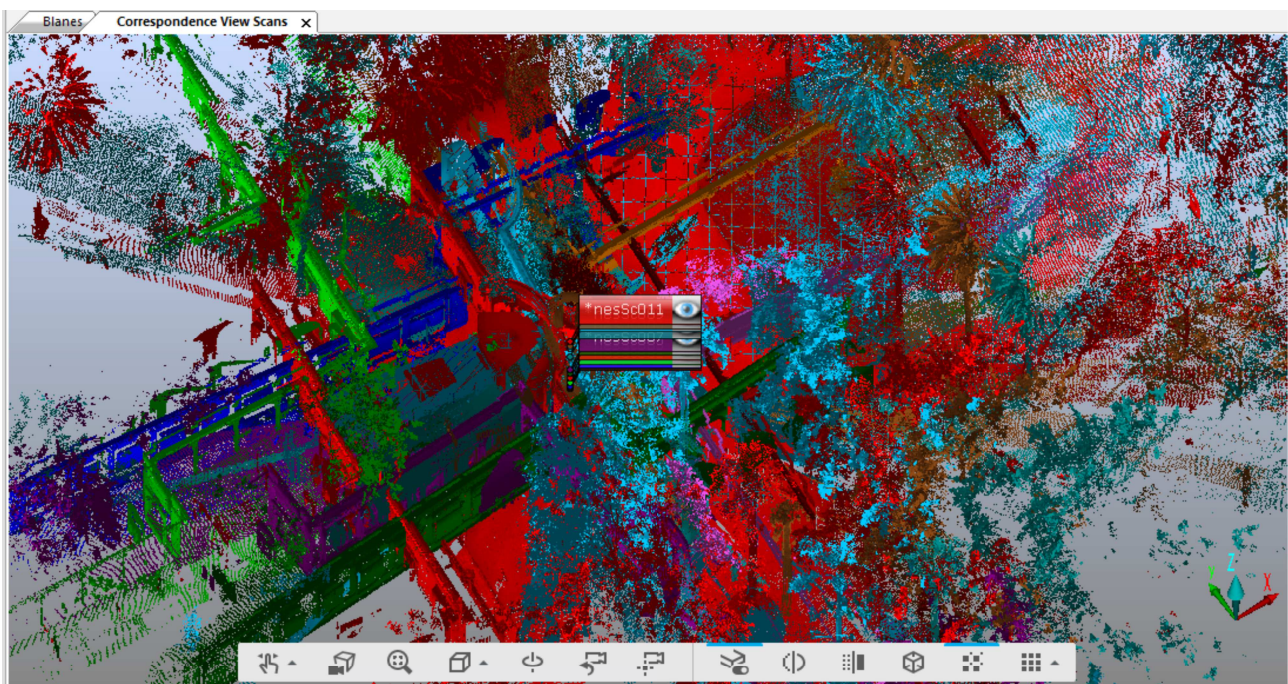
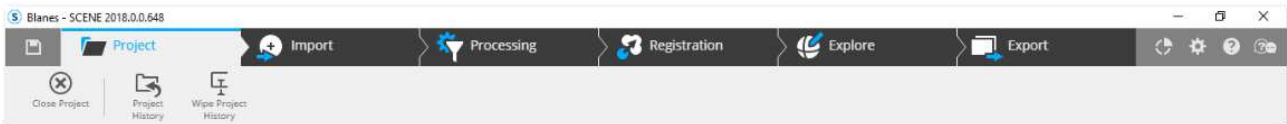


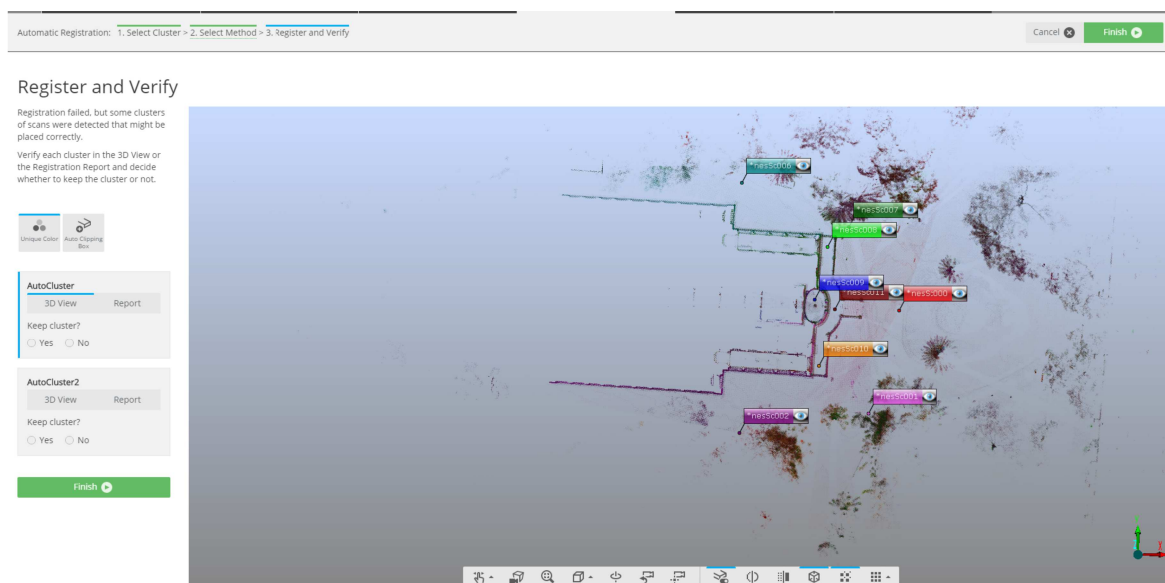
Imagen 21: Vista de Correspondencia sin procesar - SCENE (Fuente propia)

El siguiente paso en el proceso de la nube es el registro. En las primeras versiones de SCENE, los procedimientos eran engorrosos y poco intuitivos, siendo a veces difícil encontrar las funciones correctas para cumplir con el objetivo. Las versiones más actuales permiten un flujo de trabajo bien direccionado e intuitivo, con un menú por pasos:

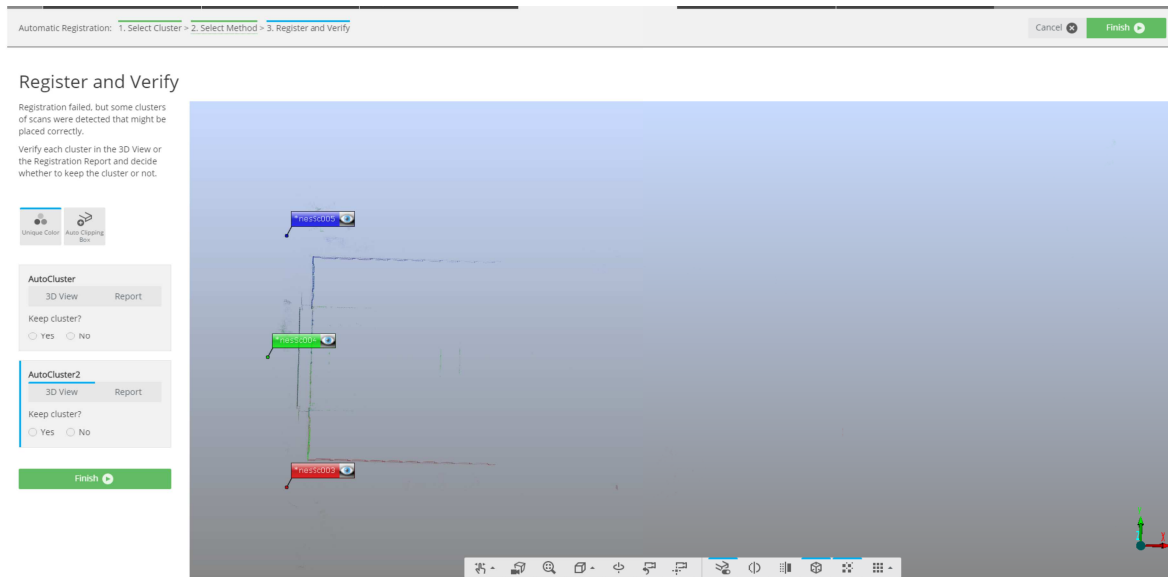


Imágen 22: Menú superior de opciones - SCENE (Fuente propia)

Los distintos pasos se muestran en la línea superior del programa a modo de guía. El primer paso indica la gestión de proyectos, donde se puede crear nuevos proyectos y revisar el historial de los mismos. El segundo paso implica la importación de archivos, tanto de escaneos crudos como de proyectos enteros o parte de otros proyectos que intervienen en el actual. Una vez importados los datos, se continúa con el procesamiento de los archivos importados. En el caso de escaneos crudos, el proceso permite seleccionar configuraciones diferentes como por ejemplo colorear o no los escaneos, utilización de filtros por distancia, búsqueda de objetivos, entre otras. Una vez procesados, se pasa a la etapa de registro de los datos. En este punto, también hay varias opciones de registro como registro manual o automático. En general, el software muestra recomendaciones para cada paso. Respecto al registro, la primera recomendación es realizar el registro automático de los escaneos, de forma que el propio software reconoce patrones similares entre escaneos y los une. Al finalizar el registro automático, se presentan los resultados a modo de verificación. De forma automática se generaron 2 Clusters (conjuntos de escaneos) y la verificación permite determinar si es correcto o no este registro tanto visualmente como con una escala de colores (rojo, amarillo y verde):

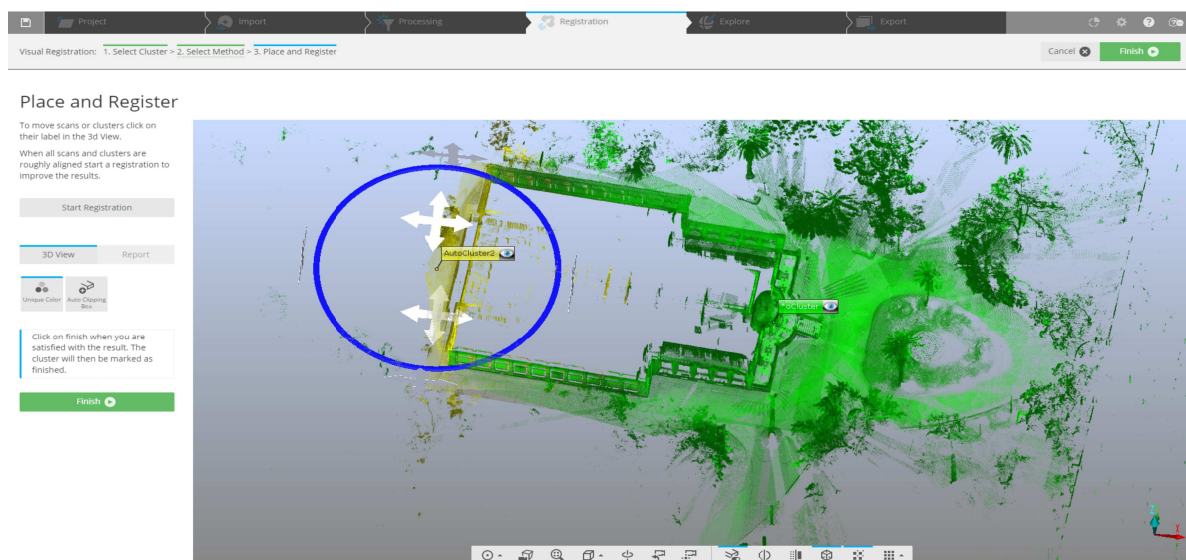


Imágen 23: AutoCluster1 - SCENE (Fuente propia)



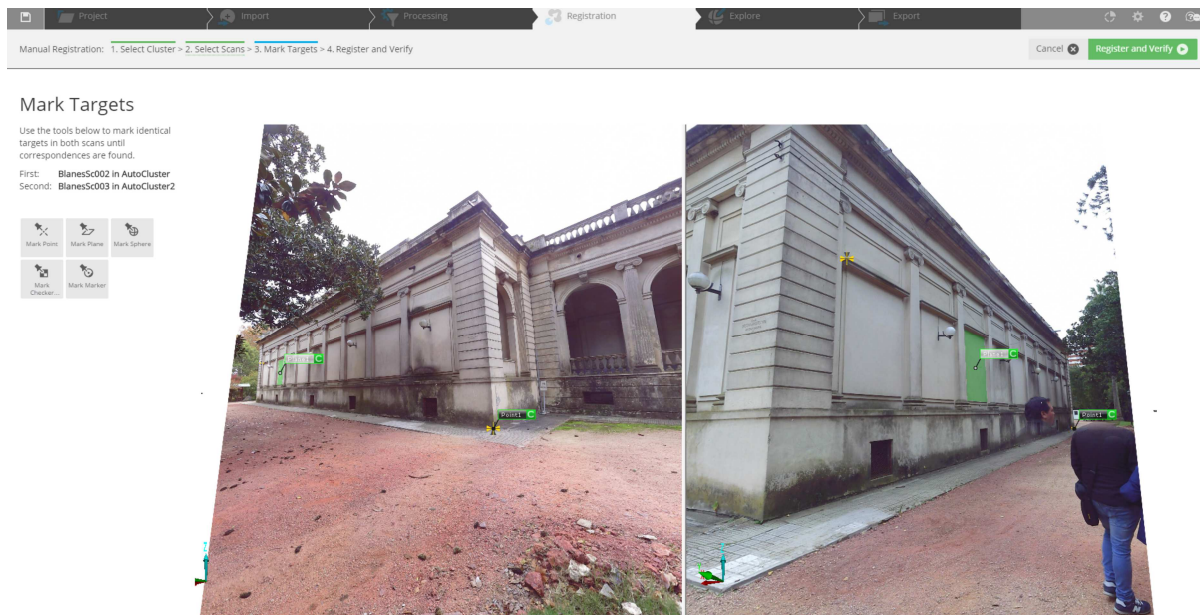
Imágen 24: AutoCluster2 - SCENE (Fuente propia)

En este punto, cuando se acepta el registro automático, se sugiere la optimización en el registro de los Clusters. La optimización se realiza de la forma “Nube a Nube” también en forma automática. De esta manera, se produce un proceso iterativo de aproximación logrando mejorar el registro de los escaneos, mostrando los nuevos resultados. Se decide aceptar este proceso y el software sugiere realizar el registro manual de los escaneos, ya que no fue posible registrar el total de ellos dado que se generaron dos conjuntos separados. Este registro se puede realizar seleccionando puntos homólogos entre un escaneo y otro en forma manual o se puede hacer en forma visual, colocando ambos cluster en sus zonas correspondientes. Se optó por realizar primero el registro visual, situando un cluster sobre el otro en una zona aproximada en un principio y con más detalle al hacer zoom:



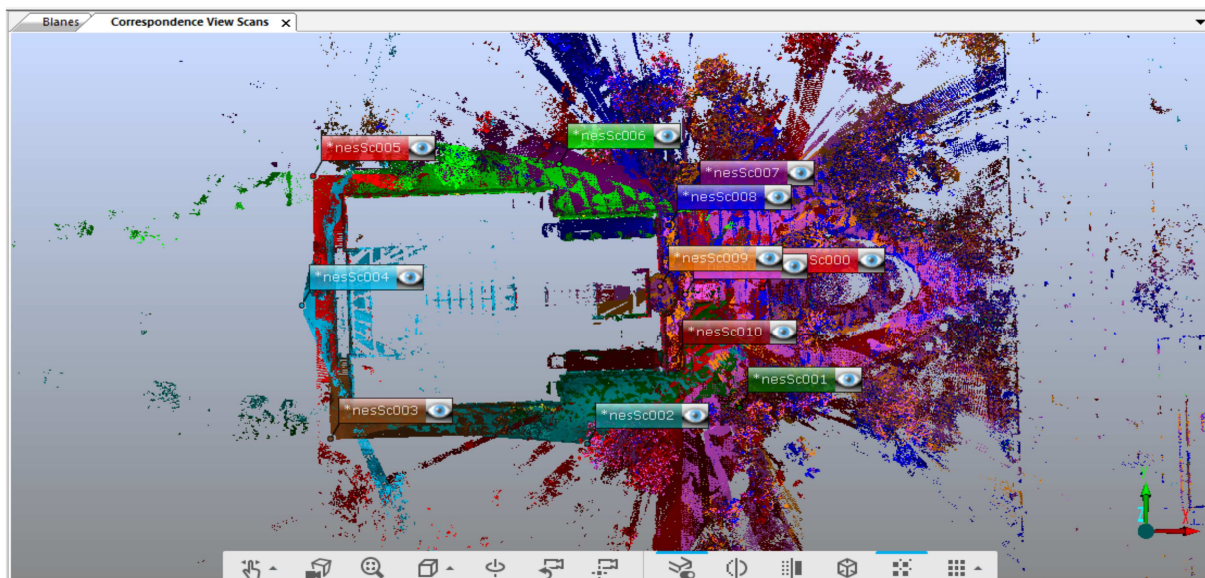
Imágen 25: Registro manual en forma visual - SCENE (Fuente propia)

Y luego el registro manual donde se seleccionan puntos homólogos y planos homólogos, en este caso fue suficiente con seleccionar un plano y un punto:

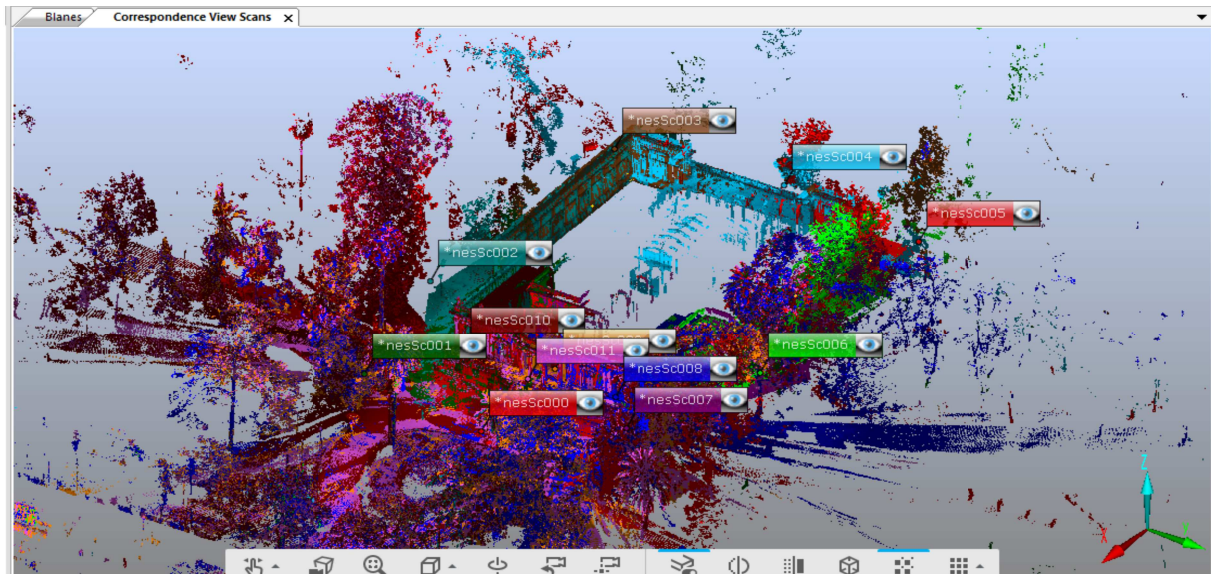


Imágen 26: Registro manual con puntos homólogos - SCENE (Fuente propia)

Al culminar el registro manual, el software recomienda realizar un procesamiento automático general de todos los escaneos ya registrados, para optimizar el registro y una vez completado el registro en las distintas etapas y formas que el software lo permite, se puede ver nuevamente la “vista de correspondencia” donde se aprecia por colores las distintas posiciones del escaner:

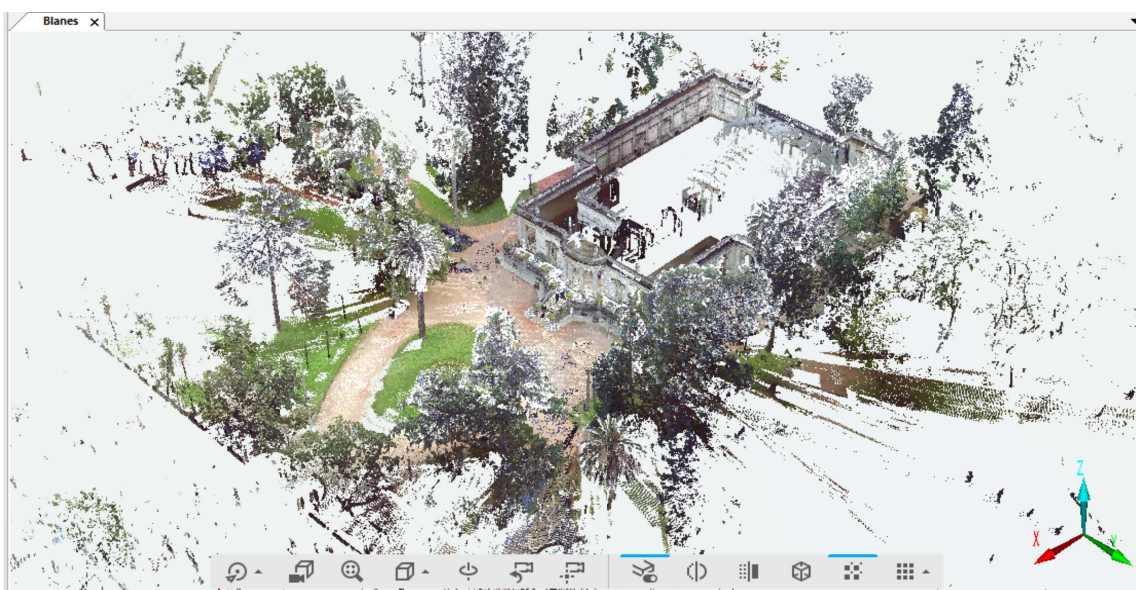


Imágen 27: Vista de correspondencia - SCENE (Fuente propia)



Imágen 28: Vista de correspondencia en perspectiva - SCENE (Fuente propia)

El resultado final del procesamiento con SCENE es la nube de puntos completa en un único sistema de referencia, con todas las posiciones de escaneo registradas y coloreadas. El sistema de referencia se corresponde con el de la primera posición del escáner. Se puede observar en la siguiente imágen el resultado, donde al igual que con el equipo anterior también se ven puntos distantes pero con la salvedad de que están coloreados. Esto se debe a que los puntos que mide, son los que efectivamente puede “ver” el equipo y como la cámara está incluida en el equipo con lo ejes coincidentes, puede fotografiar los mismos puntos que mide. En la imágen se percibe además los “conos de sombra” en blanco que producen los objetos. El “cono de sombra” se corresponde con zonas de interferencia de objetos como árboles, construcciones, etc, que no pueden ser escaneados simplemente porque tienen ese objeto adelante.



Imágen 29: Nube registrada y coloreada - SCENE (Fuente propia)

Para finalizar, es necesario crear lo que se conoce como “Nube de Puntos de Proyecto” donde se unen todos los escaneos, puntos y resultados en una sola nube. Esta nube de puntos de proyecto es la que se utiliza para crear el mallado y exportar a distintos formatos si fuera necesario. Para resumir este procesamiento, se puede ver los resultados en modo de reporte y exportar el mismo en formato pdf, pero también se puede ver un breve resumen en la página principal del proyecto:

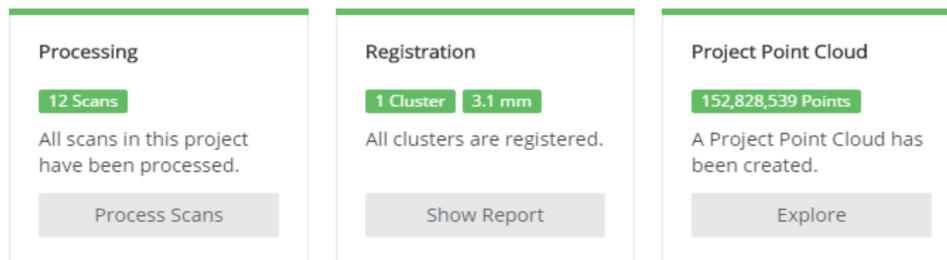


Imagen 30: Resumen de proyecto - SCENE (Fuente propia)

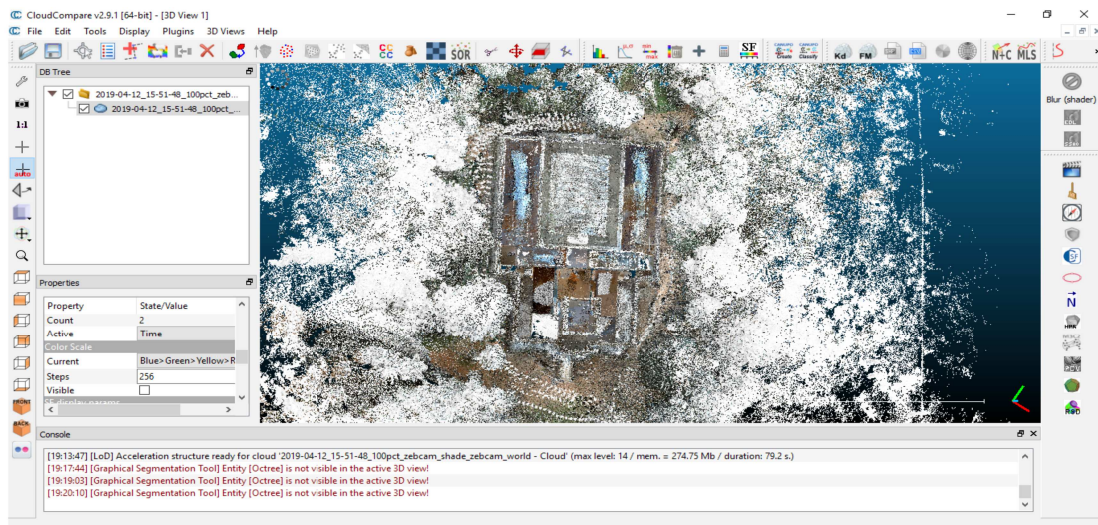
Se destaca el hecho de que este procesamiento es de los escaneos “crudos” de forma que ningún punto fue eliminado. El resultado muestra un total de 152.828.539 puntos escaneados siendo el error medio en el registro de 3.1mm. El reporte completo se puede ver en el ANEXO III, donde se muestran los valores promedio de error de cada escaneo, así como el porcentaje de solape entre escaneos entre otros parámetros de interés.

- CLOUDCOMPARE

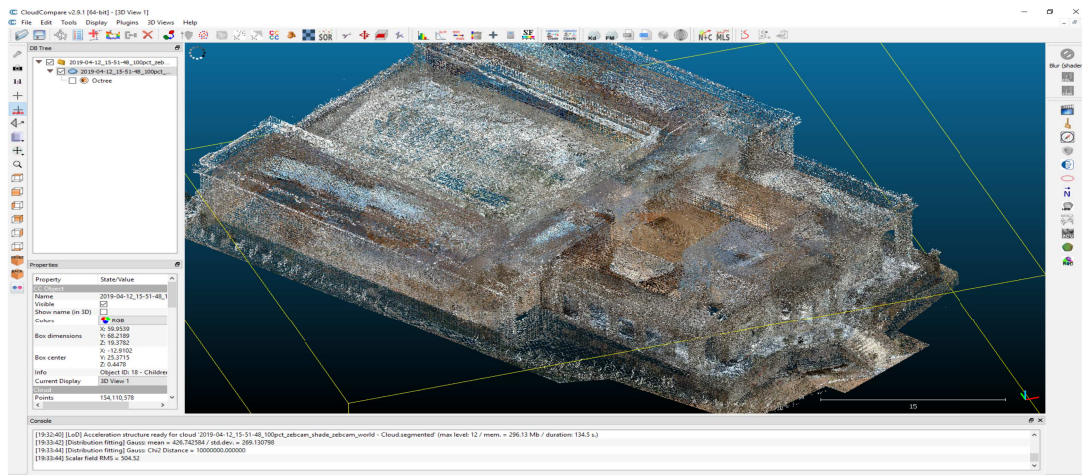
Según sus desarrolladores CloudCOMPARE es un software de procesamiento de nube de puntos 3D (y malla triangular). Originalmente se diseñó para realizar una comparación entre dos densas nubes de puntos 3D (como las adquiridas con un escáner láser) o entre una nube de puntos y una malla triangular. Se basa en una estructura de octree específica dedicada a esta tarea. Posteriormente, se ha ampliado a un software de procesamiento de nube de puntos más genérico, que incluye muchos algoritmos avanzados (registro, remuestreo, manejo de campos de color / normal / escalar, cálculo de estadísticas, gestión de sensores, segmentación interactiva o automática, mejora de visualización, etc.) (www.cloudcompare.org).

Este software permite importar distintos formatos de archivo y dispone de varias herramientas de visualización, edición y procesamiento de nubes. Las herramientas de edición más utilizadas son segmentación (para limpieza de puntos), planos de sección, filtrado para eliminación de ruido y para eliminación de puntos repetidos, a su vez, permite obtener estadísticas de la nube como histogramas, densidades, etc. En este caso se importaron ambas nubes y se limpiaron y calcularon las densidades de ambas nubes.

En las imágenes que siguen se muestra el proceso con la nube de ZEB-HORIZON. Lo primero es importar la nube, luego se eliminaron puntos innecesarios (árboles, pavimento exterior, etc) y luego se aplicó un filtro de vecindad para eliminar puntos próximos:



Imágen 31: Nube ZH en CloudCOMPARE (Fuente propia)



Imágen 32: Nube ZH en CC limpia (Fuente propia)



Imágen 33: Nube ZH en CC filtrada (Fuente propia)

- COMPARACION DE LAS NUBES

La comparación de las nubes se realiza de dos maneras distintas, la primera de forma empírica manual y la segunda mediante el software específico para la comparación de nubes de puntos como CloudCompare.

Se dice que la primera comparación es empírica porque tiene que ver con la experiencia del operador, así como algunos hechos que refieren a la cantidad de puntos obtenidos, el tiempo en la toma de datos y procesamiento, entre otros, que se pueden traducir en la siguiente tabla:

	ZEB-HORIZON	TRIMBLE TX5
Zona escaneada	Total edificio	Fachadas
Cantidad de puntos procesados	197.479.531	152.828.539
Tiempo de toma de datos	20 min	2 hs
Tiempo de procesamiento	3 hs	3 hs
Tipo de procesamiento	Automático	Automático-Manual
Software	GeoSLAM HUB	Faro SCENE
Error Promedio de Punto Procesado	-	3.1 mm

Imagen 34: Tabla comparación de procesamiento de nubes (Fuente propia)

En general, la cantidad de puntos puede ser un aspecto determinante en la calidad del escaneo. Se puede ver que la diferencia en cantidad de puntos procesados con uno y otro equipo es del entorno del 22% pero la superficie escaneada con el primero es significativamente mayor (edificio completo) que con el segundo (solo exterior). En ambos escaneos también hay puntos innecesarios de la zona exterior, como árboles, personas y otros objetos.

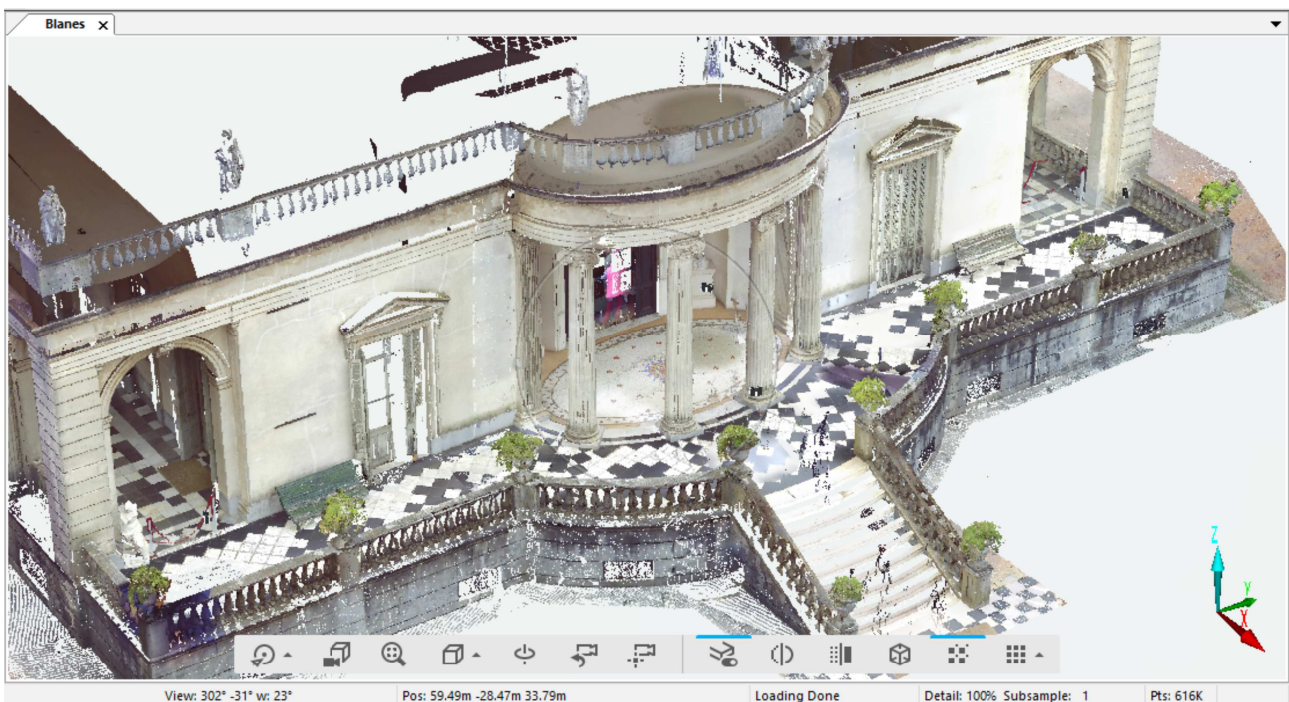
Respecto a las precisiones o calidad, con GeoSLAM HUB no se halló un valor que muestre la calidad del procesamiento o precisión de los puntos o promedio de precisiones de los puntos, pero si se halló en SCENE. En este último se puede generar un informe general del procesamiento donde se indican estadísticas de puntos escaneados y del registro de los escaneos. En este caso se indica como Error Máximo de Punto de 13.9 mm, Error Promedio de Punto de 3.1 mm y Mínimo Solape de 14.1%. Además se muestra una tabla con esos mismos valores pero para cada uno de los escaneos realizados, mostrando también la cantidad de conexiones realizadas entre escaneos:

Scan Point Statistics

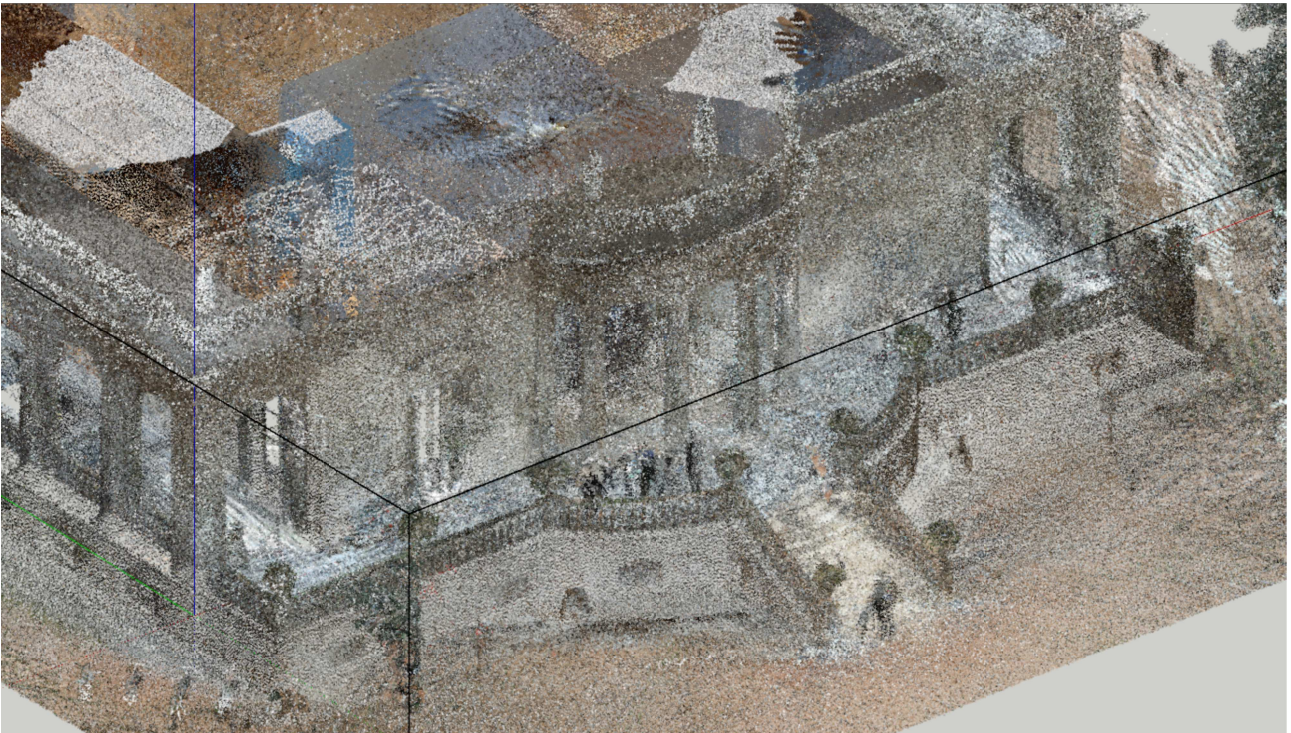
Cluster/Scan	Connections	Max. Point Error [mm]	Mean Point Error [mm]	Min. Overlap
BlanesSc000	6	3.1	2.4	19.1 %
BlanesSc003	2	13.9	7.4	26.9 %
BlanesSc004	2	1.2	1.1	26.9 %
BlanesSc005	1	1.2	1.2	36.1 %
BlanesSc008	4	4.3	3.0	29.3 %
BlanesSc009	4	5.6	3.7	19.1 %
BlanesSc010	5	5.6	3.1	14.1 %
BlanesSc011	6	3.1	2.6	25.5 %
BlanesSc001	4	3.3	2.6	23.7 %
BlanesSc007	4	2.2	1.9	29.0 %
BlanesSc002	3	13.9	6.6	14.1 %
BlanesSc006	1	1.4	1.4	34.4 %

Imágen 35: Resultado de registro de nubes TX5 (Fuente propia)

Otra característica a tener en cuenta en la comparación empírica es la visualización a simple vista de las nubes de puntos. En las imágenes a continuación se observan escenas de detalle de ambas nubes con la cámara aproximadamente en el mismo sitio:

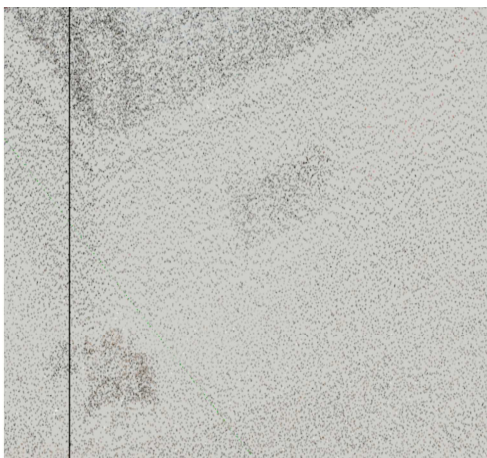


Imágen 36: Perspectiva de nube de puntos con TX5 - SCENE (Fuente propia)



Imágen 37: Perspectiva de nube de puntos con ZEB-HORIZON - SketchUp (Fuente propia)

Se puede ver que en la obtenida con ZEB-HORIZON se distinguen colores, pero no los patrones por ejemplo de baldosas, mientras que con TX5 si se distinguen colores y patrones. Tal vez puede ser porque no se cuenta con el software propietario y el archivo exportado degrada en calidad la nube. Ambos equipos tienen metodologías distintas y formas distintas de capturar datos, lo que provoca también diferencias en la visualización. Mientras que con TX5 se distingue el patrón de barrido de puntos de escaneo (imágen 39), con ZEB-HORIZON no se distingue un patrón (imágen 38), en particular el primero es un equipo estático y el segundo móvil siendo que se recorre el mismo sitio en varias oportunidades desde distintos puntos de vista:

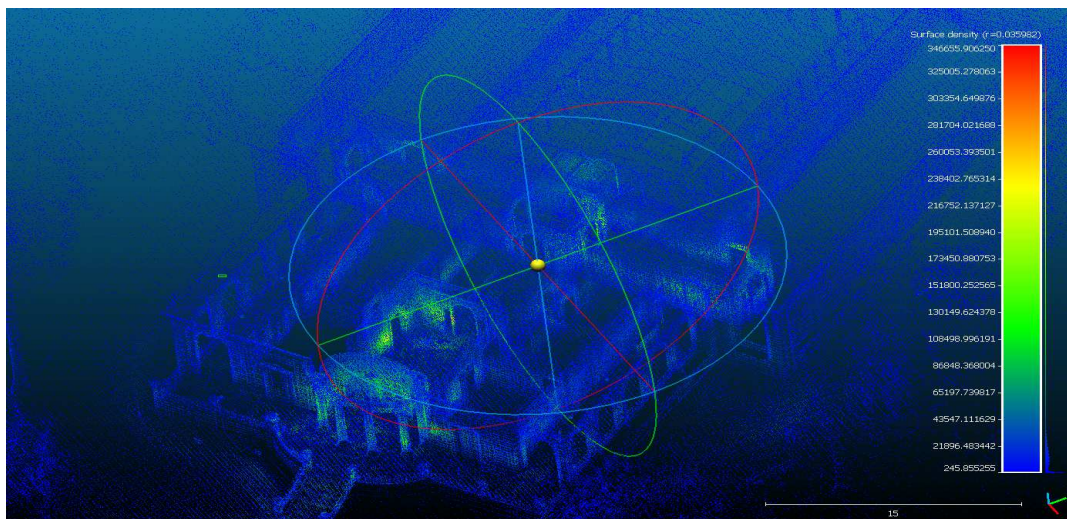


Imágen 38: Detalle - ZEB-HORIZON (Fuente propia)

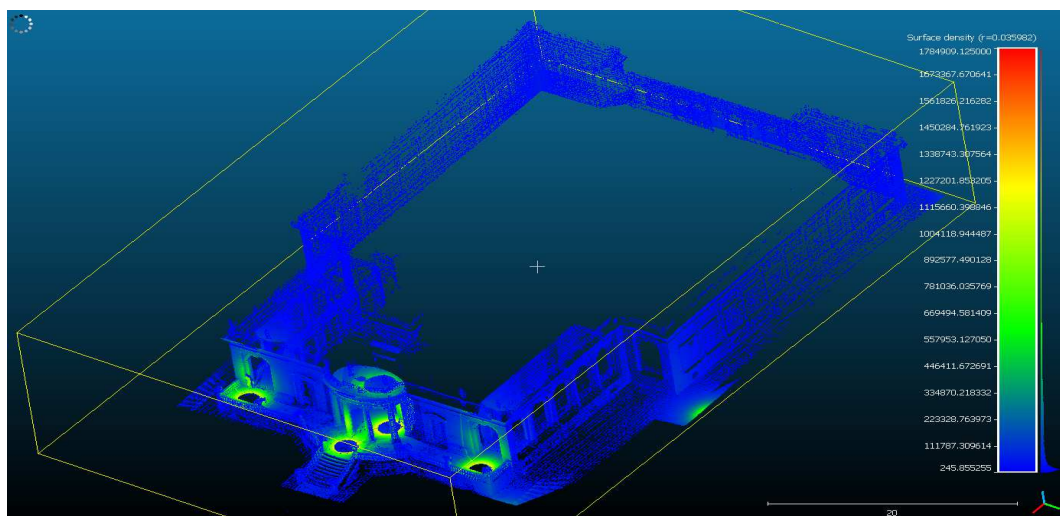


Imágen 39: Detalle - TX5 (Fuente propia)

Por otro lado, un aspecto también importante es la densidad de puntos de cada nube. La densidad se calculó con la herramienta propia de CloudCOMPARE que permite determinar la densidad de puntos en superficie o volúmen. Esta densidad se calcula en base al conteo de puntos vecinos de cada punto especificando un radio de búsqueda. Se realizó el procedimiento para ambas nubes con un radio de 0.0359m y se visualizó el resultado de densidad de superficie como se observa en las imágenes 40 y 41. La imagen 40 es una captura de pantalla de la nube sin que haya terminado de “cargar” completamente la misma en el software, de manera que se pueda ver el interior del edificio. Se puede ver que ambas nubes presentan densidades de puntos similares, en cuanto a cantidad de puntos vecinos. Se observa mayores densidades (en verde) en zonas particulares para cada nube, mientras que en la nube TX5 la mayor densidad está en lugares cercanos a los puntos de estación del escáner, en la nube ZH la mayor densidad de puntos está en el interior del edificio por lo general en las puertas y vanos donde se pasó con el escaner en ida y vuelta:

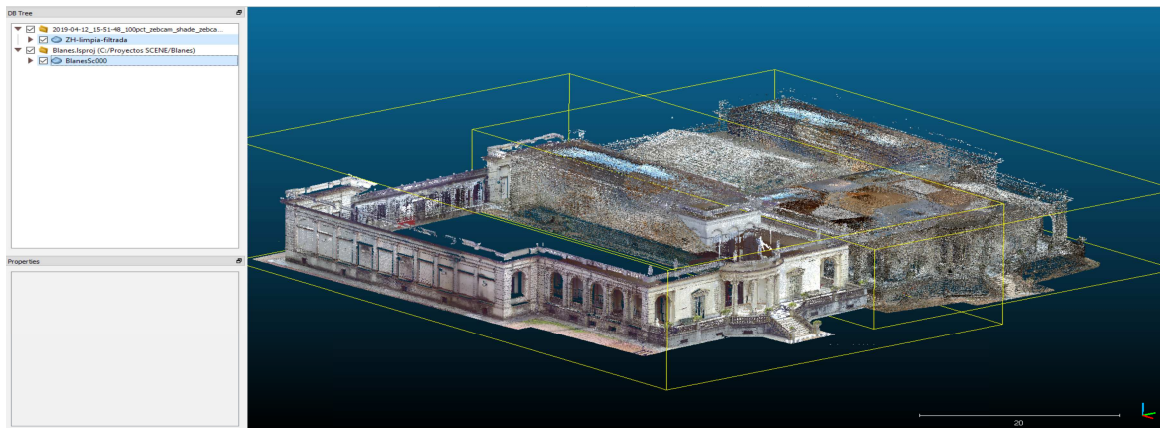


Imágen 40: Densidad de puntos ZH (Fuente propia)



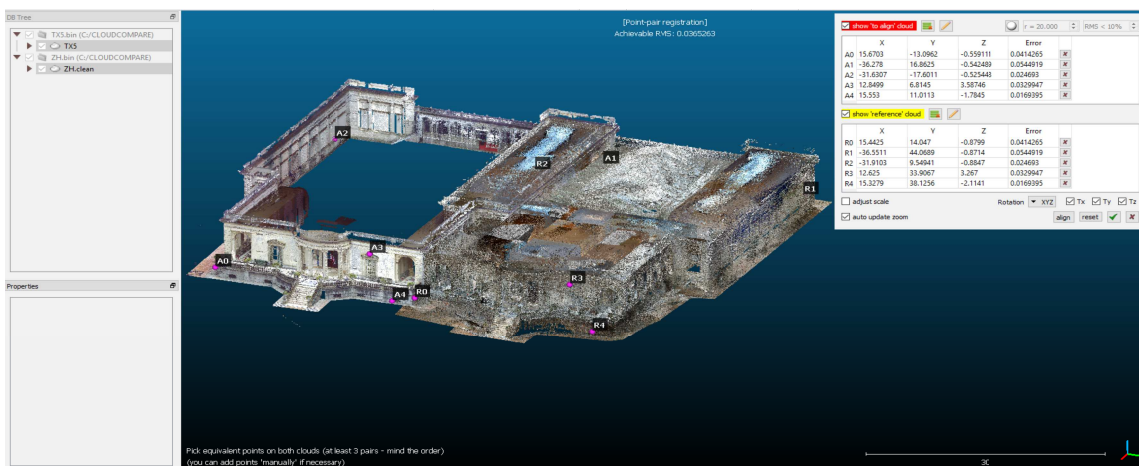
Imágen 41: Densidad de puntos TX5 (Fuente propia)

En la segunda etapa de la comparación, se utilizó el software CloudCOMPARE, que tal como lo indica el nombre, permite realizar la comparación de a dos nubes de forma automática. Esta comparación mide la distancia de separación entre una nube y la otra y muestra el resultado en una escala de colores. En primer lugar es necesario hacer el registro de ambas nubes, esto es, hacerlas coincidentes en el mismo sistema de referencia. Es necesario entonces importar ambas nubes en un mismo archivo:



Imágen 42: Nubes importadas en CloudCOMPARE (Fuente propia)

Y luego realizar el registro o unión en el mismo sistema para hacerlas comparables. El registro se puede hacer de varias maneras. El software recomienda algunos pasos. Lo primero sería tener puntos de control con coordenadas conocidas en ambos sistemas. Si no existen, se pueden buscar puntos homólogos y obtener sus coordenadas directo de las nubes. Se necesitan al menos 3 pares de puntos homólogos para realizar el registro y es importante mantener el orden, de manera que el primer punto elegido en una nube debe ser el primer punto elegido en la segunda nube. Luego de este procedimiento, el software recomienda realizar una refinación del registro de forma automática. En este caso, se hizo de ambas maneras, pero se descartó el resultado automático porque no fue bueno ya que ambas nubes no son estrictamente iguales, porque la TX5 solamente contiene las fachadas del edificio. Este procedimiento arrojó un RMS de 0.03652.



Imágen 43: Registro manual de ambas nubes

Una vez registradas se realiza la comparación propiamente dicha. CloudCOMPARE permite la comparación entre nubes, entre mallas y entre nubes y mallas. Este caso obviamente corresponde a comparación entre nubes. Se utilizó como referencia la nube del ZEB-HORIZON y se comparó así las distancias de la TX5. El resultado es un mapa en colores que indica la distancia entre puntos de una y otra nube mostrando la escala. En la siguiente imagen se aprecia en la escala, el azul indica la menor distancia entre puntos y se puede ver que la mayoría de la nube es azul, lo que muestra un buen resultado en la comparación. Con esto se puede concluir que ambas nubes son comparables en cuanto a la definición del edificio que se quiere modelar.

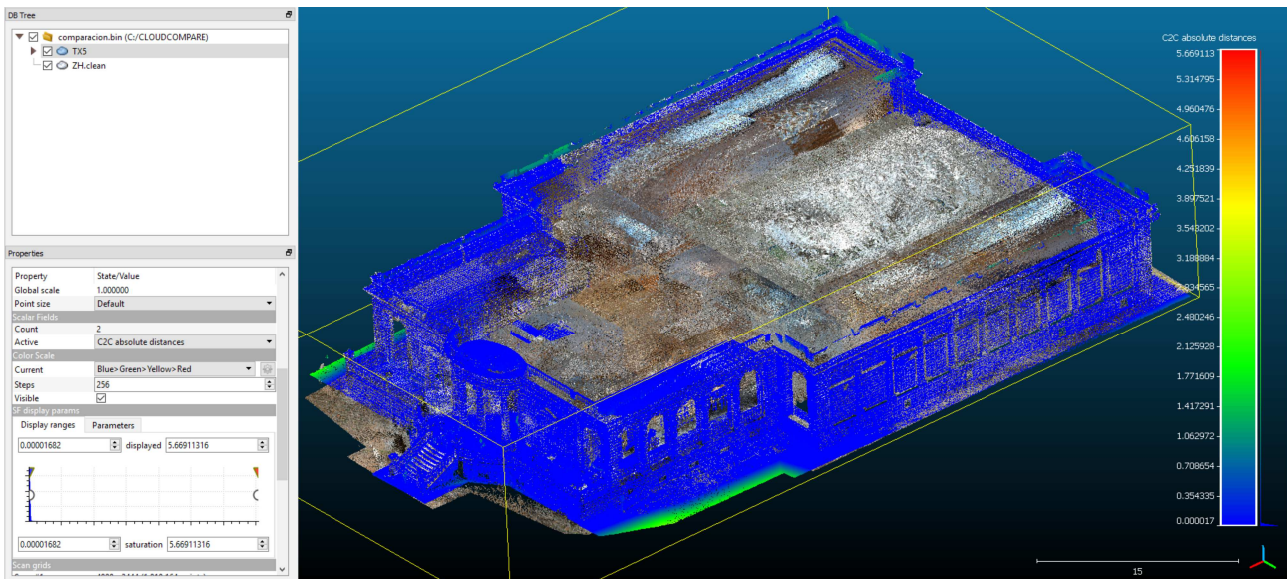


Imagen 44: Resultado de comparación (Fuente propia)

5.3.2. INTEGRACIÓN DE NUBES DE PUNTOS:

Una vez procesadas, registradas y comparadas ambas nubes, se hizo la integración de ambas nubes en una sola. Para esto se utilizó la herramienta MERGE de CloudCOMPARE. Esta herramienta une ambas nubes. El resultado es una única nube con 223.452.184 puntos, que corresponde a la suma de ambas nubes previamente filtradas. Para que ésta sea manejable, se le aplican filtros de ruido (Noise filter) y de repetición de puntos (SOR filter), para eliminar aquellos puntos que se pueden suponer repetidos. Para el filtro SOR (Remoción estadística de Outliers) se utilizan los parámetros 6 para la cantidad de puntos a considerar y 1 como escala de la desviación estándar. Con estos valores se eliminan los puntos que están a mayor distancia que el promedio de la distancia a esos 6 puntos en un entorno de 1 vez la desviación estándar. El filtro de ruido es similar al SOR, pero considerando la distancia a una superficie subyacente. El algoritmo define un plano sobre cada punto y elimina los puntos lejanos a ese plano, se lo puede considerar como un filtro paso-bajo. El resultado arroja una nube "limpia" con 135.086.653 puntos. Esta nube se exporta en formato .laz para su posterior modelado. La imagen 45 muestra parte de las nubes integradas y filtradas mientras se recompone la nube. Se aprecia claramente el patrón de filtrado de puntos generando una cuadrícula casi perfecta en los puntos.



Imágen 45: Nubes integradas y filtradas (Fuente propia)

5.3.3. MODELADO DE LA NUBE:

El modelado de la nube es la etapa del proceso donde se generan los planos, aristas, objetos y volúmenes de forma vectorial, utilizando los puntos escaneados. Distintos softwares fueron probados y utilizados, algunos más sencillos que otros tanto en la manipulación de datos como en la accesibilidad respecto a costos y otras características. En particular, se destacan softwares de acceso libre como CloudCOMPARE o con versiones de demostración, como SketchUp y su extensión para utilización de nubes de puntos Undet, y otros pagos como Revit cuya licencia fue obtenida con la ayuda de uno de sus distribuidores oficiales en la región, o Edgewise que no pudo ser obtenida dado su elevado costo.

A continuación se describirá el proceso utilizado con los programas usados. En realidad, se comenzó utilizando Revit para el modelado por la facilidad con que se pudo obtener, pero resultó ser un programa demasiado potente, robusto y poco amigable para este trabajo, siendo necesario mucho tiempo de aprendizaje para lograr resultados correctos. Por este motivo, se continuó investigando hasta encontrar SketchUp y su extensión Undet que permite la importación de nubes de puntos. Por último se usó CloudCOMPARE con sus potentes herramientas estadísticas.

- REVIT

Revit es un software de diseño integral de proyectos de arquitectura que utiliza el concepto de BIM. Este proceso asegura la máxima coherencia y coordinación entre los distintos componentes de proyecto a nivel de albañilería, instalaciones, estructura, acondicionamiento y

más. A partir de esta coordinación, se puede abarcar todo el proceso de diseño y gestión de toda la información a lo largo del ciclo de vida del edificio. El modelo BIM gestiona el proyecto como una base de datos y permite que los ajustes se reflejen en todo el modelo simultáneamente y detectar o anticipar posibles errores en el proceso de construcción (<https://fa.ort.edu.uy/disenyo-y-gestion-de-proyectos-con-revit>).

El modelado en Revit entonces, está pensado para generar el modelo BIM de la construcción. En este trabajo solamente se pretendió introducir ese concepto y se pudo constatar que el mundo BIM es más complejo que un simple modelado 3D. Revit presenta complejas y variadas formas de ingresar y gestionar datos, siendo necesario definir previamente todos y cada uno de los elementos que se van a generar. Por ejemplo, si se quieren dibujar muros, se debe identificar el tipo de muro (ladrillo, bloques, etc) así como su espesor, entre otras características. Otros aspectos y características BIM pueden ser completadas con el modelo ya definido. En particular es necesario también crear los distintos niveles y planos de corte y demás. Hay también varias opciones de visualización. Revit permite cargar directamente la nube de puntos en este caso en formato *.rcp*, archivo obtenido a partir del procesamiento con Recap. Se muestra a continuación una captura de pantalla del modelo en Revit donde se muestra el Nivel 1 y algunos muros creados:

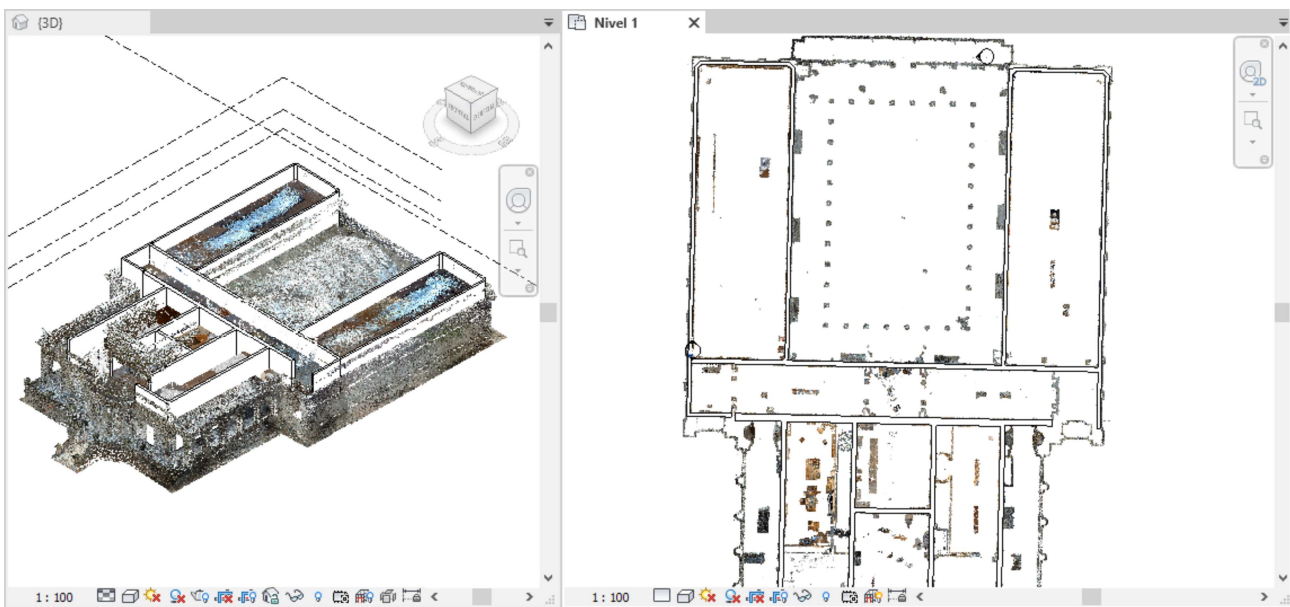


Imagen 46: Modelado en REVIT (Fuente propia)

Los muros creados fueron seleccionados de manera genérica sin colores ni texturas ni otras características. Fue necesario empezar varias veces con el modelado por falta de práctica y experiencia en la utilización del software. Luego de varios intentos, se optó por buscar otras herramientas que facilitaran el modelado. Se halló una extensión para la detección automática de bordes, aristas y planos llamada EdgeWise, viendo videos e instructivos en internet, pero no fue posible adquirir una versión de prueba del mismo.

- SKETCHUP

Dados los inconvenientes planteados antes, se decidió utilizar el software SketchUp que ya había sido utilizado con anterioridad en otras asignaturas de este Máster Universitario. Investigando se pudo hallar un complemento o extensión que permite importar y trabajar con nubes de puntos directamente en el software. Esta extensión es Undet para SketchUp. Se utilizó primero en versión demostración por 2 días de prueba y luego se vió la necesidad de adquirirlo a un precio razonable y accesible en licencias mensuales, mientras que SketchUp se utilizó en versión de demostración por 30 días. El modelado 3D en este software es bastante sencillo e intuitivo, ya que tiene pocas herramientas de diseño como líneas, elementos geométricos simples (rectángulos, círculos, arcos, etc) y herramientas de 3D sencillas (empujar, equidistancia, escalar, etc). También permite modificar los ejes de referencia de manera fácil y cómoda entre otras opciones de visualización (paralela o perspectiva) y vistas estandarizadas (frontal, planta, lateral, etc).

En este software se utilizó primero ambas nubes en forma independiente para realizar las primeras pruebas y luego la nube integrada. Se utilizó la nube integrada para definir la forma y tamaño de todo el edificio, tanto interior como exterior y con la nube exterior (TX5) se definieron algunos detalles de fachadas. Al igual que antes, fue necesario iniciar el proceso un par de veces para poder entender el flujo de trabajo. Al importar la nube en Undet, el software aplica un filtro automático en el que elimina los puntos que considera repetidos, esto es, los que distan menos de 2mm entre ellos. Luego se prosigue con la creación del modelo. El modelo se genera de manera más sencilla si los elementos creados (líneas, planos, etc) se crean ortogonales con los ejes de referencia. Para esto lo primero que se hizo fue hacer coincidir los ejes de referencia con planos de la nube. Se eligió el origen en un punto de la fachada principal, ésta coincidente con el eje X, una arista vertical de la zona izquierda de la fachada coincidente con el eje Z y el eje Y queda definido ortogonal a ambos. Para definir el contorno del edificio y habitaciones se utilizaron rectángulos paralelos a los ejes.

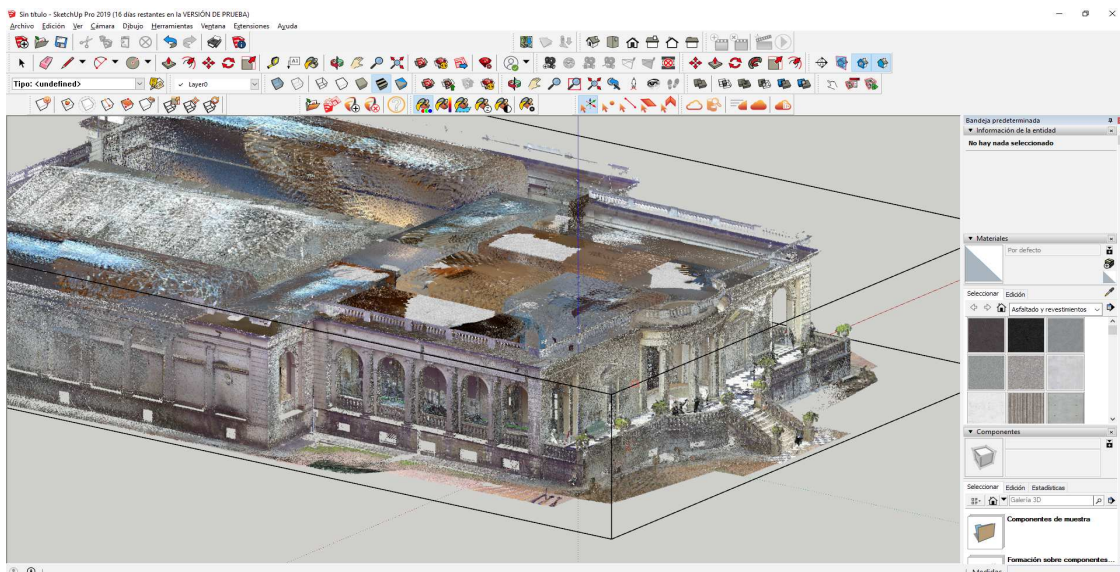
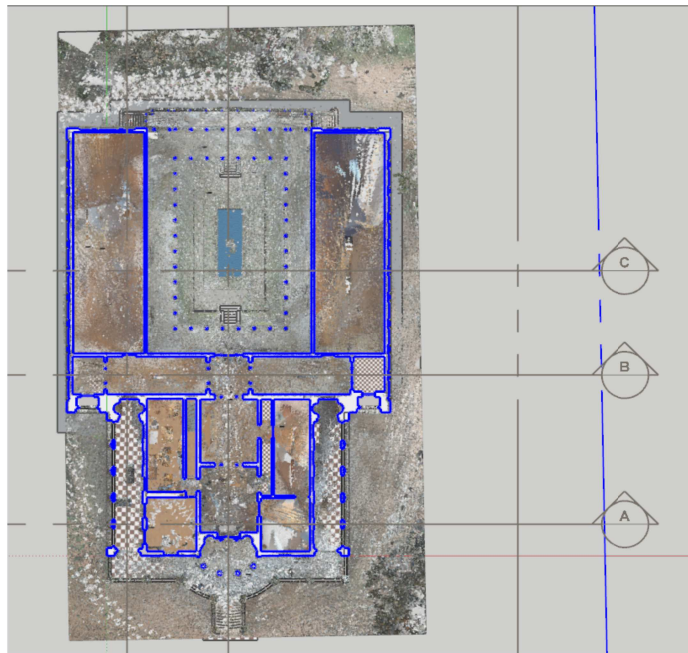


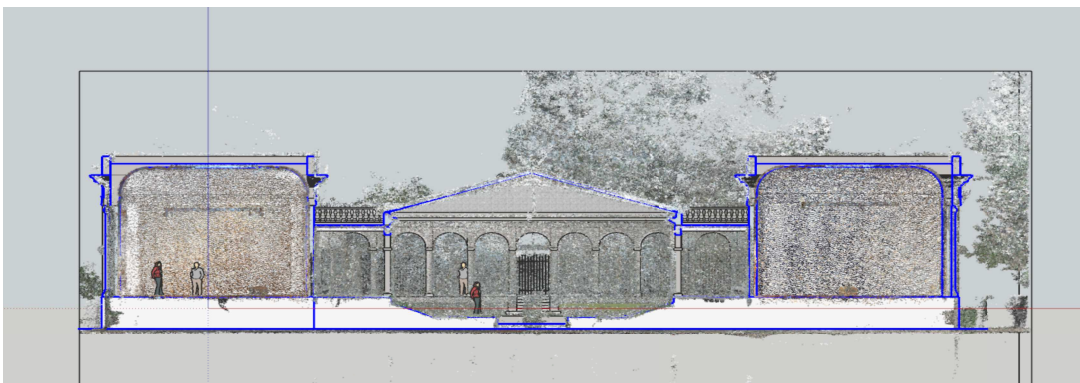
Imagen 47: Nube de puntos en SketchUp (Fuente propia)

La imagen anterior se corresponde con la nube integrada importada en el software. La extensión Undet tiene herramientas propias para visualización de la nube (cajas, colores, tamaño de puntos, etc) además de creación de rectas, planos y puntos a partir de puntos de la nube. Para crear las aristas y planos del modelo basta con crear planos de sección de SketchUp y adecuar la caja de visualización a ese plano de sección, esto es, alinear la vista al plano de sección y dibujar líneas y rectángulos utilizando los puntos de la nube como referencia:



Imágen 48: Creación de líneas - SketchUp (Fuente propia)

Una vez diseñado el contorno de habitaciones en un plano de sección horizontal, utilizando la herramienta “empujar/tirar” se “levantan” las paredes desde el piso hasta el techo. Para determinar las alturas, se llevó a cabo el mismo procedimiento descrito, pero creando un plano de sección vertical, donde se puede apreciar el nivel de piso y nivel de techo. La realidad indica que el techo fue estimado con los pretilos de fachada, ya que no se pudo acceder a la azotea, y el nivel de techo mencionado se corresponde con el cielorraso interior de cada habitación.

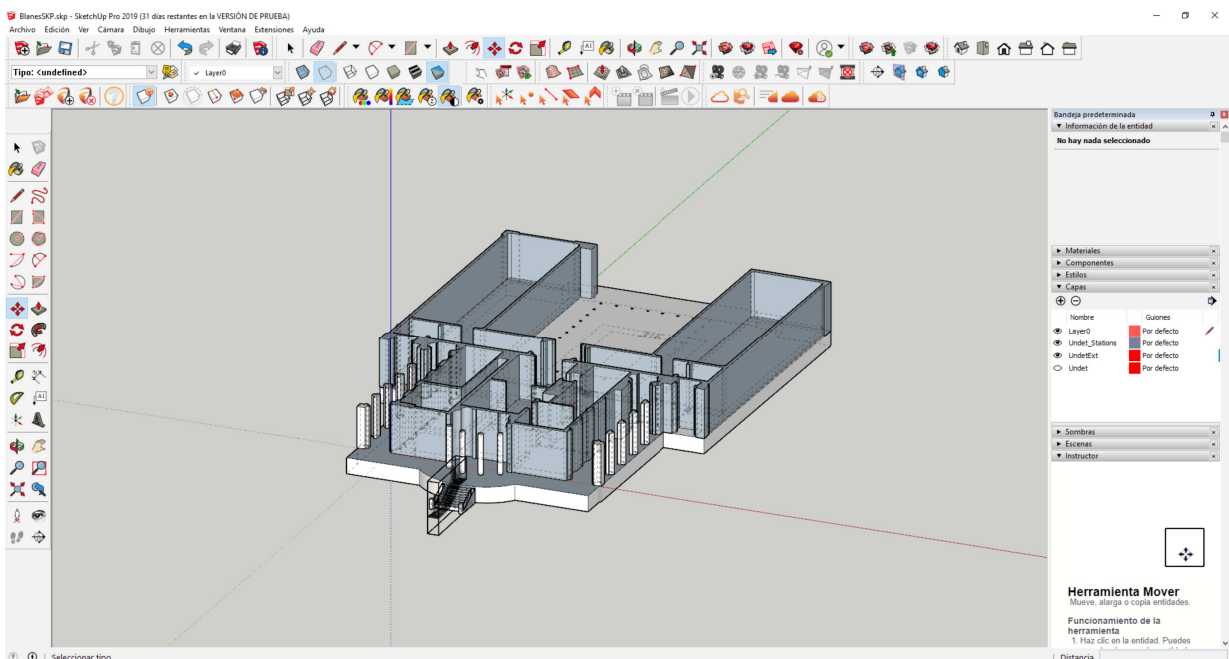


Imágen 49: Determinación de niveles - SketchUp (Fuente propia)

En algunos casos, se definieron las paredes por partes, como en las salas posteriores. De manera intuitiva el software permite levantar las paredes y dibujar líneas con referencia a otras líneas y planos ya definidos. Se puede ver parte del modelo en las siguientes imágenes. En la primera la nube con las paredes y techo y en la segunda el modelo con la nube encajonada en la escalera frontal, pronta para crear el detalle de la escalera:



Imágen 50: Modelo en construcción con nube de puntos - SketchUp (Fuente propia)



Imágen 51: Modelo en construcción con detalle de escalera - SketchUp (Fuente propia)

Se puede ver también una vista interior del modelo en construcción utilizando una de las opciones de visualización llamada “Rayos X” que permite ver todo el modelo creado con transparencia:

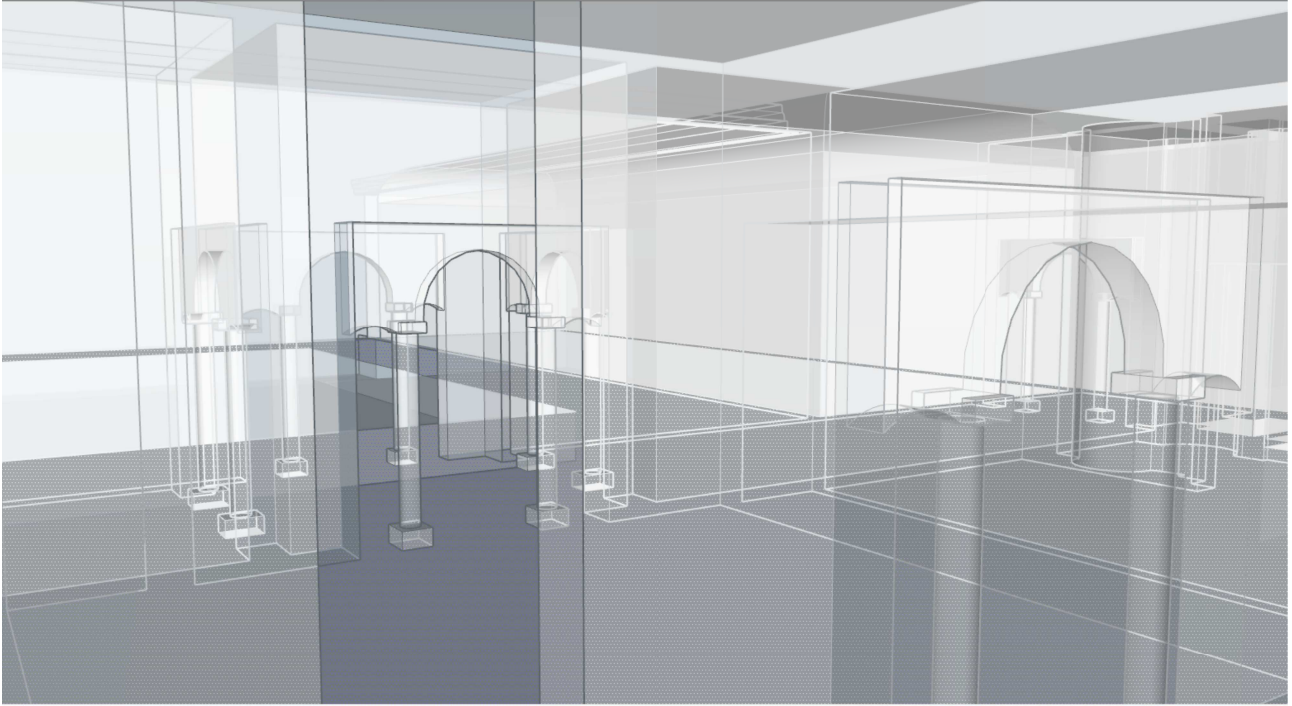
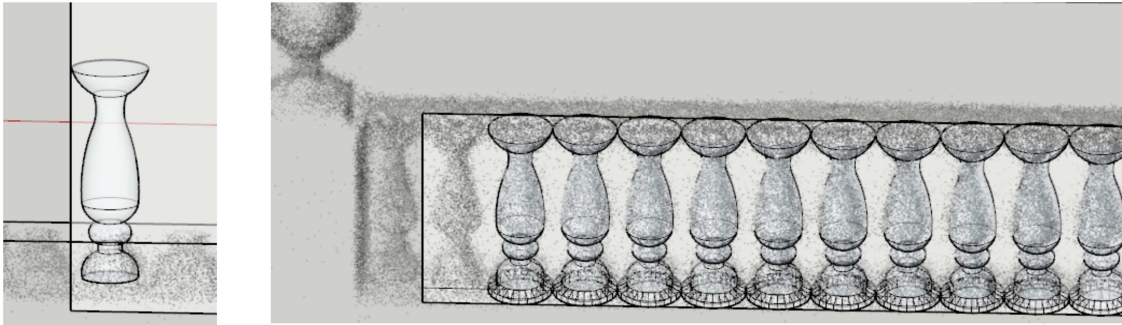


Imagen 52: Vista interior del modelo en construcción – SketchUp (Fuente propia)

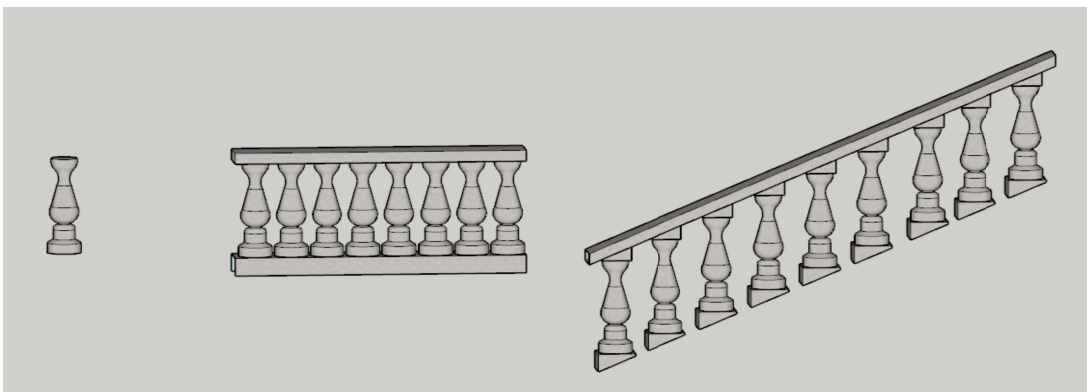
Con las paredes definidas, se continuó con la incorporación de detalles constructivos. Los vanos de puertas y ventanas se definieron de manera similar a las paredes, esta vez alineando las vistas a las paredes existentes y dibujando sobre estas los contornos. Las puertas y ventanas se obtuvieron como componentes predefinidos de las bibliotecas (“3D Warehouse”) del software, donde diferentes usuarios cargan modelos dibujados. En algunos casos se hizo necesario realizar pequeñas modificaciones a estos modelos para insertarlos de manera óptima (cambios de escalas, colores, detalles, etc). Los “componentes” son bloques o piezas que se definen por lo general de elementos que se repiten en el modelo. Son útiles porque si es necesario modificar características constructivas, al modificar uno se modifican todos los componentes del modelo. Así se hizo con las puertas con personas de la fachada lateral, las columnas de la galería del jardín y los pequeños pilares de las barandas. Tanto las columnas como los pilares de las barandas fueron creados con las nube de puntos. Los pilares se hicieron definiendo primero el contorno en un plano de sección y luego haciendo rotar ese contorno en torno a un círculo de base.

En lo que sigue, se muestra la creación del pilar de la baranda. Luego de haber creado el plano de sección y dibujado el contorno sobre éste, se utilizó la herramienta “sígueme” que permite empujar o estirar un plano con referencia a una curva. Esta curva es el círculo que sirve de base para el pilar. Luego, se copió el componente creado en toda la baranda:



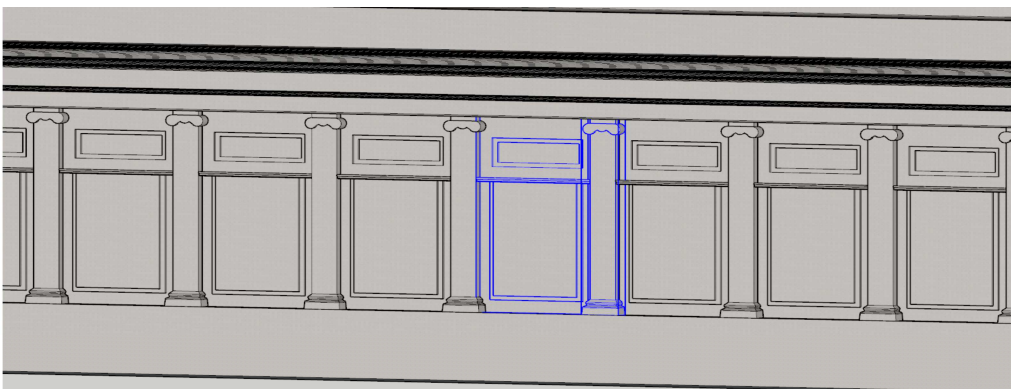
Imágen 53: Pilares iniciales y baranda - SketchUp (Fuente propia)

En rigor, este fue el primer componente creado, pero fue mejorado en una segunda instancia para que se ajuste mejor a la nube. Al mismo tiempo, con varios pilares se creó un componente más grande que se llamó baranda y se copió en todo el frente y techo, además de la escalera principal de entrada. El pilar definitivo y las barandas de la galería y escalera se muestran a continuación:



Imágen 54: Pilar definitivo y barandas - SketchUp (Fuente propia)

Los pretilos se crearon de igual manera que los pilares, creando un plano de sección y dibujando el contorno, luego se utilizó la herramienta “sígueme” para trasladar ese contorno a todo el techo. La creación de los detalles de la fachadas lateral y posterior se hizo de igual forma, generando además un componente específico que se replicó en toda la fachada:

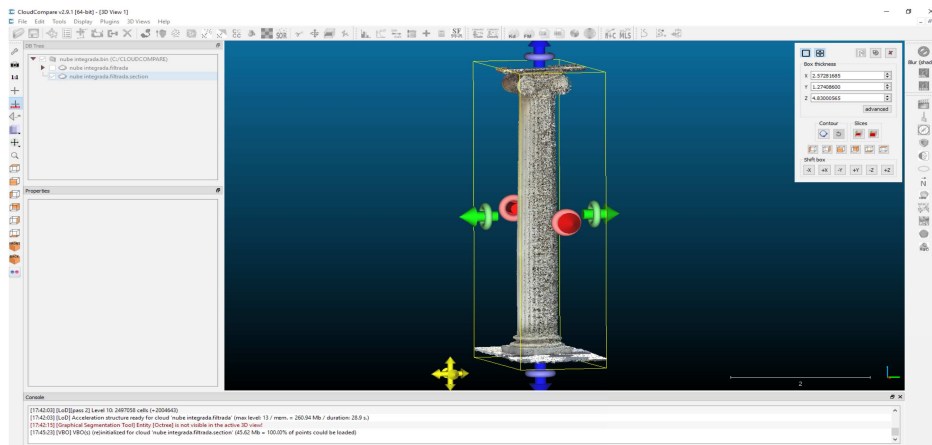


Imágen 55: Detalle de fachada lateral - SketchUp (Fuente propia)

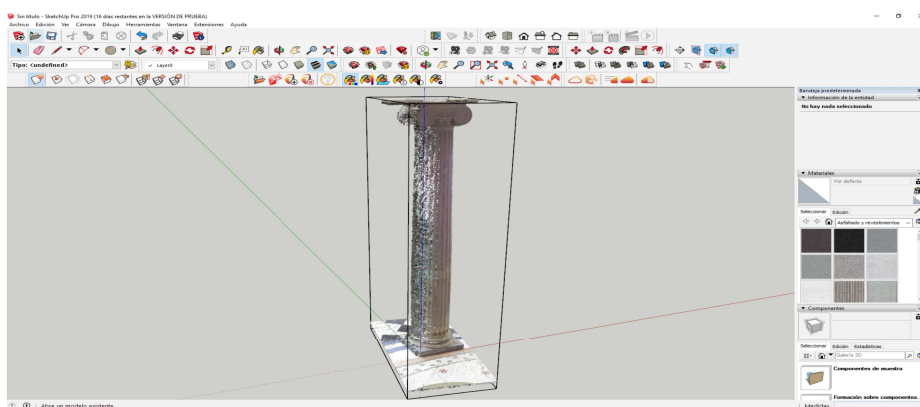
En la fachada posterior, la reja que tiene el edificio se realizó a partir de un modelo obtenido de la biblioteca, modificado para que coincida con la realidad. El proceso es similar para todos los casos. Se buscó un modelo similar, se importó al trabajo, se explotó y se modificó de forma que coincidiera de la mejor manera. Las arcadas de la galería se construyeron a partir de las columnas interiores definiendo los arcos también en planos de sección. Con estas columnas se crearon componentes y se replicaron en toda la galería.

En lo que sigue se muestra en detalle el proceso de creación de las columnas del acceso principal. En realidad, se creó una sola a partir de la nube, luego se agrupó en un componente y se copió en la posición de las 3 columnas restantes. Este componente se utilizó también para las medias columnas laterales.

Para trabajar de manera más cómoda, lo primero fue segmentar la nube general en un archivo más ligero que contiene solamente la columna. Utilizando la herramienta “sección transversal” se cortó la nube en una de las columnas usando CloudCOMPARE. Luego, se exportó en formato *.las* y se lo importó en Sketchup, para que el modelo ya fuera creado en el mismo software que el modelo general:

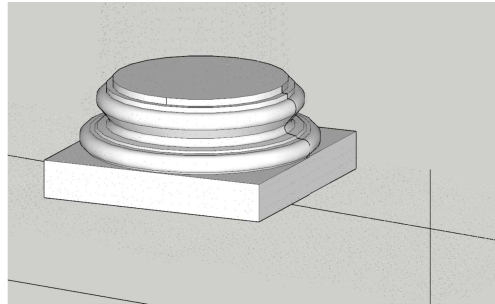


Imágen 56: Columna seccionada en CloudCOMPARE (Fuente propia)



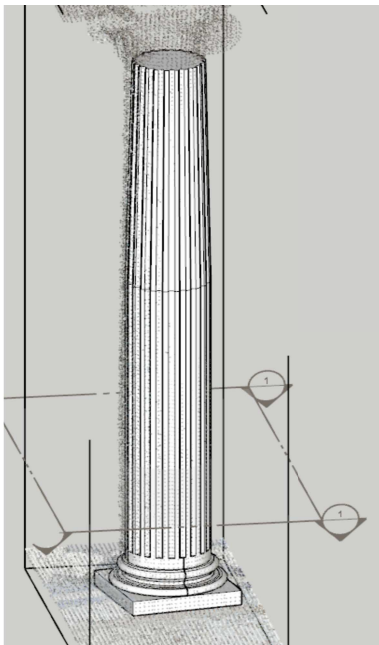
Imágen 57: Columna en SketchUp (Fuente propia)

En SketchUp se generó el modelo aislado de la columna, empezando por la base, creando el prisma rectangular y sobre él la sección circular de la misma. Para la base se usó la herramienta “empujar” y para la sección circular la herramienta “sígueme”, creando la sección en un plano perpendicular y estirando esa sección sobre un círculo dibujado sobre el prisma:



Imágen 58: Base (Fuente propia)

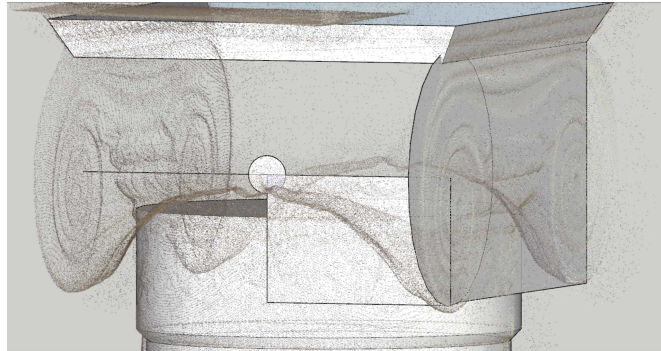
Para el cuerpo de la columna se crearon semicírculos sobre el círculo que se muestra en la imágen 58, y con la herramienta “empujar” se hizo en dos partes, ya que la columna presenta una leve inclinación formando una especie de cono truncado. Hasta la mitad se creó un cilindro con las hendiduras de los semicírculos y de la mitad hasta la parte superior se creó otro cilindro igual, pero utilizando la herramienta “escala” se logró la forma cónica. Para usar “escala” se selecciono solo la cara superior de esa columna y se escalo esa cara, al estar todo el objeto en contacto, se modificó todo el objeto. Por último, el detalle superior se creó en varias etapas, primero se hizo el prisma superior, luego un cilindro desde ese prisma hasta el cuerpo antes creado. Luego, para los elementos cónicos, se crearon varios planos de referencia y círculos. En uno de los planos perpendicular al círculo se creó la sección del elemento y con “sígueme” se le dio forma. Se creó un componente con esa forma creada y se copió en los cuatro extremos:



Imágen 59: Cuerpo de la columna (Fuente propia)

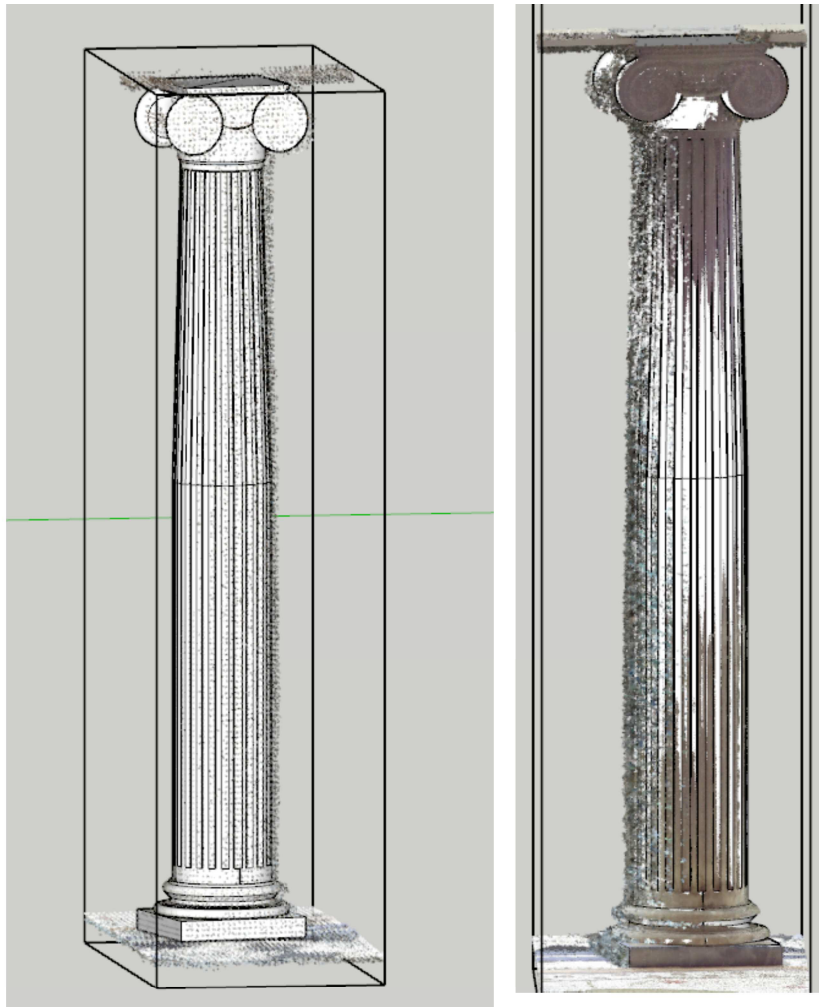


Imágen 60: Base con nube de puntos (Fuente propia)



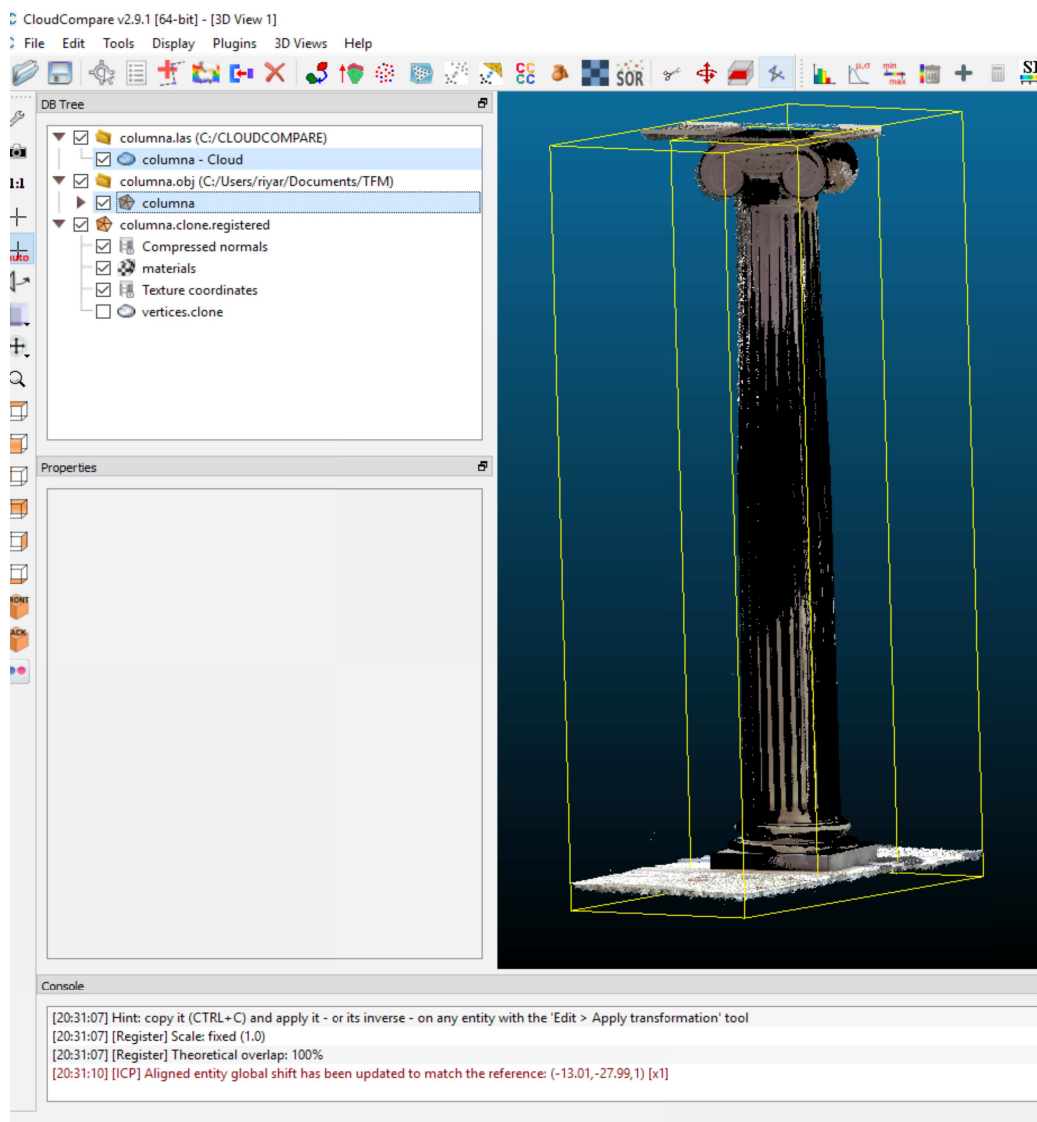
*Imágen 61: Detalle superior en construcción
(Fuente propia)*

La columna completa se puede ver a continuación:

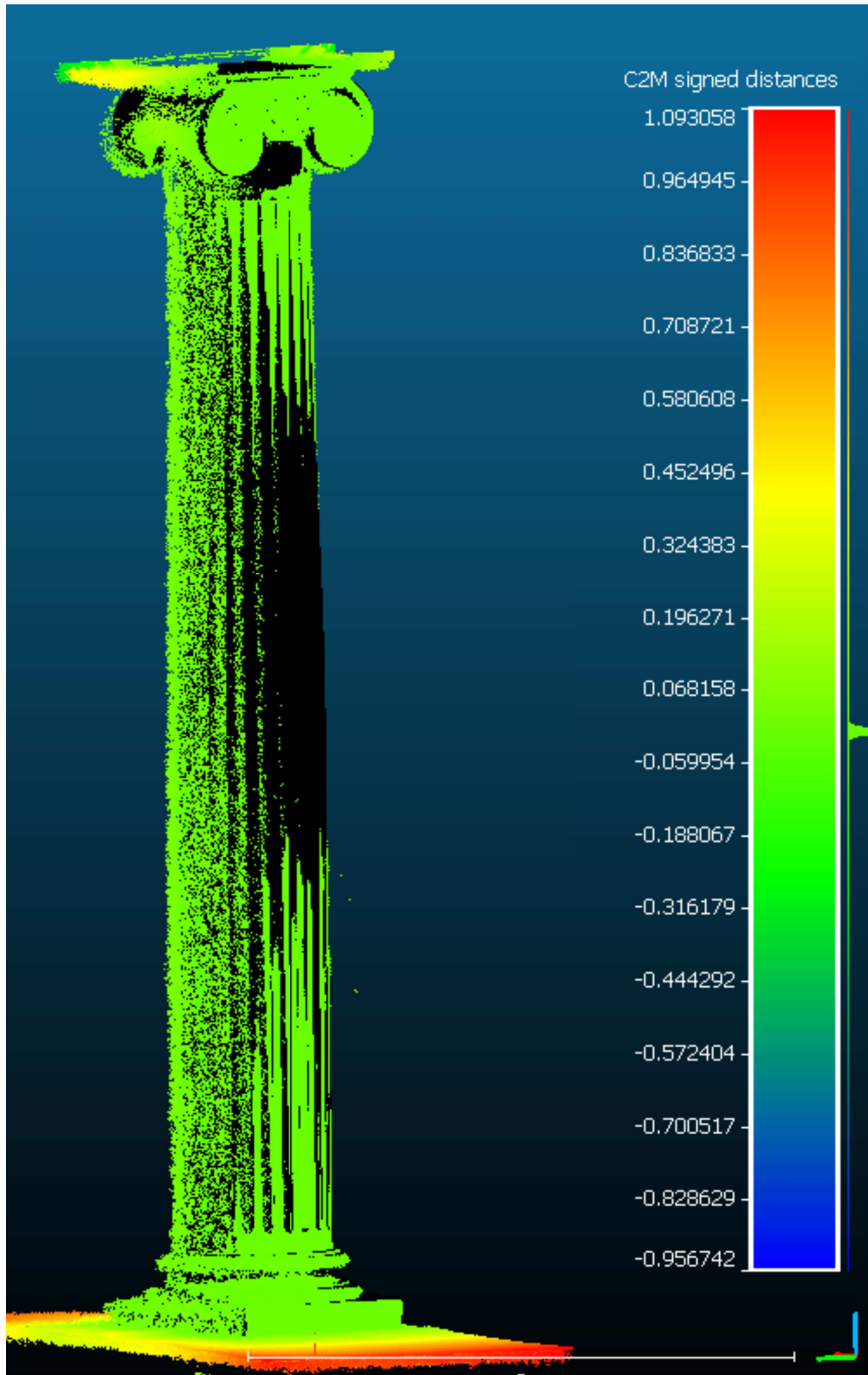


Imágen 62: Columna completa (Fuente propia)

Para tener control sobre el modelo generado de la columna, se decidió por comparar el modelo con la nube de puntos. Para esto se utilizó la comparación de nube con malla de CloudCOMPARE. Se importa el modelo y la nube al software, se registra ambos elementos en el mismo sistema de forma manual aproximada y automática para el refinamiento y se ejecuta la comparación. El resultado gráfico en escala de colores muestra que casi todo el modelo comparado está en verde y en la escala se aprecia que corresponde a un valor de entre +0.06 y -0.06 de distancia, con un promedio en el centro del intervalo, por lo que se concluye que el modelo se definió correctamente:

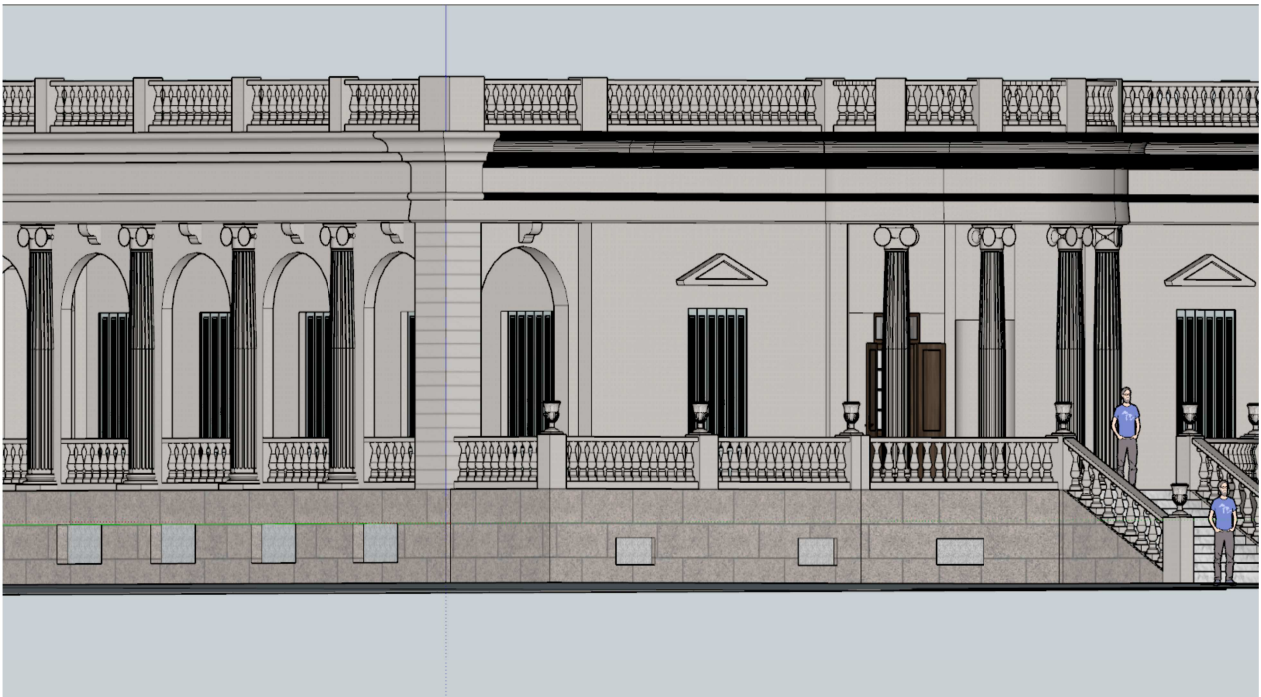


Imágen 63: Nube y modelo en CloudCOMPARE (Fuente propia)



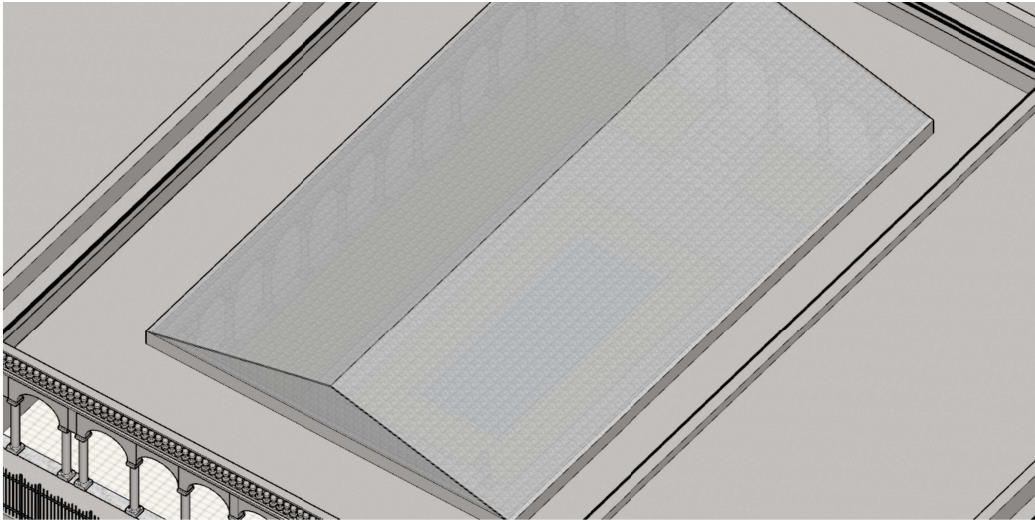
Imágen 64: Resultado de comparación (Fuente propia)

Una vez definidos todos los detalles se coloreó todo el modelo. Para paredes exteriores se utilizó una trama predefinida a la que se le modificó el color para que se asemejara a la realidad. La diferencia se dió en los pilares esquineros, donde se utilizó una trama que imita baldosas grandes horizontales porque el nivel de detalle no permitió definir las líneas horizontales. En la imagen se observa las diferentes tramas para pared exterior, pilar esquinero y muro inferior:



Imágen 65: Tramas diferentes en exterior - SketchUp (Fuente propia)

En los muros interiores se utilizó el color blanco. Los pisos fueron coloreados con texturas. En el interior se utilizaron distintas texturas de madera en forma genérica, al igual que los pisos exteriores, tanto en el frente como en la galería del jardín. Los dibujos reales son complejos en su representación por lo que se decidió utilizar tramas genéricas. Tanto en las escaleras como en parte de las columnas se utilizó la trama Mármol de Carrara para representar esas texturas. En ventanas, puertas y techo del jardín, se utilizó un material transparente, vidrio en los primeros casos y resina translúcida en el último. El material translúcido permite distinguir lo que hay en el interior:



Imágen 66: Material traslúcido en techo de jardín - SketchUp (Fuente propia)

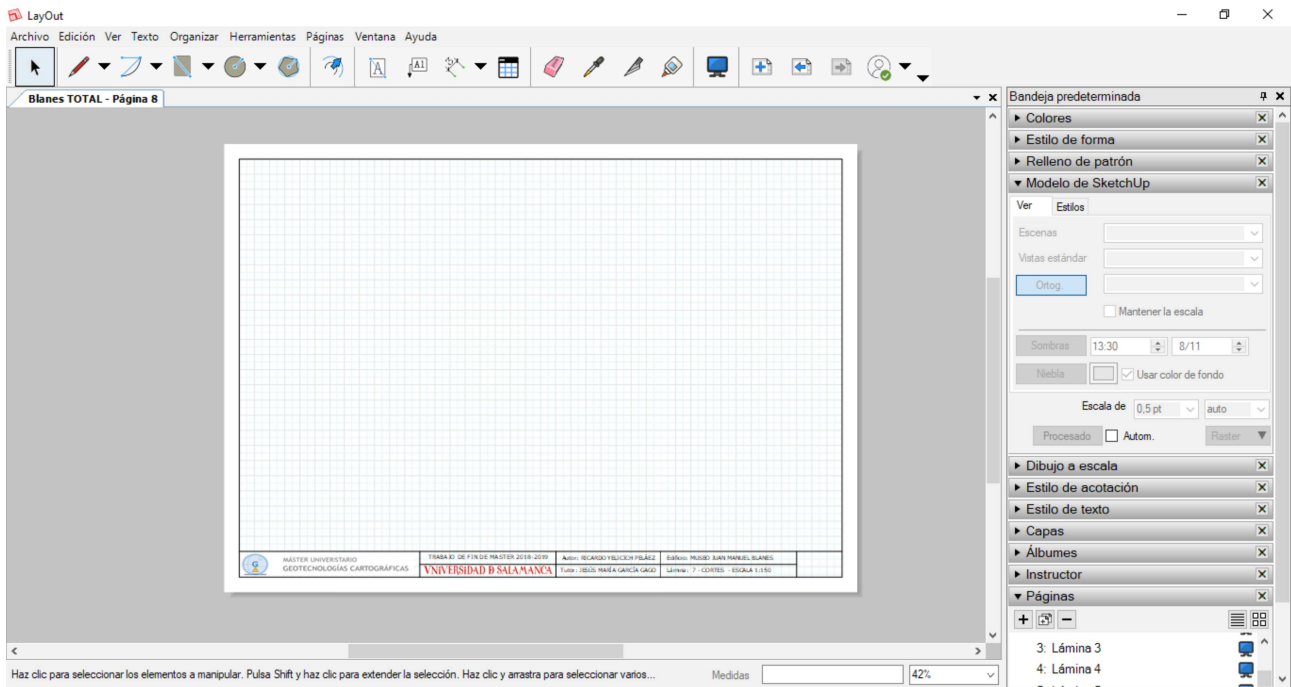
Con el modelo pronto, se crean diferentes “escenas”. Las escenas son vistas desde distintas posiciones de la cámara. Estas vistas corresponden a vistas de planta baja, fachada frontal, posterior y laterales, cortes transversales y longitudinales y vistas en perspectiva. Estas escenas sirven para crear los planos en 2D utilizando el software LayOut. Además, se crearon otras escenas de vistas de detalles de fachadas y vistas interiores del modelo, así como de la galería y jardín para crear la animación. La animación se arma en SketchUp de forma automática previa creación de las escenas. Es posible configurar el tiempo de permanencia en cada escena y la transición entre las mismas, dando la sensación de recorrido continuo sobre el modelo. Se muestra una de las escenas creadas, en este caso se la llamó “Per Fro Cerc” pudiendo ver el resto de las escenas en las distintas pestañas:



Imágen 67: Escena creada "Per Fro Cerc" - SketchUp (Fuente propia)

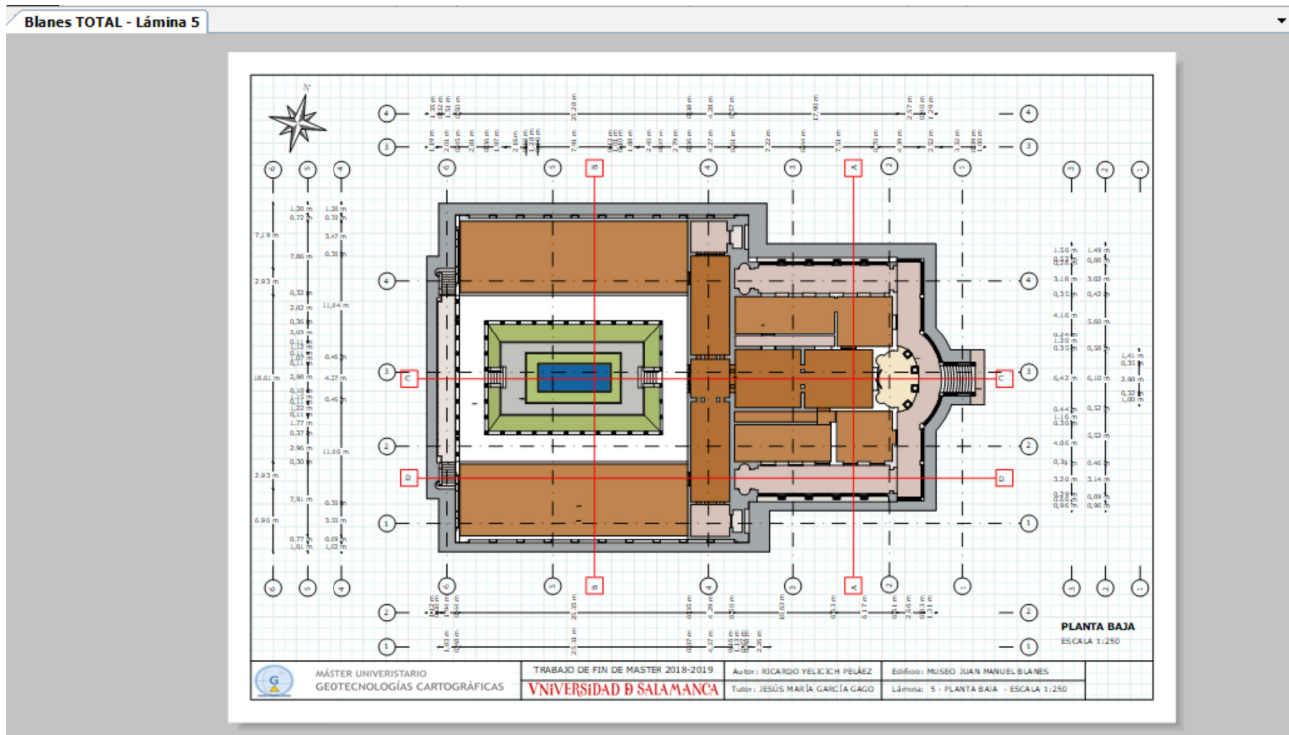
- LAYOUT:

Este software se instala junto con SketchUp. Permite la creación de láminas en 2D a partir de las escenas creadas en SketchUp. En primer lugar se debe seleccionar el tamaño de lámina, por lo general en estandar ISO como A3 o A4. En este caso se usó una lámina A3 milimetrada. A continuación se definió el margen y rótulo de las láminas que contiene información del autor:



Imágen 68: Lámina creada - LayOut (Fuente propia)

Lo interesante de este software es que se vincula directamente al modelo creado en SketchUp mediante las distintas escenas ya que se agregan las escenas creadas con anterioridad en el modelo. Además, cualquier cambio que se realiza en el modelo, se ve reflejado en la lámina una vez procesado. De hecho, se muestra una advertencia en la lámina si el modelo fue modificado y no se realizó el procesamiento. Con esto, se crearon 7 láminas distintas usando varias de las escenas, entre ellas, perspectivas generales, planta baja y cortes. Un ejemplo es el que se ve en la imágen:



Imágen 69: Lámina 5 Planta Baja - LayOut (Fuente propia)

Se puede destacar también, que este software permite la incorporación de líneas con distinto formato (enteras, punteadas, punto y raya, etc), con varios colores y formas de inicio y fin. Además, es posible la colocación de anotaciones en etiquetas, textos y acotaciones. Las acotaciones tienen diversas configuraciones respecto de la escala, posición del texto, etc.

6. RESULTADOS

Se puede destacar como resultados los obtenidos en todo el proceso de creación de este trabajo. En primer lugar se cree que el procesamiento de las nubes se logró de manera exitosa, realizando el correcto registro de las distintas posiciones del escaner, tanto fijo como móvil. No se creó la malla con textura ya que no fue necesario utilizarla, bastaba con la nube de puntos. En segundo lugar, la generación del modelo 3D también se pudo crear en forma aceptable, con aciertos y equivocaciones, pero en general aceptable.

Se entiende que el resultado principal fue la creación del modelo 3D del edificio a partir de las nubes de puntos obtenidas con ambos equipos de escaneo láser. A partir de este modelo, se destaca la animación en forma de video que muestra el modelo en distintas vistas, tanto exteriores como interiores. Esta animación se realizó con el propio software de modelado en base a distintas escenas que recorren el edificio. Además, se incorporaron las escenas de fachadas, cortes y planta a modo de complemento.

Por último, se crearon 7 láminas distintas a modo de planos en 2D, a modo de análisis constructivo del edificio. En la primera se observan vistas generales en perspectiva, la segunda tiene fachadas frontal y posterior y la tercera fachadas laterales. En la cuarta lámina se agregó una

vista en perspectiva pero con una sección horizontal a media altura, que permite ver las instalaciones del museo. A esta lámina se le agregó texto indicativo de cada una de las salas del museo. La lámina 5 muestra una vista de la planta baja y las láminas 6 y 7 contienen cortes transversales y longitudinales. Las láminas de planta y corte contienen acotado (dimensiones) que permiten obtener las medidas de las distintas habitaciones del edificio. Además, cada lámina se creó a una escala acorde a lo que se quiere representar. Las láminas se pueden ver en el ANEXO I y el video de la animación se encuentra disponible en internet según el enlace del ANEXO II.

7. DISCUSIÓN

Si bien se cree que el flujo de trabajo fue el correcto, desde la elección del sitio a escanear, así como el instrumental utilizado y el procesamiento realizado, en esta sección se discutirá sobre algunos de los planteos del trabajo.

Como principal virtud del trabajo propuesto, se considera que la realización del mismo brindó la posibilidad de adquirir experiencia beneficiosa para el autor y contribuir al desarrollo de la tecnología y su utilización en el Uruguay. Respecto al modelo creado, se cree que es representativo de la realidad en cuanto a la geometría del edificio y visualización, aunque tal vez con un nivel de detalle no muy elevado. En algunas zonas del edificio se pudo mejorar el nivel de detalle más que en otras.

En otro orden, se debe destacar algunas condicionantes a la hora del procesamiento del modelo, tanto en la etapa de procesamiento de nubes de puntos como en la creación del modelo 3D en lo que refiere a la capacidad del procesador de la computadora utilizada así como la memoria y tarjeta de video del mismo, siendo estos puntos claves en el desarrollo del trabajo. En este caso, fue necesario adquirir una nueva computadora con mejores prestaciones de procesamiento y memoria, lo que insumió además de dinero, tiempo extra en puesta en funcionamiento del equipo e instalación de softwares.

Respecto a la comparación de las nubes, se debe apreciar que no estaba entre los objetivos de este trabajo realizar juicio de valor alguno sobre el rendimiento, capacidad, calidad, etc, de los equipos y softwares estudiados. En particular, se realizó un solo escaneo con cada equipo siendo que puedo haber aspectos y metodologías específicos que no se tuvieron en cuenta. Solamente se pretendió analizar e integrar los resultados obtenidos con uno y otro y estudiar el flujo de trabajo y algunas características de estos.

A modo de consideraciones finales se puede hablar del trabajo pendiente o trabajo futuro. En este aspecto, será necesario continuar estudiando e investigando el concepto BIM ya que esta tecnología es el futuro de la construcción, tanto existente como a construir. En un futuro no muy lejano, todo proyecto de construcción se hará en modo BIM, en tanto el escaneo láser es un producto fundamental para su materialización en construcciones existentes. Lamentablemente no fue posible tener el acercamiento necesario con BIM más allá de un breve intento, dada la complejidad de la materia y la dificultad que conlleva aprenderlo de forma autodidacta. Con

respecto a esto, se puede afirmar que es casi imposible ser autodidacta en BIM. Sin duda son necesarios cursos de varios meses dedicados especialmente para ese fin.

Otro aspecto fundamental que no fue tenido en cuenta en este trabajo, son las comprobaciones de campo, como la toma de datos con otras tecnologías como estación total o simples mediciones de distancia para verificar la bondad del modelo. La utilización de puntos de control en marcos de referencia medidos con alta precisión pudo abarcar otros aspectos a la hora de la generación del modelo. Este punto también deberá ser incluido en próximos trabajos.

Por otro lado, se debe aclarar nuevamente que no fue posible acceder a algunas zonas del edificio como el subsuelo o azotea. El subsuelo en general no influye demasiado en el aspecto exterior del modelo, pero la azotea sí, ya que en cualquier fotografía del edificio se puede notar la existencia de un segundo piso de menores dimensiones que la planta baja, representando un ícono para el edificio. La falta de esta planta en el modelo genera la impresión de un faltante o vacío en el modelo que no se condice con la realidad del edificio. Pudo ser interesante la integración de otras metodologías de relevamiento como la fotogrametría, ya sea terrestre o aérea, mediante la utilización de un vehículo aéreo no tripulado, pero no hubo oportunidad de hacerlo por no contar con el mismo en el momento de la toma de datos. Este también es un punto a incluir en el trabajo futuro, respecto a la integración de otros métodos de relevamiento.

8. CONCLUSIONES

En lo que refiere a las conclusiones de este trabajo, se puede decir que en mayor o menor medida se cumplieron los objetivos planteados. Se pudo investigar sobre el estado del arte de la tecnología y el modelado de edificios patrimoniales en diversos países, más allá de la poca información con que se cuenta de trabajos realizados en el Uruguay. Se utilizó la tecnología de escaneo láser para lograr el relevamiento de las instalaciones. Se procesaron los datos obtenidos y se logró generar un modelo 3D de parte del edificio que acompaña en cierta medida la realidad del mismo.

El sitio elegido fue acorde a las necesidades y dificultades planteadas, siendo el mismo de una arquitectura clásica con zonas de fácil representación y detalles más complejos. Se analizaron programas diversos, tanto para la adquisición como para el procesamiento de los datos, en sus distintas etapas, desde el registro de las nubes de puntos hasta la utilización de las mismas para la creación del modelo. Si bien puede haber algunos programas más sencillos que otros y seguramente quedaron sin estudiar otro tanto de programas, se consiguieron dos específicos para el modelado y creación de entregables que se utilizaron de manera exitosa.

A pesar del esfuerzo realizado, queda en el deber de este trabajo la generación del modelo BIM dada la dificultad que plantea la temática, tanto en su creación como la ejecución y mantenimiento del modelo. Deberá ser fruto de trabajo futuro y estudio específico de la temática en futuros trabajos tanto de maestría como de doctorado para avanzar en la comprensión del mismo.

9. BIBLIOGRAFIA

ARTÍCULOS:

1. Ahmad Latiffi, Aryani. (2015). Building Information Modeling (BIM): Exploring Level of Development (LOD) in Construction Projects.. *Applied Mechanics and Materials*. 773-774. 933-937. 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.933.
2. Alitany, A., Fonseca, D., Redondo, E., & Riera, A. S. (2013). TIC-híbridas. metodologías integradas para la documentación del patrimonio. *CISTI (Iberian Conference on Information Systems & Technologies / Conferência Ibérica De Sistemas e Tecnologias De Informação) Proceedings, 1*, 238-244.
3. Alonso, Javier & Alonso Madrid, Javier. (2015). BIM (Building Information Modelling): New LOD definitions. Level of Development for LOD000 to LOD600 and LOD X00. *Building Smart Spanish Journal*. 01. 40.
4. Angelini, Maria & Baiocchi, Valerio & Costantino, Domenica & Garzia, F. (2017). SCAN TO BIM FOR 3D RECONSTRUCTION OF THE PAPAL BASILICA OF SAINT FRANCIS IN ASSISI IN ITALY. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-5/W1. 47-54. 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-47-2017.
5. Arayici, Yusuf. (2008). Towards building information modelling for existing structures. *Structural Survey*. 26. 210-222. 10.1108/02630800810887108.
6. Barton, J. (2009). 3D laser scanning and the conservation of earthen architecture: A case study at the UNESCO world heritage site merv, turkmenistan. *World Archaeology*, 41(3), 489-504.
7. Birk, A., Pfingsthorn, M., & Webster, J. G. (1999). Simultaneous localization and mapping (SLAM). *Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering* () John Wiley & Sons, Inc.
8. Bonduel, Mathias & Bassier, Maarten & Vergauwen, Maarten & Pauwels, Pieter & Klein, Ralf. (2017). Scan-to-BIM Output Validation: Towards a Standardized Geometric Quality Assessment of Building Information Models Based on Point Clouds. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W8. 45-52. 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-45-2017.
9. Brashaw, B. K., Anderson, S., & Ross, R. J. (2015). *Laser scanning technology as part of a comprehensive condition assessment for covered bridges / brian K. brashaw, samuel anderson, robert J. ross*
10. Chung, M., Kim, C., Choi, K., Chung, D., & Kim, Y. (2017). Development of LiDAR simulator for backpack-mounted mobile indoor mapping system. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 35(2), 91-101.
11. Fissore, Francesca & Pirotti, Francesco & Vettore, Antonio. (2017). OPEN SOURCE WEB TOOL FOR TRACKING IN A LOWCOST MOBILE MAPPING SYSTEM. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W8. 99-104. 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-99-2017.
12. Gutiérrez Baños, F., Morillo Rodríguez, F. M., San José Alonso, Jesús I., & Fernández Martín, J. J. (2016). RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL 3D DEL CORO DEL CONVENTO DE SANTA CLARA DE TORO (ZAMORA): LA RECUPERACIÓN DE UN ÁMBITO MEDIEVAL DE DEVOCIÓN FEMENINA

- MEDIANTE EL REGISTRO FOTOGRAMÉTRICO Y TÉCNICAS DE RENDERIZACIÓN. (spanish). *Virtual Archaeology Review*, 7(15), 123.
13. Holmgren, J., Tulldahl, H. M., Nordlöf, J., Nyström, M., Olofsson, K., Rydell, J., et al. (2017). Estimation of tree position and stem diameter using simultaneous localization and mapping with data from a backpack-mounted laser scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42. (3W3) pp. 59-63.
 14. Hughes, K. E., & Loudon, E. I. (2005). Bridging the gap: Using 3-D laser scanning in historic-building documentation. *APT Bulletin*, 36(2), 37-46.
 15. Klaus, Dr & Schwarz, Peter & El-Sheimy, Naser. (2004). Mobile Mapping Systems -- State Of The Art And Future Trends. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 35. .
 16. Kochi, N., Kitamura, K., Sasaki, T., & Kaneko, S. (2012). 3d modeling of architecture by edge-matching and integrating the point clouds of laser scanner and those of digital camera. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXIX-B5, Pp 279-284 (2012)*, , 279.
 17. Laing, Richard & Leon, Marianthi & Isaacs, John & Georgiev, D. (2015). Scan to BIM: the development of a clear workflow for the incorporation of point clouds within a BIM environment. 279-289. 10.2495/BIM150241.
 18. Lehtola, V. V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., et al. (2017). Comparison of the selected state-of-the-art 3D indoor scanning and point cloud generation methods. *Remote Sensing*, 9(8)
 19. Li, R., 1997. Mobile mapping: An emerging technology for spatial data acquisition. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63(9), pp. 1085–1092.
 20. Maboudi, Mehdi & Bánhidi, Dávid & Gerke, Markus. (2017). Evaluation of indoor mobile mapping systems. .
 21. Mandelli, Alessandro & Fassi, Francesco & Perfetti, L & Polari, C. (2017). TESTING DIFFERENT SURVEY TECHNIQUES TO MODEL ARCHITECTONIC NARROW SPACES. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W5. 505-511. 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-505-2017.
 22. Miriam, C. L., & José Luis, L. G. (2013). Documentación 3D de abrigos rupestres a partir de láser escáner y de procesos fotogramétricos automatizados. *Virtual Archaeology Review*, (8), 64.
 23. Nocerino, Erica & Menna, Fabio & Remondino, Fabio & Toschi, Isabella & Rodríguez-González, Pablo. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. 103320I. 10.1117/12.2270761.
 24. Paulus, S., Schumann, H., Kuhlmann, H., & Léon, J. (2014). *High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants* doi:<https://doi-org.proxy.timbo.org.uy:88/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.010>
 25. Porras Díaz, H., Cáceres Jiménez, J. J., & Gallo Lancheros, E. O. (2014). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre / three-dimensional urban models generated from point clouds of a terrestrial laser scanner. *Tecnura*, (41), 134.
 26. Salerno, M. A., Hereñú, D., Rigone, R. C., & Guichón, R. A. (2017). MODELADO 3D DEL CEMENTERIO DE LA MISIÓN SALESIANA NUESTRA SEÑORA DE LA CANDELARIA (RÍO

- GRANDE, TIERRA DEL FUEGO, ARGENTINA). (spanish). *Virtual Archaeology Review*, 8(17), 84.
27. SKARMEAS, G. C. (2010). From HABS to BIM: Personal experiences, thoughts, and reflections. *APT Bulletin*, 41(4), 47-53.
 28. Søren Riisgaard , Morten Rufus Blas - (2005) - [SLAM for Dummies](#): A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping
 29. Sirmacek, B., Shen, Y., Lindenbergh, R., Zlatanova, S., & Diakite, A. (2016). Comparison of ZEB1 and Leica C10 indoor laser scanning point clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-1, 143-149. DOI: 10.5194/isprs-annals-III-1-143-2016
 30. Tang, J., Chen, Y., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Khoramshahi, E., Hakala, T., et al. (2015). SLAM-Aided Stem Mapping for Forest Inventory with Small-Footprint Mobile LiDAR. *Forests*, 6(12), 4588–4606. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/f6124390>
 31. Thomson, Charles & Boehm, Jan. (2015). Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM. *Remote Sensing*. 7. 11753-11775. 10.3390/rs70911753.
 32. Toschi, I., Rodríguez-González, P., Remondino, F., Minto, S., Orlandini, S., and Fuller, A. (2015) ACCURACY EVALUATION OF A MOBILE MAPPING SYSTEM WITH ADVANCED STATISTICAL METHODS, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W4, 245-253, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-245-2015>.
 33. Uyar, Azize & Ulugtekin, Necla. (2017). A PROPOSAL FOR GENERALIZATION OF 3D MODELS. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. IV-4/W4. 389-392. 10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-389-2017.
 34. Xu, X., Yang, H., & Neumann, I. (2018). *Deformation monitoring of typical composite structures based on terrestrial laser scanning technology* doi:<https://doi-org.proxy.timbo.org.uy:88/10.1016/j.compstruct.2017.11.049>

FUENTES ELECTRÓNICAS:

1. <http://blanes.montevideo.gub.uy> 31/03/2019
2. [https://www.ecured.cu/Patrimonio Cultural](https://www.ecured.cu/Patrimonio%20Cultural) 06/04/2019
3. <https://geoslam.com/>
4. <https://faro.app.box.com/s/7d7fglic01z5yealvdygdkukp991uusz/folder/53828466543>
5. <http://thesketchupessentials.com/layout>
6. <https://www.sketchup.com/es>
7. <https://www.youtube.com/watch?v=DDjyjnLikKo&t=2407s>
8. <https://www.youtube.com/watch?v=xxWFqCNznxl>
9. <https://www.youtube.com/watch?v=Cm5PMLeCAgo&t=1298s>
10. https://es.wikipedia.org/wiki/Modelado_3D
11. <https://fa.ort.edu.uy/disenio-y-gestion-de-proyectos-con-revit>
12. <https://bimforum.org/lod/>
13. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>
14. <https://www.cloudcompare.org/>

10. ANEXOS

ANEXO I :

Láminas 2D del modelo:

1. Perspectivas Generales
2. Fachadas
3. Fachadas
4. Instalaciones
5. Planta Baja
6. Cortes
7. Cortes

ANEXO II:

Enlace a la animación de maqueta virtual:



<https://youtu.be/t1x3MqcGWyM>

ANEXO III:

Informe de procesamiento SCENE del escaneo con Trimble TX5.