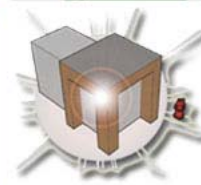
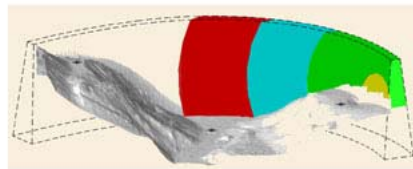
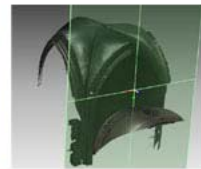


3D RiskMapping



Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas

Preparado por el proyecto Herramientas de aprendizaje para el levantamiento tridimensional avanzado en la conciencia de riesgos (3DRiskMapping)

Traductores: José Luis Lerma García & Josep Miquel Biosca Tarongers
Versión 5. Septiembre 2008

Prefacio

Esta publicación recoge el material de aprendizaje preparado en el marco del proyecto 'Herramientas de aprendizaje para el levantamiento tridimensional avanzado en la conciencia de riesgos (3DRiskMapping)', desde octubre de 2006 hasta septiembre de 2008, que ha sido cofinanciado por la Agencia Flamenca del programa europeo Leonardo Da Vinci.

Este tutorial es el resultado de la cooperación internacional de un grupo multidisciplinar de expertos de diferentes universidades e industrias de Europa, entre los que se encuentran:

- *Mario Santana Quintero y Bjorn Van Genechten, Universidad de Ciencias Aplicadas St. Lieven (Bélgica).*
- *Marc De Bruyne, BnS (Bélgica).*
- *Ronald Poelman, Delfttech (Holanda).*
- *Martin Hankar, GlobeZenit (Bélgica).*
- *Simon Barnes y Huseyin Caner, Plowman Craven (Reino Unido).*
- *Luminita Budei, Universidad Técnica de Iasi (Rumania).*
- *Erwin Heine y Hansjörg Reiner, Universidad de Recursos Naturales y Ciencias Naturales Aplicadas (Austria).*
- *José Luis Lerma García y Josep Miquel Biosca Taronger, Universidad Politécnica de Valencia (España).*

El contenido está basado en investigación científica y experiencia en la aplicación del escaneado láser terrestre para la captura de nuestro entorno construido.

La parte teórica del tutorial ha sido compilada por Bjorn Van Genechten con contribuciones de Huseyin Caner, Erwin Heine, José Luis Lerma García, Ronald Poelman, y Mario Santana Quintero, así como con el apoyo de todos los participantes.

La aplicación de Patrimonio en la toma de la iglesia de St. James con la finalidad de recuperación en catástrofes fue realizada por Bjorn Van Genechten con contribuciones de Huseyin Caner, Erwin Heine, José Luis Lerma García, Ronald Poelman, y Mario Santana Quintero así como con el apoyo de todos los participantes. El escaneado de la iglesia fue posible gracias al permiso del Ayuntamiento de Leuven, la Universidad de Leuven y el apoyo de Plowman Craven. El proyecto de escaneado fue realizado por Huseyin Caner, Tomasz Skiba, Tim MacDonald, Leive Spincemaille, Stuart McLeod, Bjorn Van Genechten, y Mario Santana.

La aplicación de Infraestructura Civil en la monitorización de la deformación de una presa hidroeléctrica fue preparada por by Hansjörg Reiner, Josep Miquel Biosca Taronger, Erwin Heine, José Luis Lerma García y el apoyo de todos los participantes. La toma de datos en campo se realizó gracias a Illwerke AG, Vorarlberg (Austria) y la colaboración de Thomas Weinold de la Universidad de Innsbruck (Austria).

La aplicación industrial en el escaneado de entonos peligrosos (plataformas petrolíferas) fue preparada por Marc De Bruyne y Martin Hankar con contribuciones de Ronald Poelman y Bjorn Van Genechten, así como con el apoyo de todos los participantes.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Agencia Flamenca del programa Europeo Leonardo Da Vinci por cofinanciar este proyecto y hacer disponible esta publicación a todos los estudiantes y profesionales de Europa.

Además, queremos agradecer a:

- Geert De Lepeleer, Barbara Wauman, Sarah De Seranno, y Guido Kips (Universidad de Ciencias Aplicadas St. Lieven);
- Simon Barnes, Malcolm Donald, Duncan Lees, Lindy Fox (Plowman and Craven);
- Ion Giurma (Universidad Técnica "Gh. Asachi" Iasi);
- Hans Liebrand (Leica Geosystems);
- Marianne Couderé (b.v.b.a Couderé);
- Thomas Weinold (Universidad de Innsbruck, Austria);
- Rupert Zischinsky, Peter Staubmann y Werner Maier (Illwerke AG, Austria);
- Wolfgang Neubauer y Matthias Kucera (VIAS, Vienna);
- Hans Cornelisse, M&H engineering.

Finalmente, queremos agradecer a todas aquellas personas e instituciones que de una manera u otra han ayudado a la finalización de esta publicación.

Tabla de Contenidos

0.	GLOSARIO	8
1.	CAPÍTULO I: INFORMACIÓN ESPACIAL 3D EN LA TOMA DE DECISIONES	12
1.1.	¿Qué es la evaluación de riesgos?	12
1.2.	¿Qué es el escaneado láser?	13
1.3.	Escaneado láser estático y dinámico	14
1.4.	Aplicaciones del escaneado láser	14
2.	CAPÍTULO II: PRINCIPIOS DEL LÁSER ESCÁNER.....	16
2.1.	El espectro electromagnético y la luz	16
2.2.	Láseres	17
2.3.	Propiedades importantes de la luz láser.....	17
2.4.	Seguridad Láser	18
2.5.	Mediciones usando la luz	19
2.5.1.	<i>Medición basada en triangulación</i>	<i>20</i>
2.5.2.	<i>Medición basada en tiempo</i>	<i>24</i>
2.5.2.1.	Escáneres basados en pulsos (Tiempo de vuelo) (detección incoherente) 24	
2.5.2.2.	Escáneres basados en la fase	27
2.5.2.3.	Interferometría (coherente)	29
2.5.3.	<i>Métodos de desviación del haz en los sistemas de medición basados en tiempo de vuelo.....</i>	<i>30</i>
2.6.	Aspectos metroológicos: análisis del error	31
2.6.1.	<i>Errores instrumentales.....</i>	<i>31</i>
2.6.1.1.	Propagación del haz láser	31
2.6.1.2.	Problema del borde partido.....	32
2.6.1.3.	Ambigüedad en la distancia	33
2.6.1.4.	Ambigüedad angular	34
2.6.1.5.	Errores en los ejes de un TLS (escáner láser terrestre)	35
2.6.2.	<i>Errores relacionados con los objetos</i>	<i>35</i>
2.6.3.	<i>Condiciones ambientales</i>	<i>37</i>
2.6.3.1.	Temperatura	37
2.6.3.2.	Atmósfera.....	37
2.6.3.3.	Interferencia de radiación	37
2.6.3.4.	Distorsión por movimiento	37
2.6.4.	<i>Errores metodológicos.....</i>	<i>38</i>
2.7.	Estado actual del equipamiento de un escáner láser	38
3.	CAPÍTULO III: EL ESCANEADO LÁSER EN LA PRÁCTICA	40
3.1.	Planificación	40
3.1.1.	<i>Determinar los objetivos.....</i>	<i>41</i>
3.1.2.	<i>Análisis del área a levantar</i>	<i>42</i>
3.1.3.	<i>Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser.....</i>	<i>42</i>
3.1.4.	<i>Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia.....</i>	<i>44</i>
3.1.5.	<i>Gestión de los datos</i>	<i>46</i>
3.2.	Trabajo en campo.....	46
3.2.1.	<i>Preparación del levantamiento.....</i>	<i>46</i>
3.2.2.	<i>Estacionamiento del escáner</i>	<i>46</i>
3.2.3.	<i>Conexión del escáner.....</i>	<i>47</i>
3.2.4.	<i>Ajustes del escáner.....</i>	<i>48</i>
3.2.4.1.	Definición del área a escanear	48
3.2.4.2.	Resolución	49
3.2.4.3.	Filtrado inicial	50
3.3.	Toma de datos.....	51
3.3.1.	<i>Escaneado de un objeto/edificio</i>	<i>51</i>
3.3.2.	<i>Escaneado de las dianas/puntos de referencia</i>	<i>51</i>

3.3.3.	<i>Medición de puntos de referencia/dianas</i>	53
3.3.4.	<i>Comprobación de la captura de datos</i>	53
3.4.	Preparación de los datos	53
3.5.	Registro y Georreferenciación	54
3.5.1.	<i>Registro y Georreferenciación Indirecta</i>	55
3.5.1.1.	Registro diana a diana	55
3.5.1.2.	Registro nube a nube	56
3.5.1.3.	Registro superficie a superficie	56
3.5.2.	<i>Registro y georreferenciación directa</i>	57
3.5.3.	<i>Aspectos generales del registro y la georreferenciación</i>	57
3.6.	Procesamiento de nubes de puntos 3D	58
3.6.1.	<i>Representaciones de las nubes de puntos</i>	59
3.6.2.	<i>Mejora de los datos</i>	61
3.6.2.1.	Filtrado del ruido	61
3.6.2.2.	Remuestreo	61
3.6.3.	<i>Modelado 2D directo a partir de las nubes de puntos</i>	62
3.6.4.	<i>Modelado 3D directo a partir de la nube de puntos</i>	62
3.6.5.	<i>Modelado 3D de superficies complejas</i>	62
3.6.5.1.	Mallado/Triangulación	63
3.6.5.2.	Eliminación de vacíos	63
3.6.5.3.	Optimización de modelo	63
3.6.6.	<i>Modelado 2D indirecto a partir de las nubes de puntos</i>	64
3.6.7.	<i>Mapeado con textura</i>	64
3.7.	Control de calidad y entrega	66
4.	CAPÍTULO IV: GESTIÓN DE LOS DATOS	69
5.	CASO DE ESTUDIO DE DOCUMENTACIÓN DEL PATRIMONIO: IGLESIA DE ST. JAMES, LOVAINA (BÉLGICA)	72
5.1.	Introducción e información técnica	72
5.2.	Planteamiento del problema	72
5.3.	Planificación del levantamiento	73
5.3.1.	<i>Objetivos</i>	73
5.3.2.	<i>Documentos finales</i>	73
5.3.3.	<i>Documentación</i>	74
5.3.3.1.	Interior	75
5.3.3.2.	Exterior	76
5.3.4.	<i>Elección de la técnica de medición más apropiada</i>	76
5.3.4.1.	Ajuste a la finalidad	76
5.3.4.2.	Minimización del riesgo utilizando escaneados láser	77
5.3.5.	<i>Tipo de escáner láser</i>	78
5.3.5.1.	Interior	78
5.3.5.2.	Exterior	79
5.4.	Adquisición de los datos	79
5.4.1.1.	Interior	79
5.4.1.2.	Exterior	81
5.4.1.3.	Dianas	82
5.5.	Preparación de los datos	83
5.6.	Registro y Georreferenciación	85
5.6.1.	<i>Registro: Interior</i>	85
5.6.1.1.	Crear un proyecto de registro	85
5.6.1.2.	Importar los datos de la estación total	87
5.6.1.3.	Añadir ScanWorlds	88
5.6.1.4.	Añadir los constreñimientos de las dianas	88
5.6.1.5.	Encontrar errores	89
5.6.1.6.	Corregir errores	90
5.6.1.7.	Añadir constreñimientos a la nube de puntos	92

5.6.1.8.	Comprobación de la precisión	94
5.6.1.9.	Bloquear y crear un ModelSpace a partir de la nube registrada.....	94
5.6.2.	<i>Registro: Exterior</i>	94
5.6.2.1.	Repetir los pasos 5.6.1.1 - 5.6.1.6	95
5.6.2.2.	Añadir otros ScanWorlds mediante el registro nube a nube.....	95
5.6.3.	<i>Registro: Combinación de los datos del interior y del exterior</i>	97
5.6.3.1.	Copiar el proyecto de registro en una nueva base de datos	97
5.6.3.2.	Unión de los dos registros	99
5.7.	Procesamiento de los datos	100
5.7.1.	<i>Modelado 2D directo a partir de las nubes de puntos</i>	100
5.7.1.1.	Introducción	100
5.7.1.2.	Carga del fichero de la base de datos	100
5.7.1.3.	Comienzo.....	100
5.7.1.4.	Herramientas de CloudWorx.....	102
5.7.1.5.	Importación de una nube de puntos	103
5.7.1.6.	Regeneración de la nube de puntos	105
5.7.1.7.	Manipulación de la nube de puntos	105
5.7.1.8.	Ejemplo práctico	106
5.7.2.	<i>Modelado 3D de superficies complejas</i>	112
5.7.2.1.	Elección del software	112
5.7.2.2.	Preparación y exportación de los datos para el modelado	112
5.7.2.3.	Introducción a Geomagic Studio (v9).....	116
5.7.2.4.	Preprocesamiento de la nube de puntos: eliminación del ruido	120
5.7.2.5.	Preprocesamiento de la nube de puntos: remuestreo	124
5.7.2.6.	Meshing	125
5.7.3.	<i>Eliminación de huecos</i>	127
5.7.3.1.	Introducción	127
5.7.3.2.	Conexión de dos mallados.....	127
5.7.3.3.	Eliminación de la bóveda del altar	128
5.7.3.4.	Eliminación de huecos pequeños (simples).....	128
5.7.3.5.	Eliminación de partes sin información suficiente	129
5.7.3.6.	Relleno de huecos complejos 1	130
5.7.3.7.	Relleno de huecos complejos 2.....	131
5.7.3.8.	Copiar/Pegar para rellenar huecos	132
5.7.4.	<i>Limpieza de bordes</i>	137
5.7.5.	<i>Corte del modelo para obtener secciones transversales</i>	137
5.7.5.1.	Preparación de los Datums.....	137
5.7.5.2.	Corte de la malla.....	139
5.7.6.	<i>Creación de animaciones</i>	140
6.	CASO DE ESTUDIO DE ENTONO INDUSTRIAL: BUQUE DE FPSO.....	144
6.1.	Introducción	144
6.2.	Planteamiento del problema.....	144
6.3.	Elección de la técnica de medición más apropiada.....	145
6.3.1.	<i>Técnicas de medición en las instalaciones industriales</i>	145
6.3.1.1.	Estación total	145
6.3.1.2.	Fotogrametría	147
6.3.1.3.	Escaneado láser	147
6.3.2.	<i>Escaneado láser: adecuación a la finalidad</i>	147
6.3.3.	<i>Minimización de riesgos utilizando el escaneado láser</i>	148
6.3.4.	<i>Procesos de ingeniería en instalaciones industriales</i>	150
6.3.4.1.	Visión general de las aplicaciones CAD 3D.....	150
6.3.4.2.	Ingeniería con datos de nubes de puntos.....	151
6.4.	Planificación del proyecto de escaneado láser.....	154
6.4.1.	<i>Definición del problema</i>	154
6.4.2.	<i>Objetivos</i>	155

6.4.3.	<i>Definición de los documentos a entregar.....</i>	156
6.4.4.	<i>Factores de riesgo</i>	156
6.4.5.	<i>Documentación en campo.....</i>	157
6.4.6.	<i>Elección del escáner.....</i>	157
6.4.7.	<i>Entrenamiento del personal.....</i>	157
6.4.8.	<i>Preparación en campo.....</i>	158
6.4.8.1.	Riesgos	158
6.4.8.2.	Elementos de suministro energético.....	158
6.4.8.3.	Restricciones del programa de trabajo	158
6.4.8.4.	Notas de campo.....	159
6.4.8.5.	Entrenamiento en campo.....	159
6.4.8.6.	Deformaciones estáticas y dinámicas en un barco.....	159
6.4.9.	<i>Operaciones del escaneado láser</i>	159
6.5.	Simulación del escaneado.....	160
6.5.1.	<i>¿Qué es la simulación del escaneado?.....</i>	160
6.5.2.	<i>Preparación de la misión de escaneado</i>	160
6.5.2.1.	Estacionamiento de un escáner simulado	163
6.5.2.2.	Definición de los parámetros de escaneado.....	165
6.5.2.3.	Escaneado	166
6.5.2.4.	Escaneado de las dianas.....	168
6.5.2.5.	Moverse a una nueva posición	168
6.5.2.6.	Preparación de las nubes de puntos para el registro	169
6.5.3.	<i>Misión de la simulación del escáner.....</i>	172
6.5.4.	<i>Procesamiento de los datos</i>	173
6.5.4.1.	Registro, elección del método.....	173
6.5.4.2.	Registro utilizando el solape	173
6.5.4.3.	Registro utilizando puntos de referencia artificiales (dianas).....	173
6.5.5.	<i>Creación de animaciones con las nubes de puntos.....</i>	173
6.5.6.	<i>Proyecto de escaneado láser – Documentos a entregar.....</i>	173
6.6.	Planificación del proyecto de ingeniería	174
6.6.1.	<i>Trabajo con Cloudworx.....</i>	174
6.6.2.	<i>Revisiones híbridas 3D.....</i>	180
6.6.3.	<i>Detección de choques</i>	181
6.6.3.1.	Simulaciones.....	181
6.6.4.	<i>As-built.....</i>	182
6.6.5.	<i>Uso del escáner láser.....</i>	183
6.6.6.	<i>Control de calidad.....</i>	183
7.	CASO DE ESTUDIO DE INFRAESTRUCTURA CIVIL: MONITORIZACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE UNA PRESA HIDROELÉCTRICA	186
7.1.	Introducción	186
7.2.	Objetivos.....	188
7.2.1.	<i>Planteamiento del problema.....</i>	188
7.2.2.	<i>Objetivos.....</i>	188
7.2.3.	<i>Documentos a entregar.....</i>	189
7.2.4.	<i>Factores de riesgo</i>	189
7.2.5.	<i>Documentación en campo.....</i>	190
7.3.	Metodología.....	190
7.3.1.	<i>Planificación de las sesiones</i>	190
7.3.1.1.	Elección del escáner y del software.....	191
7.3.1.2.	Determinación de las posiciones óptimas del escáner	192
7.3.1.3.	Simulación en CAD.....	194
7.3.1.4.	Listado de comprobación.....	197
7.4.	Adquisición de los datos.....	197
7.4.1.	<i>Sistema de coordenadas de referencia.....</i>	197
7.4.2.	<i>Escáner Móvil.....</i>	197
7.4.3.	<i>Dianas.....</i>	197
7.4.4.	<i>Estacionamientos del escáner.....</i>	199

7.4.5.	<i>Ajustes del escáner</i>	199
7.4.6.	<i>Condiciones atmosféricas</i>	200
7.4.7.	<i>Toma de datos de control</i>	200
7.5.	Procesamiento de los datos	201
7.5.1.	<i>Inicio de RealWorks Survey</i>	201
7.5.2.	<i>Registro</i>	204
7.5.2.1.	Análisis de las dianas	205
7.5.2.2.	Registro de estaciones	208
7.5.2.3.	Informe de los resultados del registro	215
7.5.3.	<i>Georreferenciación</i>	216
7.5.4.	<i>Control de los estacionamientos del escáner</i>	220
7.5.5.	<i>Eliminación de puntos</i>	221
7.5.6.	<i>Hacer secciones</i>	223
7.5.6.1.	Convertir los cortes en líneas 2D	227
7.5.7.	<i>Muestreo y triangulación</i>	228
7.6.	Análisis de las deformaciones	230
7.6.1.	<i>Utilizar software CAD</i>	231
7.6.1.1.	Crear el conjunto de datos en RealWorks Survey	231
7.6.1.2.	Visualización y medición en AutoCAD	233
7.6.2.	<i>Uso de Geomagic® Studio</i>	234
7.6.2.1.	Creación de superficies	235
7.6.2.2.	Herramienta 3D Compare	238
8.	APÉNDICE	241
8.1.	Conversión de datos de Cyclone (*.imp) a otros formatos	241
8.2.	Listado de comprobación	241
8.3.	Lista de escáneres y software	243
9.	REPUESTAS DE LAS PREGUNTAS	244
10.	LISTA DE FIGURAS	248
11.	BIBLIOGRAFÍA	252

0. Glosario

3D: Tridimensional, caracterizado por las coordenadas cartesianas (x, y, z).

Artefactos del escaneado: Irregularidades en la escena resultantes de un proceso de escaneado.

As-built: Describe cómo se construyó una estructura a partir de su diseño.

As-is: Describe el estado actual de una estructura en un momento dado.

CAD (Computer Aided Design): Uso del ordenador para el diseño de un producto.

Apoyo topográfico: Puntos con situación conocida que definen un marco de referencia (generalmente local) en el que se referencian otras mediciones.

Datos crudos del escáner: Cualquier dato tomado por un escáner láser que esté sin procesar. Esto puede incluir diferentes fuentes de error y datos periféricos (que no pertenecen al objeto deseado) tomados durante la fase de escaneado.

Datos periféricos: Datos adicionales al escaneado tomados durante el proceso de captura, pero no definidos explícitamente en el informe del proyecto.

Detección de colisiones o choques: Detección de posibles colisiones entre diseños propuestos y *as-is*.

Densidad de puntos: Número de puntos por unidad. Normalmente cuanto mayor sea la densidad, mejor se representan los elementos.

Escaneado: Hace referencia a una única sesión de toma de datos desde un origen y orientación concretos del escáner.

Escaneado láser: Desde el punto de vista del usuario, un escáner 3D es cualquier instrumento que toma automáticamente coordenadas 3D de una región de un objeto o superficie de forma automática con una alta velocidad (cientos o miles de puntos por segundo) consiguiendo resultados en (casi) tiempo real.

Escaneado láser aerotransportado: El uso de un escáner láser desde una plataforma aerotransportada generalmente con la finalidad de registrar la topografía de la superficie del terreno.

Exactitud geométrica: Caracteriza la cercanía de una medición respecto a su valor real. Normalmente se describe mediante el error medio cuadrático (EMC). Si ε es el error (la diferencia de una medición respecto a su valor real) y n es el número de mediciones, el EMC puede definir como:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}$$

GPS (Sistema de Posicionamiento Global): El sistema de posicionamiento global –un sistema de posicionamiento por satélite norteamericano utilizado para posicionar aeronaves

durante un levantamiento aéreo, también usado como técnica para efectuar levantamientos sobre el terreno. Rusia y Europa están trabajando en sistemas similares llamados GLONASS y GALILEO, respectivamente.

INS (Sistema de Navegación Inercial): Instrumento auxiliar para la navegación que utiliza un ordenador y sensores de movimiento (acelerómetros y giróscopos) para controlar continuamente la posición, la orientación y la velocidad de un objeto sin la necesidad de referencias externas.

Láser (acrónimo de *Light Amplification by Simulated Emission of Radiation*): Haz intenso de luz que produce imágenes con impulsos electrónicos.

LiDAR (acrónimo de *Light Detecting and Ranging*): Término usado frecuentemente para referirse a escaneados láser aerotransportados pero que también se aplica a algunos sistemas terrestres.

MDE (Modelo Digital de Elevaciones): Tripletas de puntos XYZ de una superficie almacenados digitalmente. Se debe mencionar siempre de qué superficie se trata (por ejemplo, MDE de una superficie marina, MDE de la superficie de la Tierra).

MDS (Modelo Digital de Superficies): Tripletas de puntos XYZ almacenados digitalmente que cubren cualquier objeto en el espacio en su totalidad. En el caso de la superficie terrestre debe incluir objetos naturales (principalmente vegetación) y objetos hechos por el hombre como edificios y puentes.

MDT (Modelo Digital del Terreno): Tripletas de puntos XYZ de la superficie terrestre almacenados digitalmente. Por tanto, un MDT es un caso especial de los MDE (MDT = MDE de la superficie terrestre).

Metadatos: Datos utilizados para describir otros datos. Es una componente vital en el proceso de gestión de los datos.

Modelado: Proceso de creación de un modelo o una forma tridimensional, como pueden ser modelos 3D, NURBS o sólidos.

Modelo: Expresión que debería ser calificada por el tipo de modelo, como por ejemplo modelo geométrico. Un modelo geométrico es, típicamente, una representación de una forma tridimensional.

Modelo 3D: Subdivisión poligonal de la superficie de modelo geométrico, también referido como modelo poligonal o modelo triangulado.

Monitoreo de deformaciones: Medición sistemática y seguimiento de la alteración de la forma o dimensión de un objeto como resultado de la aplicación de una fuerza sobre él.

Nube de puntos: Conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de coordenadas tridimensional. También puede incluir información adicional, como los valores de color y de reflectividad.

Orientación del escáner: Orientación del escáner en un sistema de coordenadas euclídeo tridimensional.

Origen del escáner: Origen de un sistema de coordenadas arbitrario en el que se realizan los escaneados estáticos. Cuando el origen del escáner se transforma al sistema de coordenadas local, se convierte en la posición del escáner.

Posición del escáner: Situación, en un sistema de coordenadas conocido, desde el que se realiza un escaneado. Si el sistema no realiza un escaneado completo de 360 grados, pueden requerirse varios escaneados desde la misma posición del escáner, pero con diferentes orientaciones.

Precisión Geométrica: Mide el grado de dispersión de un conjunto de mediciones sobre la media, que normalmente se describe como la desviación estándar. Si n es el número de mediciones y v los residuos (es decir, la diferencia entre una cantidad medida y el valor más probable para esa cantidad), la precisión de un conjunto de datos se puede representar por la desviación estándar:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

Todas las referencias a la desviación estándar de un valor deben ir acompañadas de la probabilidad del error. Por ejemplo: ± 3 mm (con un 67% de probabilidad de error).

Puntos de interés: Punto geométrico del objeto escaneado que es altamente distinguible y puede localizarse con precisión gracias a su forma. También se le conoce por punto de detalle o diana natural.

Registro: Proceso de transformación de las nubes de puntos a un sistema de coordenadas común. Este proceso también se conoce con el nombre de alineación o consolidación.

Renderizado: Proceso de generar imágenes a partir de un modelo 3D informático, sin las limitaciones del hardware de gráficos. El modelo es una descripción de objetos tridimensionales en un lenguaje o estructura de datos estrictamente definidos. Debería contener la geometría, los puntos de vista, la textura, y la información de iluminación y sombreado.

Resolución: Distancia media entre las coordenadas XYZ en una nube de puntos. Normalmente se representa de dos maneras, resolución espacial y resolución angular.

- La distancia media 3D entre puntos a una cierta distancia del escáner (asumiendo que se mide entre los centros de las huellas de los puntos): 30 mm x 30 mm (a 50 m)
- El incremento angular de los dos ejes: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$

La distancia media 3D entre puntos en el objeto es, probablemente, más clara para un usuario que no sea técnico. La densidad de puntos de un escaneado debe verse como la densidad mínima de puntos en el objeto, sin tener en cuenta los datos periféricos (puntos sobre objetos no deseados).

Ruido del escáner: Nivel de desviación de una nube de puntos respecto de una superficie real, provocado por el ángulo de inclinación, el tamaño de la huella del punto, la reflectividad, las condiciones atmosféricas, etc.

SIG (Sistema de Información Geográfica): En el sentido estricto de la palabra, es un sistema de información capaz de gestionar, integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y visualizar información geográficamente referenciada.

Sobremuestreo: Establecimiento de la densidad de la malla de puntos de la malla (resolución) mayor que la precisión de un punto del escáner. El sobremuestreo genera una menor precisión y un mayor ruido en los datos.

Tamaño del haz: Diámetro del haz láser emitido por el escáner, también conocido como huella.

TIN (*Triangulated Irregular Network, Red Irregular de Triángulos*): Representación de una superficie organizada en forma de red de triángulos sin solape.

Vacíos de datos: Secciones en la nube de puntos que no contienen datos.

1. Capítulo I: Información espacial 3D en la toma de decisiones

1.1. ¿Qué es la evaluación de riesgos?

La evaluación de riesgos es el proceso mediante el cual los riesgos asociados con ciertos azares se identifican, analizan y cuantifican para determinarlos o controlarlos. En la práctica, una evaluación de riesgos es una minuciosa mirada a un lugar, edificio o ambiente para identificar los elementos, situaciones, procesos, etc. que pueden causar daños, particularmente a la gente. Tras la identificación se realiza una evaluación de la probabilidad y gravedad del riesgo, lo que ayuda a decidir qué medidas se deben tomar para prevenir o controlar los daños de forma efectiva.

La evaluación de riesgos puede resumirse como sigue (Fig. 1):

- Identificación de riesgos y evaluación: determinación y análisis del potencial, origen, características y comportamiento del peligro (p. ej. período de frecuencia, magnitud de las consecuencias).
- Tratamiento del riesgo potencial:
 - Reducción: planificación y aplicación de intervenciones estructurales (p. ej. presas, diques) o medidas no estructurales como legislación anticatástrofes.
 - Advertencia temprana: provisión de información efectiva y a tiempo a través de las instituciones identificadas que permita a los individuos expuestos al peligro actuar para evitar o reducir el riesgo o prepararse para una respuesta efectiva.
 - Preparación ante catástrofes y gestión de emergencias: acciones y medidas tomadas con antelación para asegurar una respuesta efectiva al impacto del peligro, incluyendo medidas relacionadas con la advertencia efectiva y a tiempo así como planes de evacuación y emergencia.
- Recuperación/Reconstrucción: decisiones y acciones tomadas después de la catástrofe para restaurar las condiciones de vida de la población afectada.

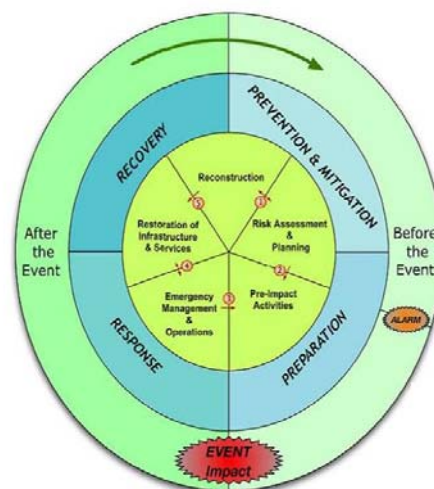


Figura 1: Ciclo de la gestión de riesgos (tomado de [1])

Una evaluación de riesgos o gestión de riesgos adecuada requiere una información actualizada, una posible respuesta rápida, unos datos precisos y una posibilidad de comprobar los datos por si ha ocurrido algún cambio durante un lapso de tiempo. Esta tarea es precisamente lo que mejor hace un láser escáner.

Los escáneres láser se utilizan en la evaluación de riesgos en una gran variedad de aplicaciones:

- Análisis del estado de la estructura de un edificio en peligro de colapso.
- Valoración de posibles deformaciones de estructuras con el paso del tiempo debido a fuerzas externas o internas.
- Detección de zonas potencialmente inundables mediante al análisis topográfico del terreno.
- Simulación de deslizamientos de laderas o terremotos.
- Evaluación de las condiciones y análisis de seguridad de carreteras y puentes.
- Documentación de zonas catastróficas, incluyendo colapsos de edificios, defectos en carreteras y fallos estructurales, vehículos dañados; áreas de colisión, incluyendo carreteras, puertos navales, aparcamientos y escaleras; restos de edificios incendiados; con nuevos diseños y bases de datos de escaneados *as-built*.
- Registro de escenas de crímenes (comparación de perfiles de los daños, ninguna alteración de las pruebas, incorporación del entorno, rápida evacuación de la escena).
- Levantamientos de áreas con gran densidad de tráfico sin tener que cerrarlas ni riesgo al personal.
- Realización de mediciones precisas y a distancia de taludes de rocas (con peligro de desprendimiento).
- Simulación de maremotos.
- Cartografía SIG: localización de población afectada e infraestructuras críticas tales como hospitales o parques de bomberos.

1.2. ¿Qué es el escaneado láser?

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

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

1.3. Escaneado láser estático y dinámico

La tecnología actual de los escáneres láser se puede dividir en dos categorías, estático y dinámico.

Cuando el escáner se mantiene en una posición fija durante la toma de datos, se llama escaneado láser estático. Las ventajas de este método son la alta precisión y la relativa alta densidad de puntos. El láser escáner estático suele ser el método más extendido a la hora de realizar escaneados terrestres. Sin embargo, no todos los escaneados láser terrestres son estáticos.

En los casos de láser escáner dinámico, el escáner se suele montar en una plataforma móvil. Estos sistemas requieren otros sistemas de posicionamiento adicionales tales como INS o GPS, lo que hace que el sistema completo sea más complejo y caro. Ejemplos de láser escáner dinámico los encontramos en aeroplanos (láser escáner aerotransportado), escáneres sobre vehículos o plataformas aéreas no tripuladas.

Este tutorial se centra en el escaneado láser estático.

1.4. Aplicaciones del escaneado láser

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

Sin embargo, otros campos han sido explotados como consecuencia de la constante evolución tecnológica. Los escáneres láser de medio alcance fueron desarrollados para la industria petroquímica. Debido a la complejidad de sus plantas, que sólo estaban documentadas como planos en dos dimensiones, los escáneres láser permitieron la gestión completa en tres dimensiones.

Otras disciplinas como el patrimonio cultural, la arquitectura, el desarrollo urbanístico, la medicina forense y la industria del entretenimiento están empezando a adoptar esta tecnología gracias a las ventajas obvias del láser escáner: la inexistencia de contacto en las mediciones, la alta precisión, el largo alcance, la rápida adquisición, etc. (Véase Figura 2).

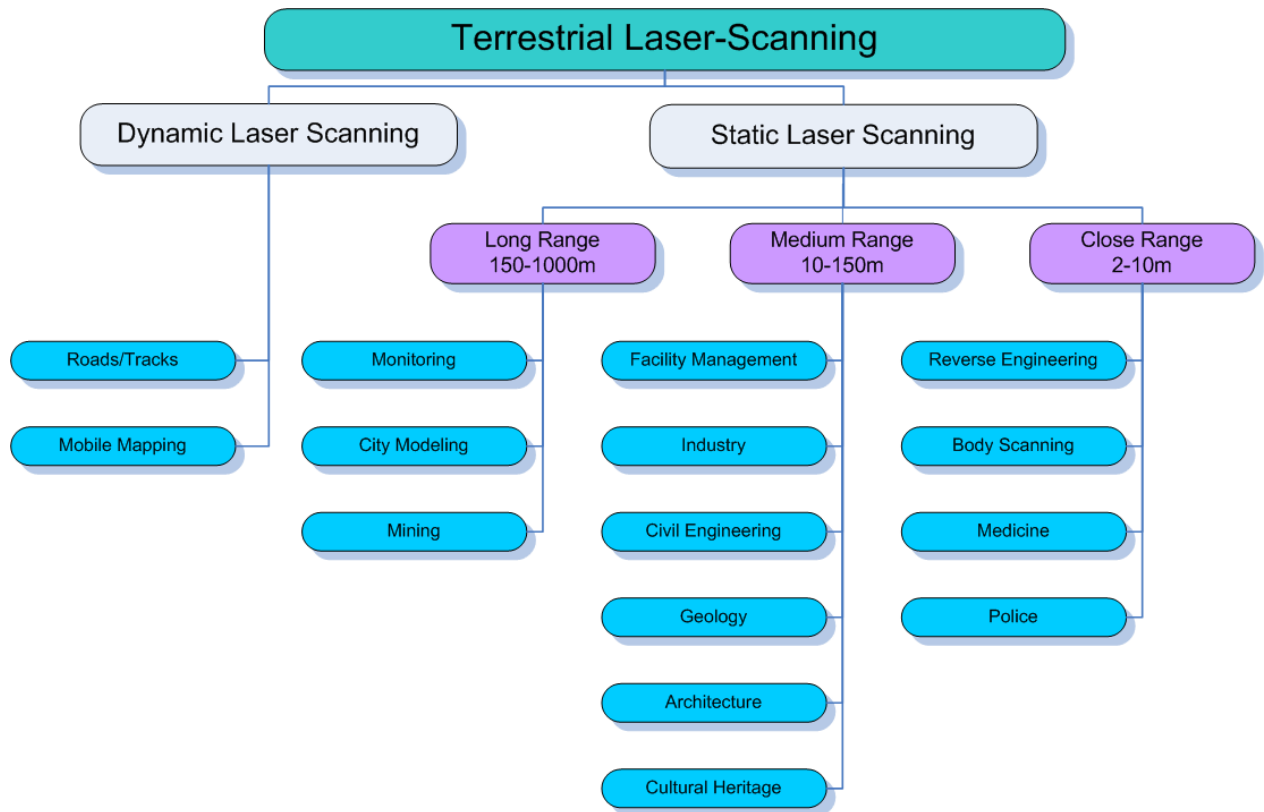


Figura 2: Aplicaciones del láser escáner

2. Capítulo II: Principios del láser escáner

2.1. El espectro electromagnético y la luz

El espectro electromagnético le es más familiar de lo que podría pensarse. Las microondas que utiliza para calentar su comida y el teléfono móvil que usa utilizan partes del espectro electromagnético. La razón por la que vemos los objetos es porque emiten, reflejan o transmiten una parte de la parte visible del espectro que llamamos luz. Esta parte visible del espectro electromagnético está compuesta por los colores que podemos ver en el arco iris (desde los rojos y naranjas hasta los azules y violetas).

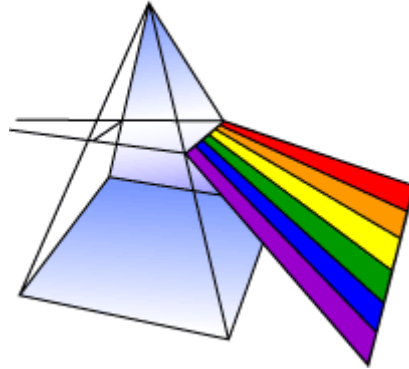


Figura 3: Prisma que convierte la luz blanca en los diferentes colores

Cada uno de los diferentes colores corresponde a una longitud de onda diferente. Esto se puede observar si hacemos pasar luz blanca a través de un prisma de vidrio, Fig. 3, la luz violeta es desviada –refractada- más que la roja debido a que tienen una longitud de onda más corta, y vemos el efecto del arco iris.

Las longitudes de onda del espectro electromagnético varían desde las ondas largas de radio (del tamaño de edificios) hasta los cortos rayos gamma más pequeños que el núcleo de un átomo, Fig. 4.

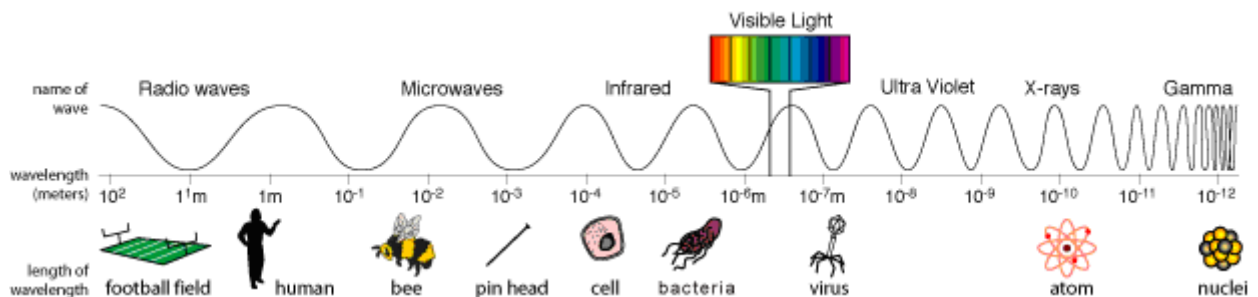


Figura 4: El espectro electromagnético

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

$$c = v \cdot \lambda$$

$$E = h \cdot v = \frac{c}{\lambda}$$

donde:

- c es la velocidad de la luz, 299.792.458 m/s

- h es la constante de Planck, $6.626069 \cdot 10^{-34}$ J·s.
- ν representa la frecuencia y λ la longitud de onda.

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

2.2. Láseres

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

Realmente, los láseres son similares a los transistores: generan o amplifican luz al igual que los transistores generan o amplifican señales electrónicas de audio, radio o frecuencias de microondas. La palabra láser es el acrónimo en inglés de las palabras amplificación de la luz por emisión inducida de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). El primer láser operativo fue demostrado en mayo de 1960 por Theodore Maiman en los laboratorios *Hughes Research Laboratories*.

Actualmente, los láseres se usan en la vida diaria, especialmente en los dispositivos de almacenamiento óptico como los reproductores de CD y DVD, en los cuales el láser escanea la superficie del disco para la lectura de los datos. Otras aplicaciones comunes del láser son los lectores de los códigos de barras y, obviamente, los punteros láser. En la industria, los láseres se usan para cortar el acero y otros metales y para grabar estampados como por ejemplo las letras en los teclados de ordenador. También se utilizan en aplicaciones médicas y militares.

2.3. Propiedades importantes de la luz láser

La luz láser es simplemente luz generada mediante un instrumento láser. Esta luz tiene algunas propiedades muy especiales que la distinguen de la luz proveniente de otras fuentes [2]:

- La luz láser se genera en forma de haz láser. Este haz tiene un alto (a veces extremadamente alto) grado de coherencia espacial, por lo tanto se propaga en una dirección bien definida con un haz moderadamente divergente. El término coherencia hace referencia a que la señal eléctrica guarda una relación de fase constante en diferentes puntos a lo largo del haz. Esta coherencia es la razón por la que un haz láser se puede propagar a lo largo de largas distancias y se focaliza produciendo manchas de luz muy pequeñas.
- La luz láser también tiene un alto grado de coherencia temporal (en la mayoría de los casos), lo que equivale a una longitud de coherencia larga. Longitudes de coherencia largas implican una rígida relación de fase a través de intervalos de tiempo relativamente largos, correspondientes a largas distancias de propagación (a menudo algunos kilómetros).
- Se obtiene un ancho de banda espectral (o ancho de línea) estrecho combinando una coherencia temporal grande con un tiempo de coherencia grande. Esto significa que los

haces de láser visible tienen un cierto color puro, por ejemplo rojo, verde o azul, pero no blanco o magenta. Por ejemplo, la mayoría de los láseres usados en mediciones cortas y medias tienen una longitud de onda de 1064 nm (infrarrojo cercano) o 532 nm (láser verde). Es destacable que una longitud de coherencia larga introduce una tendencia al fenómeno del ruido del láser, es decir, que se puede observar un patrón granular característico. Este efecto se puede observar cuando un haz láser incide en una superficie metálica.

- En la mayoría de casos, la luz láser está polarizada linealmente. Esto significa que el campo eléctrico oscila en una dirección espacial particular.

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

- La luz láser puede ser visible, pero la mayoría de láseres emiten en otras regiones del espectro, particularmente en el infrarrojo cercano, que el ojo humano no puede percibir.
- La luz láser no siempre es continua, pero puede ser emitida en forma de pulsos cortos o ultra cortos. Como consecuencia de esto, los máximos de potencia pueden ser extremadamente altos.

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

2.4. Seguridad Láser

El láser se usa en una amplia variedad de aplicaciones, entre las que encontramos aplicaciones científicas, militares, medicina y el comercio, todos ellos desarrollados desde la invención del láser en 1958. La coherencia, la alta monocromaticidad, y la capacidad de alcanzar potencias extremas son propiedades que permiten utilizarlo en estas aplicaciones especializadas. Por tanto, la luz láser debe ser manejada con una precaución extrema y se estima fundamental conocer los diferentes tipos de láser.

Para permitir a los usuarios que determinen el riesgo potencial, todos los láseres e instrumentos que hacen uso del láser están etiquetados y clasificados dependiendo de la longitud de onda y de la potencia de energía que produce el láser. El estándar europeo IEC 60825-1 [3] proporciona información sobre las distintas clases y precauciones asociadas. Se describen siete clases de láser:

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

razonablemente previsibles. Sin embargo, la visión de la salida del haz pueden ser peligrosa si se usuario emplea lentes con el haz.

- Clase 3R. Láseres potencialmente peligrosos cuando se produce visión directa intrahaz, aunque el riesgo es menor que en el caso de láseres de la Clase 3B.
- Clase 3B. Normalmente son peligrosos si ocurre exposición directa intrahaz, aunque la visión de reflexiones difusas es normalmente segura. Generalmente, esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo.
- Clase 4. Si se observan directamente causarán daños en los ojos o en la piel. Los láseres de esta clase también pueden producir reflexiones peligrosas. Esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo.

Los usuarios de sistemas de escaneado láser deben ser siempre conscientes de la clase de su instrumento. Particularmente, el usuario debe asegurarse que se está utilizando la clasificación correcta. (Véase al estándar IEC para más información sobre seguridad láser [3]).

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

- Sólo el personal cualificado y preparado debe ser asignado para instalar, ajustar y utilizar el equipamiento láser.
- Las áreas donde se utiliza estos láseres deberían estar señalizadas con la señal de advertencia apropiada.
- Deberían tomarse precauciones para asegurar que el personal no mira al haz (de manera prolongada e intrahaz ya que puede ser peligroso). La visión directa del haz a través de instrumentos ópticos (teodolitos, etc.) también puede ser peligrosa.
- Deberían tomarse precauciones para garantizar que el haz láser no se dirige a superficies especulares tipo espejo de manera intencionada
- Cuando el equipo láser no esté en uso debe guardarse en un sitio donde el personal no autorizado no tenga acceso.
- Debe utilizarse equipamiento láser especial a prueba de explosiones en entornos con peligro potencial de explosión (p. ej. plantas petroquímicas, minas). Las propiedades de este equipamiento son: el máximo de potencia del láser y la temperatura máxima deberían estar limitados. Además, que no produzca chispas.

2.5. Mediciones usando la luz

Debido a los recientes desarrollos en la visión por computador y la tecnología de sensores, la luz se ha utilizado de varias maneras para medir objetos. Estas técnicas de medición se pueden dividir en dos categorías: técnicas activas y pasivas (Fig. 5).

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

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

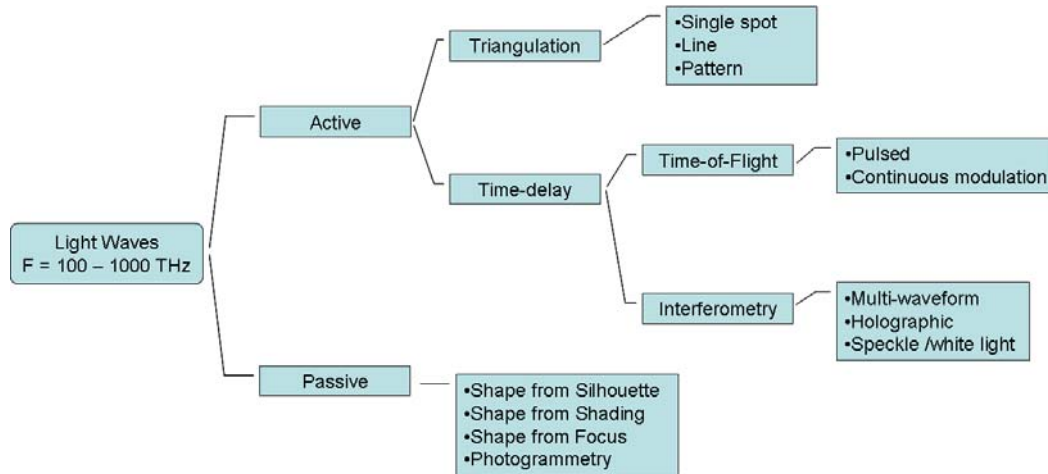


Figura 5: Categorización de los métodos de medida que utilizan la luz [tomado de [4]]

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

- No requieren luz ambiental, porque ellos generan su propia radiación.
- Proporcionan gran cantidad de mediciones de manera automática.
- Se pueden utilizar en superficies sin rasgos distintivos.
- Capturan mucha información en poco tiempo (1000-500.000 ptos/s).

Sin embargo, algunos sistemas activos pueden verse afectados por fuentes de luz externas, reflectividad, color y rugosidad. Estos inconvenientes se discuten posteriormente.

Existe un número de escáneres activos, diferenciándose todos ellos en la manera en la que el escáner recibe y/o analiza la señal de radiación reflejada. En los siguientes capítulos se describe con más detalle los diferentes tipos de escáneres activos.

2.5.1. Medición basada en triangulación

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

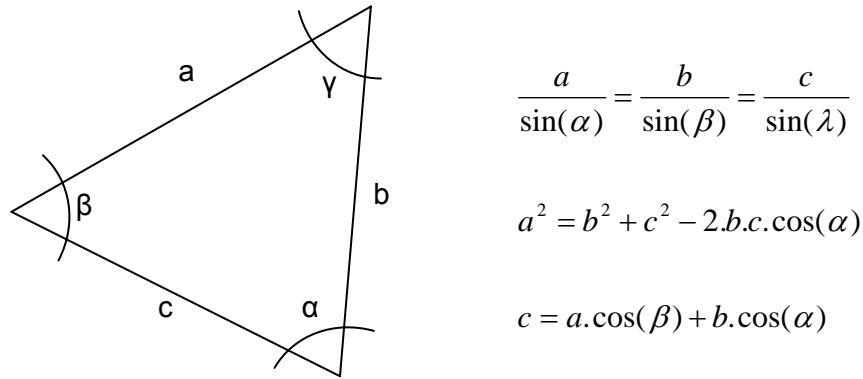


Figura 6: Principios de la triangulación

Un láser escáner por triangulación utiliza el mismo principio (Fig. 6) para investigar el entorno. Se dirige un patrón láser sobre el objeto y se emplea una cámara para buscar la localización de la proyección del mismo. El emisor láser y la cámara se instalan con un ángulo constante, creando un triángulo entre ellos y la proyección del láser sobre el objeto. De ahí, el nombre de triangulación. Debido a esta configuración, la proyección del láser cambia el campo de visión de la cámara en función de la distancia a la cámara.

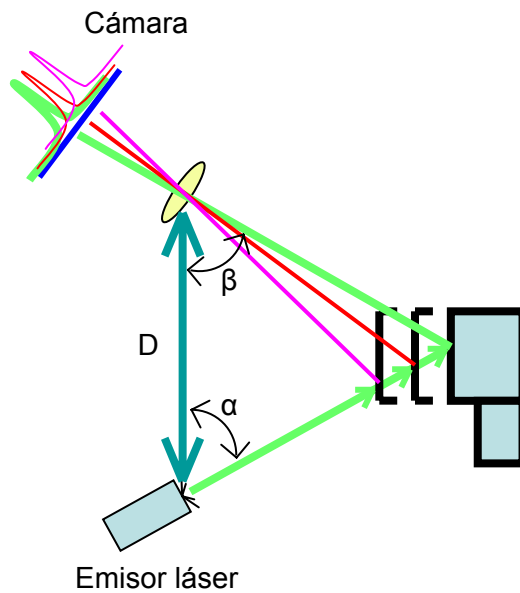


Figura 7: Principio del láser escáner basado en triangulación

Analizando la Figura 7 se observa que el lado D del triángulo es conocido, es decir, la distancia entre la cámara y el emisor láser. El ángulo del emisor láser α , también es conocido. En ángulo de la cámara β puede ser determinado encontrando la localización del haz láser en el campo de visión de la cámara. Estos tres elementos determinan completamente la forma y el tamaño del triángulo y proporcionan la profundidad exacta del objeto medido.

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

Como resumen, posibles maneras para reducir la imprecisión en la dirección de la profundidad son:

- Reducción de la distancia del objeto al escáner → reduce los efectos de las sombras
- Incremento de la base de triangulación (D) → también aumentan los efectos de las sombras
- Incremento de la distancia focal de la lente → Disminuye el campo de visión
- Reducción de la imprecisión de la medición → más píxeles en la cámara

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

A causa de las limitaciones físicas de usar una base mayor y un campo de visión limitado en la cámara, los escáneres por triangulación se usan en aplicaciones que generalmente requieren una distancia de uso menor de 10 metros. Comparados con los escáneres de medio y largo alcance basados en los principios de demora (ver capítulo 2.5.2), los escáneres por triangulación alcanzan precisiones muy elevadas, del orden de micras.

En la práctica, el método de triangulación activa fue inventado para solucionar en notable problema de correspondencia encontrado en las técnicas de medición pasiva. El problema de correspondencia se puede establecer de la siguiente manera: dadas dos imágenes, I1 e I2, de una escena tomada desde dos puntos de vista, la orientación relativa de las cámaras y un par de puntos homólogos entre las dos imágenes, se puede calcular el correspondiente punto en 3D usando el principio de triangulación. De este modo, el problema de correspondencia consiste en encontrar pares de puntos homólogos en diferentes imágenes. El método de triangulación activa usa la luz del láser para solucionar este problema marcando el punto del objeto con el color de la luz del láser. De este modo, el haz puede ser detectado fácilmente en la imagen.

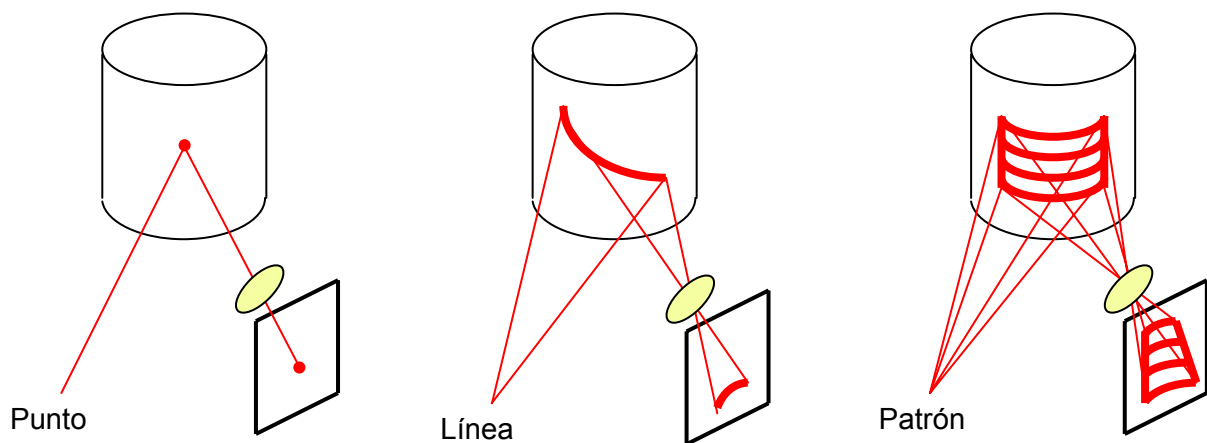


Figura 8: Diferentes técnicas de proyección usadas en los escáneres de triangulación

Para evitar el uso de fixturas, se han impuesto algunas modificaciones innovadoras. En lugar de mover/rotar el emisor láser para cubrir todo el objeto, se pueden proyectar patrones de puntos o líneas que cubran todo el objeto a la vez (Fig. 8). Hasta el momento se han utilizado diferentes patrones que van desde patrones de líneas regulares hasta patrones espacialmente codificados que modulan su frecuencia o su fase en el tiempo para

proporcionar una mejor precisión (Figs. 9 y 10). En el último caso se requiere que el escáner esté estático en relación con el objeto.

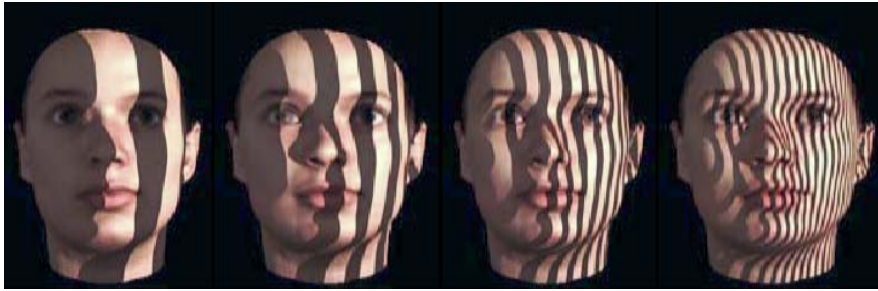


Figura 9: Proyección de un patrón regular (tomado de [5])

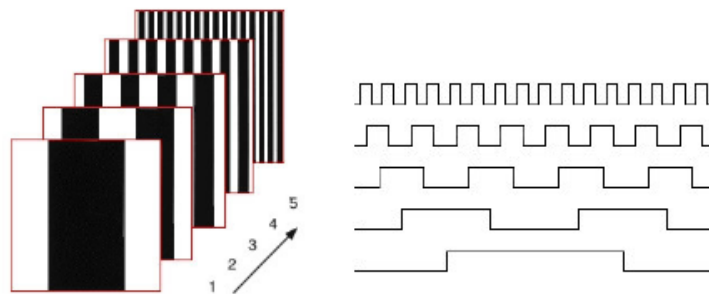


Figura 10: Patrón de código binario modulado en fase, también llamado proyección *fringe*

Incluso se utilizan patrones más complejos basados en el efecto Moiré para aumentar la precisión y robustez de estos sistemas. El efecto Moiré se produce como resultado de interactuar juntas dos señales con amplitud modulada (Fig. 11). Este fenómeno se puede observar en la televisión cuando se entrevista a gente que viste alguna prenda de ropa a rayas. Un escáner Moiré proyecta un patrón regular sobre el objeto a escanear mientras que la cámara que toma la escena tiene integrado otro patrón regular. La interferencia de estos dos patrones genera un patrón Moiré a partir del cual se pueden determinar cambios precisos de profundidad.

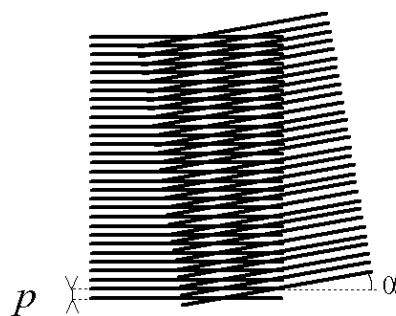


Figura 11: Patrón Moiré formado por dos conjuntos de líneas paralelas. Un conjunto está inclinado un ángulo de 5° respecto al otro (tomado de [6])

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

2.5.2. Medición basada en tiempo

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

2.5.2.1. Escáneres basados en pulsos (Tiempo de vuelo) (detección incoherente)

Como ya se ha dicho en el apartado 2.3, las ondas de luz viajan con una velocidad finita y constante a través de un medio. Por consiguiente, cuando puede medirse la demora durante el cual la luz viaja de una fuente a un objeto reflectante y regresa a la fuente, la distancia a dicha superficie (Fig. 12) puede calcularse mediante la fórmula siguiente:

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

Donde:

c = velocidad de la luz en el aire

t = tiempo que tarda la señal en ir y volver

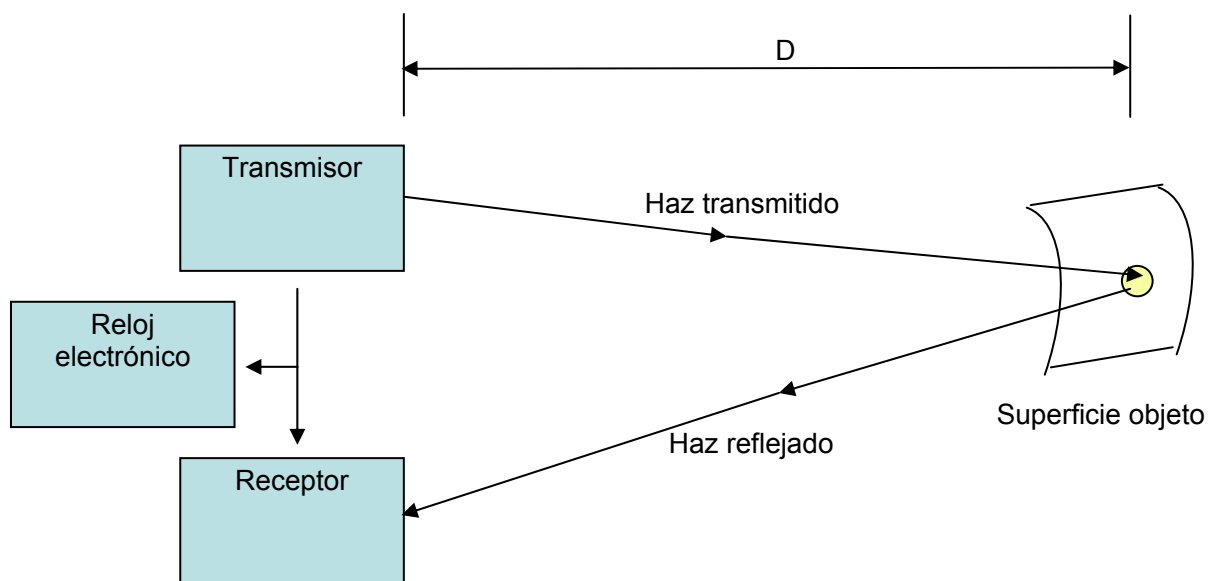


Figura 12: Principio de un láser escáner basado en el tiempo de vuelo

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

Los escáneres por tiempo de vuelo no suelen usar haces continuos, sino pulsos de láser. Escanean todo su campo de visión punto a punto cambiando la dirección del haz mediante una unidad de desviación (véase el apartado 2.5.3). Un láser escáner 3D típico basado en el tiempo de vuelo puede medir de 2.000 a 50.000 puntos por segundo.

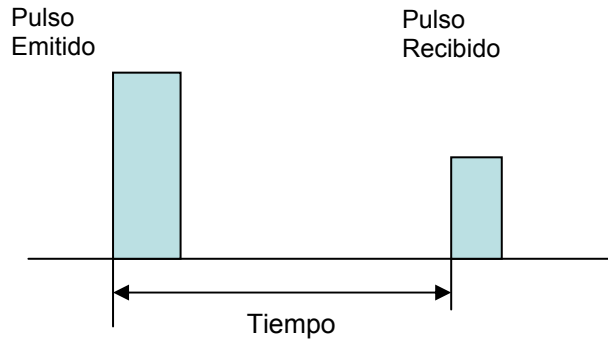


Figura 13: Medición láser por pulsos

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

$$t > T_{pulso}$$

o

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

Para entender mejor estas ecuaciones, podemos utilizar valores. Tomando T_{pulso} como 10ps, la máxima precisión que se puede alcanzar es de $d = 1.5\text{mm}$. La mayoría de los sistemas comerciales de medio y largo alcance proporcionan una precisión entre 6 y 10 mm. Como la precisión depende del mecanismo del reloj, el error de un escáner por tiempo de vuelo es casi independiente de la distancia (excepto en el caso de los láseres de huella, ver el capítulo 2.6.1).

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

En un sistema de tiempo de vuelo, la máxima frecuencia de pulso está determinada por el hecho de que el emisor no puede enviar un pulso hasta que no haya recibido el anterior [7]. La finalidad de esta restricción es evitar la confusión en la llegada de los pulsos, lo que recibe el nombre de máximo rango de certeza. Este parámetro depende de la duración del pulso y de su frecuencia (Fig. 14).

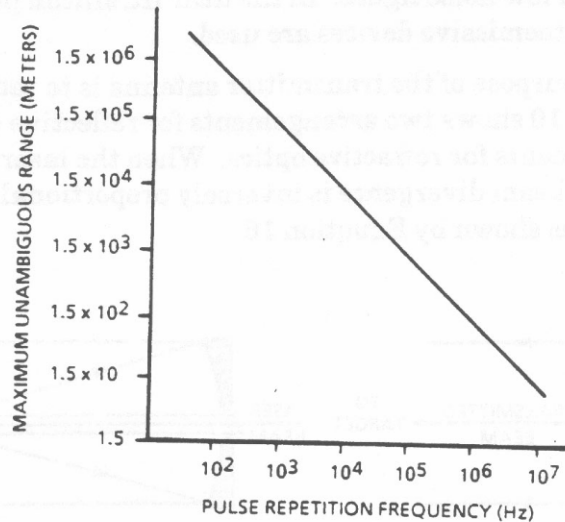


Figura 14: Máximo rango de certeza en función de la frecuencia de pulso (tomado de [7])

Hay tres factores principales que determinan la precisión de un sistema de medida por pulsos [7]:

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

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

En la Figura 15 se muestran algunos escáneres basados en el tiempo de vuelo existentes en el mercado. En el año 2008, los fabricantes más conocidos son: *Optech*, *Leica*, *Riegl*, *Trimble*, *Callidus*.



Figura 15: Láseres escáneres comerciales basados en el tiempo de vuelo

2.5.2.2. Escáneres basados en la fase

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

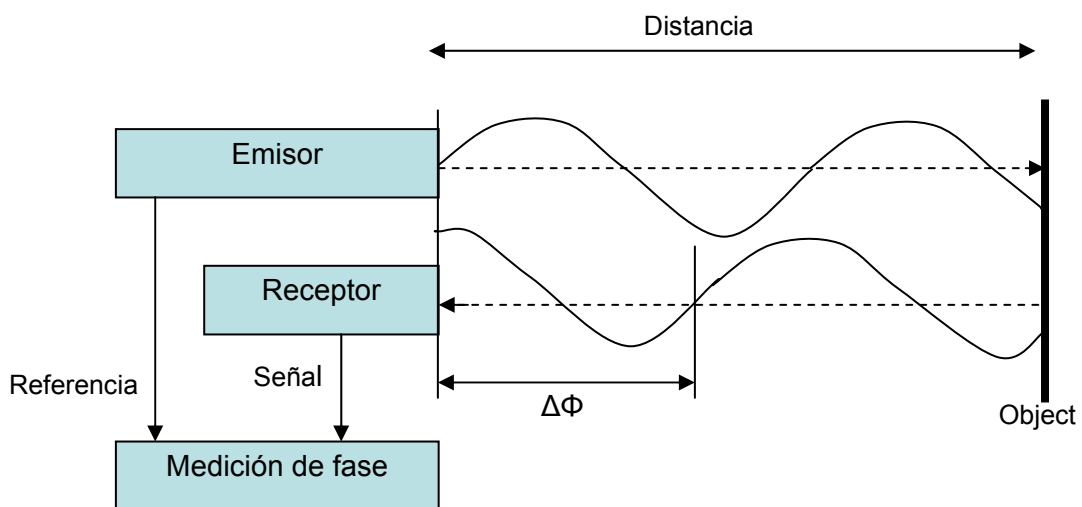


Figura 16: Principio de medición basado en la fase.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

En el ejemplo de arriba, el intervalo está sobre los 15 m (frecuencia de 10 Mhz). La ambigüedad en la medición de distancia es proporcional a z_{amb} e inversamente proporcional al cociente señal ruido (SNR). Para evitar el inconveniente de un intervalo de ambigüedad en la medición, se pueden utilizar varias frecuencias de manera que con las frecuencias más bajas (mayor longitud de onda) se localiza el punto a medir y con las altas frecuencias se mide la distancia con precisión. En la última generación de escáneres basados en fase, se superponen 2 o incluso 3 longitudes de onda diferentes (Fig. 17). La longitud de onda larga define la distancia con unicidad y la longitud de onda corta define la precisión que puede obtenerse. Generalmente, estos escáneres presentan una velocidad mayor y una resolución mejor que los escáneres de tiempo de vuelo, pero una precisión menor.

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

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

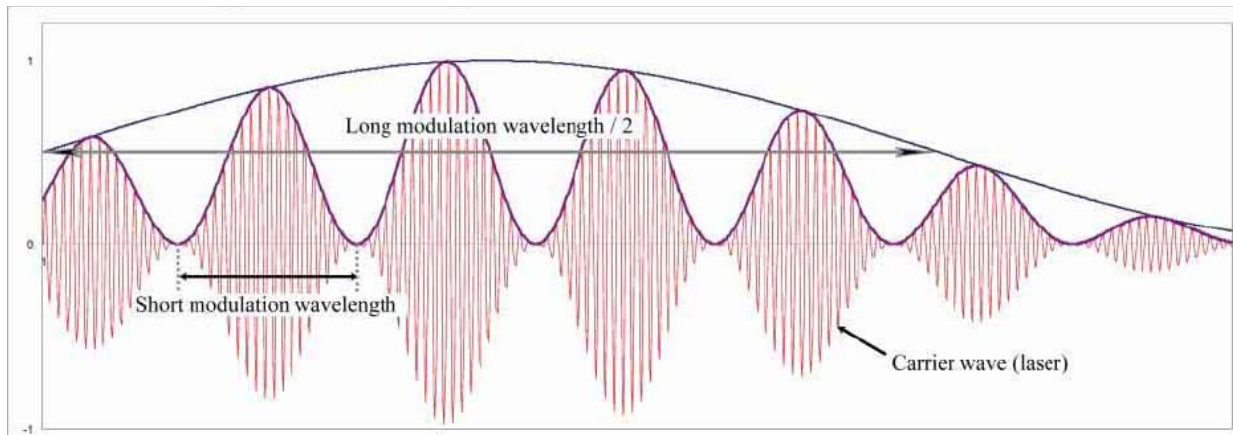


Figura 17: Esquema de dos modulaciones de onda y una onda portadora para la medición de distancias basada en fase (de [8])

En la Figura 18 se muestran algunos escáneres basados en la fase. En el año 2008, las compañías más conocidas son: *IQSun*, *Leica*, *Z+F* y *Faro*.



Figura 18: Láseres escáneres comerciales basados en fase

2.5.2.3. *Interferometría (coherente)*

Interferometría significa que se usa la interferencia de diferentes ondas de luz para registrar posiciones tridimensionales en el espacio. La interferometría óptica se utiliza desde el siglo XIX [7]. Las mediciones se restringieron a distancias de pocos centímetros debido a la intensidad limitada y la coherencia de las fuentes de luz convencionales. Estas restricciones se superaron cuando se inventaron los láseres. Los láseres han permitido desarrollar la interferometría en una técnica rápida, de alta precisión y versátil en la medición de largas distancias.

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

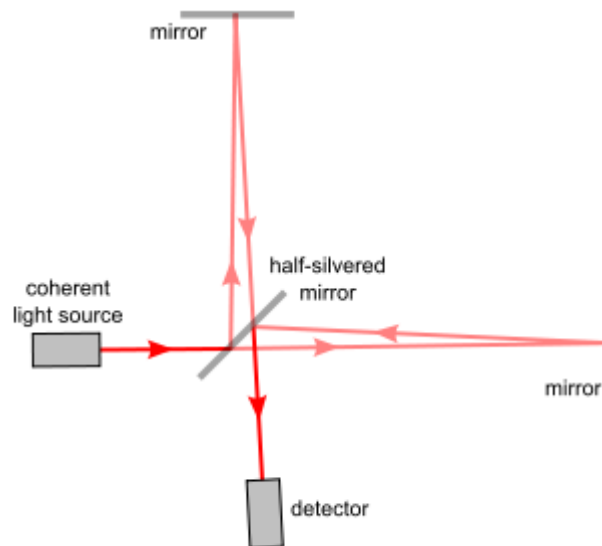


Figura 19: Un interferómetro Michelson [9]

En un láser escáner interferométrico, el haz láser se divide usando un prisma que refleja la mitad del haz en una dirección (brazo de referencia) y transmite la otra mitad (brazo de medición), Fig. 19. Ambas partes del haz viajan por diferentes caminos y cuando se combinan se producen interferencias *fringe*. Desplazamientos muy pequeños (del orden de una fracción de longitud de onda) pueden detectarse (usando la detección coherente), y también se pueden medir grandes distancias con baja ambigüedad (contando las longitudes de onda). Se han construido muchos sistemas con este principio, por ejemplo multionda, holografía e interferometría *speckle*. Estos sistemas consiguen precisiones muy altas a costa de ser muy caros.

2.5.3. Métodos de desviación del haz en los sistemas de medición basados en tiempo de vuelo.

El haz láser debe ser desviado para ser capaces de medir múltiples puntos desde el mismo punto de vista del escáner. En lugar de hacer rotar al escáner, se utiliza una unidad de desviación. La mayoría de estas unidades hacen uso de un espejo porque es mucho más ligero y se puede rotar con más rapidez y mayor precisión. Existen numerosos métodos para desviar el haz hacia una dirección específica sin tener que mover el escáner. De manera general, se emplean tres métodos para este propósito.

Una opción es usar un espejo oscilante que permite el movimiento del láser a lo largo de una línea. Una combinación de dos espejos permite la desviación del haz en dos direcciones (Figura 20a). Para aumentar la velocidad de la unidad de desviación y reducir la complejidad de girar un espejo y luego volverlo atrás, se ha logrado un prisma óptico reflectante que rota (Figura 20b). Este principio necesita sólo una dirección de rotación y, por tanto, es más rápido. Recientemente se ha introducido el uso de la fibra para hacer los sistemas más flexibles. Estos sistemas desvían el haz láser a un círculo de fibra óptica mediante un espejo rotatorio (Figura 20c). Luego, las fibras ópticas transportan el haz de luz en cualquier dirección requerida. Las ventajas de este sistema son:

- La proporción de pulsos láser no está vinculada con el ángulo de vista.
- Es posible tener un patrón de escaneado muy denso y regular.
- No es necesaria una calibración tras el ajuste de fábrica.
- Es posible un montura del láser hacia delante o lateral.

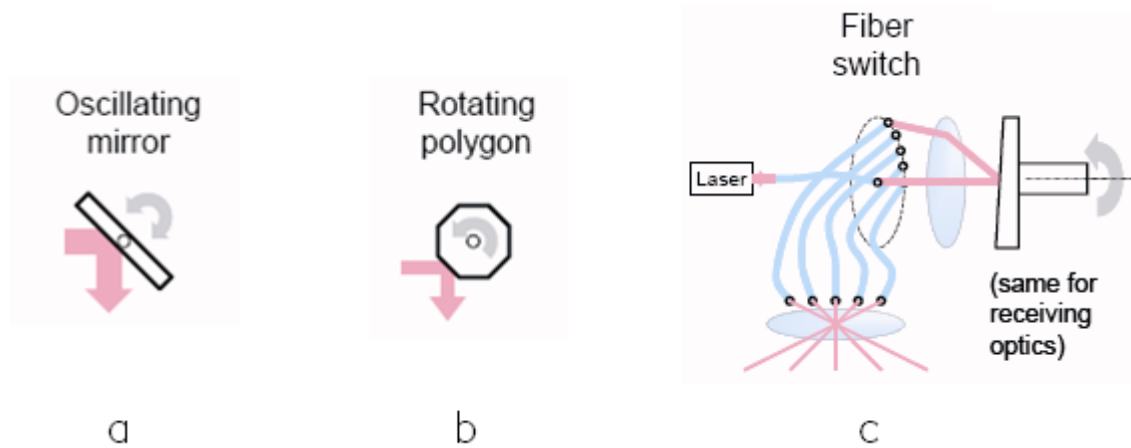


Figura 20: Métodos de desviación del haz (tomado de [10])

2.6. Aspectos metrológicos: análisis del error

Las compañías que producen escáneres láser publican las precisiones de sus equipos de manera que ilustran las ventajas de su producto en particular. Sin embargo, la experiencia demuestra que algunas veces esto no se debería tomar como valor real y que la precisión de los instrumentos, que se fabrican en series limitadas, varía de un instrumento a otro y depende de la calibración individual y del cuidado que se tenga en su uso.

Cada nube de puntos producida por un escáner láser contiene un considerable número de puntos que presentan errores groseros. Si el producto entregado es una nube de puntos, la precisión no se puede garantizar de la misma manera que con instrumentos topográficos convencionales. Se han publicado muchos artículos sobre tests de precisión con escáneres láser ([11-15]). *i3mainz*, parte de la *University of Applied Sciences* de Mainz y del *Institute of Geodesy and Photogrammetry* del *Swiss Federal Institute of Technology Zurich* [16] han realizado algún trabajo sobre la precisión de los escáneres láser. Se dividen en cuatro categorías las fuentes de error en el escaneado láser para poder describirlos de manera sistemática: errores instrumentales, errores relacionados con el objeto, errores por el entorno y errores metodológicos.

2.6.1. Errores instrumentales

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

2.6.1.1. Propagación del haz láser

La divergencia del haz es la anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida. La divergencia del haz tiene una fuerte influencia con la resolución de la nube, así como en la ambigüedad posicional del punto medido. La divergencia del haz se puede expresar mediante la siguiente ecuación [17]:

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

Donde:

- ρ_w = la distancia respecto de la circunferencia del haz
- w = radio del haz
- w_0 = radio mínimo del haz (en el punto inicial) = circunferencia del haz

Se entiende que la reflexión del haz tiene una forma gaussiana. Para largas distancias, la divergencia es aproximadamente lineal y el diámetro del haz se expresa como la posición que engloba el 86% de toda la energía del haz con una distribución de irradiancia gaussiana [18].

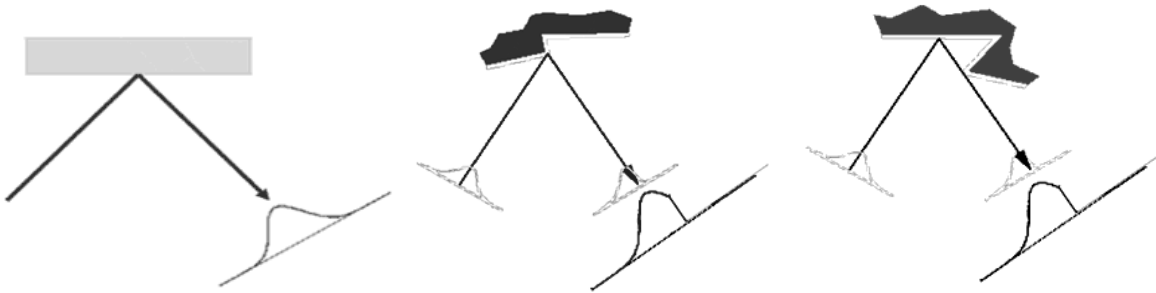


Figura 21: Reflexión ideal, iluminación parcial, oclusión parcial

En la práctica, la divergencia del haz tiene efecto en la localización del punto medido. La aparente localización del punto observado está en la línea central del haz emitido. Sin embargo, la localización real está en algún lugar de la huella del haz proyectada. Según Lichti y Gordon [19], la ambigüedad del haz es aproximadamente igual a un cuarto del diámetro del haz láser.

2.6.1.2. **Problema del borde partido**

Una de las consecuencias más importantes de la divergencia del haz es el problema del borde partido (Fig. 22). Cuando un haz láser choca contra un borde de un objeto, el haz se divide en dos. Una parte se refleja en la primera parte del salto del borde mientras que la otra parte va más lejos hasta que alcanza otra superficie. El resultado de ello es que la información de un pulso láser que llega al receptor llega desde dos puntos diferentes en el espacio. Las coordenadas de este punto, en relación con la posición del escáner, se calculan tomando la media de todas las señales recibidas para un mismo pulso y, por tanto, el punto se ubicará en un lugar incorrecto.

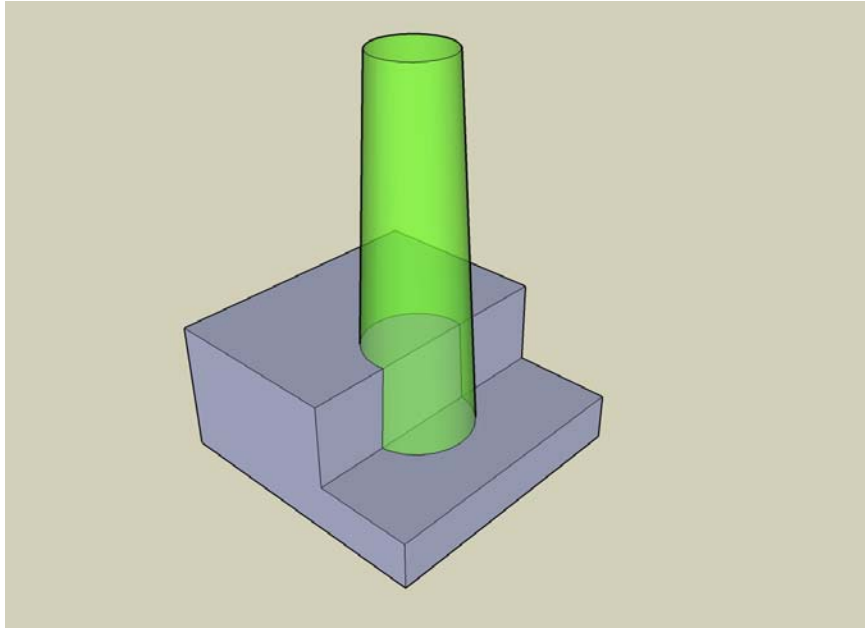


Figura 22: Problema del borde partido

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

2.6.1.3. *Ambigüedad en la distancia*

La ambigüedad en la distancia se puede expresar en función de un número de parámetros según el tipo de escáner láser y su principio de funcionamiento. A continuación, se resumen las ambigüedades en la distancia tomadas de Beraldin et al. [20].

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

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

Donde:

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

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

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

Donde:

- T_f es el tiempo de lanzamiento del pulso.
- SNR es la razón señal ruido.

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

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

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

Una comparación de la ambigüedad en la distancia para los diferentes tipos de escáner láser se puede ilustrar en un gráfico como el de la Figura 23.

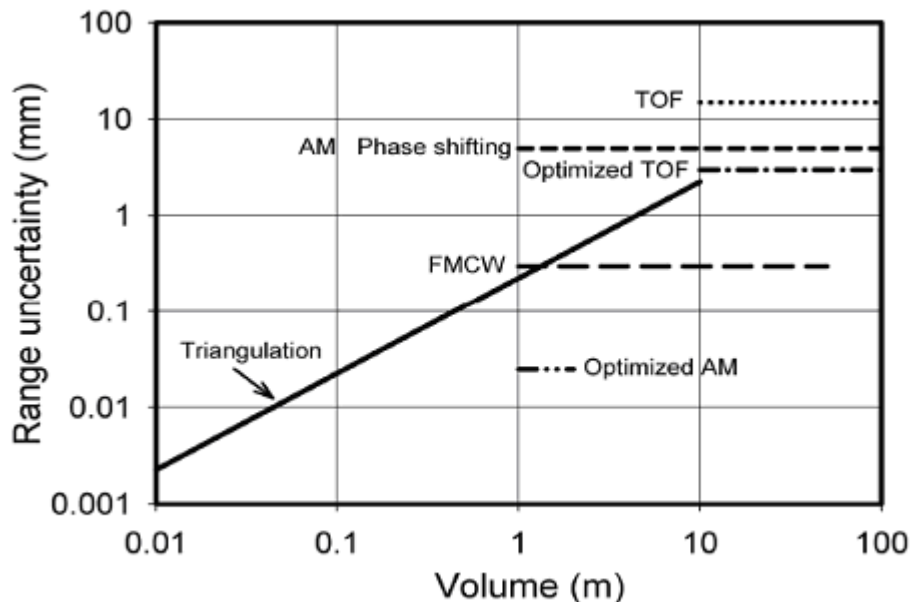


Figura 23: Ambigüedad en la distancia para diferentes tipos de escáner láser (tomado de [4])

2.6.1.4. Ambigüedad angular

La mayoría de los escáneres láser utilizan espejos rotatorios para guiar la señal láser hacia una dirección determinada. Una diferencia angular pequeña puede provocar un error considerable en las coordenadas cuando la distancia al escáner aumenta. La precisión angular depende de cualquier error en la posición de los espejos y la precisión en la medición de los ángulos. Como la posición de puntos aislados es difícil de verificar, se conocen pocas investigaciones acerca de este problema. Como se describe en Boehler et al. [21], los errores se pueden detectar midiendo distancias horizontales y verticales cortas entre objetos (por ejemplo, esferas) situados a la misma distancia del escáner y comparando estas mediciones con otras realizadas con métodos topográficos más precisos.

2.6.1.5. Errores en los ejes de un TLS (escáner láser terrestre)

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

- Eje vertical: Es el eje que permite al escáner mover el haz láser de forma horizontal. Dependiendo del tipo de escáner, panorámico o escáner de cámara, éste es el eje de rotación de la cabeza del escáner o el eje ortogonal a los ejes de oscilación de los espejos.
- Eje de colimación: Es el eje que pasa por el centro del espejo de escaneado y el centro de la huella del láser sobre la superficie del objeto escaneado.
- Eje horizontal: Es el eje de rotación del espejo de escaneado.

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

2.6.2. Errores relacionados con los objetos

Como los escáneres miden la reflexión del haz láser sobre la superficie, debemos tratar con las leyes físicas de la reflexión y las propiedades ópticas de los materiales. La reflexión de luz monocromática normalmente muestra rayos reflejados en muchas direcciones. Este tipo de reflexión isotrópica (difusa), Figura 24, se puede describir mediante la ley del coseno de Lambert:

$$I_{\text{reflected}}(\lambda) = I_i(\lambda) \cdot k_d(\lambda) \cdot \cos(\theta)$$

Con

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

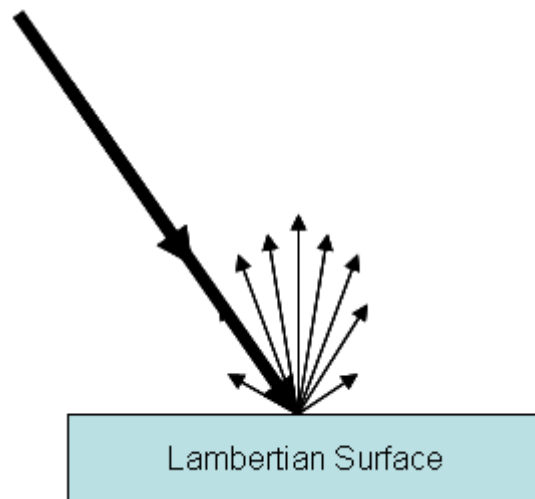


Figura 24: Reflexión sobre una superficie lambertiana

Esta fórmula nos muestra que el haz láser está afectado por la absorción de la señal que viaja por el aire, la reflexión del material sobre el que se mide y el ángulo de incidencia entre el haz láser y la superficie medida. Esto significa que para superficies muy oscuras (negras) que absorben la mayor parte del espectro, la señal reflejada será muy débil, por lo que la

precisión del punto estará afectada por el ruido. Superficies con alta reflectividad (superficies brillantes, por ejemplo) dan unas mediciones más fiables y precisas. Sin embargo, si la reflectividad del objeto es demasiado alta (superficies metálicas, cinta retroreflectantes...) el haz láser es desviado totalmente y dará en otras superficies o se propagará por el aire libre. Esta desviación provoca que el punto medido no sea el punto al que apunta el láser, sino otro o ninguno. Este tipo de ruido se le denomina ruido *speckle*.

El registro de superficies con reflectividad diferente también ocasiona errores sistemáticos en la distancia (Fig. 25), algunas veces incluso de varias veces la desviación estándar de una simple medición [21].

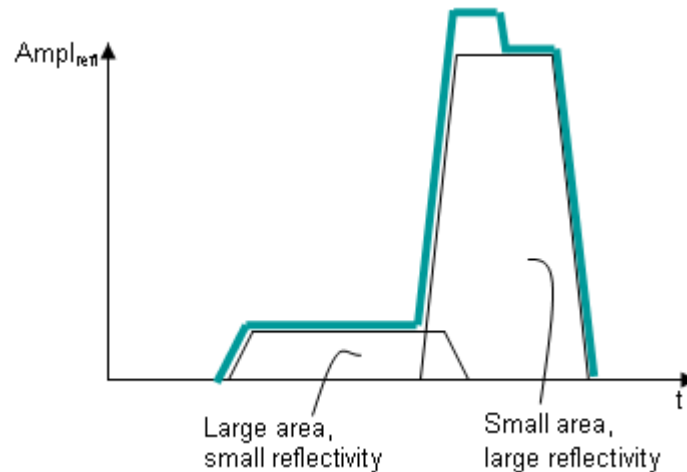


Figura 25: Respuesta de la señal cuando se escanean superficies con diferente reflectividad (tomado de [4])

Al igual que las propiedades de reflexión de la superficie, las propiedades del color también afectan a la precisión. Clark et al. [22] han visto que existen discrepancias sistemáticas significativas en la distancia que, en términos generales, se pueden relacionar con el color de cada superficie en relación y la longitud de onda del láser utilizado.

Aparte de los efectos de reflectividad, numerosos materiales presentan una capa semitransparente que permite pasar el haz láser refractándose y reflejándose en el propio material, como por ejemplo, la madera, el mármol y el poliestireno expandible (vid. Fig. 26). Estos efectos nos conducen a añadir una constante en las mediciones de la distancia, que debe ser considerada en su cálculo [23].

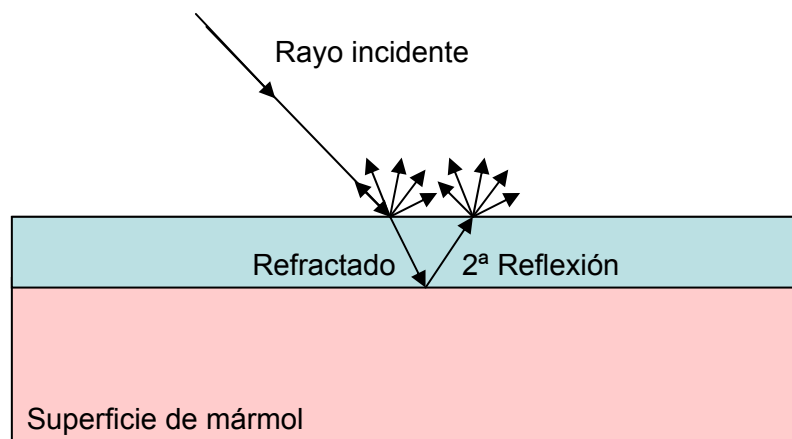


Figura 26: Efectos de la refracción en materiales semitransparentes no homogéneos

2.6.3. Condiciones ambientales

2.6.3.1. Temperatura

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

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

2.6.3.2. Atmósfera

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

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

La mayoría del software de escaneado láser proporciona una corrección del índice de refracción al establecer un parámetro de refracción. Generalmente, los escáneres están preparados para usar los parámetros atmosféricos del estándar ISO (15°C; 1013,25 hPa). Cuando se trabaja bajo diferentes condiciones atmosféricas, estos parámetros se deben adaptar. Una diferencia de temperatura de 10°C o de una presión de 35 hPa produce un error en la distancia de 1mm/100m.

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

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

2.6.3.3. Interferencia de radiación

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

2.6.3.4. Distorsión por movimiento

La mayoría de los escáneres láser escanean a una velocidad de 2.000-500.000 puntos por segundo. Aunque son muy rápidos, escanear a alta resolución puede llevar entre 20 y 30 minutos en el caso de los escáneres basados en el tiempo de vuelo y sobre 10 minutos en los escáneres basados en la fase. Durante este tiempo el escáner es susceptible de

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

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

Hay que tener en cuenta que el escáner también se mueve por cambios en la temperatura. Por ejemplo, si el sol da por un lado del escáner, las patas del trípode de ese lado se podrán expandir y distorsionar lentamente los datos escaneados (ver el apartado 2.6.3.1). Los últimos escáneres láser, también llamados estaciones láser, incorporan un compensador de eje dual integrado que compensa cualquier movimiento del escáner durante el proceso de escaneado.

2.6.4. Errores metodológicos

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

Los posibles errores generados durante la fase de registro o consolidación también se encuentran en esta categoría. Dependiendo de la técnica empleada para registrar las diferentes nubes de puntos, se introducen errores. Estos errores ocurren tanto con el método indirecto de registro/georreferenciación como con el método directo de registro/georreferenciación (ver apartado 3.5).

2.7. Estado actual del equipamiento de un escáner láser

Los escáneres láser actuales están preparados para abordar estacionamientos rápidos. Se combina el escáner, el panel de control, el almacenamiento interno y la batería en una única pieza. Los compensadores especiales de doble eje también están integrados de modo que nivelan automáticamente el escáner. Algunos escáneres llevan acoples para receptores GPS y/o compensadores INS para realizar un posicionamiento y una orientación directa del escáner en el espacio. Algunos escáneres integran cámaras digitales o proporcionan una montura para añadir información color de alta resolución a las nubes de puntos.

La tecnología de escaneado láser está continuamente en desarrollo:

- Dianas de referencia con receptores GPS integrados evitan la necesidad de tener que registrarlas con estaciones totales.
- Filtrado de nubes de puntos homogéneos por hardware.
- Combinación de los mejores escáneres de tiempo de vuelo y basados en fase en un solo escáner.

La Tabla 1 proporciona una idea de algunos de los escáneres disponibles en el mercado en el año 2008.

Scanner/Criterion		Trimble GX	Leica ScanStation	FARO LS 880 HE	Z+F IMAGER 5006
Scan method		Time-of-flight		Phase difference	
Field of view [°]		360 x 60	360 x 270	360 x 320	360 x 310
Scan distance [m]		200	300	< 76	< 79
Scanning speed		≤ 5000pts/s	≤ 4000pts/s	120kHz	≤ 500000px/s
Angular re- solution [°]	Vertical	0,0017	0,0034	0,009	0,018
	Horizontal	0,0017	0,0034	0,00076	0,018
3D scan precision		12mm/100m	6mm/50m	n.a.	n.a.
Camera		integrated	integrated	add-on option	add-on option
Inclination sensor		compensator	compensator	yes	yes

Tabla 1: Resumen de las especificaciones técnicas de algunos sistemas comerciales de escaneado láser disponibles (adaptación de [24])

En la página web de la ISPRS se puede encontrar un buen resumen de los diferentes fabricantes de escáneres láser y las especificaciones técnicas de sus aparatos.

http://www.cage.curtin.edu.au/~gordonsj/isprs_wgv3/survey.html

3. Capítulo III: El escaneado láser en la práctica

Utilizar un escáner láser en la captura de un edificio no es sólo apretar un botón y esperar a que se obtengan los resultados. Se requiere un profundo conocimiento del equipo y del proceso de escaneado. Algunos pasos del proceso de escaneado son bastante automáticos mientras que otros todavía requieren una labor intensa. En este capítulo se discutirá el proceso del escaneado láser terrestre.

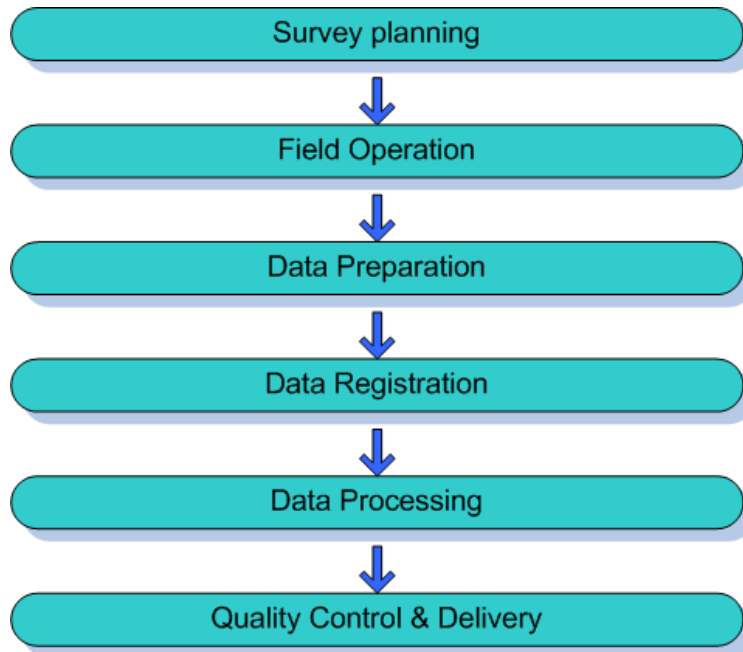


Figura 27: Flujo de trabajo con un escaner láser terrestre

3.1. Planificación

De momento no hay ningún proceso estándar para la planificación de un escaneado láser terrestre. Sin embargo, la planificación debe contener, como mínimo, los siguientes puntos de acuerdo con la comunidad de usuarios de escáneres láser (Figura 28):

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

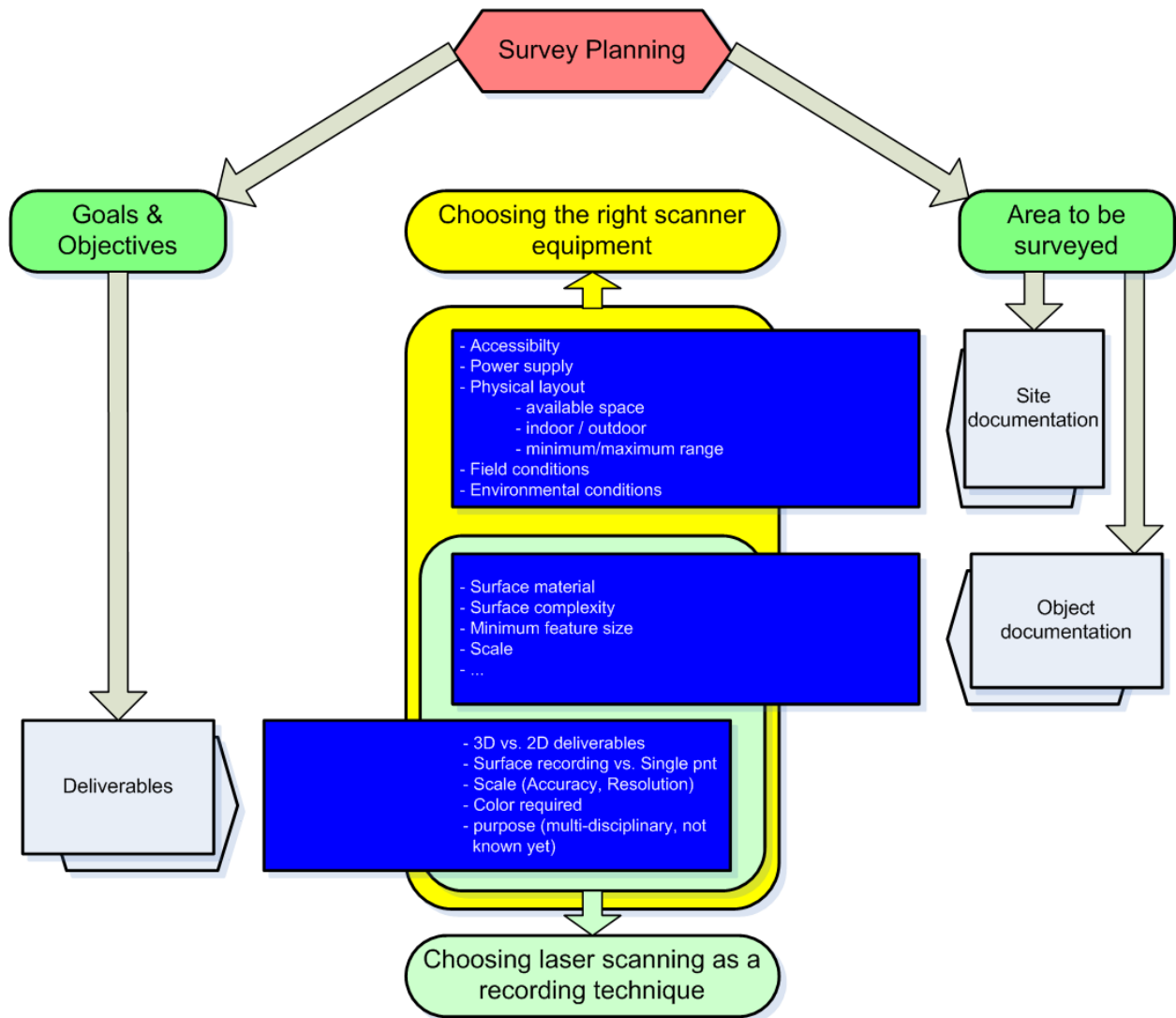


Figura 28: Diagrama de la planificación

3.1.1. Determinar los objetivos

Uno de los puntos clave cuando se escanea un objeto son las necesidades del cliente. Para entender completamente las necesidades del cliente debemos responder algunas preguntas:

- ¿Por qué el cliente quiere que se documente ese objeto y qué quiere hacer con los datos de la documentación?
- La justificación de la necesidad de documentar un objeto o un edificio puede proporcionar una idea acerca de los requerimientos en los resultados y en la precisión. A menudo, el cliente puede pensar que el escaneo láser es la herramienta perfecta para su problema porque ha escuchado que una buena compañía lo ha usado. O, incluso, al contrario, el cliente puede no estar seguro del escaneo láser para capturar su edificio porque es escéptico y confía más en las técnicas tradicionales. Sabiendo las necesidades de los clientes, se puede ofrecer una guía sobre las técnicas de medición más apropiadas.
- ¿Qué resultados necesita?

En relación con la motivación de la documentación, necesitamos definir los documentos a entregar. Estos documentos pueden ser desde planos 2D y elevaciones hasta modelos 3D o incluso animaciones 3D. En algunos casos puede que el cliente sólo quiera la nube de puntos cruda con la finalidad de archivarla. Particularmente importante es el nivel de detalle (tamaño de los elementos más pequeños) de los documentos a entregar porque ello ayuda a determinar la resolución (densidad de puntos) [25].

3.1.2. Análisis del área a levantar

Recopilar cuanta más información mejor sobre el objeto a documentar nos da una idea de la complejidad y del tiempo necesario para llevara cabo la tarea. Como ya se ha mencionado en el párrafo anterior, la resolución requerida y la precisión de la documentación vienen condicionadas por la escala del levantamiento o por la entidad mínima reconocible en los productos finales que se entregan. Notas de campo, informes, mapas, fotografías o videos del lugar pueden ayudar a determinar los posibles riesgos del momento de captura, de igual modo que levantamientos anteriores que pudieran haber sido realizados con otras técnicas (mediciones a mano, con GPS o con estación total).

No sólo nos puede proporcionar información útil el edificio en cuestión sino también sus alrededores. El lugar puede estar emplazado en un lugar disperso con obstrucciones, limitando los estacionamientos posibles, o puede incluso haber restricciones temporales para acceder al lugar (por ejemplo, en las obras de los túneles del metro). Indirectamente, los emplazamientos posibles del escáner láser determinan el alcance máximo y mínimo que el escáner debe cumplir.

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

- Estructuras de superficies muy complejas (formas orgánicas).
- Necesidad de entregar documentos 3D.
- Necesidad de medición de superficies en lugar de mediciones puntuales.
- Datos que puedan ser usados por un equipo multidisciplinar para diferentes propósitos.
- Documentar sin saber a priori el futuro uso de los datos.
- Restricciones de acceso.
- Etc.

3.1.3. Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser

Una vez recopilada la información del sitio a documentar y elegido el escaneado láser como la mejor técnica posible para ello, hay que planificar el emplazamiento del equipo láser escáner así como los puntos de referencia (Figuras 29 y 31, respectivamente).

Las posiciones óptimas para el estacionamiento del escáner se deben elegir de manera que garanticen una máxima cobertura y precisión y, al mismo tiempo, se minimice el número de inicializaciones. Como ya se dijo en el apartado 2.6, la precisión de la medición depende del diámetro de la huella del láser, indicándose que el ángulo de incidencia (ver Figura 30) y el alcance son de gran importancia para determinar la posición del escáner. En [26] se describe un minucioso análisis para determinar la configuración óptima del escáner para

alcanzar la precisión requerida. La siguiente lista proporciona un conjunto de reglas prioritarias a tener en cuenta cuando se determina la posición óptima del escáner.

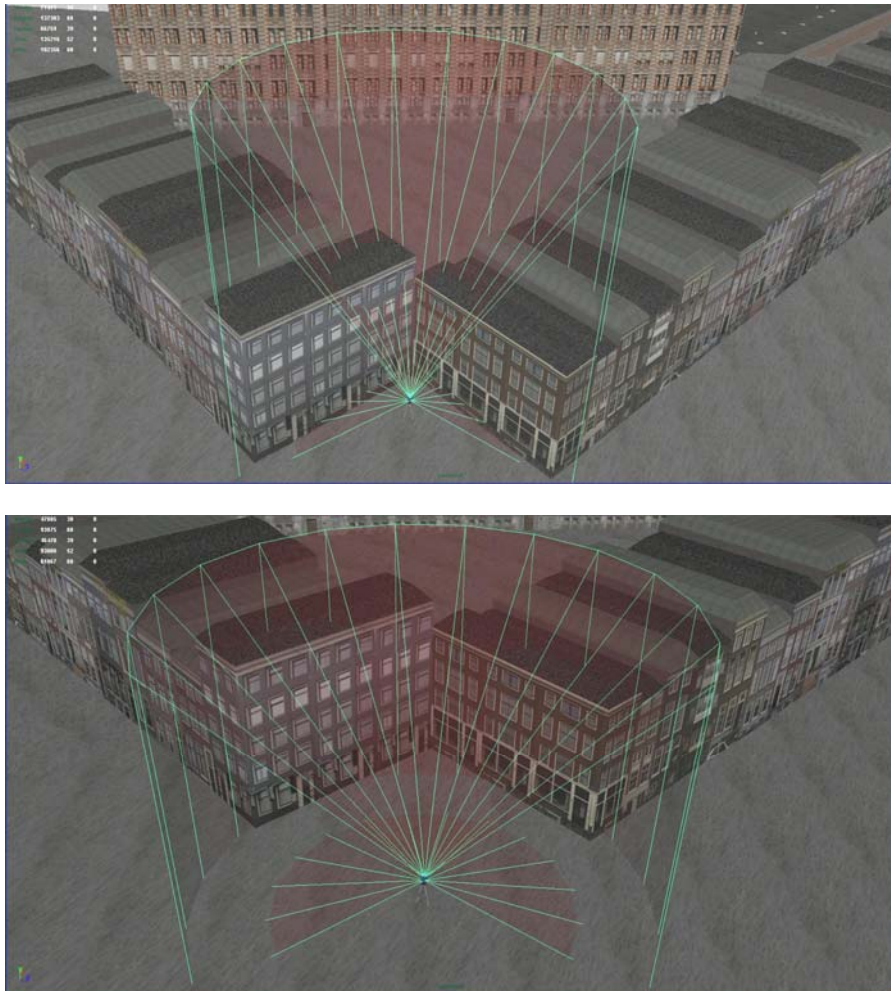


Figura 29: (Arriba) Mal posicionamiento del escáner: presenta ángulos muy inclinados. (Abajo) Buen posicionamiento del escáner

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

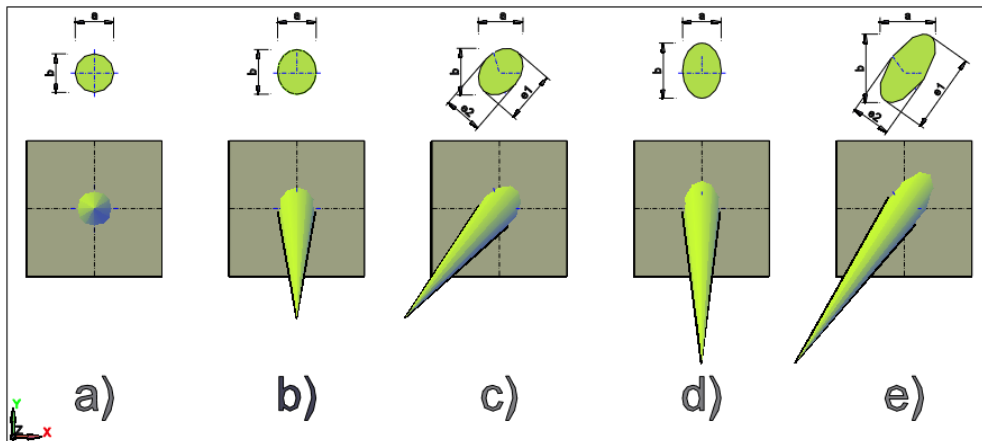


Figura 30: Huellas del láser cuando se escanea con diferentes ángulos

- Intentar reducir el número de estacionamientos

Otros factores importantes que hay que tener en cuenta son:

- Seguridad y salud.
- El entorno (vibraciones, viento...).
- Elevación del escáner sobre el suelo.
- Visibilidad de los puntos de referencia artificial o natural.

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

Junto a las posiciones óptimas del escáner, los tipos de puntos de referencia y sus posiciones y/o configuración geométrica también son importantes. Los puntos de referencia se usan principalmente para registrar los escaneados realizados desde diferentes posiciones. Actualmente hay una gran variedad de dianas disponibles: retroreflectantes, esféricas, de papel, prismas... En el futuro, habrá dianas incluso con receptores GPS.

Uno de los puntos más importantes cuando se utilizan las dianas es que tienen que estar esparcidas lo más ampliamente posible, no sólo en las direcciones de los ejes X e Y, sino también en la dirección del eje Z. Esto se olvida frecuentemente y todas las dianas se colocan simplemente en el suelo (Fig. 31).

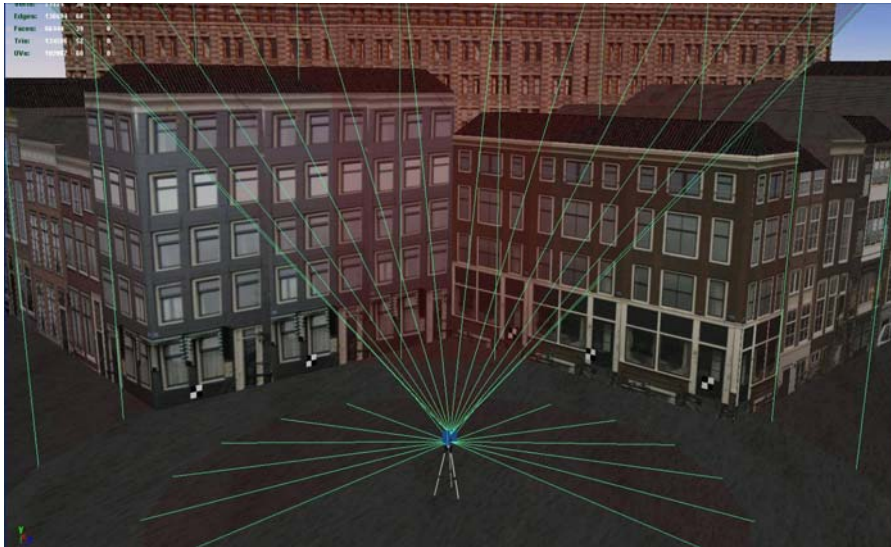


Figura 31: (Arriba) Mala configuración de las dianas. (Abajo) Buena configuración de las dianas

Algunas configuraciones de las dianas no producen una solución única cuando se realiza el registro. Por ejemplo, si todas las dianas están en una línea, tenemos un grado de libertad, la rotación en torno a esa línea.

Frecuentemente las compañías de los escáneres proporcionan dianas especiales retroreflectantes y esféricas. Estas dianas están diseñadas para reflejar la mayor parte del haz láser. El escáner puede, entonces, detectar automáticamente estas dianas y, tras un escaneado de mayor resolución, determinar el centro exacto ajustando una superficie primitiva a la nube de puntos medida.

Algunas veces se emplean dianas de papel dado su bajo coste. En otras ocasiones, se coloca un prisma retroreflectante sobre el escáner. Conociendo la distancia entre el espejo del escáner y el prisma, se puede determinar la posición del escáner midiendo el prisma con una estación total.

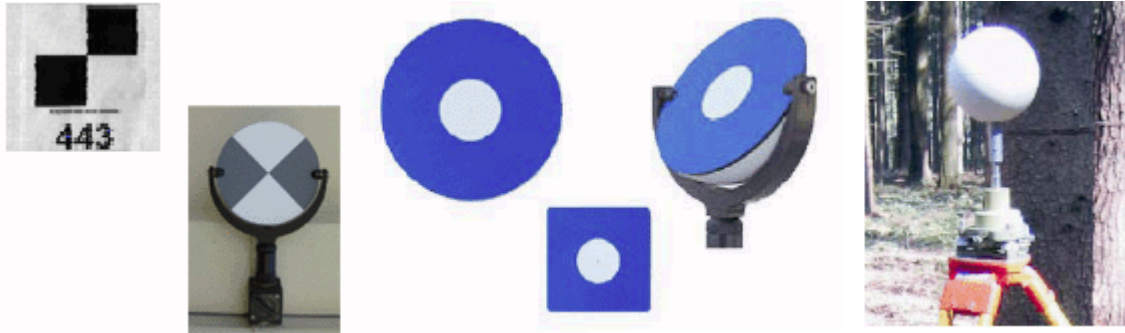


Figura 32: Tipos de dianas artificiales

Mills and Barber [25] establecen que, dependiendo de la técnica de registro empleada, debe haber al menos 4 puntos de referencia/dianas bien distribuidas en cada escaneado. En el apartado 3.5 se da una explicación más detallada de los métodos de registro y sus respectivas configuraciones óptimas de dianas.

3.1.5. Gestión de los datos

Es importante reflexionar acerca del almacenamiento de los datos antes de empezar a escanear. Por ejemplo, utilizando un *Leica* HDS4500, un escaneado ocupa 140Mb aproximadamente. Con una media de 20-30 escaneados al día, se genera un total de 7GB aproximadamente. Esto requiere una prudente planificación.

3.2. Trabajo en campo

3.2.1. Preparación del levantamiento

La fase de preparación del levantamiento incluye la toma de decisión de la técnica de registro a usar. Estas técnicas se pueden subdividir en tres categorías: registro mediante resección de dianas escaneadas, registro mediante estacionamiento en puntos de referencia conocidos y registro utilizando constreñimientos punto a punto (véase el apartado 3.5 para más detalles).

3.2.2. Estacionamiento del escáner

El estacionamiento de un escáner sigue generalmente un procedimiento similar al de una estación total. Se llevan a cabo los siguientes pasos (Figura 33):

- Montaje del trípode: Se abre el trípode y se extienden sus patas. Hay que asegurarse de que el trípode está en un suelo estable. Normalmente, el escáner se coloca a la altura de los ojos. Cuando la superficie del suelo tiene que ser escaneada es mejor una posición más alta porque proporciona un mejor ángulo de inclinación.
- Sujetar el escáner al trípode colocándolo sobre él y anclándolo.
- Dependiendo de la técnica de registro, el escáner se deberá poner sobre un punto de referencia conocido.
- Nivelar el escáner. Variando la longitud de dos de las patas del trípode, se nivela la superficie superior utilizando niveles tóricos. La burbuja debe estar dentro del círculo interior. Hay que ser lo más precisos posible. Cuando se estaciona sobre un punto de referencia, este procedimiento no debe alterar el punto sobre el que estábamos en el paso 3.

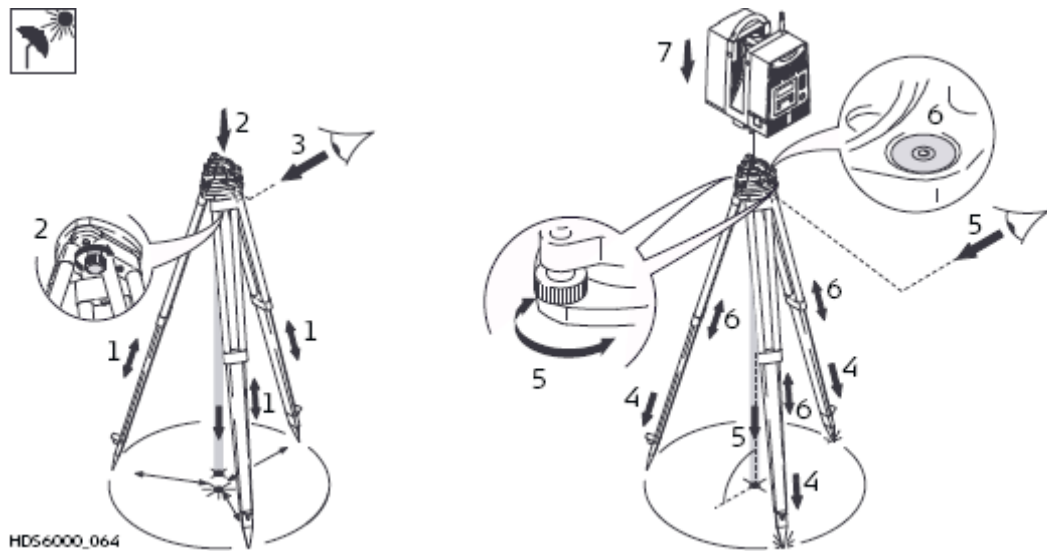


Figura 33: Estacionamiento de un escáner láser (de [27])

3.2.3. Conexión del escáner

Antes de encender el escáner, lo común es que éste deba estar conectado a un ordenador portátil que pueda recibir y almacenar todos los puntos que tome el escáner y controle sus propiedades. La energía se puede suministrar mediante baterías, un generador o directamente de la red eléctrica.

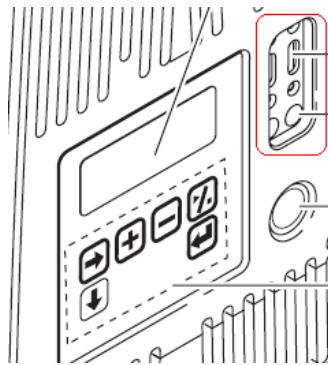


Figura 34: Control completo integrado en el escáner Leica HDS6000 (de [27])

Estos son los pasos para conectar un escáner a un ordenador:

- Conectar el escáner al ordenador mediante el cable apropiado (cable de red estándar para los escáneres viejos o un cable FireWire para los más nuevos).
- Conectar la batería al escáner.
- Quitar la tapa de la lente del escáner y desbloquear el escáner (la mayoría de los escáneres panorámicos tienen una llave de bloqueo para protegerlos de movimientos mientras se transportan).
- Encender el escáner y esperar a que se caliente.
- Abrir el programa del ordenador portátil.

- Establecer la conexión entre el ordenador y el escáner (mediante dirección IP, cable USB, conexión wireless...).
- Abrir el programa de control del escáner e inicializar la conexión.

Los escáneres de última generación (como el *Leica* HDS6000) están integrados en su totalidad, es decir, combinan un controlador, el almacenamiento de los datos y la batería en una sola pieza.

3.2.4. Ajustes del escáner

Cuando el programa de control del escáner ya ha establecido conexión con el escáner, hay que especificar los parámetros que se van a usar en el proceso de escaneado.

3.2.4.1. Definición del área a escanear

Aunque la mayoría de los escáneres actuales pueden escanear 360° totalmente (Figura 35), esto no es necesario siempre. Por tanto, necesitamos definir el área a escanear. Para ello, existen varias opciones.

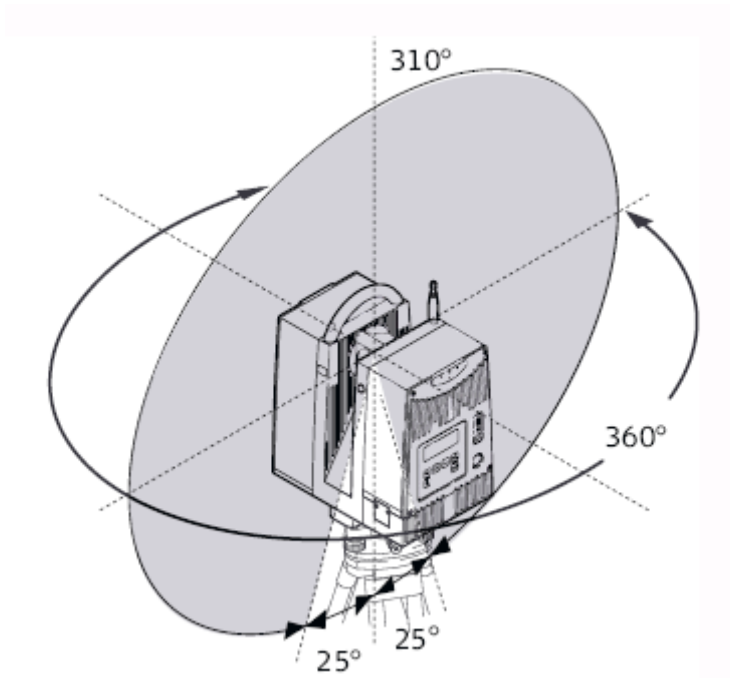


Figura 35: Ejemplo del campo de visión de un escáner *Leica* HDS6000 (de [27])

Algunos escáneres tienen un panel de control minimizado en el mismo escáner que puede definir el área a escanear. Esta forma es muy aproximada, pero muy rápida.

Generalmente, el área a escanear se define mediante el control del escáner en el programa. Con este método, primero se captura una imagen de la escena y luego seleccionamos sobre la imagen el área a escanear (Figura 36). Hoy en día, los escáneres llevan cámaras o incluso videocámaras integradas que muestran al usuario lo que se está escaneando.

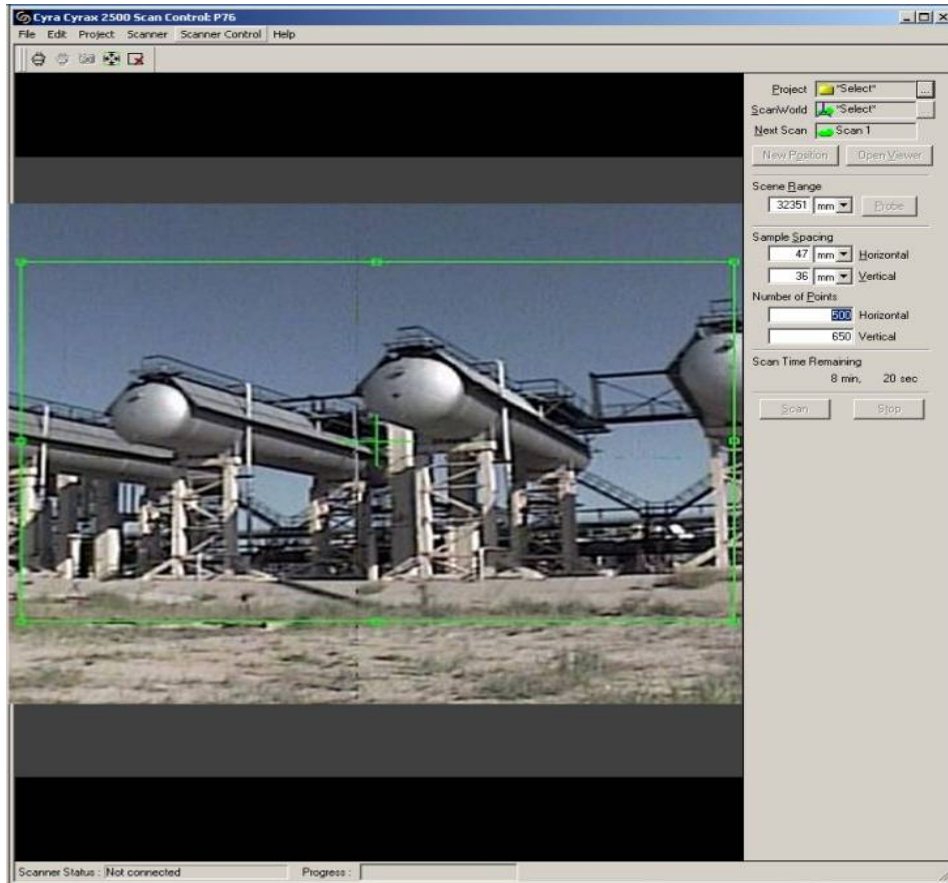


Figura 36: Definición del área a escanear

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

3.2.4.2. Resolución

La cuestión clave cuando se utiliza un escáner es elegir la correcta resolución. La resolución se define como la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, y de esta manera determina la densidad de puntos de la nube. Frecuentemente se confunde precisión con resolución. Aunque hay una cierta relación entre ambos términos, definen aspectos diferentes del proceso de escaneado.

La resolución queda determinada por el detalle de menor tamaño que se necesita reconocer en el resultado final. Por tanto, está directamente relacionado con la escala del resultado. De hecho, los escáneres láser superan el proceso inteligente que hacemos los humanos cuando analizamos un edificio (por ejemplo dividir un edificio en planos, líneas y puntos) al tomar una gran cantidad de puntos con información redundante. Por ejemplo, en áreas suaves como planos se necesitan menos puntos para modelar el objeto, mientras que en superficies con mayor curvatura se necesitan muchos más puntos, incluso a veces más de los que el escáner nos puede dar.

Hay que decir que cuánto más alta sea la resolución, se necesitará escanear más puntos y, por tanto, se tardará más. Además del tiempo, el tamaño de los datos almacenados también aumenta. Se debe tener presente que escaneando con una resolución mayor que la

precisión de cada punto se puede producir un muestreo excesivo y, así, resulta más ruido en el conjunto de datos final.

Como la mayoría de los escáneres trabajan con un ángulo constante entre dos puntos consecutivos (basado en coordenadas polares), la resolución del escáner estará definida para una cierta distancia al escáner. Esta distancia se puede introducir manualmente a través del software, o se captura la distancia a un punto y se define la resolución a esa distancia del escáner. Los puntos escaneados a una distancia mayor tendrán una resolución menor, mientras que los puntos más cercanos tendrán una resolución más alta. Generalmente, se aconseja tomar un punto de muestra en la zona más alejada del escáner.

Algunos programas de control del escáner nos dan rápidamente los ajustes para la resolución, como por ejemplo, la resolución más baja, la media y la más alta. Estos ajustes rápidos establecen un valor de resolución para una cierta distancia. En el manual del escáner, aparecen tablas que muestran la resolución efectiva a varias distancias para cada configuración de ajustes.

English Heritage, una institución del Reino unido con bastante experiencia en la gestión de entornos históricos, creó una tabla que ayuda a determinar la apropiada resolución para un proyecto [28, 29].

<i>feature size</i>	<i>example feature</i>	<i>point density required to give 66% probability that the feature will be visible</i>	<i>point density required to give a 95% probability that the feature will be visible</i>
10000mm	large earth work	3500mm	500mm
1000mm	small earth work/ditch	350mm	50mm
100mm	large stone masonry	35mm	5mm
10mm	flint galleting/large tool marks	3.5mm	0.5mm
1mm	Weathered masonry	0.35mm	0.05mm

Figura 37: Densidades de puntos apropiadas (resoluciones) para elementos de patrimonio cultural de distinto tamaño [28]

Esta tabla se basa en la siguiente fórmula [29]:

$$Q = 1 - \left(\frac{m}{\lambda} \right)$$

Donde Q es la calidad de los datos, m la densidad de puntos (resolución) sobre el objeto y λ el tamaño del elemento más pequeño, o la densidad de puntos requerida. Por tanto, el valor de Q indica el nivel de objeto escaneado.

3.2.4.3. **Filtrado inicial**

Mientras se escanea, los datos pueden filtrarse utilizando filtros primarios, a veces también llamados filtros de hardware. Para ello existen diferentes opciones: filtrado por distancia, por el valor de la reflectividad, o una combinación de ambos. Estos filtros primarios se pueden usar para asegurar que los datos se encuentran dentro del rango de distancias de precisión límite del escáner (Fig. 38) o para eliminar los puntos con poca reflectividad porque seguramente no tendrán bastante precisión.

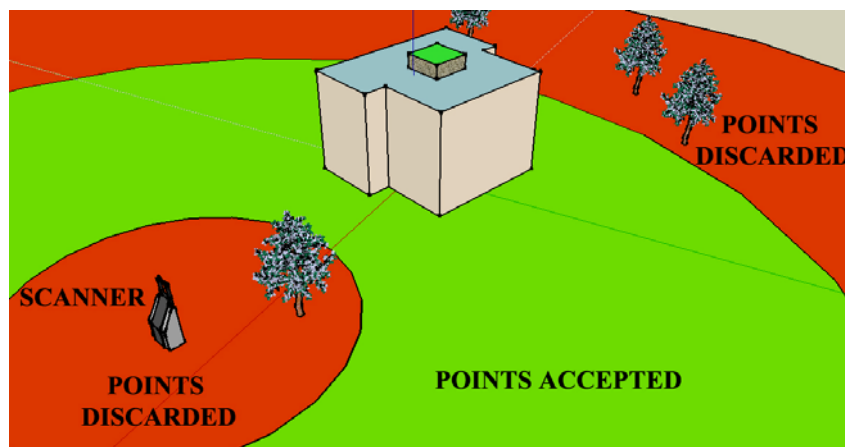


Figura 38: Filtrado inicial a partir de la distancia

3.3. Toma de datos

3.3.1. Escaneo de un objeto/edificio

Una vez se ha determinado el campo de visión y se ha fijado la resolución más adecuada, se puede empezar a escanear. El proceso de escaneo es totalmente automático. Tras apretar el botón de control en el programa de control del escáner o directamente en el control del escáner, el escáner se mueve al punto de inicio y empieza a tomar puntos. Estos puntos se almacenan en el ordenador portátil o en la memoria interna del escáner. Cuando en ordenador portátil está conectado al escáner, los puntos se visualizan directamente en tres dimensiones en la pantalla y dan una vista del área que se está escaneando. Después del escaneo, es bueno comprobar el escaneo realizado por si hubiera obstrucciones imprevistas que provoquen zonas ocultas en los datos.

En la mayoría de los programas de control del escáner, la definición de la zona de escaneo y los parámetros de los ajustes pueden programarse de manera que se pueden escanear múltiples regiones de forma consecutiva con diferentes resoluciones. Se puede crear un script para que se escaneen unas áreas específicas con una mayor resolución mientras que el escáner está trabajando, de modo que los elementos mejor definidos se usen en el registro.

Según la resolución elegida y el área escaneada, el proceso de escaneo puede durar desde los 5 hasta 120 minutos o incluso más. Durante este tiempo es apropiado tomar notas del levantamiento o hacer un croquis del entorno, si no se hicieron en la fase de planificación. El croquis y las notas del levantamiento deberían mostrar y describir los objetos escaneados, las posiciones de las dianas numeradas y los estacionamientos del escáner, así como condiciones externas específicas que puedan influenciar el escaneo y los ajustes establecidos.

3.3.2. Escaneo de las dianas/puntos de referencia

Cuando se utilizan puntos de referencia artificiales o naturales para registrar las nubes de puntos (ver apartado 3.5), estos puntos se deben etiquetar y medir con mucha precisión.

Debido a la velocidad limitada de los escáneres basados en tiempo de vuelo, el escaneo se realiza en dos fases. Primero, el objeto se escanea con una resolución adecuada para obtener la resolución pedida en los resultados finales. En una segunda fase, las dianas se escanean a mayor resolución (Figura 39) para obtener una mayor precisión en la

determinación de su centro. Sin embargo, en sitios al aire libre es mejor que se escaneen primero las dianas y luego el objeto para evitar cualquier movimiento de las dianas.

Después de terminar el escaneado global (primera fase), muchos programas de control tienen herramientas para detectar automáticamente las dianas. Como estas dianas están hechas de un material altamente reflectante, su valor de reflectividad es mucho mayor que el de su alrededor. Sin embargo, como estas herramientas automáticas a menudo dan resultados erróneos, es aconsejable que siempre se comprueben los resultados y nos aseguremos de que no se queda ninguna diana por tomar.



Figura 39: Escaneado de dianas

Una vez conocemos las posiciones aproximadas de las dianas, se escanean con una resolución muy alta (segunda fase), Fig. 40. El programa de control del escáner puede ajustar automáticamente una forma específica de la diana a la diana y determinar el centro exacto.

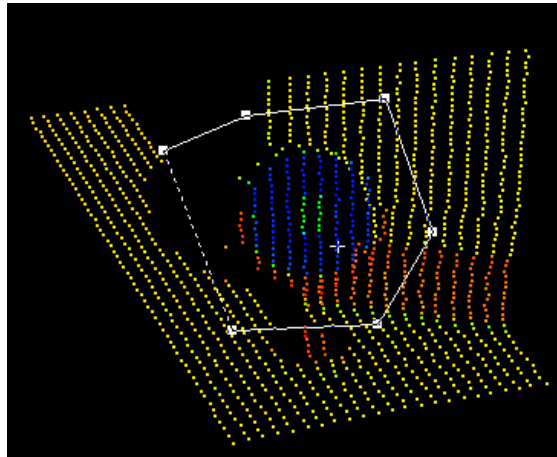


Figura 40: Escaneado de alta resolución de una diana

Algunas veces se utilizan puntos de detalle en lugar de dianas, o bien junto con éstas. Un punto de detalle es un punto geométrico altamente distinguible y que puede ser localizado con mucha precisión gracias a su forma. Estos puntos también se escanean con una resolución muy alta. Es bueno poner manualmente el vértice para estos puntos de referencia naturales y etiquetarlos en el momento para evitar problemas de interpretación en la fase de procesamiento.

Es importante saber que la última generación de escáneres basados en fase escanean a muy alta velocidad los 360°; a muy alta resolución puede llevar entre 5 y 10 minutos. Las dianas se escanean a alta resolución, por lo que no tienen que ser escaneadas de nuevo. Esta forma de trabajar es bastante más rápida porque no hay que identificar las dianas y volver a escanearlas a mayor resolución. Sin embargo, el etiquetado de las dianas suele hacerse en la oficina y ello requiere disponer de buenas notas y croquis de campo.

3.3.3. Medición de puntos de referencia/dianas

Una parte del proceso de escaneado es tomar las dianas con una estación total. Si se realizan varios estacionamientos con la estación total, se debe hacer una triangulación o poligonación para minimizar los errores. Como se entiende que los usuarios de este tutorial tienen un bagaje en topografía, este proceso no se va a detallar.

3.3.4. Comprobación de la captura de datos

Como ya se ha mencionado, es muy importante comprobar dos veces que el escaneado está completo cuando ya haya terminado. Dándonos cuenta de que falta un aparte cuando ya estamos en la oficina provoca una cara visita otra vez al sitio. Esta segunda comprobación requiere más tiempo que la comprobación realizada en el momento. Cuando se trabaja con un ordenador portátil, una vista simplificada nos puede ayudar (véase el apartado 3.6.1).

3.4. Preparación de los datos

De vuelta a la oficina, los datos se analizan y comparan con los croquis de campo y las notas. Es aconsejable empezar a trabajar con una copia de los escaneados originales y mantener los originales como copias de seguridad. Los diferentes tipos de escáneres almacenan las nubes de puntos de diferentes formas. En el Capítulo 4 se da más información sobre los diferentes tipos de archivos de nubes de puntos y sus ventajas e inconvenientes. En tareas de almacenamiento es importante que el formato del archivo sea fácilmente accesible y reconocible. Si se puede acceder a él directamente, sin

descodificación después se podrá convertir a cualquier otro formato legible con un programa adecuado. El formato del fichero también debe contener los datos en el formato más rudimentario, en lugar de usar el formato más preferido para el reprocesamiento. El formato más común en estos momentos (año 2008) es el formato *.xyzrgb.

Siempre se deben añadir los metadatos a las copias de seguridad, junto con los croquis y las notas de campo así como todos los datos recopilados en la fase de preparación.

Antes de procesar las nubes de puntos, los escaneados afectados por condiciones ambientales extremas o los escaneados erróneos ocasionados por fallos humanos se eliminan del conjunto de datos. Las nubes que no se eliminen se deben priorizar según las "mejores vistas". El orden de prioridad se establece a partir de los croquis y las notas de campo.

En algunos casos, también hace falta limpiar las nubes de puntos antes de registrarlas. Cuando las dianas se han colocado muy lejos del escáner o cuando las condiciones ambientales son malas, los escaneados a alta resolución de las dianas pueden estar llenos de ruido. Este ruido se debe eliminar antes de realizar del registro, ya que, en caso contrario, afectará a la precisión del registro.

3.5. Registro y Georreferenciación

En la mayoría de casos, el objeto escaneado es demasiado grande para que se escanee desde un única posición. Entonces, se necesitan varios estacionamientos del escáner (Fig. 41). Cada estacionamiento está definido en el sistema de coordenadas del escáner. Para poder alinear diferentes estacionamientos del escáner, es necesario saber la situación y la orientación exacta del escáner en un sistema de coordenadas externo local o global.

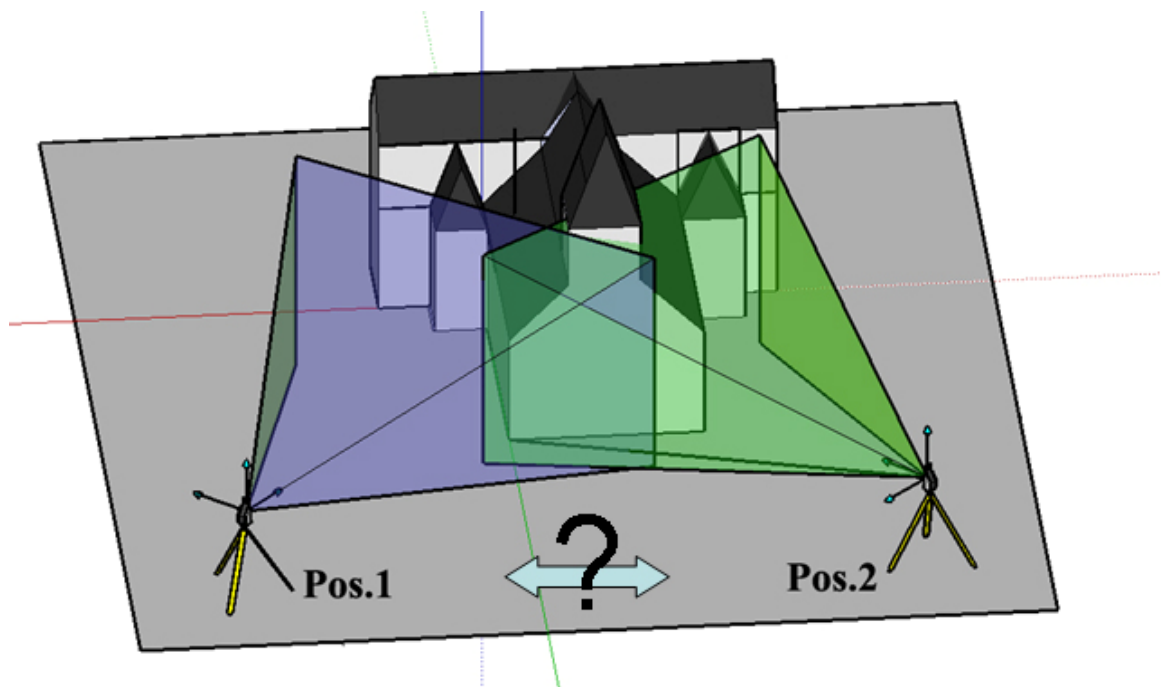


Figura 41: Registro entre dos estacionamientos del escáner

Directamente vinculado con la alineación, o registro, se encuentra la georreferenciación de todo el conjunto de datos. La georreferenciación significa, además de alinear las nubes de puntos, georreferenciar el conjunto de datos a un sistema de coordenadas fijo. A

continuación se explican las diferentes posibilidades para llevar a cabo el registro y la georreferenciación (Fig. 42).

Este tutorial clasifica las técnicas de registro en técnicas de registro o georreferenciación directas e indirectas.

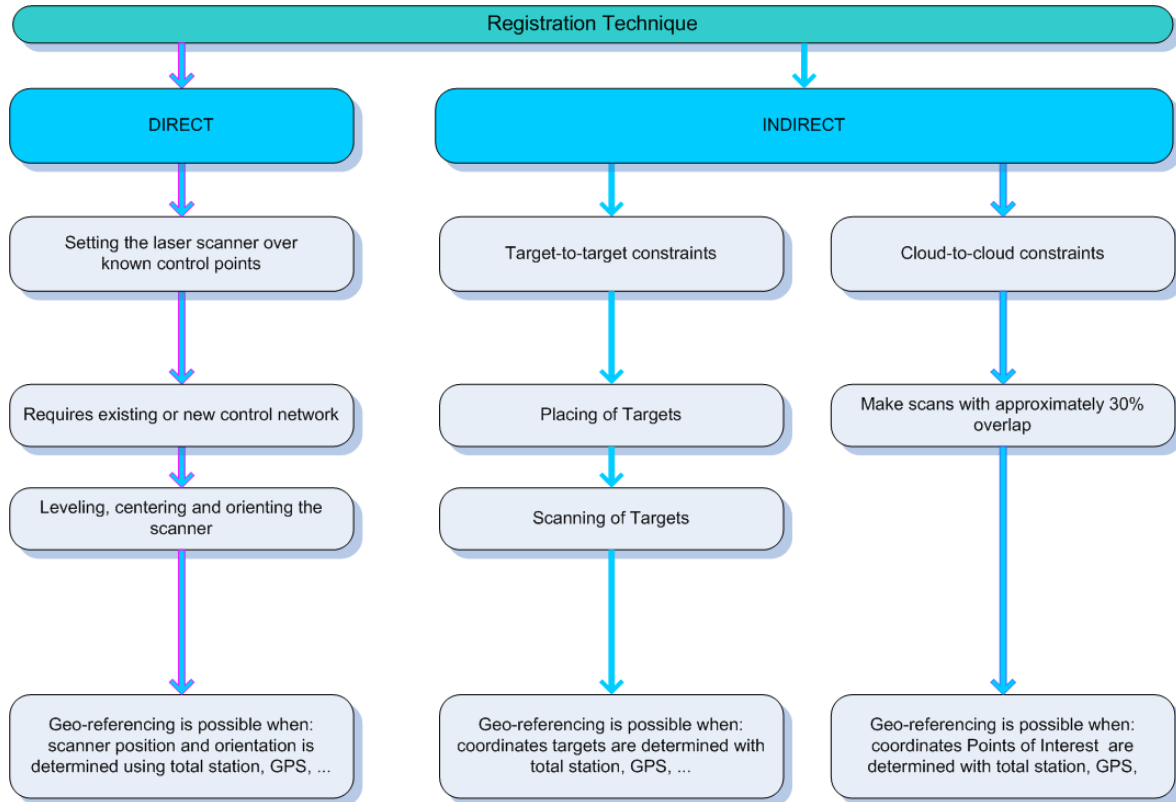


Figura 42: Técnicas de registro

3.5.1. Registro y Georreferenciación Indirecta

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

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

3.5.1.1. Registro diana a diana

Los lugares con fácil acceso no presentan problemas a la hora de colocar las dianas. Las dianas artificiales pueden ser de formas muy variadas. Hay dianas especiales que las suministras las propias compañías de láser escáner hechas de material altamente reflectante. No obstante, las dianas impresas en papel también se pueden utilizar. Cuando no hay dianas artificiales disponibles, se improvisan tomando objetos cuya superficie pueda ajustarse a un superficie geométrica ideal. Por ejemplo, se pueden utilizar piezas de tubo cilíndrico. Los programas de procesamiento del escáner permiten ajustar un cilindro a la nube de puntos del objeto para determinar su eje central con gran precisión. Si los cilindros

se colocan tanto en dirección vertical como en horizontal, se pueden utilizar para alinear diferentes nubes de puntos.

En las zonas inaccesibles, por ejemplo en zonas muy elevadas, se pueden utilizar entidades naturales. Estas entidades o blancos naturales son puntos de interés en la propia estructura a escanear que pueden ser identificados con alta precisión, como por ejemplo bordes de ventanas o cornisas. Según el English Heritage [28], el resultado del registro con blancos naturales es peor que el realizado con dianas artificiales. La razón es doble:

- Los entidades comunes en dos nubes de puntos diferentes no se componen de puntos idénticos, que son, esencialmente, círculos de varios milímetros de diámetro, debido a la divergencia del haz láser.
- La identificación de entidades comunes es bastante subjetiva, especialmente en escaneados muy inclinados.

3.5.1.2. Registro nube a nube

Otra forma de registrar dos nubes de puntos es usando el solape entre las nubes de puntos. Si dos nubes de puntos tienen bastante solape (generalmente entre el 30 y el 40%), se puede utilizar la técnica llamada ICP (Iterative Closest Point) para alinear ambos conjuntos de datos. Esta técnica requiere que el usuario marque al menos tres pares de puntos correspondientes en las nubes de puntos. Como estos tres pares nunca serán exactamente los mismos puntos (ver el apartado anterior), el algoritmo ICP comprueba iterativamente las distancias entre todos los puntos de las nubes y estima la transformación para alinear ambos conjuntos de manera que se minimice el error.

Las reglas para las configuraciones de las dianas mencionadas en el apartado anterior son aplicables a la configuración de los puntos en el registro nube a nube.

Esta técnica de registro se debe emplear con precaución. Cuando se escanean estructuras lineales muy largas en las que se necesitan varios estacionamientos, pequeños errores en el registro de cada par consecutivo de nubes de puntos se pueden propagar y producir errores globales grandes (Figura 43).

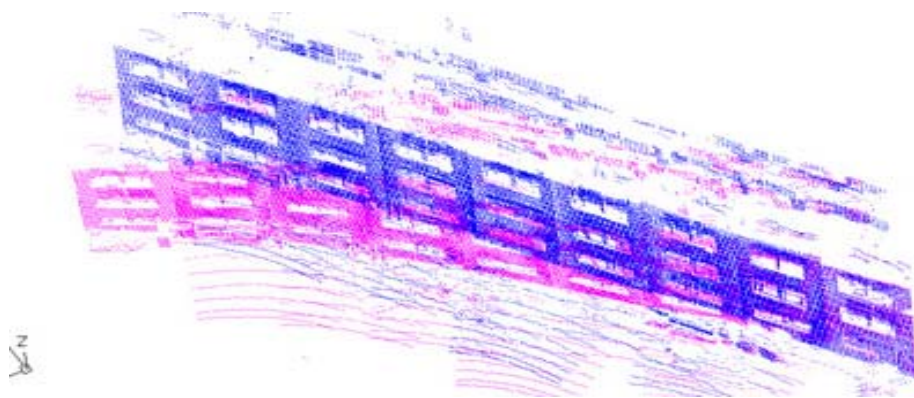


Figura 43: Propagación del error debido al registro nube a nube de varias nubes de puntos de una fachada

3.5.1.3. Registro superficie a superficie

En 2006, A. Gruen publicó una nueva técnica para alinear nubes por medio de ajuste de superficies geométricas de dos escaneados. Su algoritmo estima la distancia euclídea entre fragmentos de superficies por medio de mínimos cuadrados e intenta minimizar estas distancias de forma iterativa, al igual que en el algoritmo ICP. Este método ofrece una alta

flexibilidad para cualquier tipo de problema de correspondencia en superficies 3D, así como herramientas estadísticas para el análisis de la calidad del resultado final.

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

3.5.2. Registro y georreferenciación directa

El registro directo significa que la posición y orientación del escáner se calculan directamente. Esto se puede realizar de dos maneras. Un ejemplo es el caso de un escáner láser con algunas funciones de estación total, donde el escáner se puede estacionar directamente sobre un punto conocido utilizando una plomada láser. La orientación se puede determinar escaneando un único punto de referencia en el emplazamiento siguiente del escáner. Estos escáneres también tienen un compensador de doble eje que los nivela dentro de unos límites. Esta nivelación del escáner implica una tercera restricción en la orientación del escáner.

A veces, se fija un reflector especial en la parte superior del eje vertical de rotación del escáner. La posición exacta de este reflector respecto del centro del haz láser se puede determinar tras un proceso de calibración. Entonces, el reflector se puede medir con una estación total como si formara parte de una poligonal. Otra forma de determinar el emplazamiento del escáner es colocando un receptor GPS sobre el escáner.

Esta técnica reduce el número de dianas a considerar y, por tanto, evita los grandes requerimientos en cuanto a la configuración de las mismas. Además, no se necesita que las nubes de puntos se solapen. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, esta técnica es normalmente más rápida que el registro indirecto

Cuando se necesita georreferenciar, la posición del reflector se puede transformar a un sistema de coordenadas conocido mediante técnicas topográficas.

3.5.3. Aspectos generales del registro y la georreferenciación

Este apartado proporciona algunos consejos a tener en cuenta cuando se registran conjuntos de datos o, incluso, cuando se planifica la fase de registro. La mayoría de las siguientes afirmaciones se han adoptado de la publicación del English Heritage [29].

- Cuando se realiza un registro, nos debemos asegurar que los residuos del registro global son igual o mejores que la precisión geométrica requerida para los resultados finales.
- Cuando el registro se realiza únicamente mediante resección (indirecto), cada nube de puntos debe contener, al menos, cuatro puntos de control XYZ distribuidos adecuadamente. Con esto se consiguen más grados de libertad y, por tanto, se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados para minimizar los errores en la captura de las dianas o blancos.
- Incluir siempre los residuos del proceso de registro y las precisiones geométricas de los parámetros calculados en el informe del levantamiento.
- Añadir fotografías o impresiones de pantalla de elementos irregulares de las nubes de puntos producidos por quiebros o de elementos que se podrían malinterpretar como errores en el registro e indicarlo en el informe.

- No colocar dianas artificiales en lugares que oculten detalles importantes del objeto. Que las dianas no sean muy grandes.
- Cuando se coloquen dianas sobre la superficie del objeto, hay que asegurarse que el adhesivo no daña la estructura.
- Evitar el uso de puntos en blancos naturales, porque son menos precisos que las dianas artificiales.
- El programa de control del escáner tiene que estar adaptado a los tipos de dianas empleados. Por ejemplo, algunos tipos de dianas retroreflectantes muestran un halo alrededor del centro provocado por varios retornos de la energía del láser. Un programa adecuado puede reducir el conjunto de retornos del centro de la diana mediante una ponderación en función de la intensidad de cada retorno [11].
- Cuando se escanean dianas artificiales con un ángulo muy agudo, no se debe utilizar la identificación automática porque produce malos resultados [15].

3.6. Procesamiento de nubes de puntos 3D

El procesamiento de una nube de puntos hace referencia a la transformación de la nube de puntos cruda registrada en un resultado final. El resultado final puede adoptar varios formatos: nube de puntos limpiada, planos 2D estándar (planos, elevaciones, secciones transversales...), modelos 3D totalmente texturizados para animaciones y navegación.

Frecuentemente, las compañías de escáneres muestran videos impresionantes de nubes de puntos que se transforman en modelos texturizados en menos de un segundo. No obstante, este proceso es mucho más largo en la realidad y la mayoría de las veces manual. En la figura de abajo (Fig. 44), se muestra una visión de las diferentes fases del procesamiento del escaneado láser y su grado de automatización.

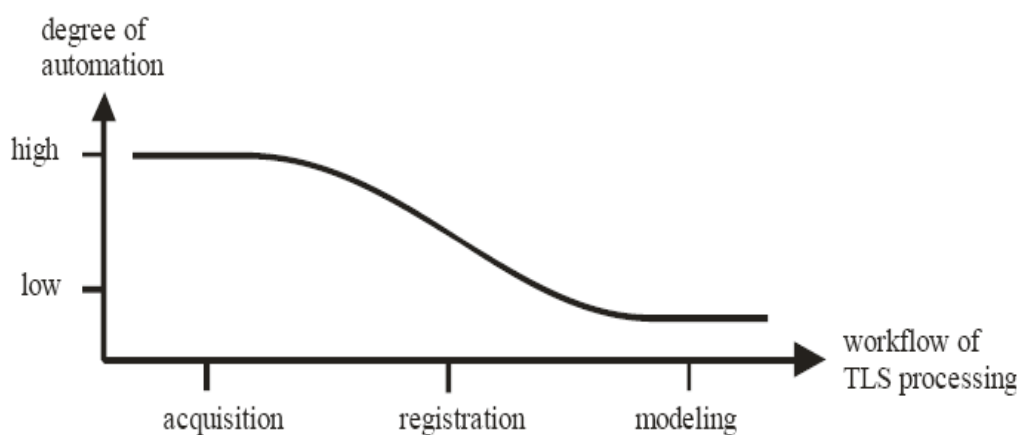


Figura 44: Automatización de las fases del procesamiento de un escaneado láser terrestre (adoptado de A.Gruen)

Generalmente, el procesamiento de una nube de puntos 3D, se puede dividir en dos categorías. Los resultados finales se pueden extraer directamente de la nube de puntos sin más procesamiento, o creando primero un modelo 3D de la superficie a partir de la nube de puntos y extrayendo los resultados de este modelo. Qué método se elige dependerá de los resultados pedidos. Por ejemplo, cuando sólo se piden un número limitado de secciones transversales, es mejor extraerlas directamente de la nube de puntos. Sin embargo, cuando

se necesita un mayor número de secciones (más de 50), el segundo método es más eficiente porque hay herramientas automáticas para generar múltiples secciones a partir de un modelo triangulado. Además, el modelo de la superficie añade más valor y comprensión que sólo la nube de puntos registrada.

3.6.1. Representaciones de las nubes de puntos

El resultado de una captura de un escáner es una gran cantidad de puntos en el espacio, cada uno teniendo unas coordenadas X,Y,Z (Fig. 45) y, normalmente, un valor de reflectividad. Algunos escáneres proporcionan incluso información del color en forma de valores RGB (rojo, verde y azul).

La nube de puntos se puede representar dibujando todos los puntos en la pantalla, pero esto conlleva una impresión caótica y el usuario puede tener dificultades para reconocer las estructuras en la nube. Cuando cada punto se muestra con su valor de reflectividad o color, el conjunto de toda la estructura se entiende mejor.

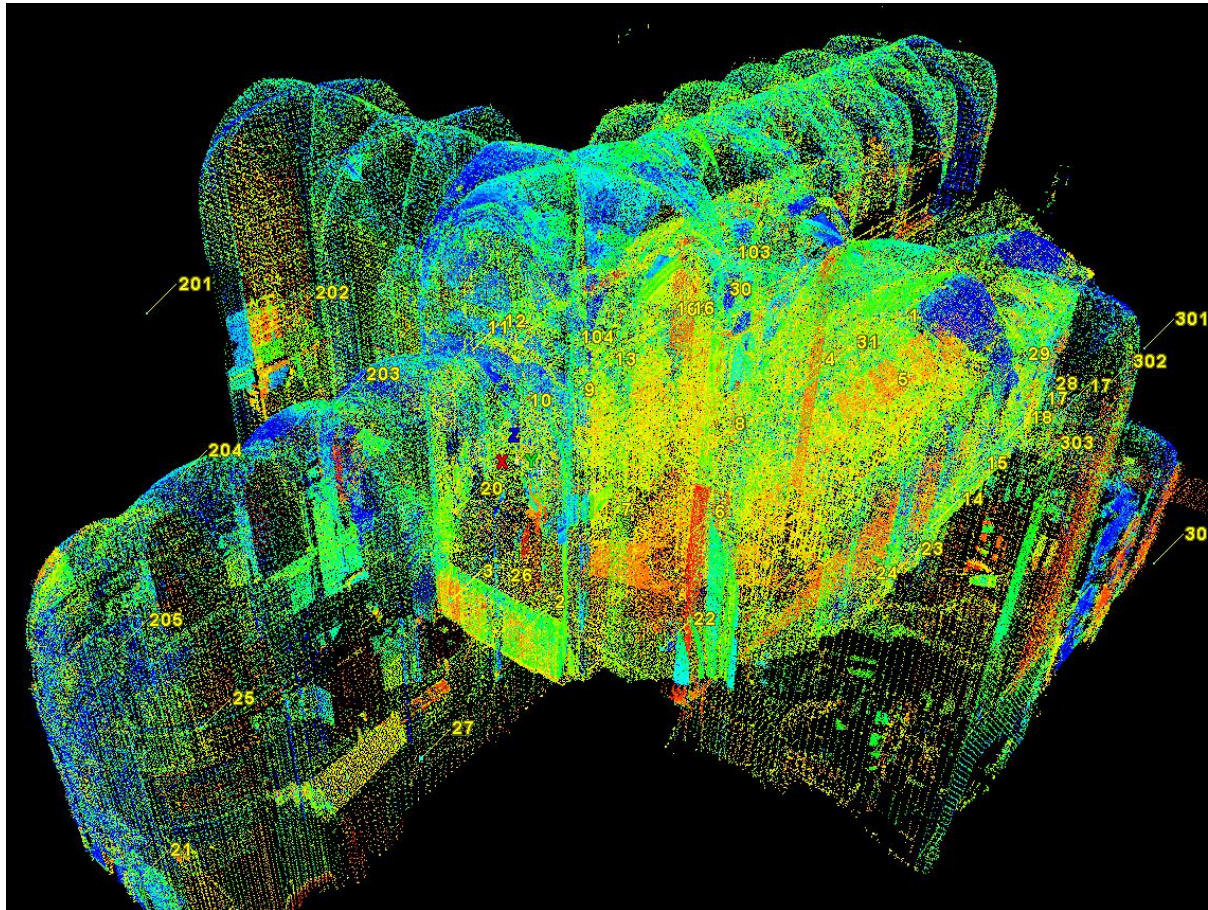


Figura 45: Imagen de una nube de puntos sin organizar

Como la mayoría de escáneres toman una escena en filas y columnas, una manera de representar una nube de puntos de una forma muy simple es con un mapa de profundidades. Un mapa de profundidades es una estructura en forma de matriz (2D) en la que cada píxel representa la distancia del punto 3D al escáner en forma de un valor de gris (Fig. 46). Debido a que este tipo de representación incorpora información del entorno de cada punto, es de gran utilidad en los algoritmos de procesamiento de la nube de puntos y se conoce como nube de puntos organizada.

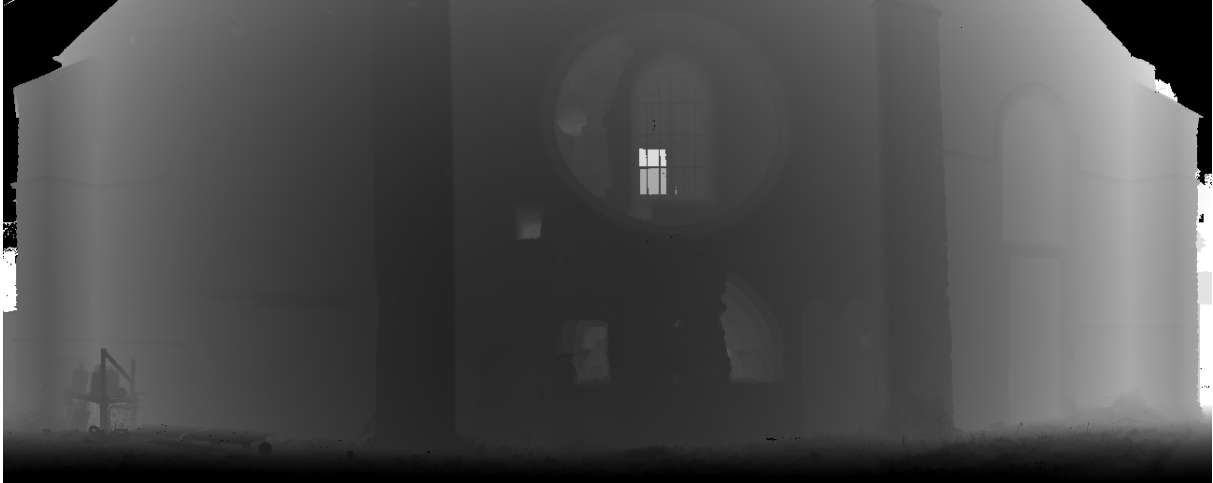


Figura 46: Mapa de profundidades

Utilizando complejos algoritmos de modelización (triangulación), los puntos vecinos se pueden conectar para formar superficies. Esto proporciona una representación más cercana a la realidad porque las estructuras superficiales o modelos no son transparentes y, por tanto, los puntos que quedan detrás de otros no pueden ser vistos. Calculando la dirección normal de la superficie, se pueden utilizar sombras artificiales para enfatizar detalles de la superficie.

Como la generación de modelos, especialmente a partir de nubes de puntos no organizadas, es compleja y puede tomar un tiempo considerable, ha habido intentos de encontrar alternativas para conseguir más rápidamente una representación aproximada de la nube sólo para visualizarla y analizarla. Como resultado, se lanzó la idea de *point splatting*, que generan “surfels” (“SURface ELEMents), pequeños elementos de superficie para cada punto de la nube creada a partir de los datos crudos del escáner láser (Fig. 47). Cada surfel se representa mediante una pequeña forma primitiva de superficie (círculo, elipse...) en 3D que hereda la normal de la superficie que forma con sus vecinos. Ésto resulta en una representación de la superficie muy rápida.

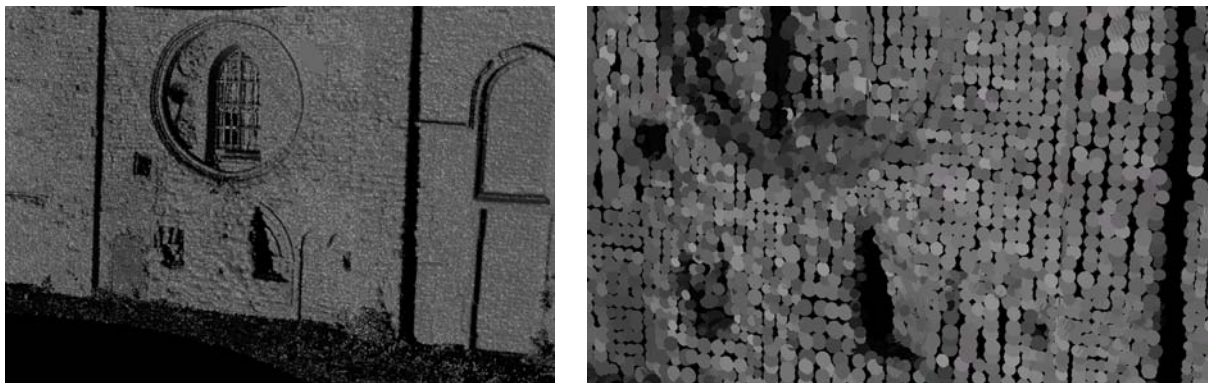


Figura 47: Resultado de *point splatting* (izquierda), acercamiento al mismo (derecha)

3.6.2. Mejora de los datos

3.6.2.1. Filtrado del ruido

Un primer paso en el proceso de mallado es la eliminación del ruido de los datos de la nube de puntos. Si el ruido se ha introducido a cause del viento, superficie de reflexión mala, etc. (ver capítulo 2.6), el modelo contendrá triángulos que conecten los puntos con ruido a los puntos correctos. Esto produce una malla llena de picos. Por tanto, es importante eliminar este ruido en el primer paso.

A menudo, el operador puede identificar fácilmente algunas partes escaneadas pero que no son necesarias en los resultados finales. Por tanto, es aconsejable que el operador lleve a cabo un primer análisis de la nube de puntos y elimine a mano todos los puntos no necesarios.

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

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

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

3.6.2.2. Remuestreo

Como se ha mencionado anteriormente, cuando se crea una malla, el número de triángulos es más del doble del número de puntos. Un modelo de una nube de puntos de un escáner por fase puede tener más de 20 millones de triángulos fácilmente. Esta cantidad hace que sea difícil trabajar con programas estándar. Generalmente, se necesita reducir el número de triángulos antes de crear el modelo. Esta reducción de puntos se puede hacer de dos formas:

La manera más fácil de reducir el número de puntos es eliminar un punto que esté muy cerca de otros puntos. Los puntos se pueden eliminar mientras que se mantiene toda el área escaneada. Sin embargo, esta técnica puede eliminar puntos en áreas que contengan elementos importantes y, por tanto, que se elimine información valiosa.

Otra forma de eliminar puntos es teniendo en cuenta la curvatura de la superficie para determinar si parte de la superficie es suave o muy curva. Esta técnica de remuestreo funciona inteligentemente, manteniendo los puntos importantes en las áreas con alta curvatura y eliminando puntos en áreas que se pueden representar con menor cantidad. Con esta técnica se consigue una reducción más adecuada de la nube de puntos original sin perder elementos valiosos.

3.6.3. Modelado 2D directo a partir de las nubes de puntos

Hacer modelos 2D directamente de las nubes de puntos es una cuestión de interpretación humana. La mayoría de los programas en este ámbito son módulos de paquetes CAD como *AutoCAD* o *Microstation*. Un interfaz especial permite al usuario cargar grandes nubes de puntos en estos programas para procesarlos con las herramientas CAD estándar. Programas comunes para realizar estas tareas son: *Leica CloudWorx*, *Kubit Pointcloud*, *LFM CAD Link*...).

Las secciones transversales, planos y elevaciones se pueden generar tomando un corte fino de la nube de puntos y proyectando todos esos puntos sobre un plano. Luego el usuario tiene que dibujar manualmente o conectar los puntos creando líneas, arcos, etc. El usuario hace una interpretación de las esquinas y detalles más pequeños que la resolución del escáner. Esto es una tarea difícil y precisa que puede llevar un tiempo considerable. La persona que lleve a cabo esta tarea debe tener un conocimiento del edificio o estructura o tener material fotográfico a su disposición para hacer las interpretaciones correctas.

En algunos centros de investigación se han creado algoritmos para automatizar estas tareas. Algunos de estos algoritmos han resultado ser útiles, sin embargo necesitan ciertas restricciones para dar resultados satisfactorios. Esto significa que no se pueden usar de forma genérica y, por tanto, no están todavía implementados en los programas comerciales.

Las elevaciones se pueden crear de dos maneras. Cuando hay información disponible sobre el color, gracias a fotografías, o se dispone de los valores de intensidad, los puntos con color se pueden proyectar sobre un plano, creando un ortofoto verdadera. Dibujando sobre la ortofoto se pueden obtener las elevaciones. Con este método, la precisión de la elevación depende en gran medida de la resolución del escáner.

Otra forma de crear las elevaciones es trazar los bordes importantes (ventanas, puertas, etc.) de la nube de puntos 3D y proyectar estas entidades 3D sobre un plano. Esta técnica requiere un buen conocimiento geométrico y la capacidad para reconocer rápidamente estructuras en nubes de puntos.

Algunos programas permiten registrar imágenes externas a la nube de puntos y utilizarlas para monoplotear. Así pues, la interpretación se realiza en la imagen y se extrae la información de profundidad de la nube de puntos. El problema con este tipo de programas es que el resultado debería comprobarse dos veces porque al trazar un borde en una imagen a menudo es malinterpretado por el programa debido a que faltan datos y, por consiguiente, no se genere en la posición correcta.

3.6.4. Modelado 3D directo a partir de la nube de puntos

Cuando se conoce de antemano la forma de un objeto 3D y se puede describir con primitivas geométricas, se puede detectar automáticamente a partir de la nube de puntos. Cuando se ajustan estas formas geométricas a la nube de puntos, el algoritmo asume que es una forma ideal. Por ejemplo, el escaneado de una planta petroquímica se puede convertir fácilmente en un modelo 3D asumiendo que todas las tuberías tienen una sección circular y que las piezas de conexión también tienen una forma específica. La mayoría de estas aplicaciones se aplican en la industria petroquímica.

3.6.5. Modelado 3D de superficies complejas

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

creando una representación completa de la superficie. Para crear un modelo de calidad, se deben seguir una serie de pasos:

- Limpieza de los datos (reducción del ruido, eliminación de errores groseros...).
- Remuestreo (véase 3.6.2.2).
- Mallado/Triangulación
- Eliminación de vacíos (puenteando, uniendo...)
- Optimización de la malla (decimado...).

3.6.5.1. *Mallado/Triangulación*

Existen diferentes algoritmos para crear mallas a partir de nubes de puntos. Las conexiones entre puntos se realizan normalmente mediante triángulos o cuadriláteros. La técnica de modelización con triángulos y tetraedros más popular es la del criterio de Delaunay [30]. Este criterio establece que ningún punto puede estar contenido en la esfera circunscrita en cualquier tetraedro del modelo, que ilustrado en 2D aparece reflejado en la Figura 48.

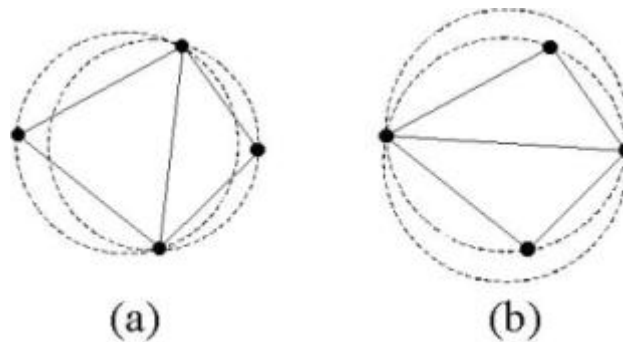


Figura 48: Ejemplo del criterio de Delaunay: (a) Cumple el criterio; (b) No cumple (adaptada de [30])

En los últimos años, se han desarrollado algoritmos más complejos de modelado como el algoritmo de la bola pivotante o el del desfile de cubos que son capaces de triangular grandes conjuntos de datos con un bajo consumo de memoria.

3.6.5.2. *Eliminación de vacíos*

Se realizan múltiples estacionamientos diferentes del escáner para solucionar el problema de las oclusiones. Sin embargo, cuando se hace la malla se introducen pequeños agujeros o vacíos debido a una insuficiencia de datos. En los últimos años se han desarrollado numerosos algoritmos para eliminar estos vacíos. Estos algoritmos utilizan la interpolación para maquillar la falta de información. El agujero o vacío se puede rellenar de forma plana, conectando los bordes con triángulos, o utilizando una superficie curva de forma que los puntos y triángulos de los bordes se usen tanto para crear nuevos puntos como para rellenar el vacío por medio de una superficie suave.

3.6.5.3. *Optimización de modelo*

Aunque la nube de puntos se haya reducido durante el remuestreo para crear un menor número de triángulos, puede ser necesario reducir el número de triángulos de la malla en un segundo paso para superar las capacidades del hardware. Esto se llama diezmo de la malla.

Otra forma de optimizar la descripción de la superficie es mediante la aproximación de superficies matemáticas. Uno de los tipos de superficies más comunes para estas tareas son las *NURBS (Non Uniform Rational Basis functions)*. Éstas son precisas representaciones matemáticas precisas de superficies con forma libre como las formas de las carrocerías de los coches, los cascos de los barcos o incluso la cara humana. Tienen puntos de apoyo, que dirigen la superficie. Sin embargo, estos puntos de apoyo no son necesariamente puntos de la nube.

3.6.6. Modelado 2D indirecto a partir de las nubes de puntos

El modelado 2D indirecto significa que se pueden obtener dibujos 2D a partir de objetos 3D modelados u objetos mallados. Esta técnica es útil cuando se tienen que hacer muchas secciones transversales, por ejemplo una sección a cada centímetro para crear un mapa con curvas de nivel.

La modelización indirecta requiere una fase de modelado 3D como la descrita en el apartado 3.6.5. Una vez se ha creado un modelo, se puede cortar por planos para crear secciones transversales. La interpolación de áreas entre puntos medidos se hace de manera automática en la fase de modelado y no requiere que sea realizada por un operador.

3.6.7. Mapeado con textura

Una textura (puede ser el color u otra) se mapea sobre la superficie de una forma, o polígono. Para colocar correctamente la información de la textura se emplean mapas UV (Figura 49). En contraste con X, Y, Z, que son las coordenadas del objeto original 3D en el espacio modelo, U y V son las coordenadas del objeto transformado. El mapeado UV transforma los objetos 3D/mallas en imágenes planas en las que puede enlazarse información con textura. Esta transformación de malla también se puede describirse como un desplegable de una forma en 3D en un cánvas 2D.

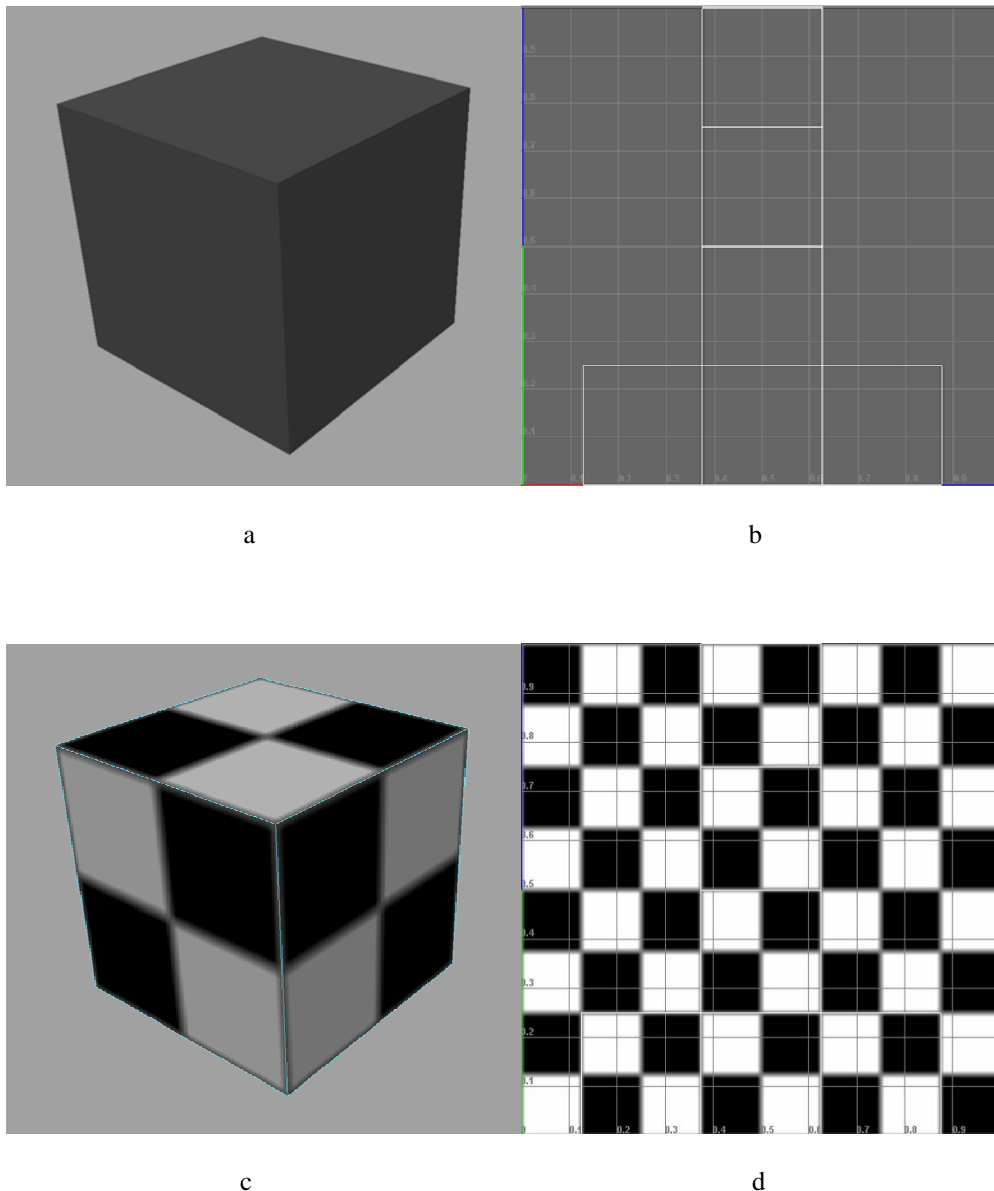


Figura 49: (a) Cubo sin información de la textura, (b) plantilla UV, (c) cubo texturizado, (d) textura

Cuando se crea un modelo como una malla de polígonos mediante un modelador 3D, se pueden generar las coordenadas UV para cada vértice de la malla. Una forma es que el modelador 3D despliegue el conjunto de triángulos por las juntas, poniendo automáticamente los triángulos sobre un plano. Un mapa UV puede ser generado automáticamente por la aplicación, de forma manual por el artista o una combinación de ambos. Los mapas más comunes son mapas de altitudes, mapas de normales, mapas de desplazamientos y mapas de sombras.

Una vez está creado el mapa UV, el usuario puede colorearlo/pintarlo y, luego, proyectarlo sobre el modelo 3D, haciendo más fácil que el modelo 3D se coloree.

En lugar de usar mapas UV, algunos programas tienen la opción de proyectar la textura sobre la superficie utilizando proyecciones ortográficas, lo que simplifica el proceso de texturizado (Figura 50):

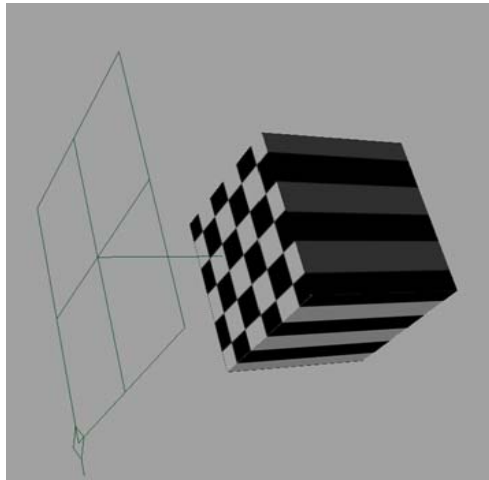


Figura 50: Plano de proyección ortográfica y superficie

El despliegue es mejor que las proyecciones porque minimiza el estiramiento de la textura. Ambas técnicas se pueden usar de forma mixta en un modelo 3D.

El escaneado láser a menudo requiere una alta resolución fotográfica para la visualización de los modelos 3D. Los mapeados de alta precisión exigen conocer las posiciones de las cámaras y los parámetros internos de la cámara (focal, distorsión de la lente...) en relación al modelo. Los programas comerciales proporcionan algoritmos que permiten seleccionar manualmente puntos homólogos en la imagen y el modelo 3D para determinar estos parámetros desconocidos.

Existen, principalmente, dos algoritmos diferentes para proyectar fotografías sobre un modelo 3D, el mapeado con textura y el cubrimiento de textura. El cubrimiento de textura se puede describir como el proceso de poner la fotografía en un cánevas elástico y para luego arrastrar y cubrir el modelo 3D. Esto implica que las áreas que no contengan mucha información o no aparezcan del todo en la fotografía (por ejemplo, superficies muy oblicuas) serán estiradas y, por tanto, no se texturizarán correctamente. El mapeado con textura resuelve este problema analizando primero las partes visibles en la imagen y, luego, proyectando los píxeles visibles de las fotos en el modelo 3D.

El detalle de un mapa con textura depende de la resolución, que se define la mayoría de las veces como una potencia de dos (p. ej. 256*256, 512*512, 1024*1024) que es lo mejor para la memoria gráfica. La nueva generación de tarjetas gráficas son más potentes y capaces de manejar texturas cuyas dimensiones no sean potencias de dos.

3.7. Control de calidad y entrega

La calidad de los levantamientos mediante escáneres láser necesita una consideración cuidadosa durante todo el proceso de medición y procesamiento. Cada vez que se estaciona el escáner para tomar datos (antes, durante y después) ciertos elementos de los datos deberían inspeccionarse y contrastarse con los resultados esperados o precedidos. La mayoría de los aspectos técnicos que pueden influenciar en la calidad de los datos han sido explicados en detalle en el apartado 2.6. Además de estos factores, el operador del escáner debe comprobar otros factores como que exista recubrimiento suficiente, la distribución de los puntos con la resolución requerida, fotografías referenciadas con una cámara de alta resolución, correcta adquisición de las dianas retroreflectantes y de dimensiones adicionales que pudieran ser muy útiles en futuras etapas de procesamiento.

La calidad empieza con un completo conocimiento de las especificaciones del proyecto. Este conocimiento permite la correcta elección del escáner, la correcta resolución, el método apropiado de registro, etc. Por ejemplo, elegir un escáner que no tiene suficiente alcance, sin usar las dianas necesarias ni los emplazamientos correspondientes, no permitir un solape apropiado (si se decide registrar los escaneados utilizando el recubrimiento), y lo que más importante, si la resolución no es la correcta, todo ello afectará directamente en la calidad del producto final.

La documentación adecuada en campo asegura que los datos se archiven con calidad óptima. Los croquis de apoyo, las fotografías de referencia y las comprobaciones de diversas dimensiones podrán utilizarse en futuras fases del proceso.

Generalmente, el objetivo debería ser conseguir una precisión en los resultados del registro diez veces menores que la precisión final requerida. Teniendo esto en cuenta, hay muchos otros elementos que podrían tener efecto en la precisión; así pues, lo mejor es intentar conseguir los mejores resultados posibles en el registro.

El siguiente diagrama (Figura 51) proporciona información en lo que respecta al proceso de control de calidad en los levantamientos con escáner láser.

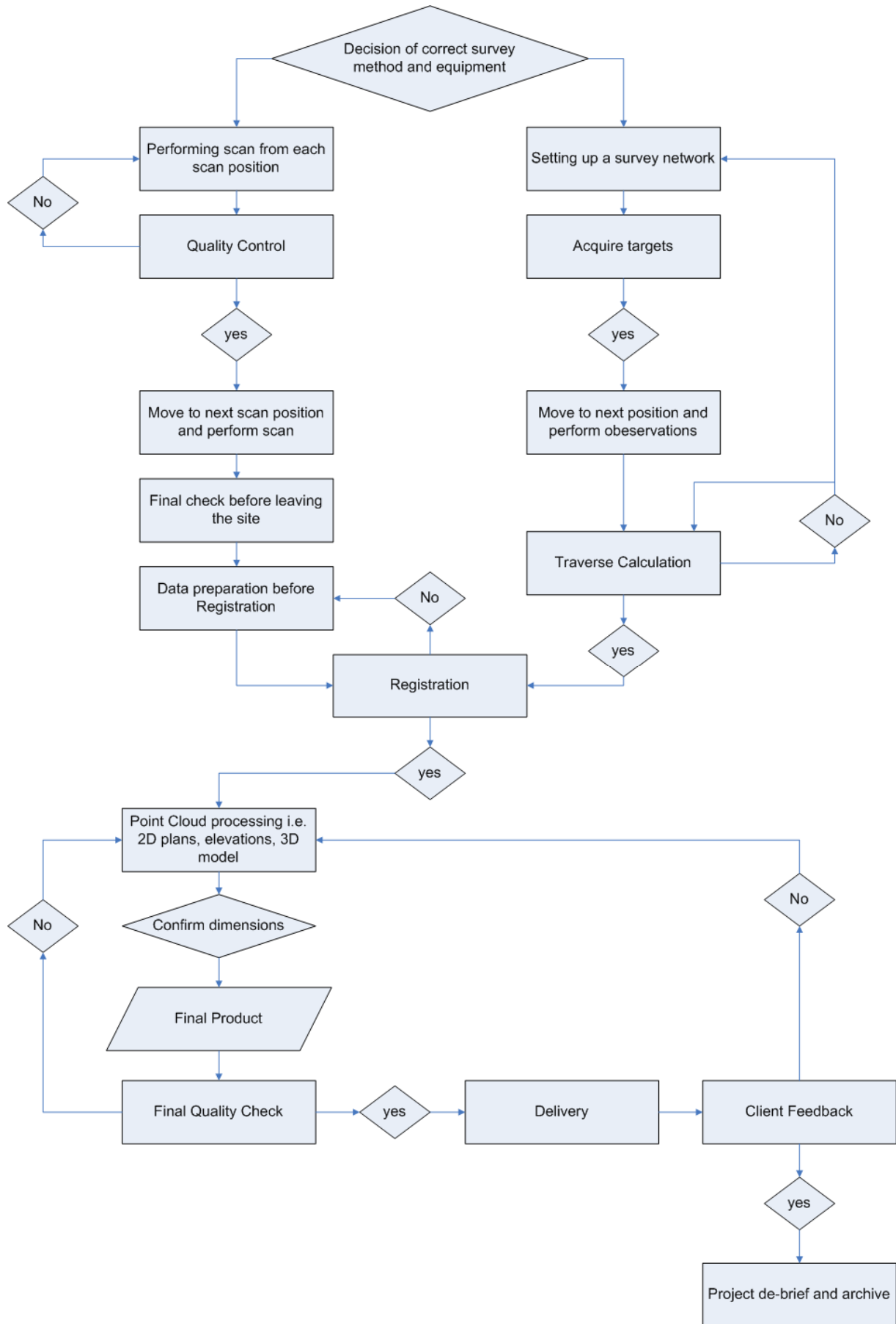


Figura 51: Flujo del control de calidad

4. Capítulo IV: Gestión de los datos

Como se refirió en el apartado 3.1, la gestión de datos debe ser considerada cuando empieza la planificación del levantamiento. Un escáner láser captura miles de puntos por segundo y, por tanto, los conjuntos de datos se hacen muy grandes en poco tiempo. Por esto, se necesita un equipo capaz de almacenar, procesar y archivar los datos.

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

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

Los formatos más comunes para el almacenamiento de nubes de puntos son:

- DXF: formato de *AutoCad*.
- PTX: formato de texto ordenado de *Leica* que contiene las coordenadas xyz, la reflectividad y el color. Algunas veces también contiene la posición del escáner.
- PTS: formato de texto no ordenado de *Leica* que contiene las coordenadas xyz, la reflectividad y el color.
- XYZ: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas xyz.
- XYZRGB: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas xyz y los valores de color (RGB) para cada punto.

Como el escáner láser captura grandes cantidades de datos, se toman muchos más puntos de los realmente necesarios; si bien éstos pueden utilizarse más tarde. Por lo tanto, es muy importante archivar los datos y mantenerlos accesibles por un largo periodo de tiempo. El hecho de archivar datos se ha convertido, en sí mismo, en un problema importante, no sólo en el caso de los escaneados láser.

Cuando se archiva, es muy importante añadir metadatos para saber qué es lo que se ha escaneado y cómo se ha almacenado o procesado. Según el English Heritage [29], los metadatos se deberían subdividir en metadatos del escaneado, del proyecto, del registro e información del apoyo.

Metadatos del escaneado:

- Nombre del fichero y datos crudos.
- Fecha de la toma.

- Sistema de escáner usado (con el número de serie del fabricante). Nombre de la compañía.
- Nombre del monumento.
- Número del monumento (si se conoce).
- Número del levantamiento (si se conoce).
- Número del escaneado (número único para este levantamiento).
- Número total de puntos.
- Densidad de puntos en el objeto (con la distancia de referencia). Condiciones meteorológicas durante el escaneado (sólo en escaneados al aire libre).
- Nombre del fichero de una imagen, tomada desde el mismo punto y mostrando los datos tomados. El nombre debe ser el mismo que el del fichero de los datos crudos.

Metadatos del proyecto:

- Nombre del fichero(s) con los datos crudos utilizados en el registro.
- Fecha de toma (mes y año).
- Sistema(s) de escáner usado (con el número de serie del fabricante(s)).
- Nombre de la compañía.
- Nombre y número (si se sabe) del monumento.
- Número del levantamiento (si se sabe).
- Número de escaneados individuales.
- Números total de escaneados.
- Número total de puntos.
- Nombre del fichero con los datos de apoyo.
- Descripción del método de registro (por ejemplo: "Todos los escaneados se registran respecto a una malla local usando dianas").
- Un plano de guía para mostrar los datos tomados con puntos individuales nombrados.
- Condiciones meteorológicas durante el levantamiento (sólo en escaneados al aire libre)
- Cualquier otra información específica.

Información del registro (para cada estacionamiento del escáner):

- Traslaciones en los ejes X, Y, Z necesarias para transformar el escaneado original a la posición del escáner.
- Rotaciones alrededor de los ejes X, Y, Z. Se deberían realizar en el orden X, Y y Z.

Información de apoyo:

- ID del punto, X, Y, Z, σ_{DX} , σ_{DY} , σ_{DZ} , comentario (opcional)

El medio y el formato en que se almacenan los datos para un uso posterior, determina si los datos podrán ser leídos en 10 años o incluso en 50. Los medios de almacenamiento actuales como los discos duros externos, CD-Roms, incluso el BlueRay tienen la posibilidad de almacenar grandes cantidades de datos, pero la duración de su vida es incierta. Por tanto, es necesario hacer copias de seguridad cuando su vida esté casi finalizada. El formato debería ser lo más simple posible (archivos de texto por ejemplo) y contener la máxima información posible, lo que implicaría archivos de gran tamaño.

5. Caso de estudio de documentación del patrimonio: Iglesia de St. James, Lovaina (Bélgica)

5.1. Introducción e información técnica

Este caso práctico explica como documentar edificios complejos, uniendo mediciones del interior con otras del exterior. Las principales áreas de estudio son la fase del registro y el modelado 2D y 3D utilizando diversas herramientas de otros programas.

5.2. Planteamiento del problema

La iglesia de Saint James (San Jacobo) se encuentra en Lovaina, Bélgica. Data del año 1220 cuando se inició la construcción de la torre oeste. Durante las siguientes fases de construcción, la iglesia románica ha sido reemplazada y extendida por otra de estilo gótico. Los techos de madera de las naves central y laterales fueron reemplazados por bóvedas de mampostería y se añadieron contrafuertes volantes. La iglesia mide aproximadamente 62 m de largo, 38 m de ancho y 28 m de alto, exceptuando la torre.

Como se construyó sobre un antiguo pantano, la capacidad de soporte del subsuelo es limitada, provocando grandes diferencias de asentamiento. En diferentes ocasiones se han realizado trabajos de restauración. Sin embargo, debido a las excesivas fracturas observadas, el 1963 se decidió cerrar la iglesia por miedo al colapso de su estructura. Durante los años siguientes, se colocaron numerosos apuntalamientos para parar el deterioro de la iglesia. En 1995 la ciudad de Lovaina decidió restaurar la iglesia en su estado original y valorarla como un espacio multicultural.

Para poder empezar la restauración de la iglesia, se deben realizar numerosas acciones:

- Como la iglesia ha cambiado muchas veces a lo largo del tiempo por ampliaciones, eliminaciones o renovaciones de partes del edificio, se necesita, en primer lugar, planos *as-is* y secciones. Por tanto, la iglesia debería ser levantada, proporcionando una presentación geométrica mediante planos 2D.
- También se desea valorar las condiciones estructurales del edificio, particularmente las bóvedas de mampostería y partes de las paredes que podrían haberse deformado con el paso del tiempo. A partir de las mediciones queremos comparar estos elementos con su forma geométrica ideal. Asimismo, hace falta un modelo 3D completo de estos elementos para llevar a cabo un análisis mediante elementos finitos. Usando estos datos, se pueden elegir técnicas de refuerzo y/o apoyo estructural apropiado para cortar el deterioro progresivo.
- Los cimientos de la iglesia deberían ser comprobados y reforzados para prevenir posibles movimientos y garantizar su seguridad estructural en el futuro. Estas tareas se llevarán a cabo por parte de ingenieros en estructuras que requieren herramientas de monitoreo estructural de elevada precisión.

La historia de esta iglesia revela varios aspectos interesantes relacionados con sus problemas estructurales:

- 1484-1485: Construcción del campanario (mampostería y madera) en cruz. Retirado en 1735 por el grave estado de desmoronamiento.

- 1485-1488: Reconstrucción de las bóvedas de mampostería en las naves laterales, lado norte y sur.
- 1534-1535:
 - Construcción de un nivel adicional con ventanas en la nave principal.
 - Construcción de soportes y contrafuertes.
 - Retirada de la bóveda de madera.
 - Construcción de la bóveda de mampostería en la nave principal.
- 1806: Los pilares se refuerzan con anillos de acero.
- 1905: Petición de consolidación y refuerzo tras una inspección local y en vista de las graves fracturas en la fachada oeste del crucero (tras pintarse en 1872).
- 1929 y 1936: Los contrafuertes volantes (los que permanecen) están en malas condiciones.
- 1950-1953: Reparación de los daños ocasionados por la guerra (tejados, ventanas y techos de estuco).
- 1956: La nave central y dos laterales están fuera de plomada unos 30 cm. Dos años más tarde se mide un incremento de 10 cm.
- 1963: La iglesia se cierra.
- 1965-1971: La primera fase de la restauración (desmantelamiento de las bóvedas de las naves laterales, apuntalamiento de las columnas principales y de las naves laterales).
- 2000: Desmantelamiento de los contrafuertes volantes.
- 2005: Medidas de consolidación: reparación de tejados y renovación del sistema de alcantarillado.

5.3. Planificación del levantamiento

5.3.1. Objetivos

La finalidad de este caso de estudio es proporcionar mediciones precisas previamente a la restauración de la iglesia a su estado original y valorarla como espacio multicultural. Se realizarán numerosos estudios de ingeniería cuyos resultados se enlazarán geoespacialmente a la geometría del edificio. Estos estudios los efectuarán diferentes compañías y personas, todas ellas trabajando en diferentes campos pero algunos utilizando la misma información de partida, principalmente la geometría del edificio. En lugar de que cada equipo tuviera que contactar un topógrafo para documentar la parte de la iglesia que necesitase, la utilización del escáner láser proporcionará una base de datos geométrica centralizada a partir de la cual cualquier equipo podrá extraer la información que necesite.

5.3.2. Documentos finales

Los documentos finales requeridos al equipo de topógrafo son:

- Planos 2D as-is, alzados y secciones de la iglesia.

Deben contener las mediciones del interior y del exterior del edificio con la precisión requerida en planos arquitectónicos, es decir, ± 1 cm.

Para asegurar que toda la estructura de la iglesia se puede entender fácilmente a partir de los planos, se sugiere crear al menos 3 plantas (1.20m, 8.70m, 13.00m y, posiblemente, 19.00m), 2 secciones (una longitudinal a lo largo del eje principal y otra a través del crucero) y 3 alzados (de las fachadas que no están ocultas por árboles).

- Un modelo 3D completo de las bóvedas de mampostería con una precisión muy alta (± 5 mm).
- Un modelo 3D completo de la fachada del ala sudeste del crucero para poder comprobar su ángulo de inclinación.
- Una animación virtual navegable de la nube de puntos completa con fines turísticos.

5.3.3. Documentación

El escaneado se va a realizar tanto del interior como del exterior de la iglesia. Por tanto, dividiremos la fase de documentación en dos partes.



Figura 52: Fotografía de la Iglesia de San Jacobo en Lovaina, Bélgica

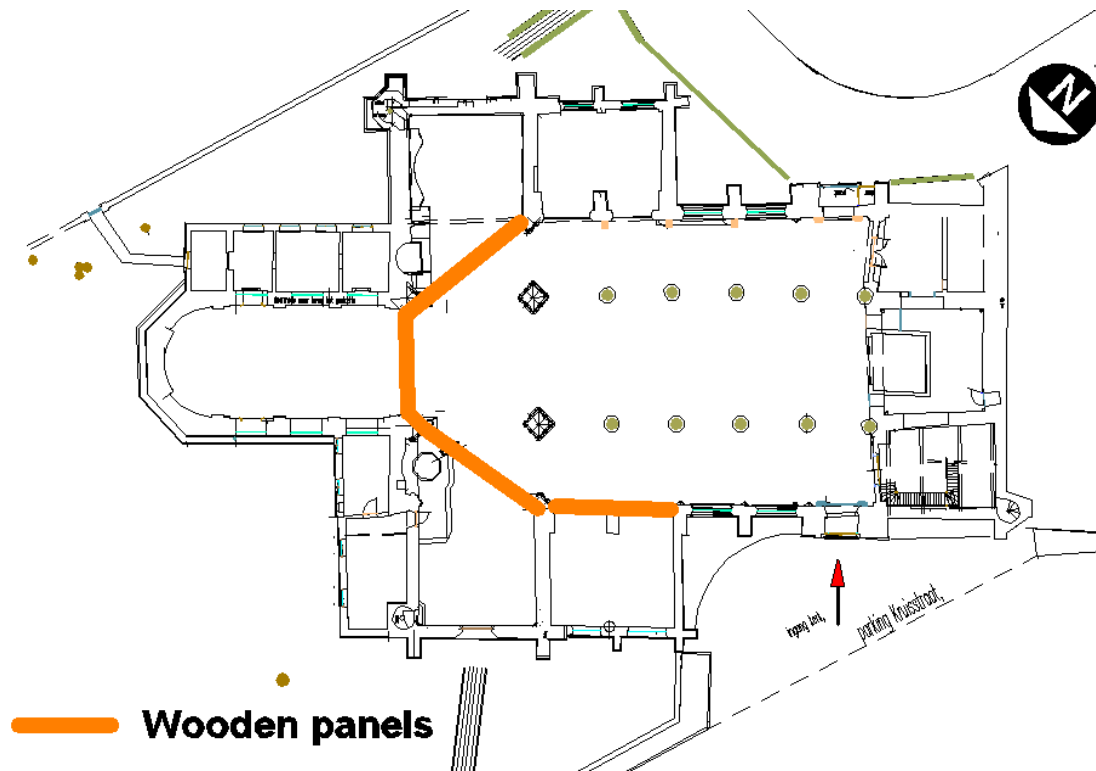


Figura 53: Plano de la planta con las obstrucciones

5.3.3.1. Interior

- El interior de la iglesia está vacío y parece, en cierta manera, un sitio en construcción. El suelo está en muy malas condiciones y los ingenieros han colocado andamios dentro de la iglesia. Estos andamios obstruyen una vista clara de las estructuras que tienen detrás (Fig. 54).
- La parte más baja de los arcos entre el crucero central y sus alas y entre el crucero central y el área del coro está obstruida por paneles de madera.
- Existen algunas habitaciones pequeñas en el perímetro de la iglesia (ver el plano de la planta, Fig. 53). No es aconsejable utilizar un escáner láser para levantar estas habitaciones pequeñas.
- Hay una toma de corriente cerca de la entrada posterior de la iglesia. Se puede utilizar para alimentar el ordenador portátil y el escáner láser.



Figura 54: Fotografía panorámica del interior de la Iglesia de San Jacobo

5.3.3.2. Exterior

- La iglesia se encuentra en el centro de la ciudad, próxima a un parking público.
- Hay muchos coches aparcados enfrente de las entradas (posterior y frontal); ésto se tiene que considerar como obstrucciones.
- Enfrente de la entrada hay una calle muy concurrida.
- El área noreste (coro) está visualmente obstruida por muchos árboles.
- La fachada sudoeste solamente es accesible a través de un pequeño patio. Este patio está cerrado al público.
- No hay un acceso directo a la toma de corriente.

5.3.4. Elección de la técnica de medición más apropiada

5.3.4.1. Ajuste a la finalidad

Cuando se elige la técnica de medición más adecuada se debe tener en cuenta varias consideraciones.

Primero, viendo la geometría de la iglesia, podemos hacer varias suposiciones en cuanto al coste, al tiempo y la precisión de las diferentes técnicas de medición disponibles. En este caso, tenemos un edificio que debe ser topografiado por dentro y por fuera y todos estos levantamientos deben estar alineados en el mismo sistema de referencia. Esto significa que necesitaremos algún tipo de sistema de referencia que conecte las mediciones del interior con las del exterior. Para este propósito, es conveniente utilizar una estación total para realizar una poligonal cerrada y, así, establecer un sistema de referencia que nos permita reducir errores mediante una red de ajuste de la poligonal. Desde cada estacionamiento de

la estación total, se medirán unas dianas (puntos naturales o artificiales) sobre el edificio que nos permitirán conectar todas las mediciones.

Segundo, los documentos a entregar finalmente son planos 2D as-is y secciones. La iglesia es una gran estructura, por lo que queremos conseguir el mayor número de mediciones posible con el menor número de estacionamientos. Las estructuras realizadas por el hombre contienen, principalmente, formas regulares, pero como parte de esta iglesia es de estilo gótico, también contiene muchas formas irregulares, orgánicas que son mucho más difíciles de medir con las técnicas tradicionales (por ejemplo, a mano o con estación total). Otra cuestión a considerar son los altos techos. Esto implica que utilizando técnicas de medición por distancia en lugar de técnicas de medición por contacto evitará el uso de andamios. La mayoría de las técnicas de medición basadas en distancia también son más precisas en estructuras grandes.

Por último, se necesita un modelo 3D completo de ciertas partes de la iglesia para usarlo en cálculos estructurales mediante análisis de elementos finitos. Esto significa que la técnica de medición elegida debe ser capaz de medir estructuras tridimensionales. La precisión y la resolución juegan un papel importante en esta parte, ya que necesitamos suficiente información para poder crear un modelo 3D del edificio lo más preciso posible.

Teniendo en cuenta estas consideraciones elegimos el escaneado láser como la técnica de medición más apropiada para este trabajo. El escaneado láser es una técnica de medición a distancia que presenta una gran precisión y resolución. Contiene suficiente información para realizar planos 2D y secciones, así como modelos 3D completos de formas irregulares u orgánicas. Utilizando dianas artificiales tanto dentro como fuera y conectándolos en un mismo sistema de referencia mediante una poligonal cerrada con estación total es posible corregir la alineación de los escaneados de dentro y de fuera de manera correcta.

Más tarde, los datos se pueden utilizar para fines turísticos proporcionando paseos virtuales y mostrando las medidas que se han tomado para renovar la iglesia. Otras aplicaciones posibles son la monitorización de las deformaciones de ciertas estructuras, como las bóvedas de mampostería en el tiempo, así como para garantizar la seguridad estructural cuando la iglesia se vuelva a poner en uso.

5.3.4.2. Minimización del riesgo utilizando escaneados láser

La medición de edificios de este tipo empleando el escaneado láser minimiza ciertos riesgos que podrían ocurrir al usar otras técnicas topográficas.

Riesgo para la estructura misma:

- Como el escaneado láser es una técnica de medición a distancia, no necesitamos realizar ningún contacto con la estructura. Esto minimiza el riesgo de futuros deterioros.
- Por la misma razón, no tenemos la necesidad de utilizar andamios que medir los techos. Los andamios podrían dañar la estructura.
- El escaneado láser proporciona precisión, datos con alta resolución que se pueden utilizar para modelos 3D de ciertos elementos estructurales. Estas consideraciones minimizan los errores en la fase de ingeniería.

Riesgos para el topógrafo:

- Como no necesitamos andamios, el topógrafo no tendrá el riesgo de trabajar a altura.

5.3.5. Tipo de escáner láser

Como el escaneado de una iglesia de este tamaño es un proceso complejo, dividiremos el trabajo en dos partes: escaneado del interior y escaneado del exterior de la iglesia. Ambas tareas presentan diferentes requerimientos en cuanto al equipamiento del escáner. Por razones de disponibilidad y costes, se asignaron 2 días para realizar el escaneado de toda la iglesia.

5.3.5.1. Interior

Para escanear el interior de la iglesia, necesitamos un escáner con las siguientes especificaciones:

- El escáner debe poder escanear una vista totalmente panorámica (360° x 270°).
- El alcance máximo será alrededor de los 20 ó 30m.
- Como sólo se dispone de 2 días para el escaneado de la iglesia, necesitamos un escáner muy rápido, que adquiera muchos puntos por segundo con posibilidad de una resolución apropiada para tomar detalles importantes de la estructura.
- La precisión debe ser muy alta (5mm), ya que los datos se utilizarán para el cálculo de la seguridad estructural.
- No hay necesidad de considerar posibles problemas con la temperatura, lluvia o viento, ya que el escaneado será en el interior.
- Hay toma de corriente eléctrica, por lo que no necesitamos una batería.

Observando el alcance máximo, la precisión y la duración de 2 días, un escáner basado en diferencia de fase (del año 2007) sería la mejor solución para este trabajo. En este caso, se utilizó el escáner de fase *Leica HDS 4500* (ver las especificaciones en Fig. 55). Para poder trabajar todavía más rápido, se acopló al trípode del escáner un soporte para el ordenador portátil; el trípode se montó en una plataforma móvil de manera que el movimiento del escáner entre las diferentes posiciones fuera muy rápido y fácil.



LASER SCANNING SYSTEM	
TYPE	Phase-shift
COLOR	Red (visible)
LASER CLASS	Class 3R (IEC EN60825-1)
RANGE (optimal effective)	1m to 25m
MINIMAL RANGE	0.1m (low output power mode)
MAXIMUM RANGE (25M MODEL)	25.2m (default output power mode)
MAXIMUM RANGE (53M MODEL)	53.5m (default output power mode)
SCAN RATE	Up to 500,000 points/second*
SCAN DENSITY (RESOLUTION)	
Spot size	5mm at 10 meters, 8.5mm at 25 meters

SYSTEM PERFORMANCE (25M AMBIGUITY RANGE MODEL)		
SINGLE POINT ACCURACY***		
POSITION	AT 10M	AT 25M
20% reflectivity (dark grey)	≤ 6mm	≤ 13.5mm
100% reflectivity (white)	≤ 6mm	≤ 12.8mm
DISTANCE		
20% reflectivity (dark grey)		≤ 3mm +180ppm*
100% reflectivity (white)		≤ 3mm +64ppm*
ANGLE		
Horizontal		350 micro-radians
Vertical		350 micro-radians
MODELED SURFACE PRECISION**	AT 10M	AT 25M
20% reflectivity (dark grey)	≤ 1.6mm	≤ 4.4mm
100% reflectivity (white)	≤ 1.0mm	≤ 1.8mm
TARGET ACQUISITION ACCURACYϕ	≤ 2mm	≤ 3.5mm
* PPM value equals the range noise standard deviation		
** Data acquired in default mode, subject to modeling methodology		
*** at 125 KHz data rate		
ϕ Algorithmic fit to black and white HDS targets		


Figura 55: Escáner basado en fase Leica HDS 4500

5.3.5.2. Exterior

El exterior de la iglesia requiere un escáner diferente:

- No hay necesidad de una vista panorámica (no es necesario escanear los alrededores), sin embargo debe de tener un ancho campo de visión (alrededor de 100 grados horizontalmente, 60-70 grados en vertical) debido al tamaño del edificio.
- El escáner debe ser capaz de medir puntos hasta distancias de 100m.
- Debe poder escanear con alta precisión ya que los datos se usarán para calcular la inclinación de ciertas partes de las paredes.
- La resolución del escáner es menos importante porque no hay apenas detalles finos en el exterior. Sin embargo, se requiere una resolución adecuada para modelar con alta precisión las discontinuidades en la superficie.
- Se han de tener en cuenta posibles problemas por la temperatura, el viento y la lluvia, al realizar el escaneado al exterior (el rango de temperatura varía de 0 a 20 °C)
- Se necesitará una batería o un generador para alimentar al escáner dado que no hay acceso directo a la toma de corriente eléctrica.

En el momento del escaneado (año 2007) se eligió el escáner basado en tiempo de vuelo *Leica HDS3000* (Fig. 56).



LASER SCANNING SYSTEM		SYSTEM PERFORMANCE	
TYPE	Pulsed; proprietary microchip	SINGLE POINT ACCURACY*	
COLOR	Green	Position	6mm
LASER CLASS	Class 3R (IEC 60825-1)	Distance	4mm
RANGE		Angle (horizontal)	60 micro-radians
Optimal effective range	1m-100m	Angle (vertical)	60 micro-radians
To 10% reflectivity targets	Up to 100m (typical)	MODELED SURFACE PRECISION**	2mm
SCAN RATE	Up to 1800 points/second*	TARGET ACQUISITION ACCURACY†	1.5mm
<i>* Maximum scan rate dependent on scan resolution and selected field-of-view</i>		DATA INTEGRITY MONITORING	Periodic accuracy self-checking during operation and at startup
SCAN DENSITY (RESOLUTION)		<i>* All specifications shown @ 1m - 50m range</i>	
Spot size	≤ 6mm from 0 - 50 meters	<i>** Subject to modeling methodology</i>	
Selectability	Independently selectable vertical and horizontal point-to-point measurement spacing †	<i>† Algorithmic fit to planar HDS targets</i>	
Point Spacing	Select by total number of points per unit area or minimum distance between points (at specified range) †		
Maximum Sample Density	1.2mm †		
Scan row (horizontal)	20,000 points/row, maximum †		
Scan column (vertical)	5,000 points/column, maximum †		

Figura 56: Escáner basado en tiempo de vuelo Leica HDS3000

5.4. Adquisición de los datos

Antes de empezar con el verdadero escaneado debemos planificar los estacionamientos del escáner. Como se ha explicado en la parte teórica, se recomienda cubrir lo máximo posible con el mínimo de estacionamientos.

5.4.1.1. Interior

El edificio se divide en áreas considerando las obstrucciones más grandes como los paneles de madera y los pilares entre la nave principal y las laterales, que también tienen

andamios. Así pues, resultan 8 áreas diferentes en las que la altura del techo de cada una de ellas es aproximadamente constante y su vista no se encuentra obstruida por ningún obstáculo (Fig. 57).

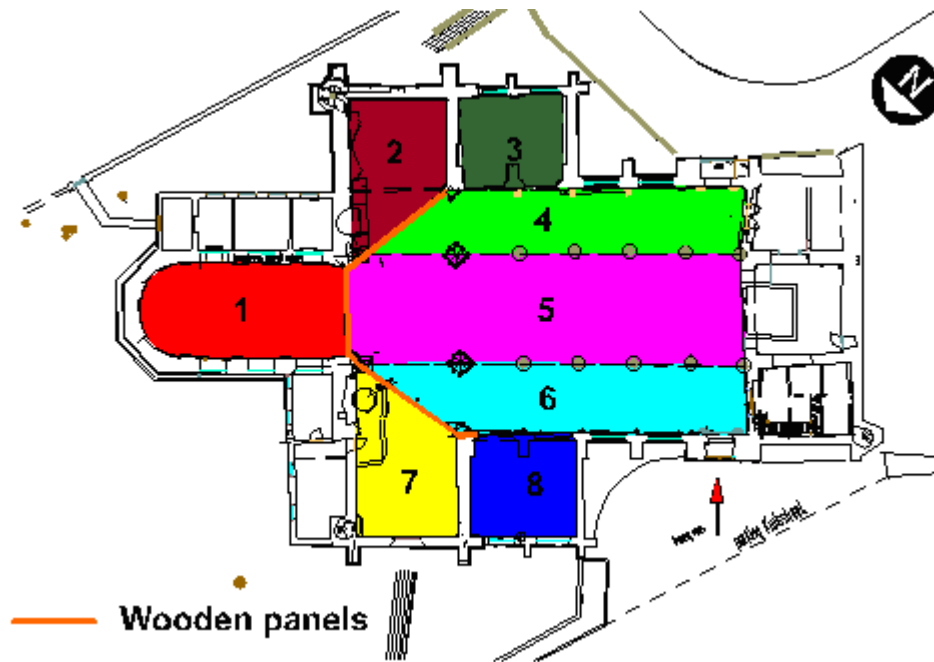


Figura 57: Zonas separadas por las obstrucción de la visión

A realizar: Copia el croquis e intenta planificar las posiciones del escáner.

Una configuración óptima tiene, al menos, un estacionamiento en cada una de las zonas. Es importante ver las pequeñas obstrucciones que podrían producir zonas de sombra desde cada estacionamiento. Si se producen zonas de sombra se pueden añadir otras posiciones del escáner que cubran la zona. Esto se debe hacer con cuidado. Las posiciones adicionales del escáner se deben colocar de forma que no se solape más de un 50% con otros escaneados a menos que sea necesario para eliminar todas las zonas de sombra.

La Figura 58 muestra la propuesta planteada para el emplazamiento in situ del escáner. Realmente, hubiera sido mejor haber realizado más estacionamientos para tener una cobertura completa, pero no fue posible por las limitaciones del tiempo.

El programa Cyclone (véase el capítulo 5.6) utiliza el término *ScanWorld* para cada estacionamiento, lo que equivale a una nueva posición física y orientación del escáner.

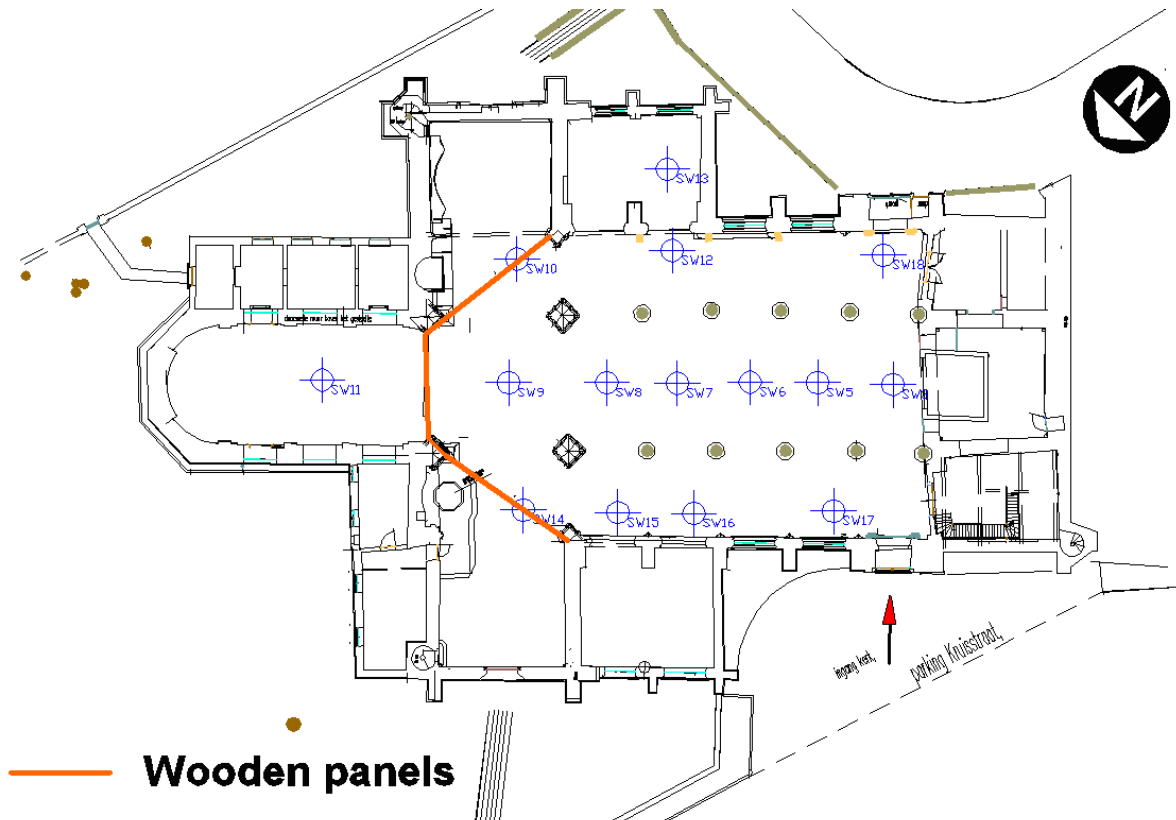


Figura 58: Descripción de las posiciones del escáner en el interior del templo

Descripción de las posiciones del escáner en la propuesta:

- Los *ScanWorlds* 3, 5, 6, 7, 8 y 9 se tomaron desde el centro de cada bóveda para tener la mayor cobertura con un buen solape. Este solape también implica una mejor precisión porque se toman más puntos en la misma área.
- Los *ScanWorlds* 10 y 14 se tomaron desde el centro de las aberturas de los paneles de madera para conseguir la mayor cobertura posible de las alas del crucero al mismo tiempo que también se tomaba parte de la nave central. Esto permite hacer el registro mediante puntos de referencia en la nave central y el método de registro de nube a nube.
- En el coro sólo se realizó un escaneo a alta resolución (*ScanWorld* 11). Esto fue suficiente para cubrir toda el área. La posición del escáner fue elegida de manera que el escáner también pudiera digitalizar parte de las bóvedas en la intersección entre el crucero y la nave central. Este solape se puede utilizar más tarde en la fase de registro (véase apartado 5.6.1.7).
- Los *ScanWorlds* 12, 15, 16, 17 y 18 se realizaron para asegurar una cobertura completa de las naves laterales. La posición exacta de los *ScanWorlds* 12, 15 y 16 se eligió para cubrir la nave lateral al mismo tiempo que también se tenía la mayor cobertura de las alas del crucero.

5.4.1.2. Exterior

Se decidió no escanear los lados norte y noreste del templo porque estaban ocultos por arbustos y árboles, y por el poco tiempo disponible. También era muy difícil situar dianas artificiales debido a la accesibilidad directa del lugar. La gente que pasa siente curiosidad y

algunas veces mueven o incluso quitan las dianas artificiales. Por tanto, se decidió hacer dos o tres escaneados desde diferentes lados en un mismo día utilizando dianas artificiales y escaneados adicionales al día siguiente. Estos últimos escaneados pueden registrarse entonces mediante el método de registro nube a nube.

A realizar: a partir del croquis, planifica las posiciones del escáner para el exterior de la iglesia.

La Figura 59 muestra la configuración del escáner (*ScanWorlds*) utilizada por los autores en la toma de datos. Los *ScanWorlds* 30, 32 y 31 son del primer día, por lo que contendrán dianas. Los *ScanWorlds* 33, 34, 35, 36 y 37 se realizarán el segundo día y se registrarán a los anteriores por medio del método de registro de nube a nube.

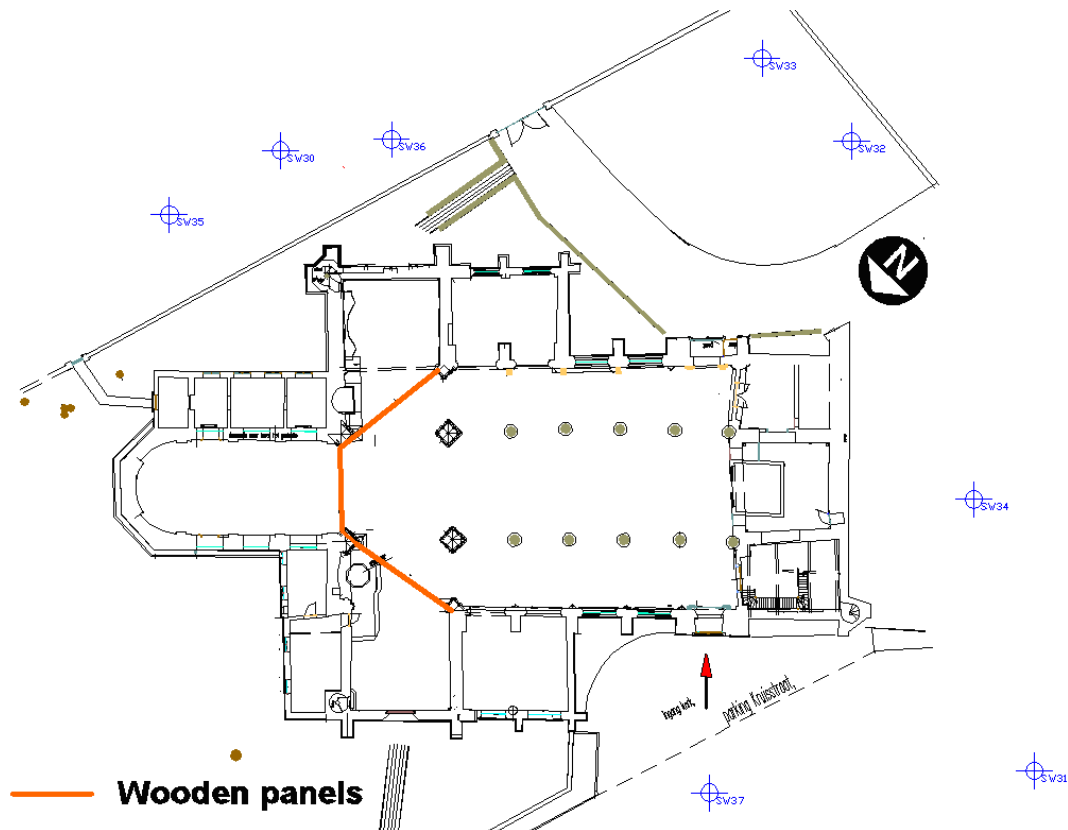


Figura 59: Descripción de las posiciones del escáner en el exterior de la iglesia

5.4.1.3. *Dianas*

No solo es importante la posición del escáner, sino también la de las dianas. Como ya se ha mencionado anteriormente, es importante que:

- Estén lo más separadas posible.
- Estén a diferentes alturas.
- Haya el menor número posible en una misma línea.
- Al menos haya 3 puntos visibles desde cada posición del escáner.

Es necesario medir todas las dianas con una estación total por medio de una poligonal (preferentemente cerrada) que ajuste los errores y que permita conectar los escaneados del interior con el exterior. De este modo, tendremos todos los escaneados en el mismo sistema de referencia.

A realizar: Intenta completar tu croquis añadiendo las posiciones de los puntos de referencia siguiendo las indicaciones anteriores.

El croquis final con las posiciones del escáner y los puntos de referencia se muestra a continuación (Fig. 60).

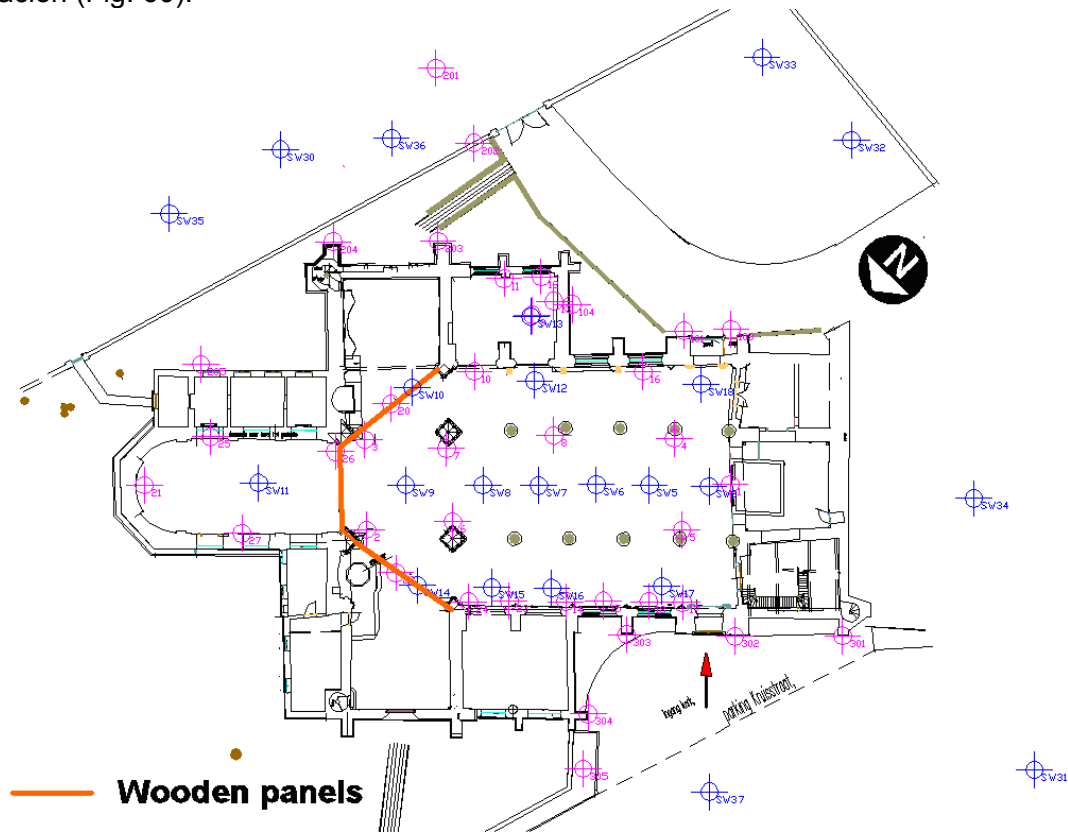


Figura 60: Vista de todas las posiciones del escáner y puntos de referencia propuesta por los autores

5.5. Preparación de los datos

Durante la fase de adquisición de los datos, algunas cuestiones no ocurren como estaban planeadas. Por ejemplo, en la toma del interior del templo, algunas personas (estudiantes y profesores) querían tener una demostración del equipamiento del escáner, con lo que algunos escaneados se realizaron con dicha intención. Antes de procesar los datos es aconsejable eliminar los escaneados que están contaminados por ruido (gente en la línea de vista del escáner, gente alrededor provocando vibraciones...). Los *ScanWorlds* implicados (*ScanWorlds* 1, 2 y 3) se eliminaron del conjunto de datos.

Para empezar a trabajar con los datos en el programa Leica Cyclone, se requiere una conexión entre la base de datos que contiene los datos de los escaneados y Cyclone.

- Abrir el programa *Cyclone*.
- Hacer clic con el botón derecho sobre el icono (*Unshared*) en la lista de servidores y selecciona *Databases*.

En el cuadro de dialogo, haz clic en el botón *Add...*, luego haz clic en el botón ... junto a *Database Filename* y navega hasta la base de datos llamada *St.James Church – Tutorial*

Inside – start. Selecciona el fichero *.imp y pulsa el botón *Open*. Vuelve al diálogo previo, pulsa el botón *OK* y luego *Close*. Esto nos trae el navegador de Cyclone.

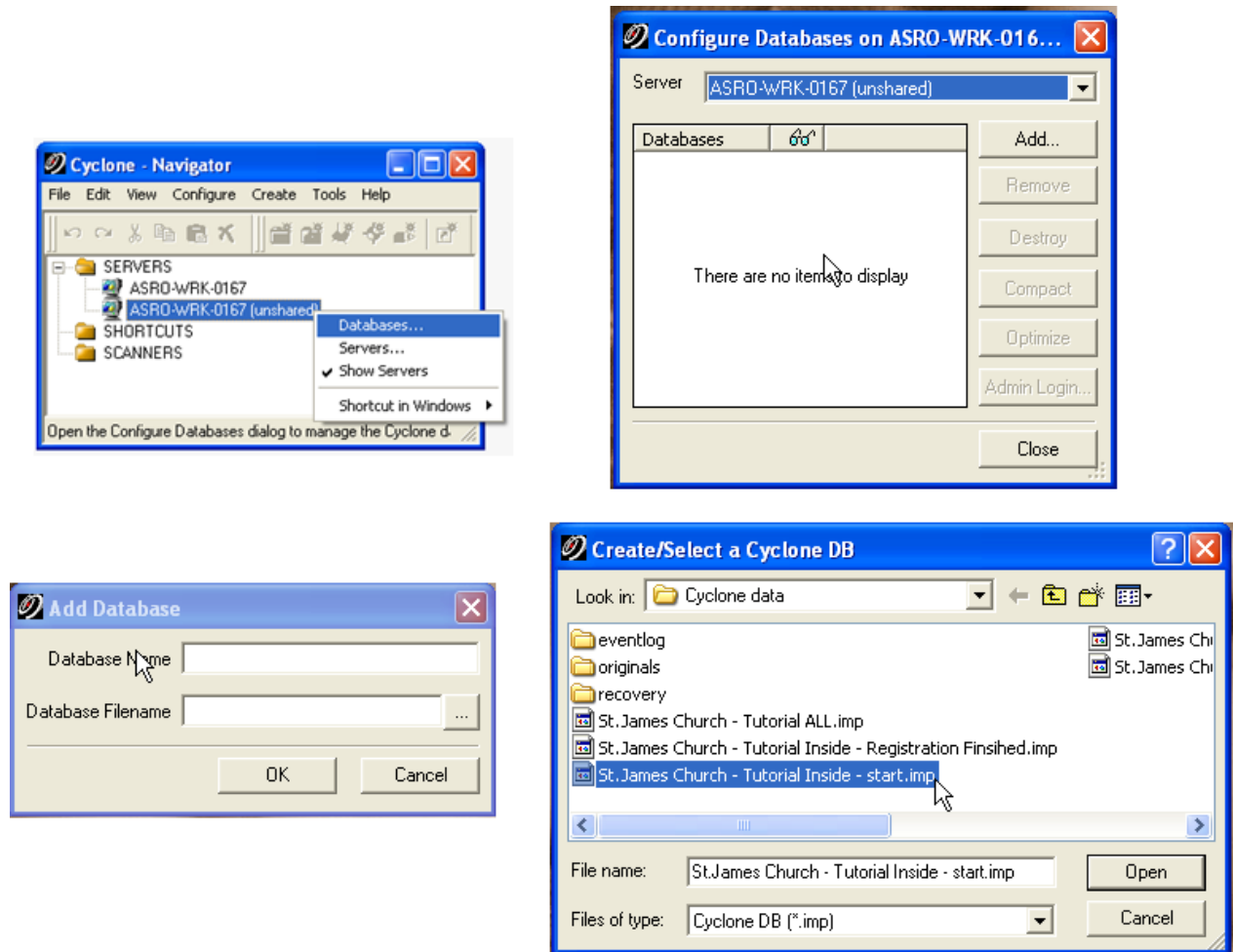


Figura 61: Carga de una base de datos en Cyclone

Cyclone importa la base de datos y la muestra en el listado del navegador. Para comprobar los datos, abre la base de datos haciendo clic en el botón + de la base de datos. Así se expandirán los niveles inferiores. Cada escaneo individual realizado en campo se mostrará como un *ScanWorld*; estos escaneados no tienen unas coordenadas u orientación específica en relación a los otros. Cada *ScanWorld* tiene 4 partes: *ControlSpace*, *ModelSpace*, *Scans* e *Images*. La carpeta *Images* contiene las imágenes tomadas por la cámara interna del escáner que ayuda a definir el campo de visión del escáner. La carpeta *Scans* contiene cada escaneo como datos RAW (originales). Aquí, incluso los escaneados realizados desde un mismo punto con diferentes parámetros están separados. Las carpetas más importantes son las otras dos, *ControlSpace* y *ModelSpace*. Estas carpetas contienen los datos con los que trabajar. El *ControlSpace* es el espacio que realmente contiene los datos RAW del escáner. Este *ControlSpace* se utiliza en todas las fases. Sin embargo, es una medida de seguridad. El usuario no puede cambiar directamente el *ControlSpace*. Se puede cambiar el *ModelSpace* y luego copiar los cambios al *ControlSpace*. El *ModelSpace* es, de hecho, una instantánea del *ControlSpace*. Proporciona una vista del *ControlSpace* en un momento dado. Es posible tener varios *ModelSpaces* tomados en diferentes momentos de un mismo *ControlSpace*.

5.6. Registro y Georreferenciación

5.6.1. Registro: Interior

Como resultado de la fase de adquisición de los datos tenemos un total de 23 *ScanWorlds*, 15 del interior y 8 del exterior. Nota: Cuando se utiliza la base de datos reducida, sólo hay 8 *ScanWorlds* disponibles del interior, pero permiten seguir las instrucciones del tutorial. El tutorial apantalla resultados de la base de datos completa. Por tanto, prescinde de ellos si utilizas la base de datos reducida. A veces aparece la referencia (*reduced dataset:...*) que indica un valor diferente en dicho conjunto.

El registro empezará con los escaneados del interior. Para registrar el interior de la iglesia se van a utilizar diferentes técnicas (véase el video "[registration interior part1.avi](#)").

Primero, se utiliza la técnica diana a diana. Una cierta cantidad de dianas artificiales se colocaron en la escena antes de escanearla. Enlazando al menos 3 de estas dianas entre diferentes *ScanWorlds* permite registrar los escaneados. Hay que destacar que no todos los escaneados se pueden registrar utilizando solo dianas.

Cuestión 1: ¿Cuáles? Véase Figura 60.

Para registrar el *ScanWorld* 11 a los otros *ScanWorlds* se utiliza el método nube a nube. Para poder registrar escaneados mediante este método es necesario que exista suficiente solape entre las nubes de puntos. Es recomendable tener un 30% de solape para un adecuado registro.

Cuestión 2: Observa los escaneados que no se pueden registrar únicamente con los puntos de referencia y comprueba si tienen suficiente solape para realizar el registro nube a nube.

Incluso las nubes de puntos que no tiene suficiente solape y tampoco puntos de referencia en común, se pueden registrar conectando las dianas de una nube a las dianas de otra midiéndolos con una estación total. Con esta técnica, todos las dianas pueden tener el mismo sistema de referencia y usar este sistema como base para registrar todas las nubes de puntos. Esta técnica se llama registro nube a estación total.

En el caso de la Iglesia de *St. James* se utilizaron mediciones con estación total para automatizar una gran parte del proceso de registro. Luego, estas mediciones podrán ser utilizadas para hacer la conexión entre los escaneados del interior y del exterior.

En las siguientes secciones se utilizarán y revisarán con detalle las técnicas de registro.

5.6.1.1. Crear un proyecto de registro

Para realizar un registro en *Cyclone* observa el navegador de *Cyclone* (Fig. 62). En el navegador se encuentra la base de datos '*St.James Church – Tutorial Inside - start*'. Esta base de datos contiene todos los *ScanWorlds* del interior de la iglesia. Haz clic con el botón derecho sobre la carpeta del proyecto '*Project St.James Church – Inside*' y selecciona *Create – Registration*. Al final de la lista de *ScanWorlds* se ha añadido un proyecto de registro. Renómbralo como '*Registration St.James Church – Inside*' (véase el video "[registration interior part2.avi](#)").

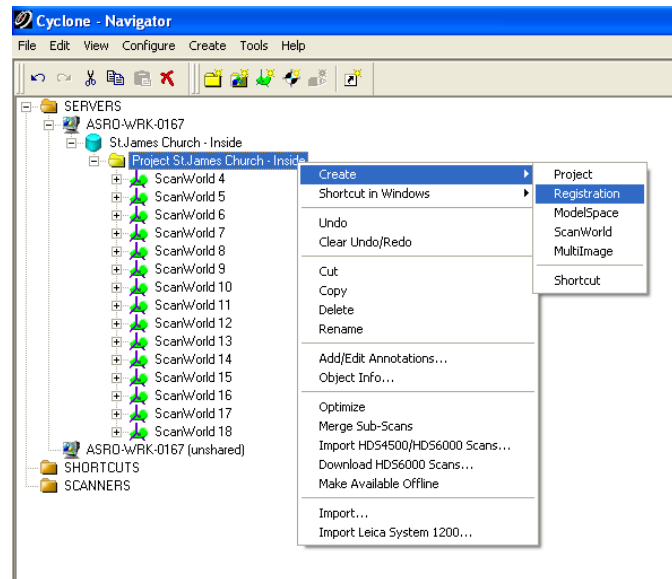


Figura 62: Navegador de Cyclone – Creando un proyecto de registro

Una vez creado el registro, haz doble clic sobre él para abrir el cuadro de diálogo del registro. En él encontrarás 3 pestañas (Fig. 63): *ScanWorld's Constraints*, *Constraint List* y *ModelSpaces*, que en este momento están vacías.

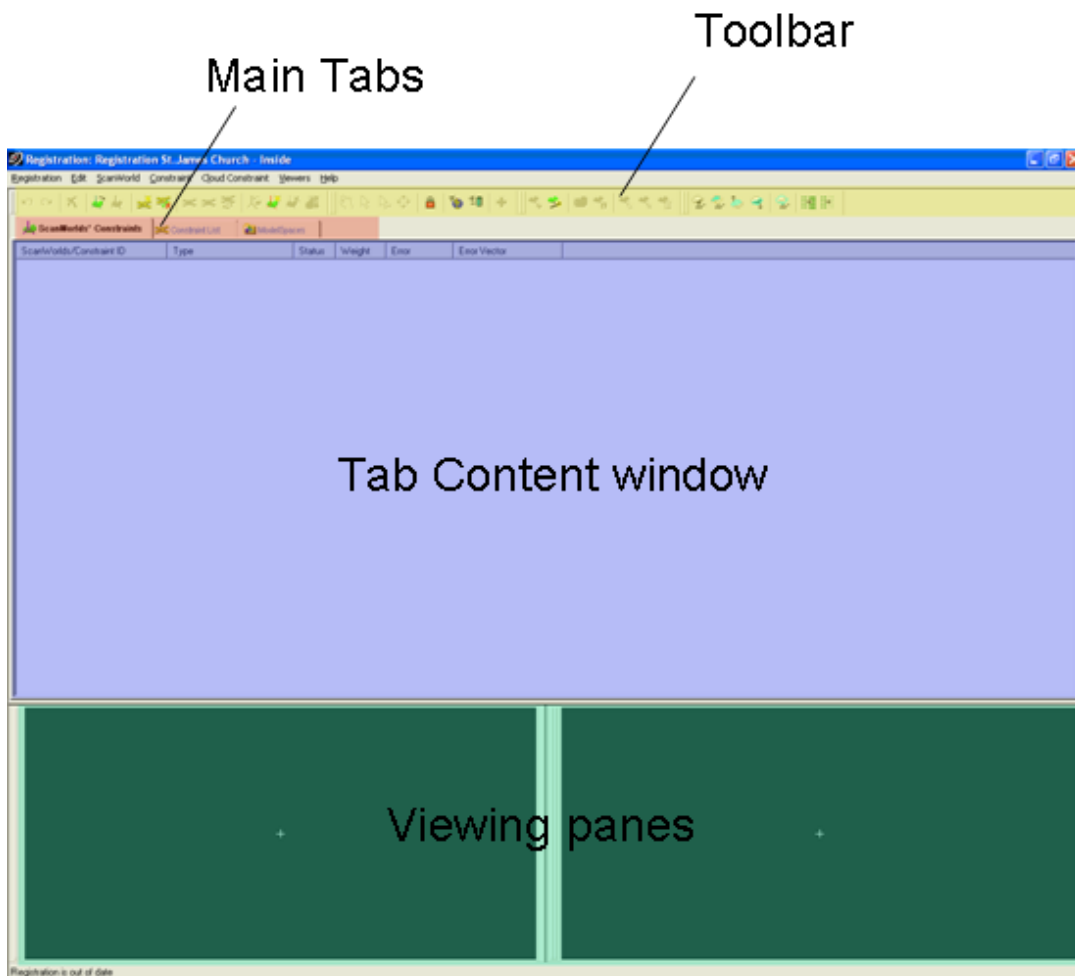


Figura 63: Cuadro de diálogo del proyecto de registro

5.6.1.2. Importar los datos de la estación total

Como se ha mencionado anteriormente, todos los puntos de referencia se han medido con una estación total para automatizar en gran medida el proceso de registro. Antes de empezar con el registro, debemos importar estas mediciones. En el navegador hacemos clic con el botón derecho sobre el proyecto y seleccionamos la opción *Import*. Aparece un nuevo cuadro de diálogo en el que podemos seleccionar el fichero que contiene los datos de la estación total. Este fichero puede presentar diversos formatos, por lo que se puede especificar su estructura en el mismo cuadro. En este caso seleccionamos el fichero llamado '[TSSurvey-StJames.txt](#)'. *Selecciona el fichero y ábrelo.*

Ahora definimos la estructura del fichero. Los valores del fichero están **delimitados por espacios** y su unidad es el **metro** (Fig. 64). La primera columna contiene el *TargetId*, mientras que las tres siguientes contienen las coordenadas *X*, *Y* y *Z*. Especificamos estos encabezamientos de columna haciendo clic en ellas y seleccionando el título correcto (véase el vídeo "[registration_interior_part3.avi](#)").

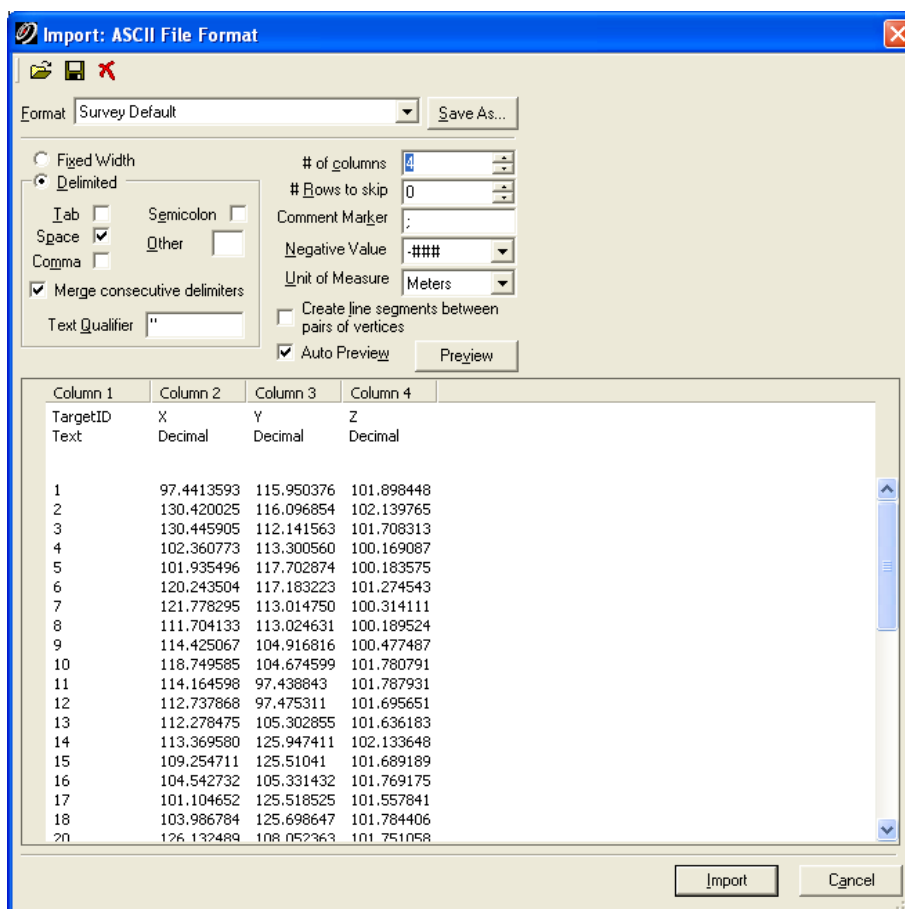


Figura 64: Importando los datos de la estación total desde un fichero ASCII

Una vez se han establecido todos los parámetros, importamos el fichero haciendo clic sobre el botón *Import*. Cuando se importa una nueva base de datos desde un fichero de texto ASCII, se crea un nuevo *ScanWorld* en el navegador. Este *ScanWorld* tiene la misma estructura que uno normal. Contiene un *ControlSpace* y un *ModelSpace* que en este momento contienen los puntos en las dianas y sus nombres en lugar de una nube de puntos (Fig. 65).

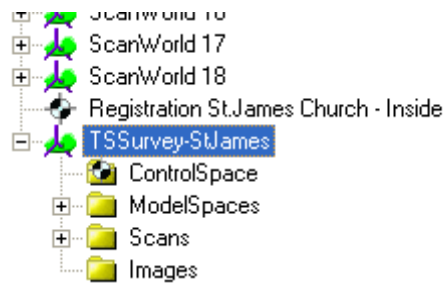


Figura 65: Estructura de los datos de una estación total importados en Cyclone

5.6.1.3. Añadir ScanWorlds

Para añadir *ScanWorlds* al registro se debe abrir el proyecto de registro haciendo doble clic sobre él y seleccionando el menú *ScanWorld - Add ScanWorld...*. En el siguiente cuadro de diálogo selecciona los *ScanWorlds* que quieras registrar (Fig. 66). Primero, se hará un intento de registrar todos los *ScanWorlds* de una sola vez para ver los problemas que ocurren. Selecciona todos los *ScanWorlds* manteniendo pulsada la tecla *shift*. Asegúrate de incluir el *ScanWorld TSSurvey-StJames* que contiene los datos de la estación total. Haz clic en la flecha de la derecha para añadir estos *ScanWorlds* al proyecto de registro y pulsa el botón *OK* (véase el vídeo "[registration interior part4.avi](#)").

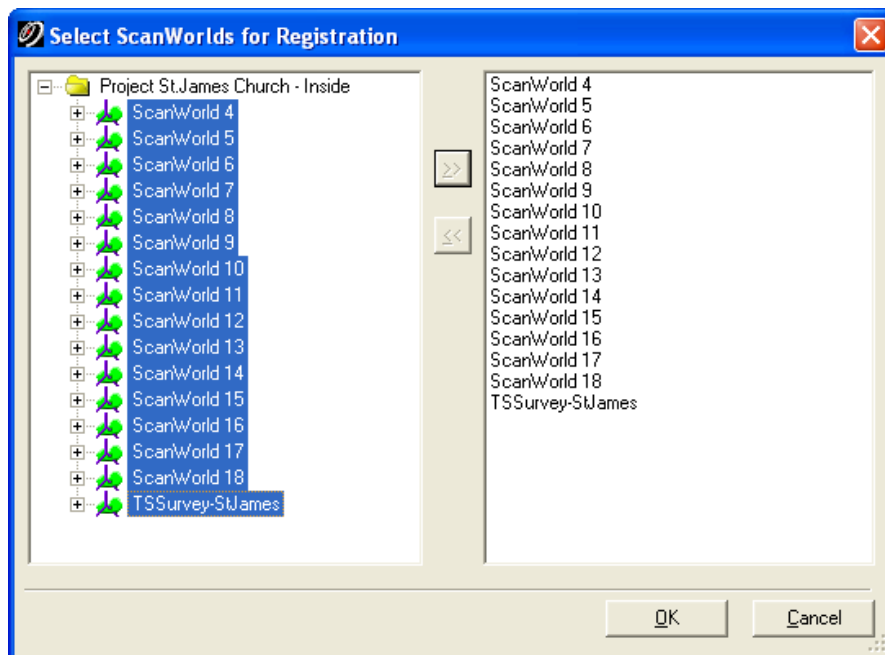


Figura 66: Inserción de todos los ScanWorlds al proyecto de registro

5.6.1.4. Añadir los constreñimientos de las dianas

Cuando se han añadido todos los *ScanWorlds* al proyecto de registro, se selecciona uno de ellos para ser el *Home ScanWorld*. Esto significa que los otros *ScanWorlds* se registrarán respecto a su sistema de referencia. Para ello, se debe ir a la pestaña *ModelSpaces* y seleccionar el *ScanWorld TSSurvey-StJames*. A continuación pulsar el botón derecho y seleccionar *Set Home ScanWorld*. Estableciendo *TSSurvey-StJames* como el *Home ScanWorld*, se utiliza automáticamente una combinación de las técnicas de registro diana a diana y diana a estación total (véase el vídeo "[registration interior part5.avi](#)").

Ahora se pueden añadir constreñimientos. Añadir estos constreñimientos de forma manual llevaría mucho tiempo, por tanto, se utiliza una técnica automática y se chequean los resultados de salida. Primero se detectan automáticamente las correspondencias entre las dianas artificiales y los *ScanWorlds* para realizar el registro diana a diana. Para ello, se abre el menú *Constraint* y seleccionamos la opción *Auto add constraints* (Fig. 67). El programa intentará encontrar automáticamente las correspondencias entre dianas artificiales, considerando que están colocados y nombrados correctamente.

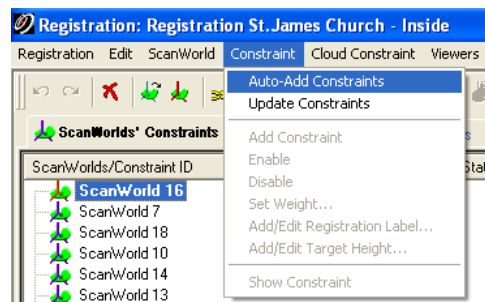


Figura 67: Opción del menú Auto-Add Constraints

Al final de este proceso aparece un mensaje de aviso indicando el número de constreñimientos que pueden haber quedado sin etiqueta o ser erróneos, dando una idea de qué dianas pudieran ser erróneas. Examinando la lista de dianas ‘malas’, se puede ver que las dianas 6, 7, 13 y 17 están repetidos, por lo que deben comprobarse. Pulsa el botón de cerrar y abre la pestaña *Constraint List*. En este nuevo cuadro se pueden ver los constreñimientos detectados automáticamente por el programa. En este momento la columna del error presenta el valor *n/a*. Esto significa que todavía no se han calculado los errores.

5.6.1.5. Encontrar errores

Las nubes de puntos tienen que estar registradas para calcular los errores. Abre el menú *Registration* e inicia la orden *register*. Cuando esta tarea acaba, la columna del error toma un valor. Los constreñimientos se ordenan en orden descendente según el valor del error haciendo clic en el encabezamiento de esta columna. Así podemos analizar los constreñimientos, examinar los que tengan errores altos y, si es necesario, corregirlos manualmente (véase el vídeo "[registration_interior_part6.avi](#)").

A realizar: Ordena la columna de los errores y comprueba los valores.

En la columna de los errores, los primeros 4 constreñimientos tienen un error mayor de 2 metros, y el punto (Target) 17 está implicado en todos ellos. Haciendo doble clic en un constreñimiento, el programa abre los *ScanWorlds* implicados en 2 vistas.

Cuestión 3: Haz doble clic en el segundo constreñimiento que une los ScanWorld 5 y ScanWorld 6 y haz zoom sobre el punto 17 (Fig. 68). ¿Qué hay incorrecto en este punto?

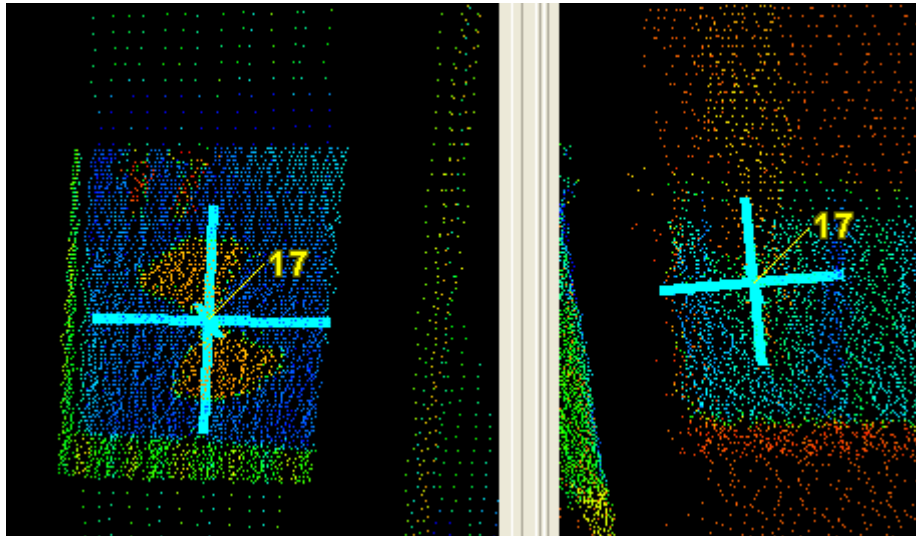


Figura 68: Punto 17 en los ScanWorlds 5 (posición correcta - izquierda) y 6 (posición incorrecta - derecha)

Se debe tener cuidado cuando se comprueban las dianas directamente con el visualizador en el proyecto de registro porque no todos los escaneados con alta resolución pueden estar visibles. Por tanto, es mejor comprobar los *ScanWorlds* directamente en el navegador y ver si todos los escaneados individuales están visibles. Esto se puede hacer abriendo el *ControlSpace* del respectivo *ScanWorld* directamente del navegador y comprobando el *Tools – Scanner – ScanWorld Explorer...* Si todos los escaneados están marcados, están visibles.

5.6.1.6. Corregir errores

Para corregir el problema con el punto 17, todos los constreñimientos que contengan el punto 17 en el *ScanWorld* 6 se desactivarán.

Cuestión 4: Reordena los constreñimientos de la lista según su ID y busca los que contengan al punto 17. ¿Cuántos constreñimientos contienen el punto 17?

Comprueba los *ScanWorlds* de cada constreñimiento y desactiva los constreñimientos que contengan *ScanWorld* 6 haciendo doble clic en ellos y seleccionando la opción *Disable*. Tras desactivar algunos constreñimientos, selecciona la opción *re-Register*. (La opción auto-update puede activarse para actualizar automáticamente el registro).

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 17	ScanWorld 18	ScanWorld 6	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.777 m	(-1.782, 2.120, 0.200) m
TargetID: 17	ScanWorld 6	TSSurvey-StJames (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.776 m	(1.782, -2.119, -0.201) m
TargetID: 17	ScanWorld 17	ScanWorld 6	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.774 m	(-1.783, 2.115, 0.202) m
TargetID: 17	ScanWorld 5	ScanWorld 6	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.773 m	(-1.780, 2.118, 0.199) m
TargetID: 13	ScanWorld 16	TSSurvey-StJames (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.151 m	(-0.083, 0.044, -0.119) m
TargetID: 13	ScanWorld 16	ScanWorld 7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.142 m	(-0.083, 0.043, -0.107) m
TargetID: 13	ScanWorld 16	ScanWorld 12	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.126 m	(-0.079, 0.040, -0.090) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	TSSurvey-StJames (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.105 m	(-0.007, 0.013, 0.104) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	ScanWorld 9	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.105 m	(-0.008, 0.014, 0.104) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	ScanWorld 5	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.104 m	(-0.006, 0.013, 0.103) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	ScanWorld 8	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.104 m	(-0.006, 0.012, 0.103) m

Figura 69: Lista de constreñimientos después del registro

Ahora, los constreñimientos se pueden volver a comprobar (ordenados por el valor del error). Se observa que el mayor error “enabled” ha bajado a 15.1 cm (*reduced dataset: 14*

cm), lo que todavía es un valor demasiado alto (Fig. 69). También se observa que los tres constreñimientos con error alto contienen el punto 13 (véase el vídeo "[registración_interior_part7.avi](#)").

Cuestión 5: Comprueba todos los constreñimientos que contengan al punto 13. ¿Qué hay incorrecto con este punto?

A realizar: Comprueba qué diana es el correcto en el ModelSpace (el que tiene la diana visible en el escaneado con alta resolución) y elimina los puntos mal nombrados. Haz lo mismo en el ControlSpace (cuando se eliminen las dianas del ControlSpace, el programa comunica que esa diana está siendo utilizada en el proyecto de registro. Antes de eliminar la diana del ControlSpace, se debe eliminar el respectivo ScanWorld del proyecto de registro. Para ello, hay que ir a la ventana ModelSpaces y seleccionar el ScanWorld 16. A continuación haz clic con el botón derecho y selecciona la opción Delete. Después de eliminar el problema, añade el ScanWorld al proyecto de registro y vuelve a registrarlo. Comprueba si el problema se ha solucionado completamente.

Después de eliminar el punto 13 en el ScanWorld 16 y volver a registrar el proyecto, hay un error con un valor de 10 cm. Se puede observar que los errores más altos se encuentran en los constreñimientos que contienen la diana 7.

Cuestión 6: Comprueba estos constreñimientos y encuentra lo que está mal respecto a la diana 7 (Fig. 70).

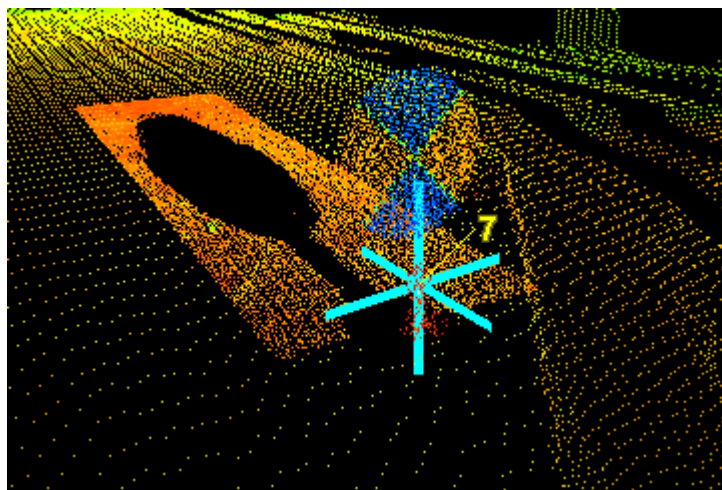


Figura 70: Diana 7 en el ScanWorld 7, posición incorrecta

Para corregir esta diana hace falta eliminarla del ControlSpace y del ModelSpace.

A realizar: Primero, elimina el ScanWorld 7 del proyecto de registro. Luego, elimina la diana del ControlSpace. A continuación ir al ModelSpace y eliminar también la diana.

Ahora se puede renombrar la diana. Observa que cuando se crean dianas nuevas, se deben crear en el ModelSpace y después copiarse al ControlSpace. Solamente las dianas del ControlSpace se utilizan en el registro.

Para crear una nueva diana, selecciona un punto cercano al centro de la diana mediante la herramienta de selección. El escaneado a alta resolución debería destacarse. A continuación, selecciona *Create Object - Fit To Cloud - Black/White Target... Cyclone* intentará ajustar automáticamente una diana a la nube de puntos y encontrar su centro exacto. Cuando esto sea exitoso, aparecerá un cuadro de diálogo para preguntar el nombre de la diana (*TargetID*). Introduce el número 7 y pulsa *OK*. Entonces, el programa muestra un diálogo diciendo que éste tiene múltiples referencias a diferentes ControlSpaces y

pregunta cuál se debe actualizar. Selecciona los dos ControlSpaces disponibles y acepta. Antes de continuar con el registro, comprueba que la diana se ha insertado correctamente.

*Nota: Cuando Cyclone falla al detectar una diana automáticamente, se puede usar la inserción manual. Haz esto seleccionando el punto del centro de la diana mediante la herramienta de selección y luego ves a **Create Object – Insert – Vertex**. A continuación, selecciona el vértice y nómbralo con la opción **Tools – Registration – Add/Edit Registration Label...**, poniéndole el número correspondiente. Cuando esto esté terminado, copia el punto al ControlSpace mediante **Tools – Registration – Copy To Controlspace**.*

Vuelve al proyecto de registro y selecciona la opción **Constraint – Auto Add Constraints**. Registra el proyecto otra vez y ordena los errores según su valor.

*A realizar: Comprueba el primer constreñimiento activo que contenga el error más alto. ¿Qué valor tiene?
Respuesta: El error más alto debe estar alrededor de 1.2 cm, lo que es un error aceptable para un edificio de este tamaño.*

Comprueba siempre el valor del error medio absoluto del registro completo seleccionando la opción **Registration – Show Diagnostics...** A continuación se muestra que el error medio absoluto del registro es de 3 mm (Fig. 71), lo que está dentro de la tolerancia para un edificio de este tamaño.

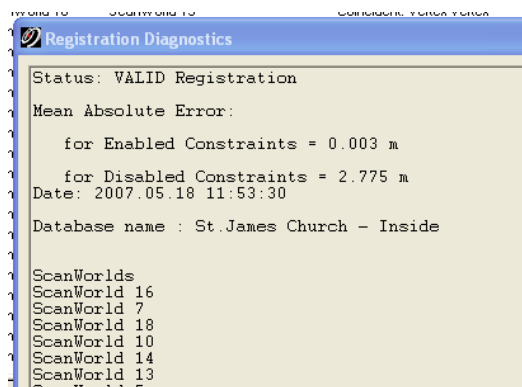


Figura 71: Resultados del registro

5.6.1.7. Añadir constreñimientos a la nube de puntos

Se pueden añadir constreñimientos a la nube de puntos para optimizar el registro. Constreñimientos a la nube de puntos son constreñimientos entre los *ScanWorlds* que tiene suficiente solape como para ser incluidos constreñimientos adicionales. Como todos los *ScanWorlds* están ya registrados, los constreñimientos a los nubes de puntos añaden redundancias. Añadir constreñimientos de este tipo en este caso es muy fácil. Seleccionamos la opción **Cloud Constraint – Auto-Add Cloud Constraints** (véase el vídeo "[registration_interior_part8.avi](#)"), Fig. 72.

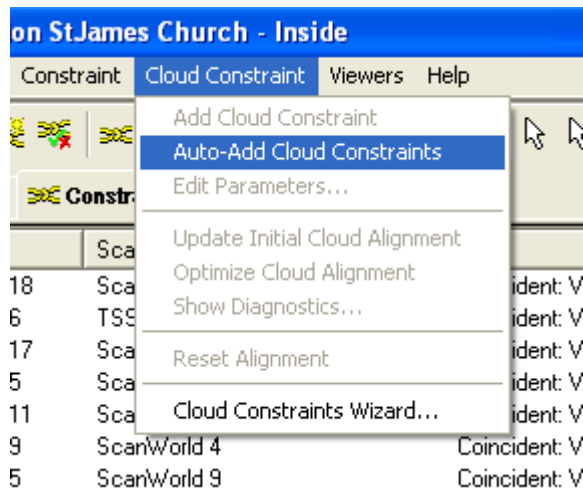


Figura 72: Opción Auto-Add Cloud Constraints

Cyclone empezará automáticamente a buscar y analizar todas las nubes de puntos para encontrar suficiente solape e intentar añadir constreñimientos a estas nubes de puntos. Este proceso puede llevar entre 10 y 20 minutos. El histograma mostrado durante el proceso del registro ya nos indica si los constreñimientos son buenos o no.

Este histograma debe parecerse a una función con un fuerte descenso en lugar de una función con un descenso ligero (Figura 73). Durante el proceso, la gráfica se actualiza iterativamente y muestra después de unas pocas iteraciones un número de puntos mayor con errores menores. Si uno de los constreñimientos no se desarrolla de esta manera, probablemente sea erróneo.

El histograma mostrado debe parecerse a la Figura 73B. Esta imagen muestra que tras un número de iteraciones, el programa ha sido capaz de optimizar el constreñimiento 11 para tener más puntos con errores menores.

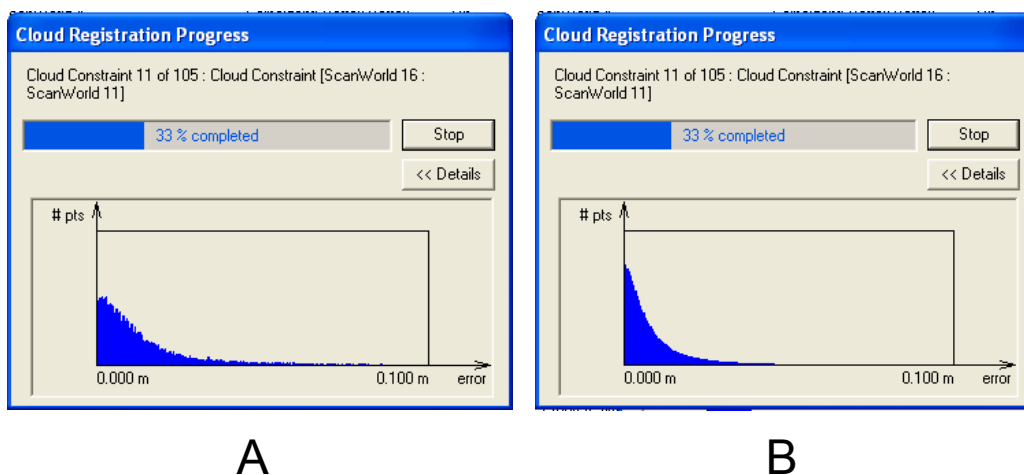
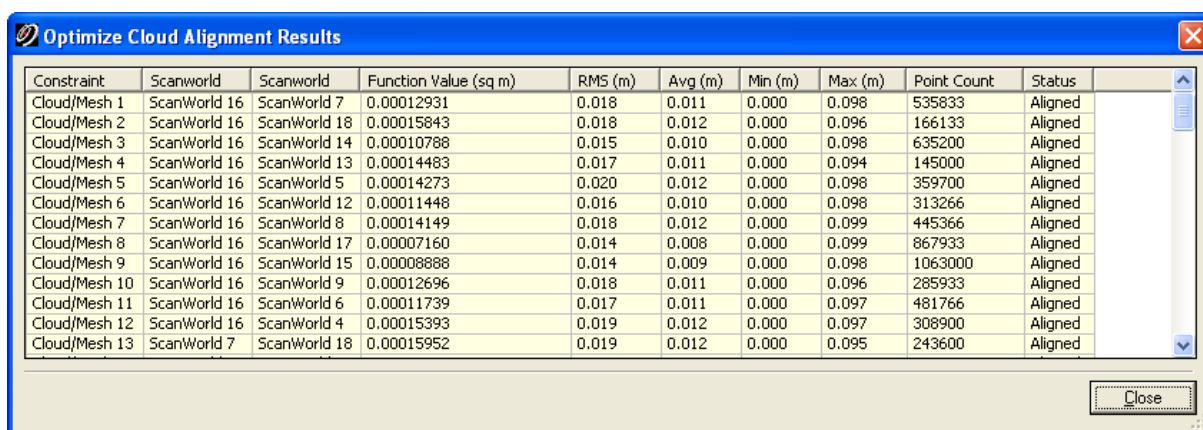


Figura 73: Cuadro de diálogo del registro nube a nube, (a) después de 5 iteraciones, (b) después de 50 iteraciones

Cuando el proceso de *Auto-Cloud-Constraint* termina, el programa muestra un informe de los constreñimientos añadidos y sus errores (Fig. 74).



Constraint	Scanworld	Scanworld	Function Value (sq m)	RMS (m)	Avg (m)	Min (m)	Max (m)	Point Count	Status
Cloud/Mesh 1	ScanWorld 16	ScanWorld 7	0.00012931	0.018	0.011	0.000	0.098	535833	Aligned
Cloud/Mesh 2	ScanWorld 16	ScanWorld 18	0.00015843	0.018	0.012	0.000	0.096	166133	Aligned
Cloud/Mesh 3	ScanWorld 16	ScanWorld 14	0.00010788	0.015	0.010	0.000	0.098	635200	Aligned
Cloud/Mesh 4	ScanWorld 16	ScanWorld 13	0.00014483	0.017	0.011	0.000	0.094	145000	Aligned
Cloud/Mesh 5	ScanWorld 16	ScanWorld 5	0.00014273	0.020	0.012	0.000	0.098	359700	Aligned
Cloud/Mesh 6	ScanWorld 16	ScanWorld 12	0.00011448	0.016	0.010	0.000	0.098	313266	Aligned
Cloud/Mesh 7	ScanWorld 16	ScanWorld 8	0.00014149	0.018	0.012	0.000	0.099	445366	Aligned
Cloud/Mesh 8	ScanWorld 16	ScanWorld 17	0.00007160	0.014	0.008	0.000	0.099	867933	Aligned
Cloud/Mesh 9	ScanWorld 16	ScanWorld 15	0.00008888	0.014	0.009	0.000	0.098	1063000	Aligned
Cloud/Mesh 10	ScanWorld 16	ScanWorld 9	0.00012696	0.018	0.011	0.000	0.096	285933	Aligned
Cloud/Mesh 11	ScanWorld 16	ScanWorld 6	0.00011739	0.017	0.011	0.000	0.097	481766	Aligned
Cloud/Mesh 12	ScanWorld 16	ScanWorld 4	0.00015393	0.019	0.012	0.000	0.097	308900	Aligned
Cloud/Mesh 13	ScanWorld 7	ScanWorld 18	0.00015952	0.019	0.012	0.000	0.095	243600	Aligned

Figura 74: Resultados de las alineaciones de las nubes de puntos

5.6.1.8. Comprobación de la precisión

Una vez ya se han añadido todos los constreñimientos posibles, se puede realizar un registro final para comprobar la precisión total. En el menú de registro, seleccionar la opción *Registration – Show Diagnostics*. El programa nos muestra un informe con el error medio absoluto, que en este caso debería estar alrededor de los 4 mm. Este valor es correcto puesto que la precisión del escáner esté entorno a los 4 mm también.

Observando las precisiones de cada uno de los constreñimientos se puede comprobar que el máximo error es de 19 mm (*reduced dataset: 17mm*). Este es el error originado por los constreñimientos que contienen al *ScanWorld 11*. Esto tiene su explicación en que este *ScanWorld* no tiene suficiente solape con los otros y la conexión se ha hecho, principalmente, con las dianas medidas con la estación total. Como este estacionamiento no formaba parte de la poligonal cerrada, el reparto del error no fue óptimo.

Viendo la lista de constreñimientos, se puede observar que el primero que no contiene al *ScanWorld 11* tiene un error de 12 mm, lo que es aceptable para este tipo de levantamientos (véase el vídeo "[registration_interior_part9.avi](#)").

5.6.1.9. Bloquear y crear un ModelSpace a partir de la nube registrada

Como paso final del proceso de registro, se puede crear un nuevo *ScanWorld* que contenga todas las nubes de puntos registradas. Para ello, selecciona la opción *Registration – Create ScanWorld/Freeze Registration*. Así, se bloquea el registro realizado de forma que nada se puede cambiar. En caso de que se necesite modificar el registro o añadir otro constreñimiento, hay que asegurarse que todos los *ModelSpaces* generados a partir del registro se eliminan y se desbloquea el registro.

Tras bloquear el registro, selecciona *Registration – Create and Open ModelSpace* para crear un nuevo *ModelSpace* que contenga todas las nubes de puntos registradas y lo muestre en una nueva vista (véase el vídeo "[registration_interior_part10.avi](#)").

La base de datos registrada hasta este punto se encuentra en el fichero "[St.James Church – Tutorial Inside – Registration Finished.imp](#)" (vínculo a una base de datos reducida)

5.6.2. Registro: Exterior

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, hay varias técnicas de registro disponibles. Ya se han comentado las técnicas diana a diana y diana a estación total. También se ha utilizado el registro nube a nube, pero esto se ha realizado de manera

totalmente automática para añadir constreñimientos. En el registro de las nubes de puntos del exterior se va a utilizar la técnica de registro nube a nube, pero, en este caso como único constreñimiento para conectar las nubes.

Hay que mencionar que los escaneados del exterior se realizaron en diferentes momentos y que el tiempo disponible era muy limitado. Una gran parte del lado noreste de la iglesia estaba muy ocultado por arbusto y árboles. Debido al poco tiempo disponible, se decidió no escanear esta parte. Los otros escaneados del exterior se realizaron en diferentes días. Esto significa que una parte de estos *ScanWorlds* no contiene puntos de referencia porque las dianas no se podían dejar en el exterior por la noche.

Cuestión 7: *A Realizar: abre todos los ScanWorlds del exterior y comprueba cuáles tienen puntos de referencia y cuáles no.*

Para registrar el exterior del templo, los escaneados que tengan dianas se registrarán primero. Luego, los otros se añadirán uno a uno mediante el registro nube a nube. El conjunto de datos del exterior de la iglesia puede encontrarse en "[St.James Church – Tutorial Outside – start.imp](#)".

5.6.2.1. Repetir los pasos 5.6.1.1 - 5.6.1.6

De la misma manera que en el registro de las nubes de puntos del interior, debemos crear un nuevo proyecto de registro.

Cuestión 8:

- Crea un nuevo proyecto de registro para el exterior y nómbralo 'Registro St.James – Exterior'.
- Copia los datos de la estación total desde el proyecto del interior como un 'copia completa' a este proyecto (botón derecho – copy – paste)
- Abre el proyecto de registro e importa los *ScanWorlds* 30, 31, 32 y el fichero de la estación total.
- Asegúrate de que el fichero con los datos de la estación total se ha establecido como Home *ScanWorld*
- Añade automáticamente los constreñimientos de los puntos de referencia
- Registra el conjunto, busca y corrige los errores.

¿Qué ha ocurrido mal? ¿Por qué? (Recomendación: comprueba los constreñimientos)

Dos constreñimientos no son suficientes para lograr un registro correcto, por tanto elimina el *ScanWorld* 32 del conjunto y registra el proyecto otra vez. El *ScanWorld* 32 se importará más tarde y se aplicarán constreñimientos adicionales para registrarlo al resto. Al analizar los errores del registro, el error máximo es de 1.8 cm.

5.6.2.2. Añadir otros ScanWorlds mediante el registro nube a nube





Los otros *ScanWorlds* que no contienen dianas suficientes para poder realizar el registro diana a diana se pueden añadir en este momento. Observando el croquis de las posiciones de los *ScanWorlds*, se intenta encontrar un *ScanWorld* que tenga, al menos, un 30-40% de solape con otro que ya esté registrado.

Cuestión 9: *¿Qué ScanWorld(s) tienen un solape adecuado con los ScanWorlds 30 ó 31?*

Empezaremos con el *ScanWorld* 37 porque presenta un gran solape con el *ScanWorld* 31.

A realizar: *Añadir el ScanWorld 37 al proyecto de registro.*

Para añadir un constreñimiento de nube de puntos, haz clic en la pestaña *ModelSpace* de la ventana de registro. Luego, abre la vista del *ModelSpace* del *ScanWorld* 31 y del *ScanWorld* 37 haciendo doble clic sobre ellos. El programa abre ambos *ScanWorlds* en

las vistas inferiores de la pantalla. Utiliza las herramientas de visión (**desplazamiento**, **rotación** y **zoom**) para alinear las dos nubes de manera aproximada. Para añadir un constreñimiento de nube, hay que seleccionar al menos 3 pares de puntos correspondientes en ambas nubes, de manera que *Cyclone* tenga una aproximación inicial de la orientación de las nubes. Usa el **puntero**  o  para seleccionar al menos 3 pares de puntos correspondientes. Cuando se utiliza la herramienta , mantén pulsada la **tecla Ctrl** para añadir un punto correspondiente después de seleccionar el primer punto. Esto no es necesario cuando se emplea la herramienta .

En las imágenes de abajo (Fig. 75) se muestran los puntos seleccionados por el autor. Es importante que todos los pares de puntos estén situados lo más lejos posible unos de otros y que no se encuentren en línea recta.

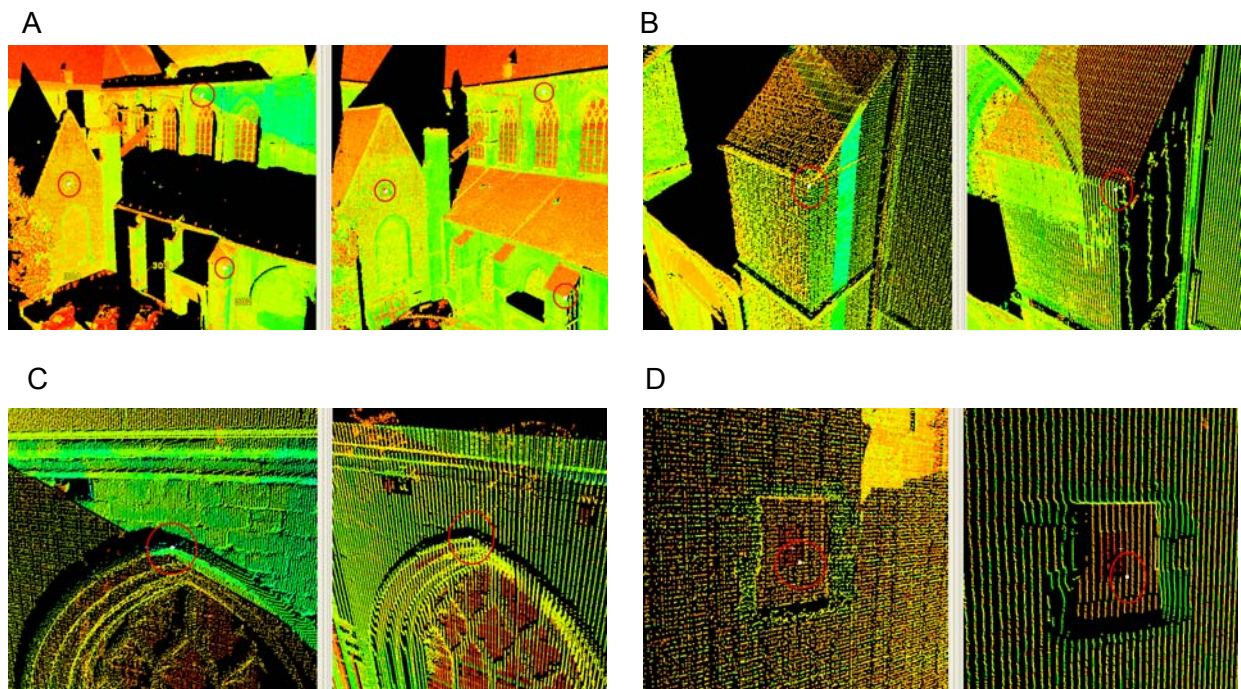


Figura 75: (A) Vista de los puntos correspondientes; (B) Esquina de la pared con el tejado cercano a la entrada; (C) Parte superior del segundo arco de la derecha; (D) Esquina de un rectángulo en la pared de la izquierda

Quando están seleccionados todos los puntos homólogos, seleccionamos la opción *Constraint - Add Cloud Constraint*. Si los tres pares de puntos no están lo suficientemente bien ajustados para que el programa tenga una aproximación inicial, mostrará un mensaje de error diciendo que se han encontrado menos de tres correspondencias. En este caso, comprueba los pares seleccionados y adáptalos o añade más pares. El programa tomará automáticamente los tres mejores pares de puntos para realizar la orientación inicial.

En la lista de constreñimientos se pueden ver los constreñimientos añadidos. Ahora, se puede ejecutar la orden *Registration*. Cuando el registro termina, se puede ver que el error global del constreñimiento de nube es de 1.1 cm, lo que es muy bueno para una alineación nube a nube.

A realizar:
- Añadir los ScanWorlds 35 y 36 y unirlos al ScanWorld 30 mediante constreñimientos de nube de puntos

- Añadir el ScanWorld 34, unirlo al ScanWorld 31
- Añadir el ScanWorld 32, unirlo al ScanWorld 34 y utilizar también los constreñimientos de diámetro
- Añadir el ScanWorld 33, unirlo al ScanWorld 32
- Añadir un constreñimiento de nube de puntos entre el ScanWorld 31 y el 32
- Finalmente, intenta añadir constreñimientos de nube de puntos de forma automática con *Auto-add cloud constraints*
- Comprueba el error medio cuadrático de los constreñimientos de nube de puntos

El registro final presenta un error medio absoluto de 9 mm que se comprueba con el comando *Registration – Show Diagnostics*. El error máximo de un constreñimiento es de 18 mm, siendo éste un resultado satisfactorio en este levantamiento.

Freeze (bloquea) el registro y crea una nueva vista del *ModelSpace*. Al observar las nubes de puntos del exterior registradas se pueden ver algunas zonas con huecos. Esto se debe al poco tiempo disponible para realizar los escaneados.

5.6.3. Registro: Combinación de los datos del interior y del exterior

5.6.3.1. Copiar el proyecto de registro en una nueva base de datos

Finalmente, los dos conjuntos de datos registrados, interior y exterior, se registrarán para obtener un modelo registrado completo de la iglesia. Para ello, se necesita crear una nueva base de datos. En el navegador de *Cyclone*, se selecciona *Configure – Databases....* Luego se selecciona el servidor que contenga todas las bases de datos importadas. Se selecciona *Add...* y se introduce el siguiente nombre a la base de datos '*St.James – TODO REGISTRADO*'. Ahora, se pincha en el botón *OK* y se cierra el siguiente cuadro de diálogo. En la lista se debería ver la nueva base de datos (Fig. 76).



Figura 76: Bases de datos en el navegador de Cyclone

Añade un nuevo proyecto a la base de datos haciendo clic con el botón derecho sobre la misma y selecciona *Create – Project*. Utiliza el nombre por defecto para el proyecto.

A continuación, copia los *ScanWorlds* registrados del interior y del exterior del templo a este nuevo proyecto. Para ello, abre la base de datos *St.James Church – Inside* y selecciona el proyecto del registro. Luego, haz clic con el botón derecho y selecciona *Copy* (Fig. 77). El registro de las nubes de puntos del interior se copia en el portapapeles de Windows y se puede pegar en cualquier lugar.

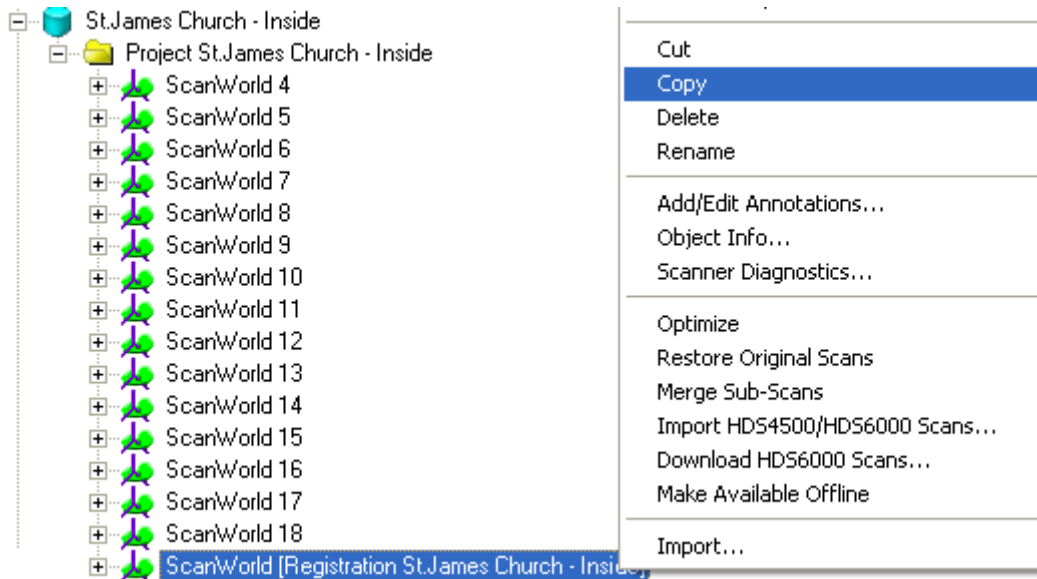


Figura 77: Copia del registro interior en el portapapeles de Windows

Nota: Asegúrate que no se copia el proyecto entero en el nuevo proyecto de registro, sino sólo los ScanWorlds registrados. De esta manera, se utiliza menos memoria y el ordenador funcionará más rápidamente.

Ves a la base de datos *St.James – TODO REGISTRADO* y haz clic con el botón derecho sobre el nuevo proyecto, luego selecciona la opción *Paste*. *Cyclone* preguntará si el proyecto se copia de forma completa (*as a whole*) o como una referencia (*as a reference*), Fig. 78. Una copia completa significa que todos los datos se copian en el nuevo proyecto, por lo que ocupará espacio en el disco duro y no hará ningún enlace entre la versión copiada y la original. Si se copia como referencia se crea un enlace en esta base de datos a la base de datos original, y se utilizarán estos datos. En este caso se utilizará del modo *Reference*.

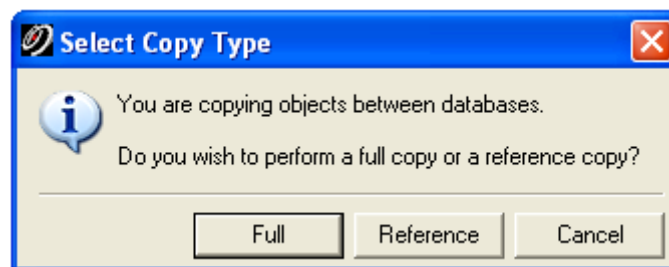


Figura 78: Crear una copia completa o una referencia

Cuando ya se ha realizado la copia, el proyecto de registro del interior se debería ver en la nueva base de datos. Hacemos lo mismo con el proyecto de registro de las nubes de puntos del exterior. Al hacer esto, el programa nos comunica que el fichero con los datos de la estación total ya existe. Confirmamos la opción por defecto.

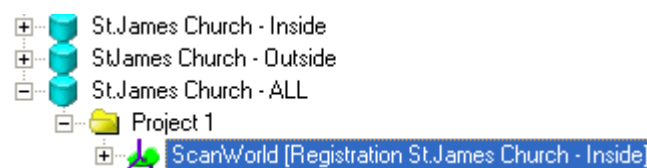


Figura 79: Pegado del proyecto de registro interior en el nuevo ALL proyecto de registro

5.6.3.2. Unión de los dos registros

Creamos un nuevo proyecto de registro en esta base de datos como se ha explicado en los apartados anteriores. En lugar de añadir *ScanWorlds*, se importarán los proyectos de registro de las nubes de puntos del interior y del exterior. Para ello, abrimos el nuevo proyecto de registro y seleccionamos la orden *Registration – Import Registration...* Ahora selecciona los dos proyectos de registro y añadelos al nuevo, luego pulsa el botón *OK* (Fig. 80)

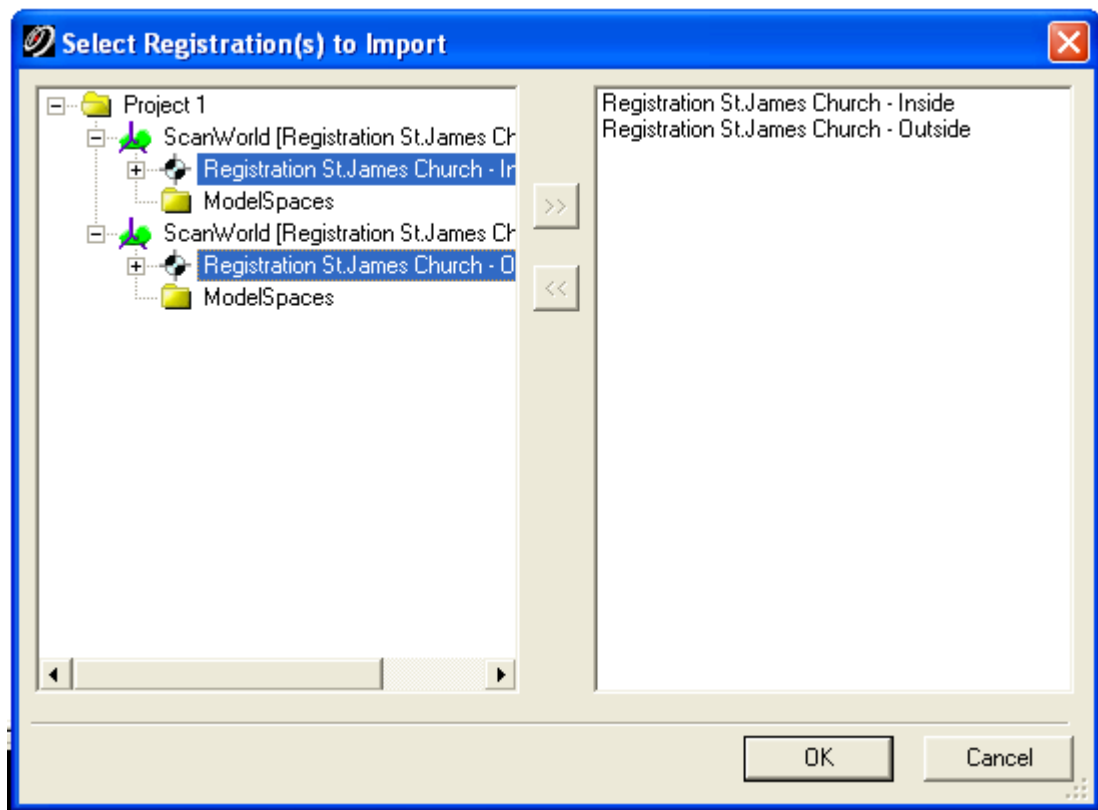


Figura 80: Inserción de los proyectos de registro interior y exterior al proyecto de registro global

Nota: En la ventana de constreñimientos, el fichero con los datos de la estación global debe aparecer sola una vez. Si aparece dos, significa que el fichero del proyecto del interior no se copió al del exterior sino que se volvió a crear uno nuevo para el proyecto del exterior (véase el apartado 5.6.2.1).

Una vez los dos proyectos de registro se insertan en el proyecto de registro general, comprueba la lista de constreñimientos y observa que están insertados todos los constreñimientos individuales. Utiliza la orden *Registration – Register* para registrar todos los escaneados de la iglesia al mismo sistema de referencia.

Cuando el registro finaliza, comprueba los errores máximos de los constreñimientos activos. Deben estar alrededor de los 19 mm. También comprueba que el error medio absoluto de todo el registro (*Register – Show Diagnostics*) está del orden de unos 4 mm.

Para poder trabajar con el conjunto de puntos registrados, usa la orden *Registration – Create ScanWorld/Freeze registration*. Luego, creamos un nuevo *ModelSpace* mediante la orden *Registration – Create and open ModelSpace*.

El resultado final es una base de datos totalmente registrada que se puede utilizar en procesamientos posteriores ([St.James Church – Tutorial ALL.imp](#)).

5.7. Procesamiento de los datos

5.7.1. Modelado 2D directo a partir de las nubes de puntos

5.7.1.1. Introducción

Existen diferentes maneras a la hora de extraer datos útiles de las nubes de puntos. En este capítulo se van a extraer planos 2D, secciones a lo largo del eje X y alzados directamente del modelado 2D. Esto significa que la nube de puntos se va a filtrar para que sólo contenga los datos relevantes que permitan el dibujo manual en un entorno de CAD.

CloudWorx es un aplicación externa (*MDL – MicroStation Development Language*) para *MicroStation* que permite visualizar y manipular nubes de puntos con la finalidad de realizar planos 2D, planos topográficos 3D o modelos 3D completos (basados en mallas, superficies o sólidos). Existe un *plug-in* similar con la misma estructura de menú y comandos para AutoCAD. Este tutorial explicará cómo utilizar *CloudWorx* en *MicroStation*.

5.7.1.2. Carga del fichero de la base de datos

Una vez registradas las nubes de puntos ya están listas y se pueden utilizar en *MicroStation CloudWorx*. Debido al gran tamaño de los ficheros *.imp*, no es práctico trabajar con ellos a través de una red. Por tanto, se copian en un disco duro. Para poder abrir la base de datos en *MicroStation*, primero se debe enlazar con *Cyclone*. Si esto todavía no se ha realizado, se deben seguir los pasos del apartado 5.5.

El área de interés es el dato que se ha registrado junto en una única nube de puntos con cada escaneado en su posición correcta. Los datos que se han registrado juntos estarán (casi) siempre al final de la lista de *ScanWorlds*. Expande este proyecto para visualizar sus niveles inferiores. Para abrir los datos en una vista, expande la carpeta de *ModelSpaces* y haz doble clic en '*ModelSpace View 1*'.

5.7.1.3. Comienzo

El primer paso cuando se empieza a trabajar con *MicroStation* es crear un nuevo fichero. Abre *MicroStation* y luego selecciona la opción *File>New* y elige el directorio de trabajo. Finalmente, introduce en nombre del fichero (Fig. 81).

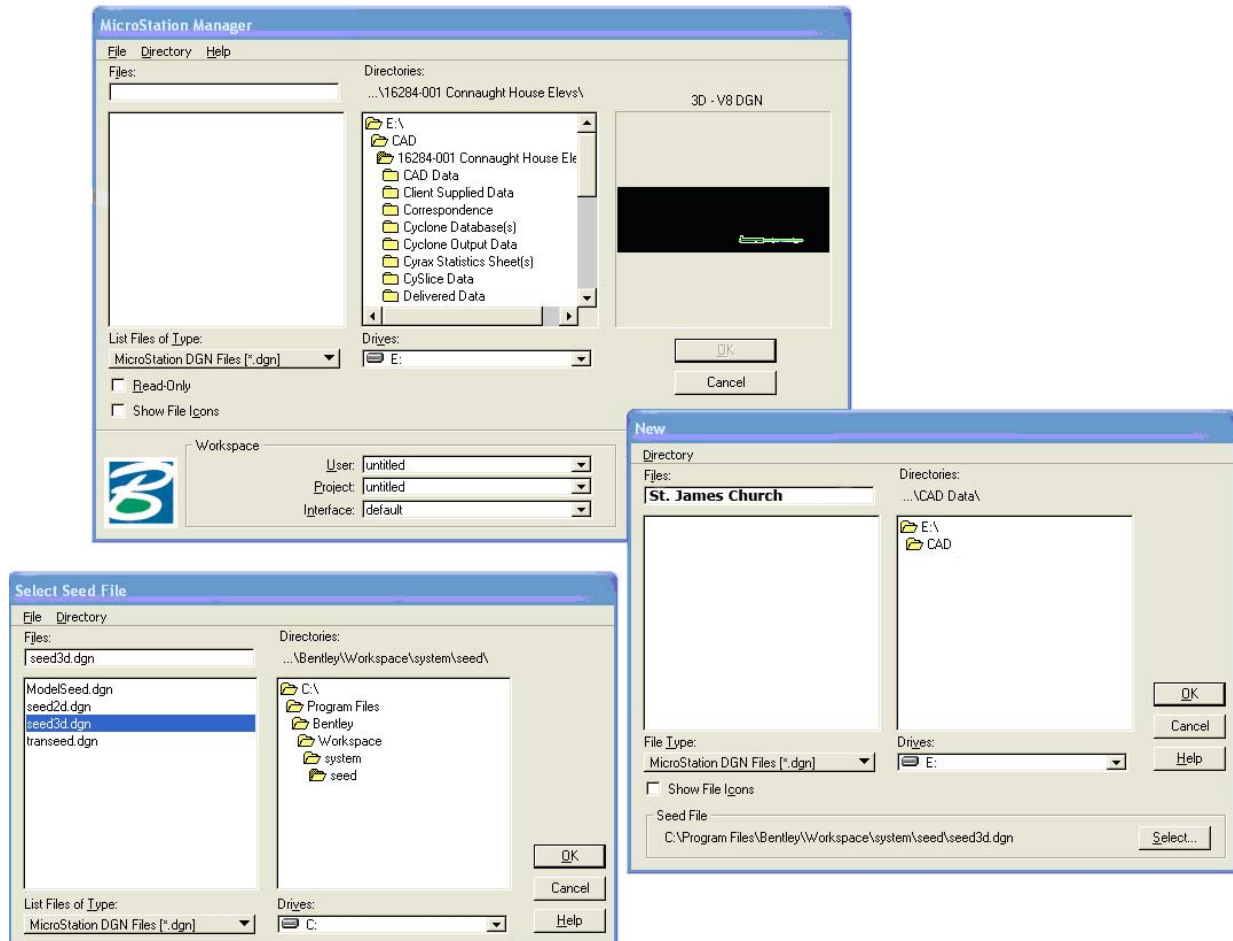


Figura 81: Creación de un nuevo fichero de dibujo para importar la nube de puntos en *MicroStation*

Asegúrate de que se ha escogido el fichero de plantilla (seed) correcto. Debería ser el fichero *seed3D.dgn*. *MicroStation* soporta ficheros 2D y 3D, pero cuando se trabaja con *CloudWorx* siempre se utiliza un fichero 3D. Además, la unidad de medida del fichero tiene que ser el metro.

Ahora, carga el *plug-in CloudWorx* en *MicroStation*. El *plug-in* se puede encontrar en *Utilities>MDL*. Se encuentra en la parte baja de la ventana y haz clic en *Load* (Fig. 82).

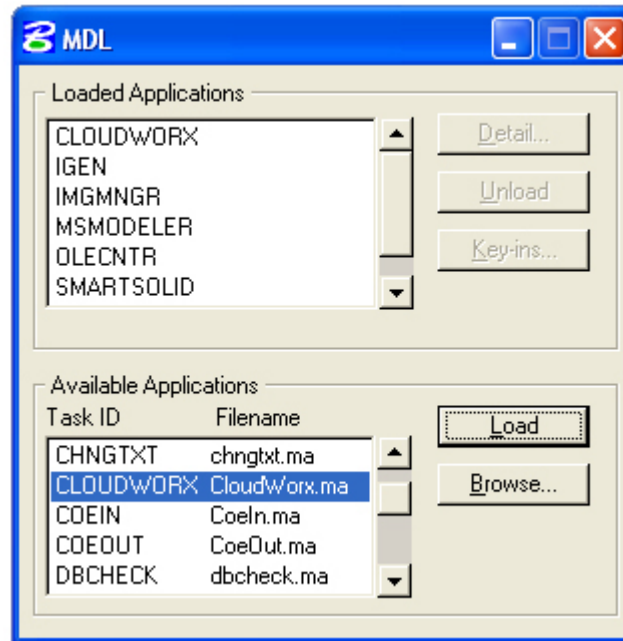


Figura 82: Carga del *plug-in* CloudWorx en MicroStation

Una alternativa es teclear en el campo de entrada la orden *mdl load cloudworx*. En este momento *CloudWorx* está cargado en el entorno de *MicroStation*.

5.7.1.4. Herramientas de CloudWorx

La caja de herramientas principal de *CloudWorx* tiene 8 sub-cajas. Ábrelas haciendo clic y arrastrando (como se muestra en las figuras 83 y 84)

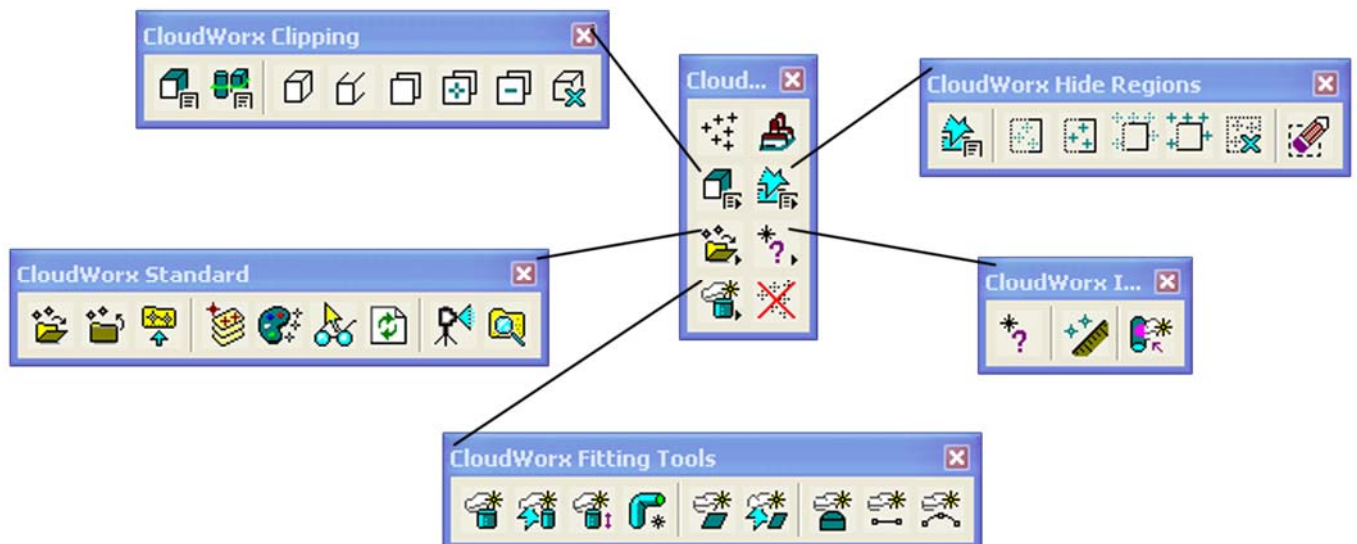


Figura 83: Cajas de herramientas de CloudWorx

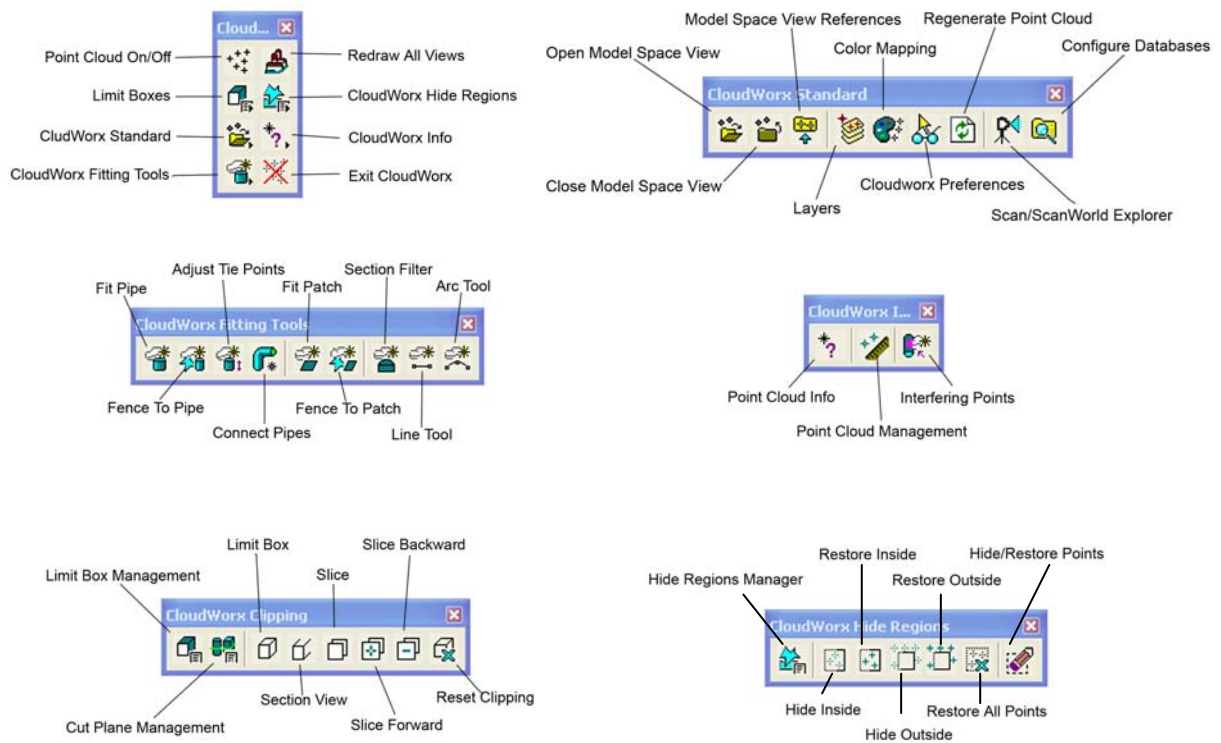


Figura 84: Cajas de herramientas de CloudWorx

5.7.1.5. Importación de una nube de puntos

Para importar la nube de puntos en *MicroStation* es necesario utilizar la herramienta *Open ModelSpace View* de la caja de herramientas principal de *CloudWorx* (Fig. 85). De esta manera se abre la ventana *ModelSpace View* que nos resultará familiar al haber preparado la base de datos en *Cyclone* anteriormente. Si la base de datos y el *ModelSpace* no aparecen en el servidor de la ventana, navegamos hasta llegar a él.

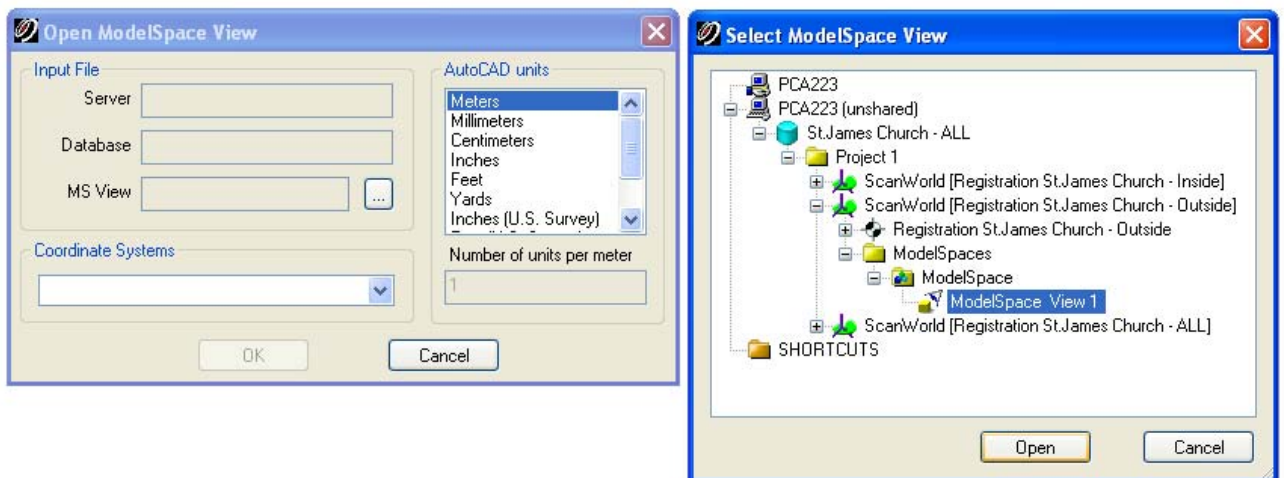


Figura 85: Abriendo la vista ModelSpace de la nube de puntos en CloudWorx

Después de hacer clic en el botón *Open*, *CloudWorx* nos muestra un cuadro de diálogo con algunos parámetros del conjunto (Fig. 86). Estos parámetros se extraen automáticamente a partir de la base de datos.

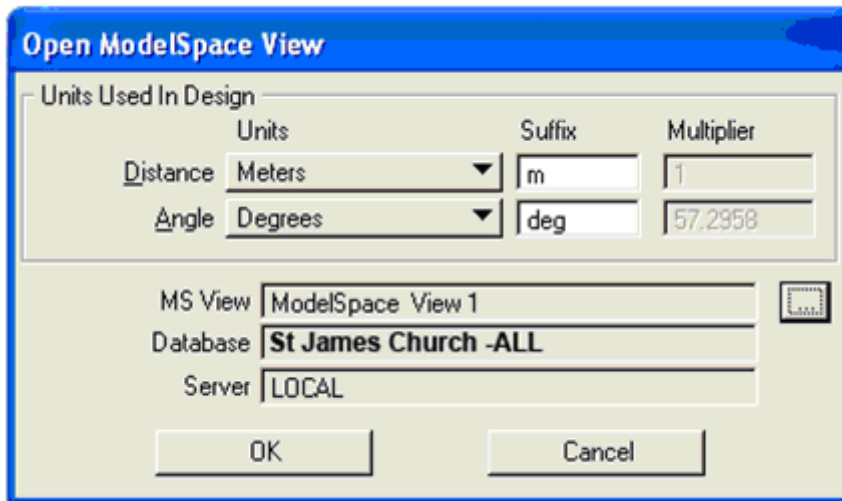


Figura 86: Parámetros para abrir la vista de un ModelSpace

Pulsa *OK* y la nube de puntos aparecerá en *MicroStation*. Si no, utiliza la orden *Fit View* (Fig. 87).

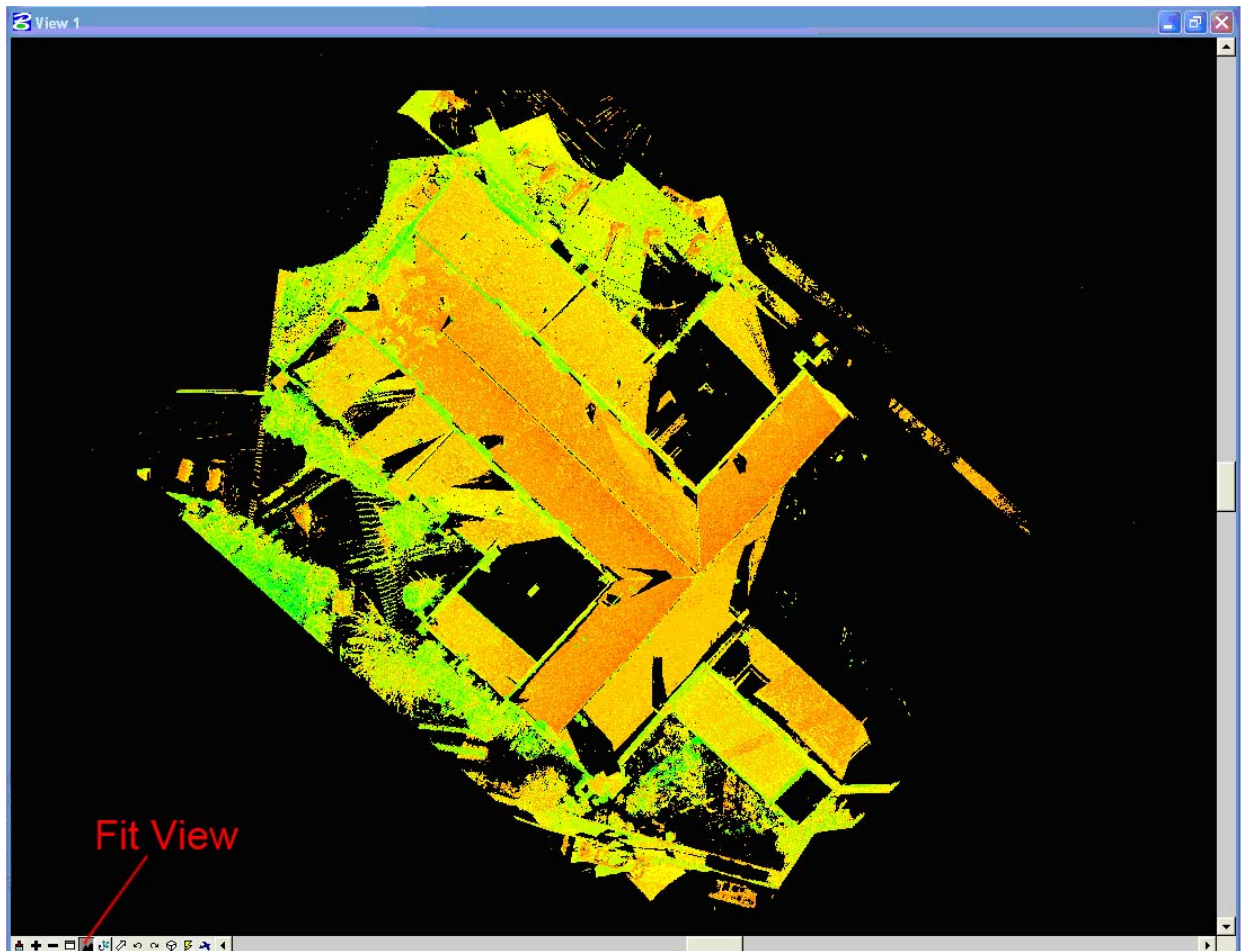


Figura 87: Nube de puntos cargada en MicroStation CloudWorx

Nota: Por defecto, MicroStation establece los ajustes Can Select Point Cloud and Snap To Point Cloud cuando se importa una nube de puntos. Estos parámetros se pueden desactivar a través de la orden CloudWorx Preferences.

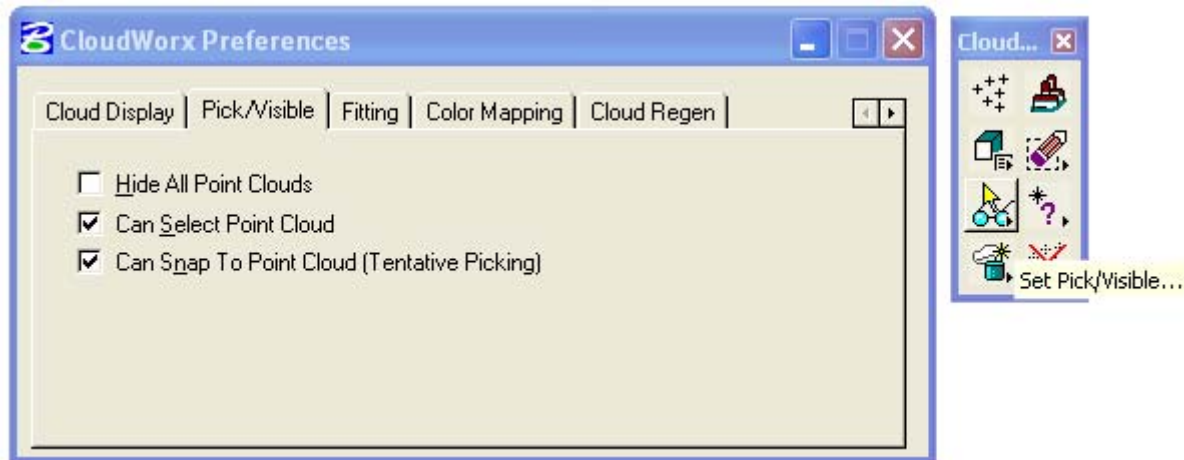


Figura 88: Ajuste de los parámetros de CloudWorx

5.7.1.6. **Regeneración de la nube de puntos**

Cuando se visualiza una nube de puntos en *MicroStation* hay una cuestión referente al refresco de la pantalla. La orden *Update View* de *MicroStation* no es suficiente para regenerar toda la nube de puntos ya que realmente es *Cyclone* quien está controlándola. Por ello, cuando se ve una nube por primera vez puede parecer poco densa. Observa que hay algunos puntos visualizados pero a una resolución que no permite visualizarlos todos.

Para ver todos los puntos se utiliza el icono *Regenerate Point Clouds*. Entonces aparece una barra en la esquina inferior izquierda que muestra el proceso de lectura de todos los puntos. Una vez alcanza el 100% (puede tomar un periodo largo de tiempo según el número de puntos) la nube se debe haber regenerado.

Cuando se hace zoom más o menos, se desplazan o rotan las vistas, la resolución de la nube de puntos disminuye y el proceso de regeneración necesitará constantemente aplicarse a toda la nube de puntos.

5.7.1.7. **Manipulación de la nube de puntos**

Hay órdenes de *CloudWorx* que permiten al usuario visualizar sólo ciertas partes para facilitar la visualización en *MicroStation*. Por ejemplo, si se ha escaneado parte de una calle para dibujar las fachadas de algunos edificios, entonces, sólo se visualizará la parte de la nube que nos sea de interés.

Hay diferentes métodos para recortar la nube de puntos. Para definir si los puntos se van a visualizar o esconder, se puede hacer mediante cajas de límites, cortes, vista de sección, o cerco.

Los cuadros de diálogo de *Limit Boxes Manager*, *Cutplane Manager* y *Hide Regions Manager* se pueden utilizar para crear, editar, actualizar y eliminar vistas de cortes, cajas o secciones en *CloudWorx*. La ventaja de esto es que el usuario puede guardar varios cortes y nombrarlos como corresponde, por ejemplo Alzado 1, Alzado 2, etc.

En la práctica, hay muy pocos comandos que necesitan utilizarse a la hora de manipular la nube. Estos son, principalmente, mostrar/esconder regiones mediante un Cerco o Corte. La habilidad es saber cuándo y cómo utilizar estos comandos para producir los resultados deseados.

Nota: Los puntos ocultados no se eliminan del ModelSpace o de la base de datos. Las siguientes órdenes simplemente reducen el tamaño y la complejidad de las nubes de puntos para la visualización y el procesamiento.

Slice

Un 'slice' o corte permite definir dos planos 3D paralelos y ocultar los puntos fuera de la zona entre los dos planos, quedando una vista controlada de la sección de la nube de puntos. Este método es bueno para recortar una nube de puntos y mostrar sólo elevaciones, por ejemplo. Sólo se puede tener un slice a la vez. El slice actual se puede desplazar un escalón (igual a su anchura) adelante o atrás a lo largo de su eje mediante las herramientas *Slice Forward* y *Slice Backward* o con el *Cutplane Manager* (donde también se puede nombrar al corte).

Fence

El comando cerco permite ocultar o mostrar los puntos de un área definida por el usuario mediante un cercado. Estas operaciones son independientes de otras funciones que ocultan puntos. Es decir, se puede definir un cerco para visualizar ciertos datos en un área, y luego realizar un corte de los datos mostrados. El cercado puede tener forma de círculo, rectángulo o polígono y así ofrecer al usuario la manera de control más precisa sobre qué puntos ocultar o mostrar. El cuadro de diálogo del *Hide Regions Manager* se utiliza para manejar todas las regiones definidas mediante la herramienta *fence*. El comportamiento de cada región es individual. Desafortunadamente no se puede nombrar ninguna de estas regiones.

Limit Box

Una caja de límites es una caja 3D rectangular cuyos puntos no se visualizan o procesan. Esta caja crea o modifica sus límites mediante las herramientas del menú *Clipping*. En el *Limit Box Manager* se nombran y guardan estas cajas.

Section View

Esta herramienta permite definir un plano 3D y ocultar los puntos que estén a un lado del plano.

5.7.1.8. Ejemplo práctico

- Elegir la elevación

La imagen de abajo (Fig. 89) muestra la vista de planta de la iglesia de St. James que necesita alzados. La primera tarea es aislar justo el alzado a dibujar. Se utilizará el alzado marcado.

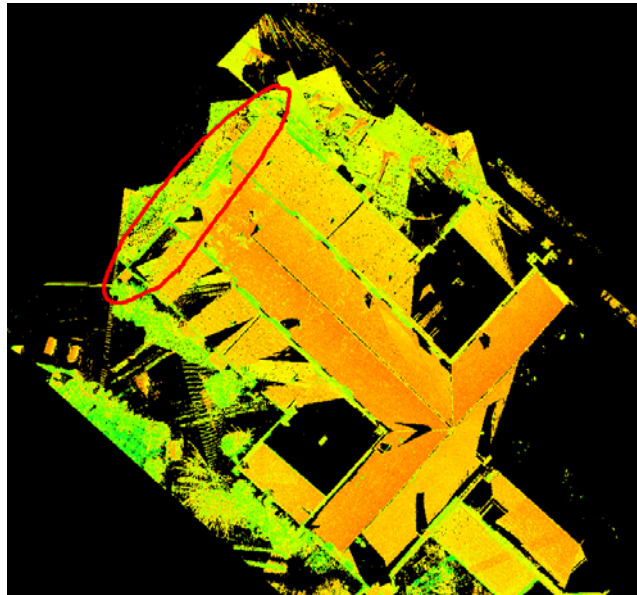


Figura 89: Elección de una elevación

Para ello, primero necesitamos delimitar un área (Fig. 90). Uso del *Fence Type: Shape*. Una vez colocado el cercado, hacemos clic en la orden *Hide Outside* y todos los puntos de fuera se ocultarán.

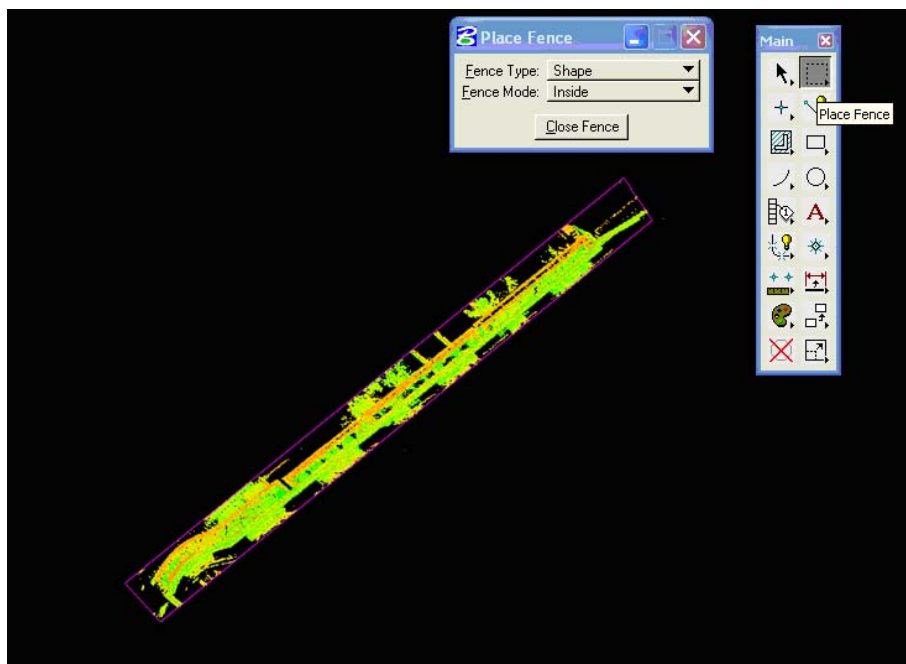


Figura 90: Ocultación de todos los puntos de fuera del cercado

- Estableciendo Vistas

Por defecto, *MicroStation* abre 4 vistas: Planta, Isométrica, Frontal y Derecha. Estas vistas están asociadas al sistema de coordenadas global. Normalmente no estará alineado con el edificio, por lo que es necesario rotar las vistas antes de empezar a dibujar.

En primer lugar, se dibuja una línea para definir el plano de elevaciones (Fig. 91). Hacemos zoom más para fijar esta línea lo mejor posible al plano del alzado solicitado.

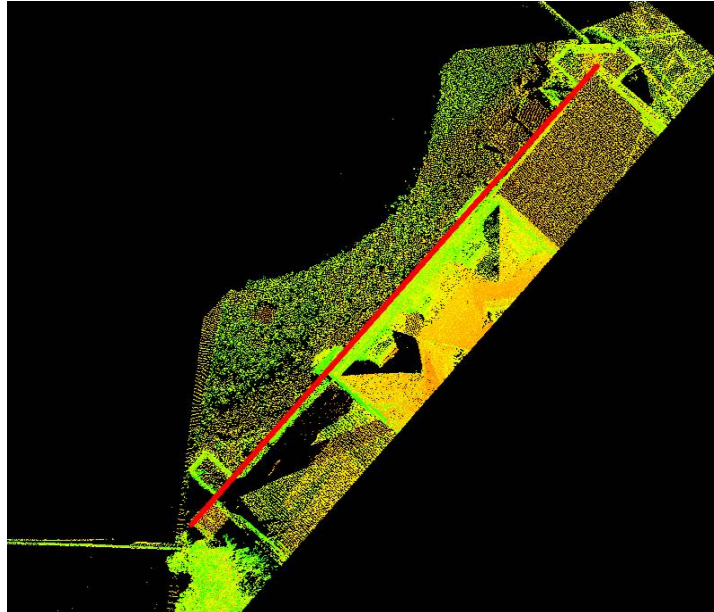


Figura 91: Creación de una línea para definir el plano de elevaciones

Ahora necesitamos alinear la vista de la planta con esta línea. En el campo de entrada se introduce la orden *rotate view element* y se pulsa Intro. Luego se identifica el elemento a alinear, que coincide con la línea dibujada y se selecciona *view for rotation – Top view*.

A continuación, se deben alinear las vistas Frontal y Derecha con el alzado. Primero, copiamos la vista desde la Vista 1 a la Vista 3 y la rotamos de manera que la vista Frontal esté alineada con el alzado. La herramienta *Copy View tool* se puede encontrar en la caja de herramientas *Vista 2D* (Fig. 92).



Figura 92: Caja de herramientas Vista 2D

Se pulsa el icono *Copy View* y se selecciona la vista fuente (Vista 1 – Planta), luego seleccionamos la vista de destino (Vista 3 – Frontal). Así se copia la Vista 1 en la 3. Para conseguir la vista frontal en la Vista 3, es necesario rotarla.

Las vistas de *MicroStation* tienen unos sistemas de coordenadas independientes, siempre alineados con los bordes de la ventana. El eje x es horizontal, de izquierda a derecha, el eje Y es vertical, de abajo a arriba y el eje Z es vertical a la vista. Para rotar la vista un cierto ángulo, escribe *rotate view* y la cantidad de la rotación alrededor de cada eje, separada por comas. El sentido de la rotación es el de las agujas del reloj.

Por ejemplo, para conseguir la vista frontal del alzado en la Vista 3, rota la vista alrededor del eje X una cantidad de -90 grados (Fig. 93). Para ello, escribimos: *rotate view -90,0,0*. Luego pulsa *Intro* y selecciona la vista. Ahora obtén el perfil derecho del alzado. Copia la Vista 3 en la Vista 4 y escribe *view 0,-90,0* (para rotar la vista frontal -90 grados verticalmente), pulsa *Intro* y selecciona la Vista 4.

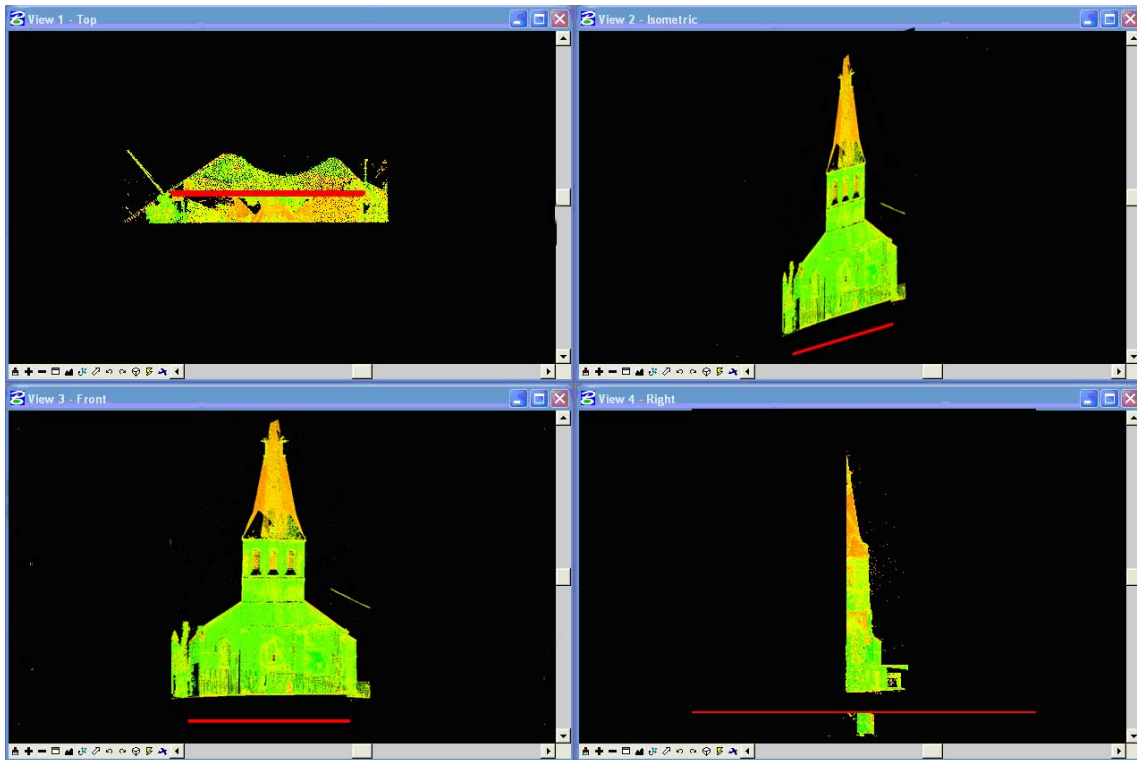


Figura 93: Vistas alineadas con el plano de elevación

Guarda las vistas, de manera que se puedan recuperar y visualizar en cualquier otra ventana. Para ello, se debe ir a *Utilities>Saved Views* (Fig. 94). Aparecerá una ventana similar a la de abajo.

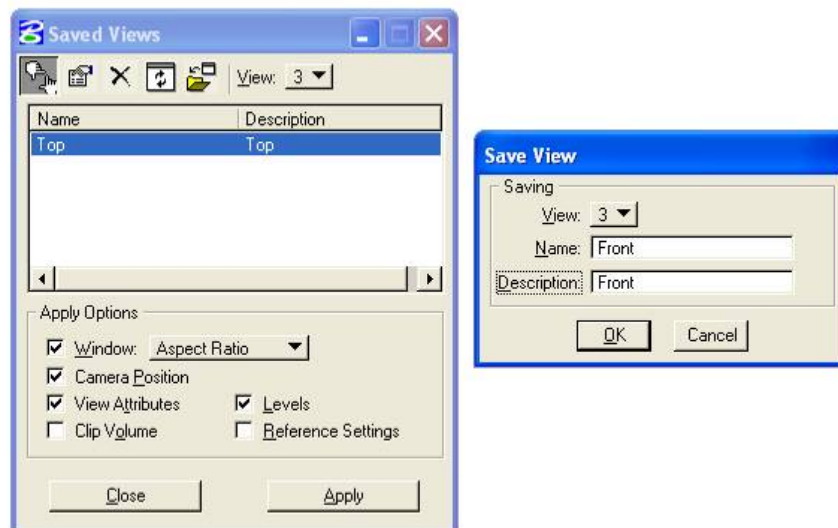


Figura 94: Guardando las vistas

Haz clic en el icono de la parte superior izquierda (*Capture*) de la ventana y añade un nombre y una descripción (Por ejemplo: Vista 3 capturada, nombrada *Front*, descripción: *Front*) y pulsa *OK*. Ahora captura y nombra el resto de vistas. Para hacer una vista actual, haz clic en el nombre a ver y luego selecciona la vista en el icono superior derecha (*View*). *MicroStation* puede visualizar hasta un máximo de 8 vistas. Confirma la selección pulsando el botón **Apply**.

Si lo que se requiere es un plano 2D del alzado, todas las líneas se deben dibujar en un plano. Para asegurarse de que esto ocurre, define el ACS (Active Coordinate System) y bloquéalo para que todas las líneas estén sobre el plano XY del ACS.

Para definir el ACS, utiliza la línea que se utilizó para definir el plano de elevación. Utiliza la herramienta *Define ACS (Aligned with Element)*, Fig. 95. Luego selecciona la línea y la vista. Ahora bloquea el plano ACS mediante el menú *Settings>Lock>ACS*.



Figura 95: Definiendo un nuevo ACS

Nota: Antes de empezar a dibujar, recuerda guardar los ajustes ((File> Save Settings o CTRL+F). En caso contrario, si se cierra MicroStation, todas las vistas y ajustes previos se perderán.

Nota: Si no encuentras una de las cajas de herramientas, probablemente sea porque no está abierta. A las cajas de herramientas se puede acceder desde el menú Ajustes>Cajas de herramientas (Settings>Toolboxes) o mediante las teclas CTRL+T.

Una vez el ACS está creado y alineado con el alzado puede empezar el dibujo. Sigue los puntos e intenta ajustar las líneas lo mejor posible. Se pueden ver algunos resultados realizados por los autores en las Figura 96, Figura 97 and Figura 98.

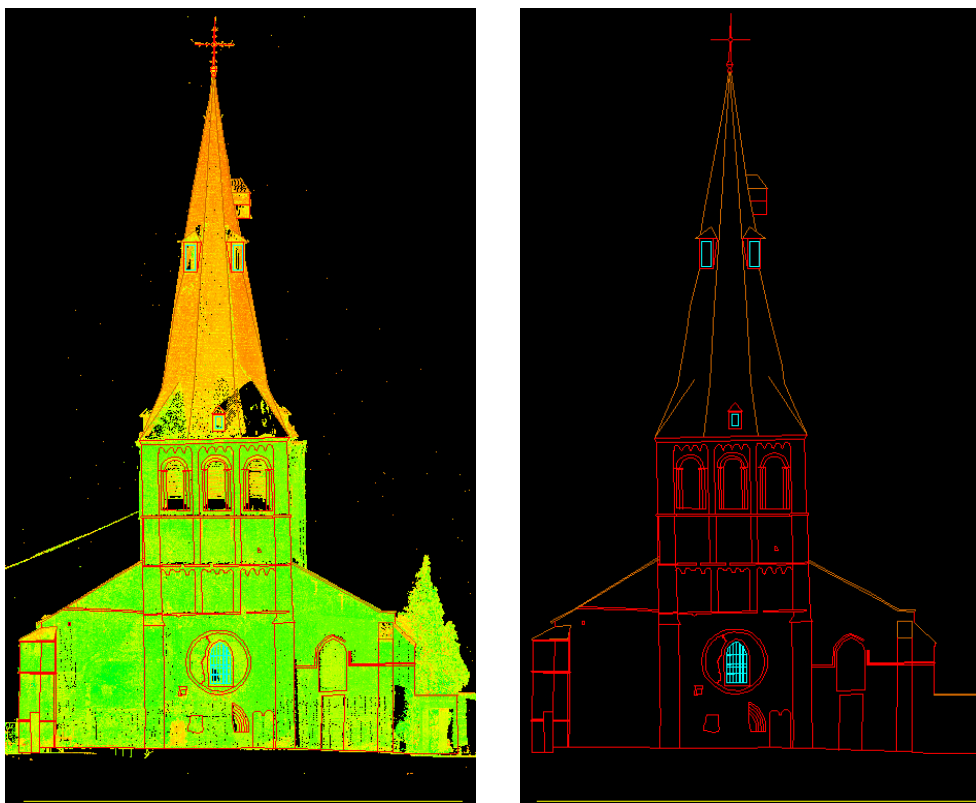


Figura 96: Vista frontal de la elevación

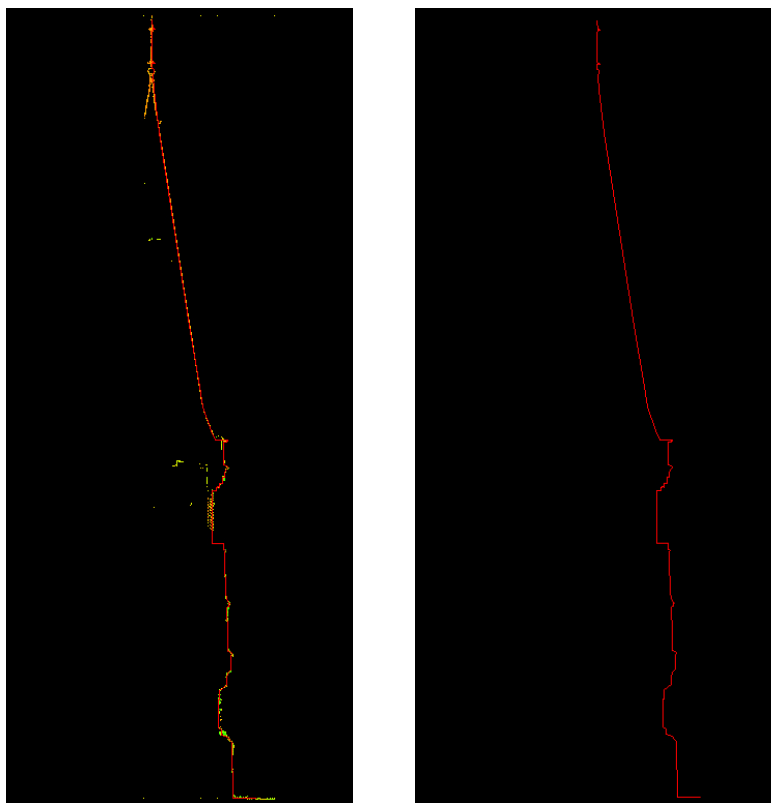


Figura 97: Sección

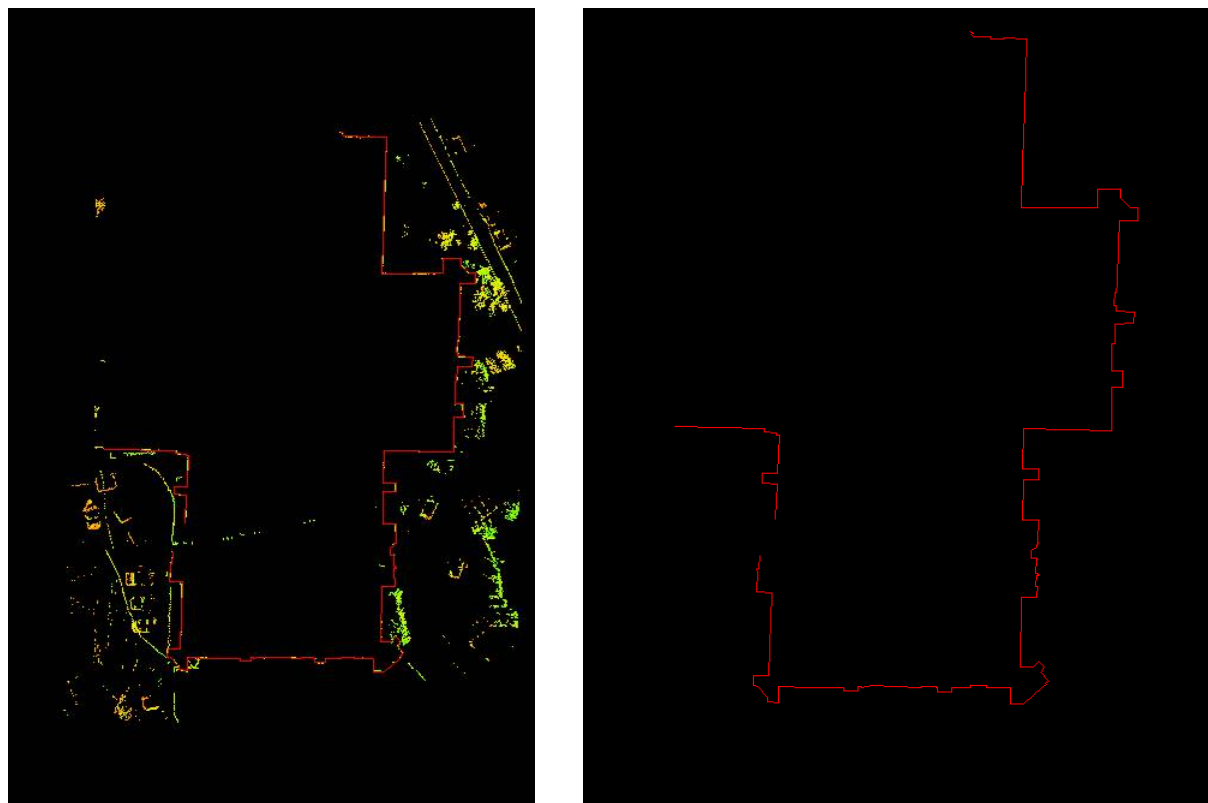


Figura 98: Vista en planta

5.7.2. Modelado 3D de superficies complejas

5.7.2.1. Elección del software

Uno de los documentos finales a entregar es un modelo 3D de las bóvedas de mampostería a muy alta precisión, de modo que se puedan utilizar para realizar un análisis de las deformaciones estructurales mediante análisis de elementos finitos. Generalmente, las estructuras complejas como éstas malladas, es decir, todos los puntos se transforman en superficies conectándolos mediante pequeños triángulos.

Los paquetes estándar de software proporcionados por las empresas de escáner láser (por ejemplo *Cyclone*, *Realworks Survey*...) ofrecen algunas herramientas de triangulación y modelado. Sin embargo, están limitadas uso con formas muy simples (planos, cilindros...) o no ofrecen el control apropiado del ruido o el rellenado de huecos. Por tanto, se aconseja utilizar otros programas. Debido al incipiente uso en una gran variedad de campos, el escaneado láser ha generado una competición en el mercado de programas de procesamiento de nubes de puntos láser.

En este tutorial, se ha utilizado el programa *Geomagic Studio* (v9). Las principales razones de esta elección son que presenta un interfaz muy fácil de usar; puede manejar grandes cantidades de datos y realiza previsualizaciones cuando se realizan ciertas tareas, lo que hace que sea más fácil de encontrar los parámetros más adecuados. Otros paquetes de programas que realizan las mismas tareas son *Rhino3d*, *Innovmetric PolyWorks*, *Inus Rapidform*, *JRC Reconstructo*...

5.7.2.2. Preparación y exportación de los datos para el modelado

Como el modelado o la etapa de mallado es uno de los pasos que requieren más tiempo de procesamiento de todo el proceso completo, es una buena costumbre exportar sólo los datos requeridos en el procesamiento. En *Cyclone* se puede cortar la nube de puntos completa y registrada, así como en *Geomagic Studio* (v9), aunque utilizaremos el primero por su mejor capacidad de manejar grandes cantidades de puntos.

Para dividir la nube en diferentes trozos, se crea un nuevo ModelSpace del proyecto con las nubes de puntos del interior registradas. En el navegador del *Cyclone* se hace clic con el botón derecho en la carpeta ModelSpace y se selecciona la opción *Create and open ModelSpace view* del menú desplegable, Fig. 99.

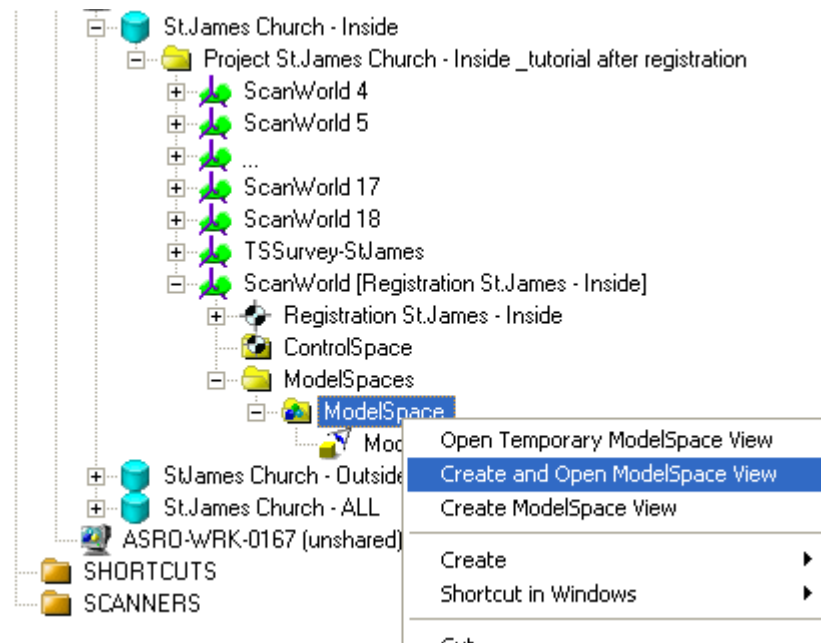



Figura 99: Crear y abrir un ModelSpace del proyecto de registro interior ('Inside')

Cyclone abre ahora una vista de todas las nubes del interior registradas. Para poder seleccionar la parte de la nube de puntos que representa sólo las bóvedas, cambio el tipo de vista a ortográfica en lugar de perspectiva. Esto se puede hacer con los dos iconos de la barra superior de herramientas . Luego selecciona la orden *Viewpoint - Standard Viewpoints - Top* para obtener una vista superior. En el mismo menú, elimina la opción *Keep Viewpoint Upright*. Luego, maniobra con la nube de puntos mediante las herramientas *pan*, *rotate*, *zoom* para crear una vista como la de la siguiente imagen (Fig. 100).

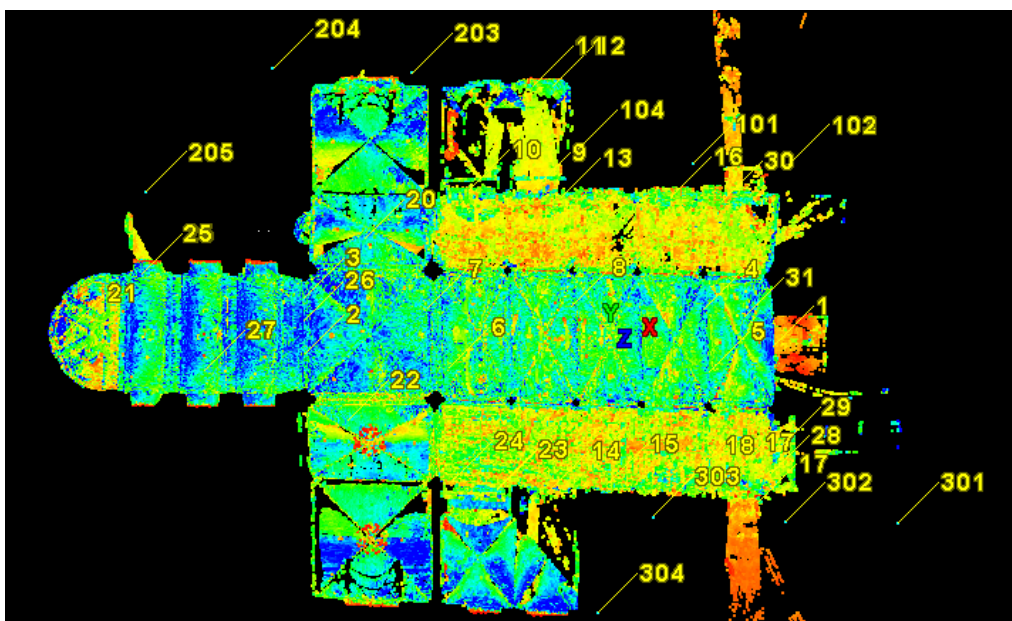



Figura 100: Vista superior del proyecto del interior

Utiliza la herramienta *Rectangle Fence Mode*  para seleccionar sólo el área de las bóvedas de la nave principal; haz clic con el botón derecho en el cercado y selecciona la opción *Fence - Delete Outside* del menú desplegable.

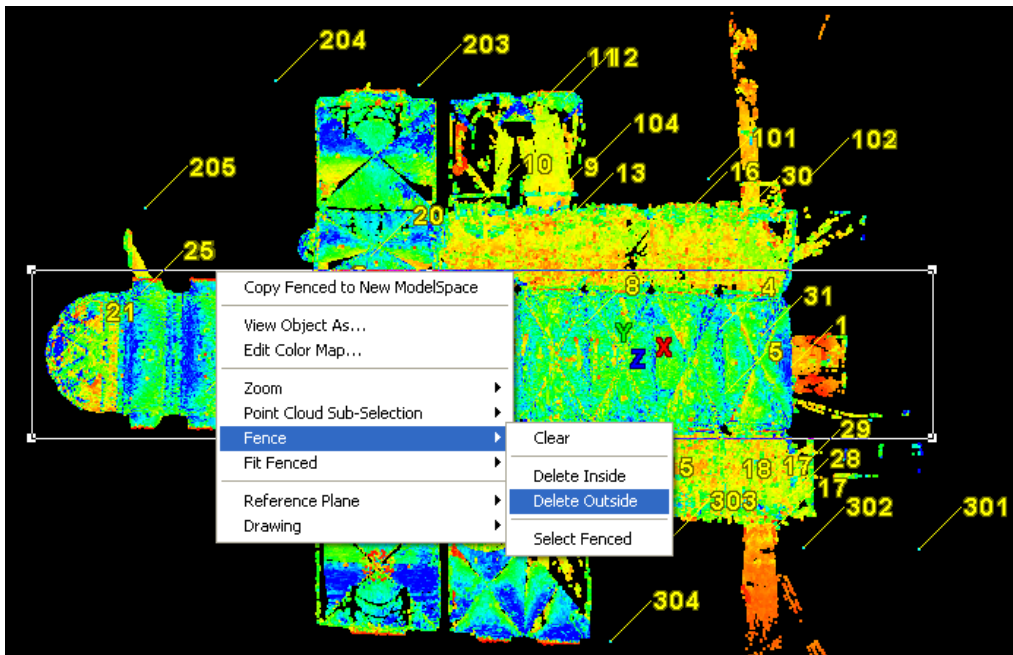


Figura 101: Selección de una parte de la nube de puntos mediante un cercado

A continuación rota la nube de puntos para obtener una vista frontal y eliminar las partes no deseadas. El resultado de este proceso se muestra en la Figura 102.

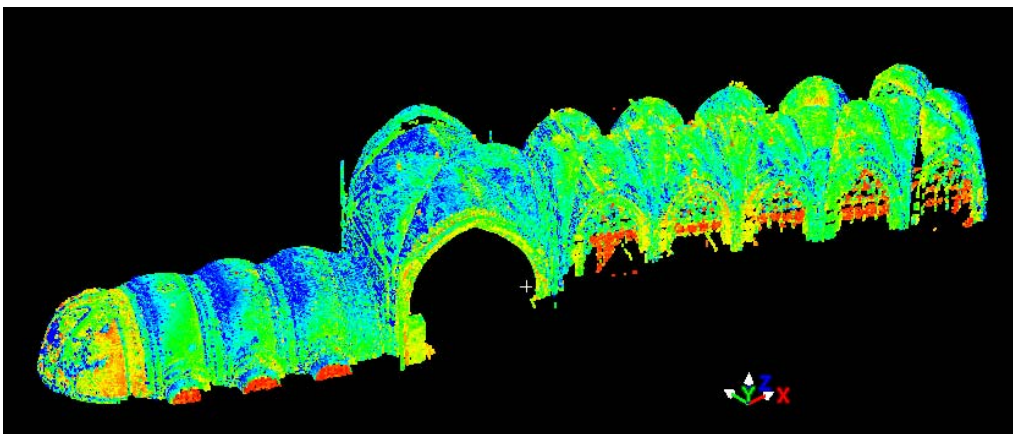


Figura 102: Área seleccionada de la nube de puntos

Desafortunadamente, no existe una manera sencilla de saber el número de puntos total de esta nube de puntos final. La única manera es unificar todas las diferentes nubes de puntos en una única nube y luego consultar la información de esta nube de puntos. Para ello, utiliza el menú *Tools - Unify Clouds...* y asegúrate de que la opción *Reduce option* no está marcada. A continuación, el programa mostrará un mensaje de advertencia declarando que se ha encontrado un objeto ajustado a la nube de puntos y que éstos serán eliminados para unificar las nubes. **Acepta** y, una vez las nubes de puntos estén unificadas, se puede obtener información a través del menú *Tools - Info - ModelSpace Info* (Fig. 103).

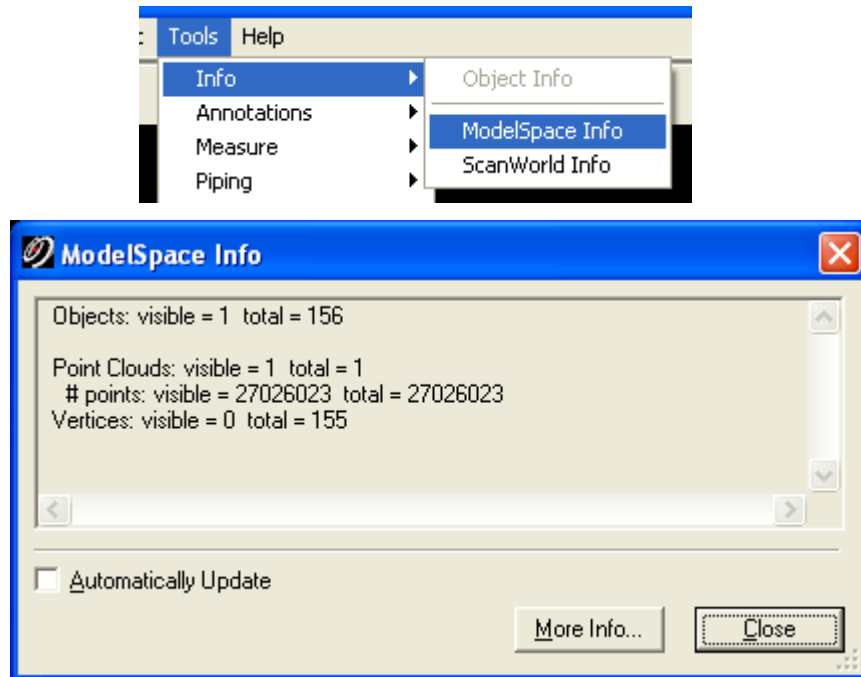


Figura 103: Dialogo de información del ModelSpace para ver cuántos puntos contiene la nube

Se puede ver que existen alrededor de 27 millones de puntos en la nube filtrada. Esta cantidad de puntos es todavía bastante grande para cargarla en un programa de procesamiento externo (excepto en versiones de 64 bits que permiten el uso de toda la capacidad de memoria). Por tanto, se necesita dividir más la nube y así tener 3 nubes de puntos: una, las bóvedas sobre el área del coro; otra, con las bóvedas del crucero y la última con las bóvedas de la nave principal.

En el visualizador de *Cyclone*, crea un nuevo cercado alrededor de las bóvedas del coro. Luego, haz clic con el botón derecho y selecciona la opción *Copy Fenced to New ModelSpace* (Figura 104). De este modo se creará un nuevo ModelSpace y copia los puntos seleccionados en este ModelSpace. A continuación, haz lo mismo con las otras dos partes asegurándote que haya un pequeño solape entre las nubes de puntos. Cuando se cierren los nuevos ModelSpaces creados, selecciona la opción para eliminar el vínculo con el ModelSpace original para desconectar esta nube de puntos de la original.

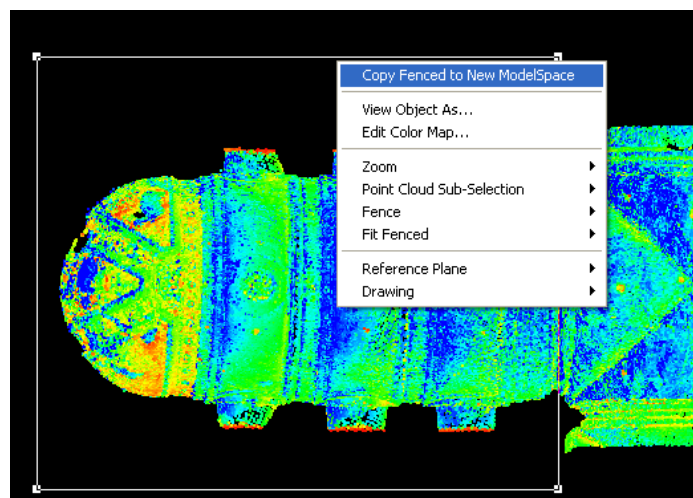


Figura 104: Copia del área seleccionada en un nuevo ModelSpace

Exporta cada conjunto de puntos para que se puedan utilizar en otro programa. En el navegador de *Cyclone* se pueden ver tres nuevos ModelSpaces. Cada uno de ellos contiene los conjuntos anteriores. Para exportarlos, haz clic con el botón derecho en la vista de cada ModelSpace y selecciona la opción Export del menú desplegable. La mayoría de programas pueden leer varios formatos de nubes de puntos, pero uno de los más comunes es el formato .xyz. Selecciona este formato y nombra los ficheros como 'bovedas_coro.xyz', 'bovedas_crucero.xyz' y 'bovedas_naveprincipal.xyz' respectivamente (Figura 105). Cuando el proceso de exportación haya terminado, cierra el navegador.

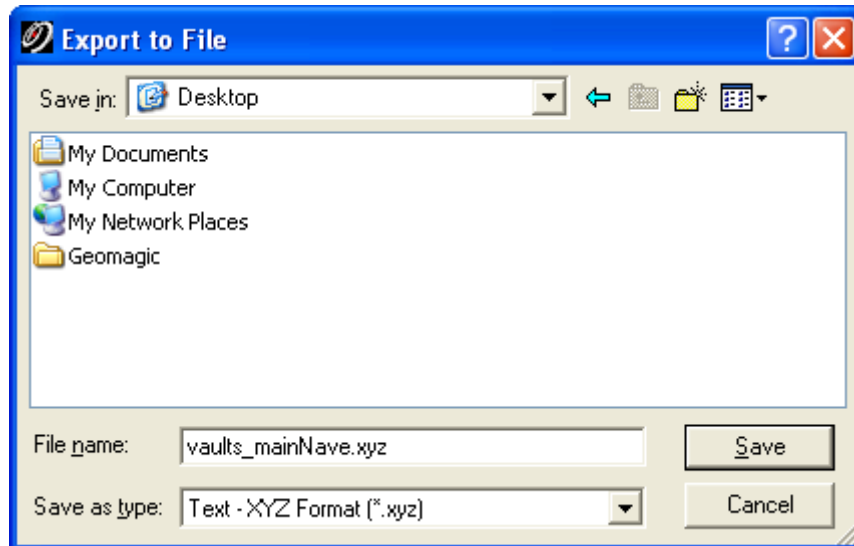


Figura 105: Exportación de las nubes de puntos a un fichero

5.7.2.3. **Introducción a Geomagic Studio (v9)**

Geomagic Studio (v9) puede producir un modelo tridimensional de diferentes formas. Es importante seguir el flujo de trabajo correcto. En este tutorial se recomienda seguir un flujo de trabajo aceptado por la comunidad de documentación del patrimonio. Se explicarán los pasos principales y principios, y ayudará a los principiantes a utilizar el programa *Geomagic Studio (v9)*. Aunque el caso de la iglesia de St. James es muy complicado y necesitará la mayoría de las herramientas para hacer el trabajo, se puede encontrar más información detallada en los archivos de ayuda del programa o en el mostrador de información (www.geomagic.com).

Como se ha mencionado, el procesamiento de las nubes de puntos se realizará con *Geomagic Studio (v9)*. Abre el programa *Geomagic Studio (v9)*, Fig. 106, haciendo doble clic en el icono del escritorio.

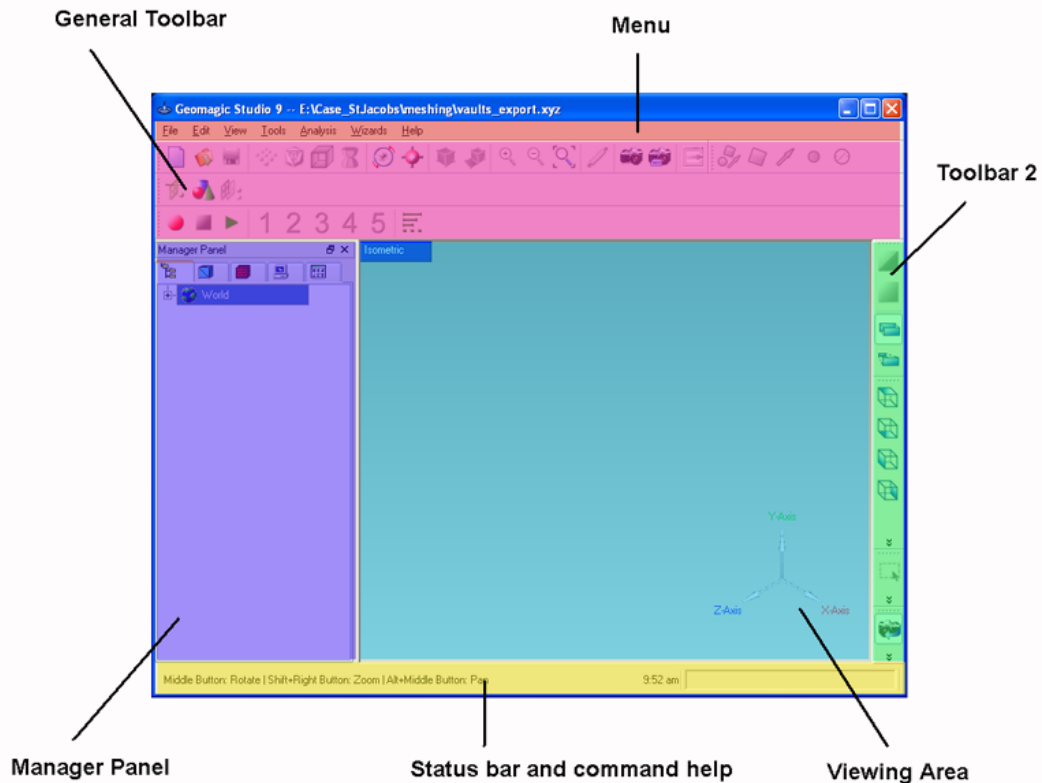


Figura 106: Interfaz gráfica de Geomagic Studio (v9)

Geomagic Studio (v9) tiene seis áreas principales en su interfaz de usuario, todas ellas indicadas en la Figura 106. Para cargar los datos, selecciona el menú *File – Import* y el fichero '[vaults_choir.xyz](#)'. El programa mostrará un cuadro de diálogo que pregunta por el ratio de muestreo (Figura 107). Se utilizarán un ratio del 100%, es decir, se cargarán todos los puntos.

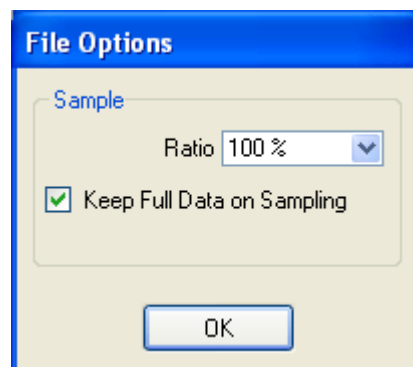


Figura 107: Ratio de carga

Cuando el programa termina de importar los puntos preguntará por el tipo de unidad de los datos. En este caso, todos los datos se registraron con los datos de una estación total, que realiza sus mediciones en metros. Por tanto, seleccionaremos la unidad '*meters*' (Fig. 108).

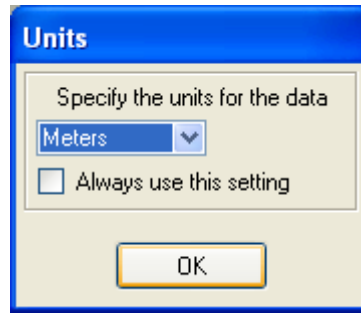


Figura 108: Especificando el tipo de unidad para los datos cargados

Geomagic Studio (v9) abre la nube de puntos y la muestra en el área de la vista. También muestra el número de puntos cargados en la memoria, en este caso, alrededor de los 7,8 millones de puntos.

Para rotar la nube de puntos, pulsa el botón central del ratón y mueve el ratón. El zoom se maneja con la rueda de desplazamiento y las traslaciones manteniendo pulsada la tecla *Alt* y moviendo el ratón. Como se requiere un gran cálculo computacional para visualizar esta cantidad de puntos, *Geomagic Studio (v9)* reduce el número de puntos a mostrar en la pantalla mientras se guardan todos los puntos en memoria para el procesamiento. El porcentaje de puntos visualizados se puede cambiar mediante las opciones de Display statistics (Figura 109). El valor de la izquierda es el porcentaje de puntos mostrados cuando no se mueve la nube y el de la derecha el de los puntos mostrados cuando la nube se mueve. El programa establece estos valores por defecto según la memoria disponible.

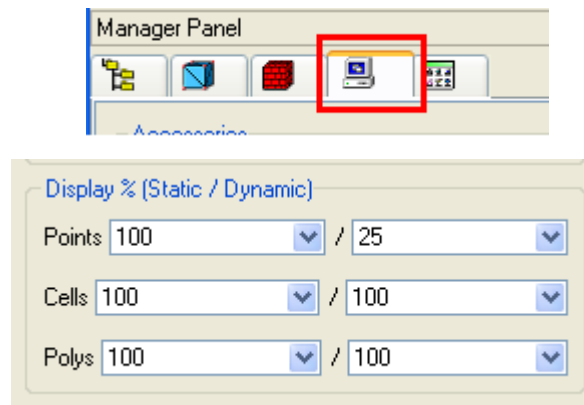


Figura 109: Cuadro de diálogo con los ajustes de Display Statistics

Quando se carga la nube de puntos, se visualiza como una masa negra de puntos. Esto hace difícil tener una idea de la estructura de la nube. Por tanto, se debe cambiar el sombreado de los puntos mediante el menú *View - Shading - Shade points* (Figura 110).



Figura 110: Sombreado de la nube de puntos para un mejor entendimiento

La nube de puntos será *splatted* (véase el capítulo 3.6.1), y parecerá más limpia y fácil de entender (Figura 111).

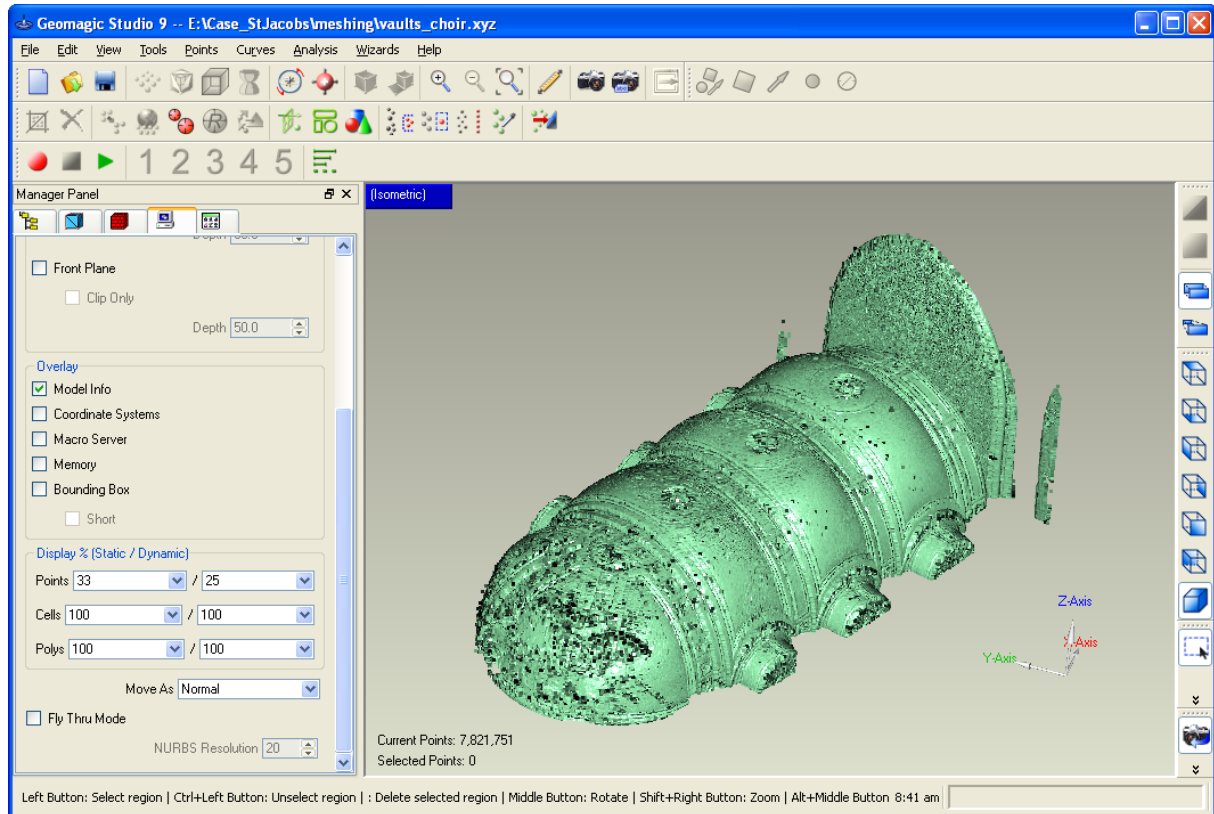


Figura 111: Vista de toda la nube de puntos cargada en Geomagic Studio (v9)

La versión de 32 bits de *Geomagic Studio (v9)* es capaz de manejar alrededor de 20 o 25 millones de puntos, pero se recomienda trabajar con cantidades menores, de aproximadamente 5 millones de puntos. Para esta parte de las bóvedas (8 millones de puntos), dividiremos el conjunto en dos partes. Para ello, cambia la vista para tener una vista superior de las bóvedas. Luego, haz una selección de las dos primeras bóvedas. El programa seleccionará estos puntos y los coloreará en rojo (Figura 112). Para separarlos de la nube de puntos original, seleccionamos la opción *Edit – Selection To Object*, nombramos el nuevo objeto como '*part 1*' y dejamos la opción '*Cut and Paste*' marcada.

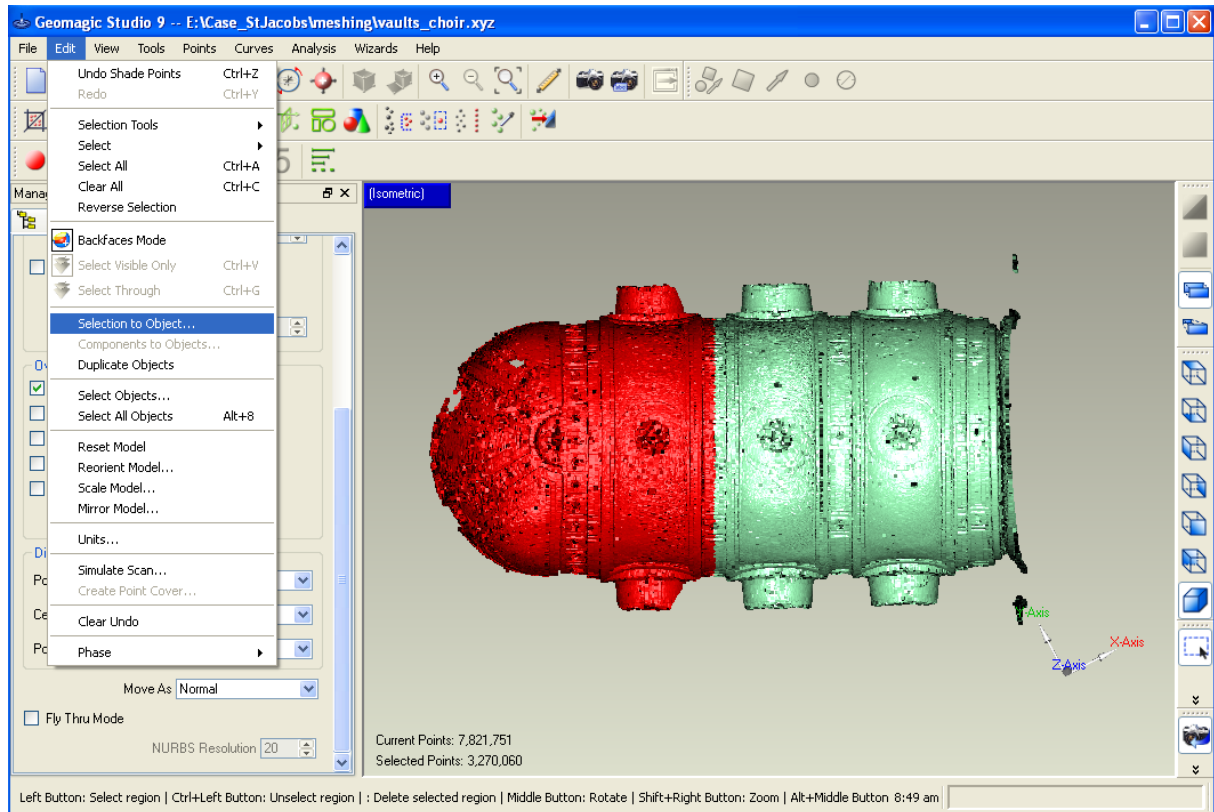


Figura 112: División de la nube de puntos en partes menores para una mejor manipulación

Cuando finaliza esta operación, hay dos partes ('part1' y 'vaults_choir') en el Model Manager. La primera que se procesará es 'vaultss_choir', por tanto elimina la primera parte de la memoria (Fig. 113). Para ello, haz clic con el botón derecho en 'part 1' y selecciona *ignore*, luego vuelve a hacer clic con el botón derecho y selecciona *hide*.

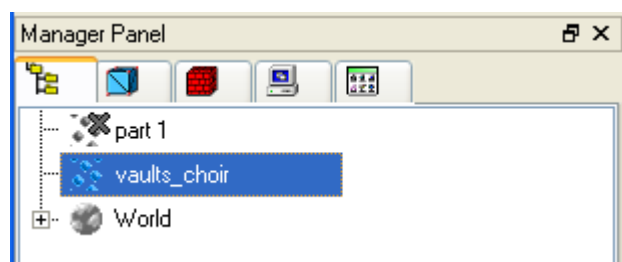
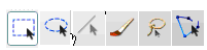


Figura 113: Eliminación de partes de la memoria

5.7.2.4. **Preprocesamiento de la nube de puntos: eliminación del ruido**

Cuando se analiza la nube de puntos, se observa que algunas áreas no están conectadas con la nube entera y, por tanto, son ruido (ver los puntos moteados). Antes de que esta nube de puntos se transforme en un modelo, es necesario limpiarla y remuestrearla.

Un primer paso en el proceso de limpieza es la eliminación de los componentes desconectados de forma manual. Selecciona manualmente estos componentes mediante una caja de selección y pulsa la tecla *suprimir* (Figura 114). En Geomagic hay diferentes herramientas de selección disponibles. Éstas se pueden encontrar a través de los iconos de la derecha .

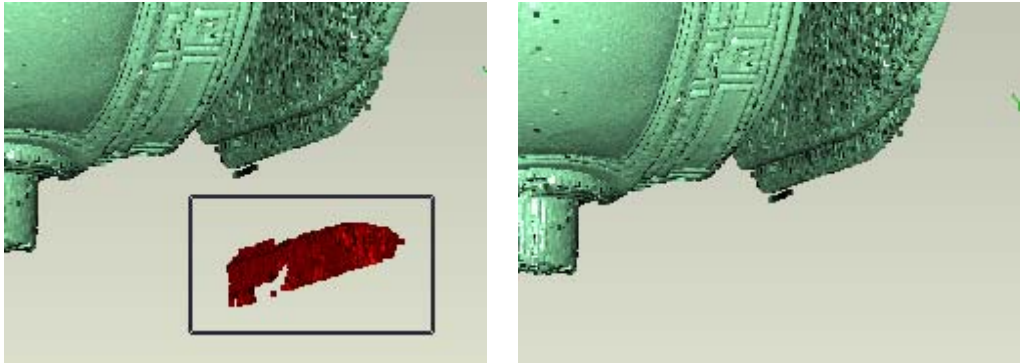



Figura 114: Eliminación manual de las partes desconectadas

Cuando la mayoría de los componentes aislados se borran del conjunto, podemos utilizar las herramientas de eliminación automática del ruido para optimizar la nube de puntos de cara a la fase de mallado.

Seleccionamos el menú *Edit – Select – Outliers* o pulsamos el icono . El programa abre una caja con parámetros a la izquierda de la pantalla. Ajustamos los valores para que las áreas sin gran conexión se seleccionen como ruido. En este caso, utilizamos un valor de 50 y, como se puede ver en la esquina inferior izquierda, se seleccionan 57000 puntos de los 4.5 millones (Figura 115). Esto representa un 1.2% del total de puntos. También se puede observar que hay ruido en el área vertical que conecta esta bóveda con la del crucero. Una explicación de este problema es el hecho de que el ángulo de intersección del haz láser con la superficie es muy pequeño, produciendo una gran huella del haz y una baja reflexión (véase el capítulo 3.1.3).

Cuando aceptamos con el botón **OK**, el programa selecciona los puntos del ruido de manera que se pueden eliminar pulsando la tecla *Suprimir*.

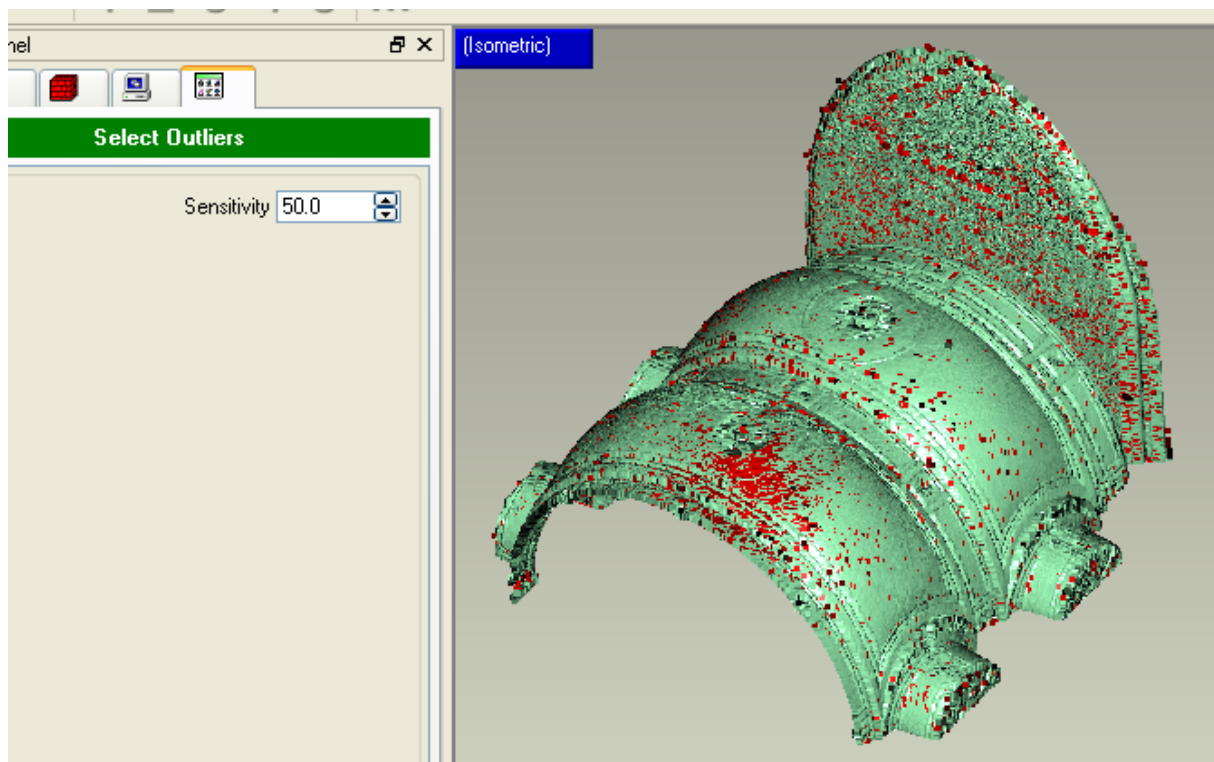


Figura 115: Eliminación de errores groseros mediante la herramienta de eliminación automática

El siguiente paso en la preparación de los datos para el mallado es la eliminación del ruido inherente. *Geomagic Studio (v9)* proporciona una herramienta en el menú *Points – Reduce noise...* La herramienta ofrece varias posibilidades y ajustes para asegurarse de que se elimina el ruido sin perder detalle o afectar a la precisión. Hay tres algoritmos diferentes implementados, cada uno de ellos enfocado a un tipo de objeto diferente: formas libres, formas prismáticas (conservador) y formas prismáticas (agresivo). Generalmente, los edificios suelen presentar formas aproximadas a prismas. Sin embargo, en la documentación del patrimonio, se necesitan mediciones precisas y no aproximaciones. Por tanto, utilizaremos la opción '*free-form shapes*' (véase Figura 116).

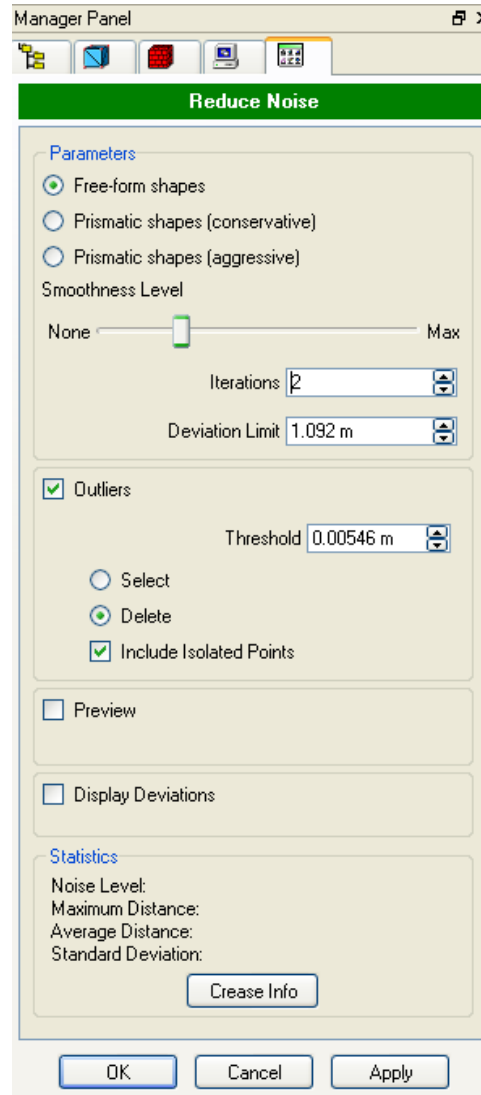


Figura 116: Eliminación de ruido mediante herramientas automáticas

Para controlar la cantidad de ruido a reducir, *Geomagic Studio (v9)* proporciona 3 parámetros: *Smoothness Level*, *Number of Iterations* y *Deviation Limit*. Un primer valor para *Deviation limit* es calculado automáticamente. En la mayoría de casos es un valor apropiado, por lo que lo mantendremos. *Smoothness Level* especifica la agresividad del filtro. Generalmente, se intenta utilizar el valor más bajo posible que proporciona resultados aceptables. El número de iteraciones también se puede fijar. Esto permite la eliminación gradual de ruido en pasos consecutivos. Es preferible aumentar este parámetro por encima del valor de suavizado (*smoothness*) porque mantiene más los detalles de la superficie.

Para tener una idea de cómo resulta los parámetros elegidos, se puede hacer una vista previa de una pequeña parte del modelo. Para ello, marcamos la opción *Preview option* en el cuadro de diálogo (Figura 117). En el diálogo de la vista previa se puede cambiar la cantidad de puntos a utilizar. Para grande conjuntos de puntos es recomendable utilizar alrededor de 10000 puntos. Luego, selecciona un punto de la nube y el programa aislará esa área y la triangulará utilizando los ajustes para la reducción del ruido. En esta vista previa se pueden cambiar los ajustes para ver su efecto. Es recomendable hacer la vista previa de un área relativamente suave primero y probar diferentes valores en cuanto al nivel de suavizado (smoothness level) y al número de iteraciones (number of iterations). Luego haz clic en el botón *Select área* otra vez y selecciona un área más compleja con mayor relieve. Comprueba si los ajustes realizados para la superficie suave también son buenos en esta superficie. Si no, adáptalos y comprueba otra vez la superficie suave.

Para la nube 'vaults_choir.xyz', utiliza la opción *Free-form shapes* con un nivel de suavizado a la mitad y 3 iteraciones. Estos parámetros eliminan la mayor parte del ruido y mantienen bastante detalle para una correcto mallado.

A realizar: Comprueba los diferentes tipos de reducción en diferentes áreas de la nube de puntos (por ejemplo: áreas suaves, con relieve complejo, con bordes afilados) e intenta saber para qué se pueden utilizar.

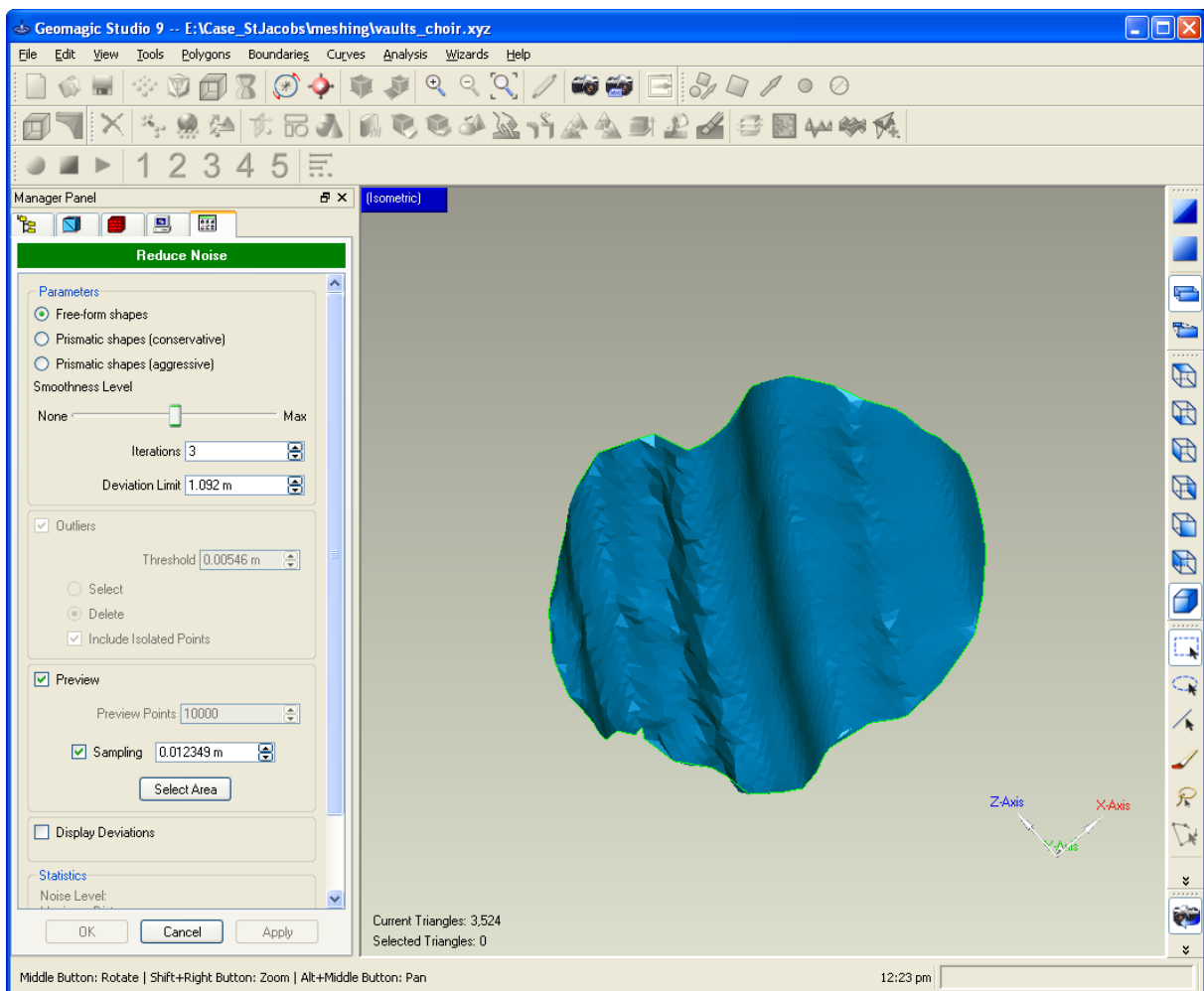


Figura 117: Vista previa de los parámetros de reducción de ruido en una pequeña muestra.

Cuando se hallan determinado los parámetros satisfactorios, deselecciona la opción *Preview* y pulsa el botón *Apply*. Cuando finaliza el proceso de reducción del ruido, se debe comprobar el *Crease info*. El ángulo de pliegue (crease angle) predice el éxito del proceso de mallado. Un valor superior a 10 sugiere que es necesario una reducción del ruido adicional o un muestreo.

Tras la reducción del ruido, el ángulo de pliegue de la nube de puntos de *St. James* es de 3.33759, lo que es un valor aceptable. Por tanto, pulsa el botón *OK* (Figura 118).

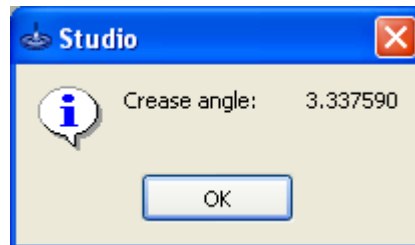


Figura 118: Crease Info

5.7.2.5. Preprocesamiento de la nube de puntos: remuestreo

Como ultimo paso antes del mallado se requiere un remuestreo de la nube de puntos. Esto es necesario porque cada punto de la nube creará alrededor de 2 triángulos en el modelo mallado. Por tanto, con 4.5 millones de puntos, se crearán alrededor de 9 millones de triángulos. Esto no sólo requiere una memoria considerable, sino también un gran tiempo de procesamiento. Por tanto, es más efectivo que primero se reduzca la nube de puntos de manera inteligente para tratar con un número de puntos aceptable (alrededor de 1 ó 2 millones).

Geomagic Studio (v9) proporciona cuatro métodos diferentes de remuestreo, sin embargo el más usado es el método *Uniform Sampling*. Esta herramienta se puede encontrar en el menú *Points – Uniform Sample*. Cuando el programa inicia esta orden, se muestra un cuadro de diálogo en la izquierda para ajustar los parámetros (Figura 119).

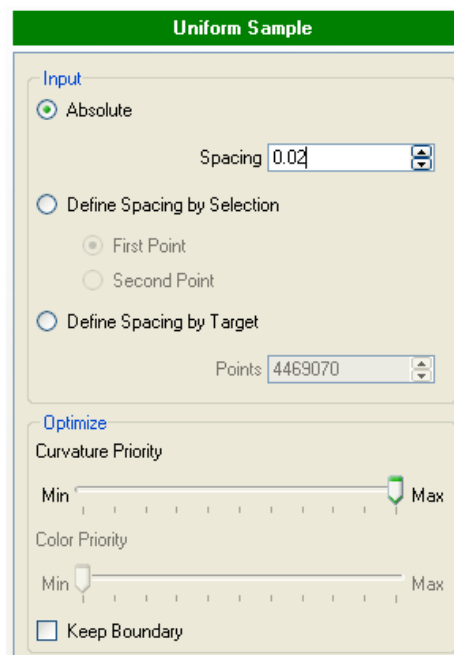


Figura 119: Cuadro de diálogo para el método Uniform Resampling

Se ofrecen tres opciones para remuestrear los datos. Como es necesario mantener el máximo detalle posible, es importante utilizar la primera opción que requiere la distancia absoluta entre puntos en la nube resultante. Este valor se define como la distancia entre puntos en áreas con poca curvatura (áreas suaves). Estas áreas no necesitan generalmente mucho detalle. Se establece la *Curvature Priority slider* al máximo, para escalar el valor de la distancia a áreas con poca o mucha curvatura.

La barra de desplazamiento del parámetro *Curvature priority* tiene 11 pasos. Por ejemplo, introduciendo una distancia de 2 cm para área con poca curvatura y estableciendo la barra *Curvature priority* al máximo (11), el espacio entre puntos en áreas con mucha curvatura será, aproximadamente, de $2\text{cm} / 11 = 0.18\text{ cm}$ o 1.8 mm. Así pues, se debe pensar en la distancia requerida en área con mucha curvatura, establecer *Curvature Priority* al máximo y, luego, calcular la distancia entre los puntos de áreas con poca curvatura.

Como es mejor reconectar este modelo al modelo de 'vaults_crossing.xyz', es recomendable activar la opción *Keep Boundary Option*. Inicia la herramienta de remuestreo con los parámetros explicados. Tras el remuestreo, sólo quedarán 446000 puntos en la nube, es decir, el 10% de la nube original.

5.7.2.6. Meshing

Ahora que se ha eliminado el ruido de la nube de puntos y se ha remuestreado a una cantidad aceptable de puntos, el mallado puede empezar. El proceso de triangulación en *Geomagic Studio* (v9) es bastante directo. Utiliza el menú *Points - Wrap* para iniciar la herramienta de mallado. Otra vez aparece un cuadro de diálogo en la parte izquierda (Figura 120). En la mayoría de casos de reconstrucción arquitectónica se requiere una superficie final, por tanto, usa la opción *Surface Wrap Type*. En la opción avanzada hay otro algoritmo de reducción del ruido que no se ha utilizado porque su resultado no se puede controlar visualmente y porque la reducción del ruido ya se ha realizado anteriormente. De nuevo, se puede elegir un ratio para reducir la complejidad de la malla.

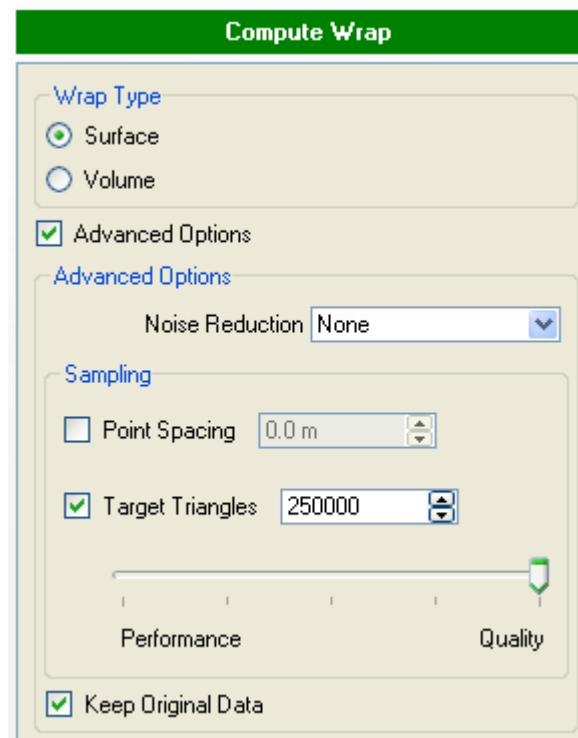


Figura 120: Cuadro de diálogo de la opción malla con envolvente

Varias pruebas han demostrado que el ajuste estándar de 250000 triángulos no proporciona casi ninguna diferencia respecto a utilizar el conjunto de datos completo. La máxima diferencia medida entre estas dos posibilidades en la mayoría de las pruebas fue de 2 mm. Así pues, utilizamos el ajuste estándar y procedemos al proceso de triangulación pulsando el botón *OK*.

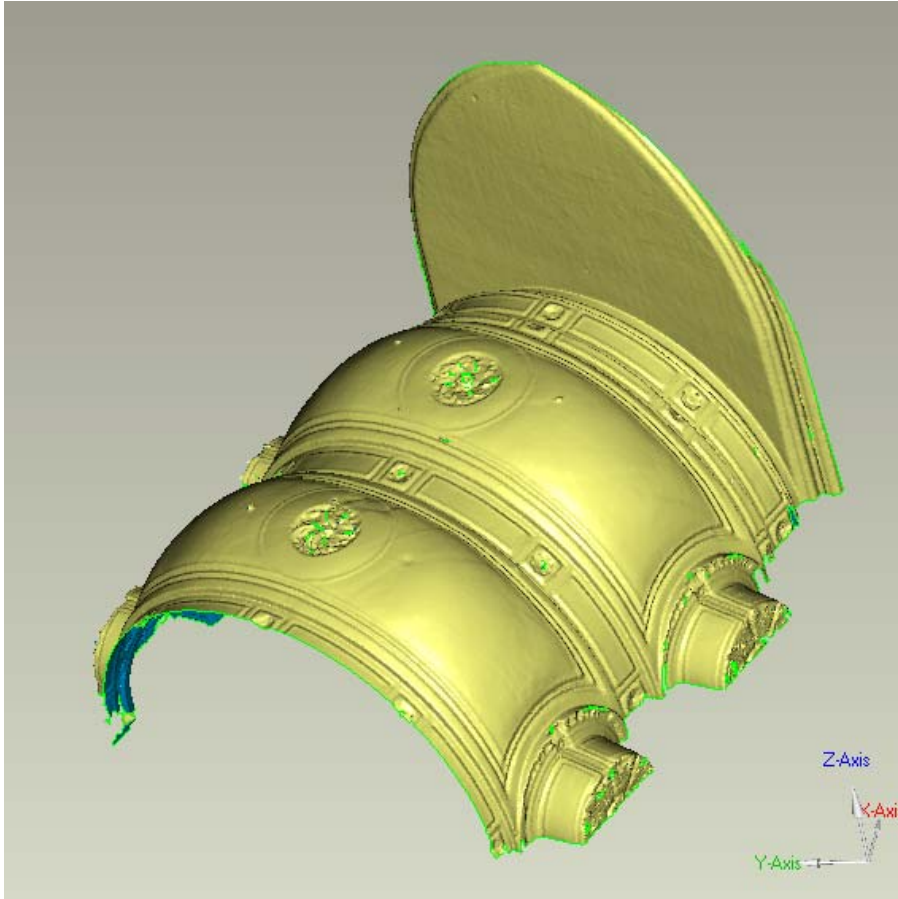


Figura 121: Modelo triangulado

Geomagic Studio (v9) encuentra la normal de cada superficie y, según ella, colorea los triángulos: el interior de color azul y el exterior de color amarillo (Figura 121). Normalmente, la superficie externa se pide de color azul, por lo que hay que dar la vuelta a las normales mediante el menú *Polygons – Flip normals*.

A realizar: Haz zoom en la triangulación y analiza su precisión, especialmente en áreas con gran curvatura. ¿Qué observas?

A realizar: Intenta preparar y triangular la sección de la 'part 1' que se separó anteriormente en el apartado c.

Los autores de este manual han utilizado los siguientes ajustes:

- Selección de errores groseros: 30.0
- Reducción del ruido: *Free-form Shapes*, nivel de suavizado $\frac{1}{4}$, 3 iteraciones, eliminación de outliers → *Crease Angle* 5.496
- Remuestreo uniforme: *Espaciado absoluto* 0.02m, *Curvature Priority maximum*, *keep boundary*
- *Wrapping*: *Surface*, sin reducción del ruido, número de triángulos 250000, calidad máxima

El resultado se puede ver en el fichero '[vaults_choir_meshed.wrp](#)'

5.7.3. Eliminación de huecos

5.7.3.1. Introducción

Debido a la falta de información o al ruido de los datos, la fase de mallado produce a menudo huecos en la malla final. Las áreas que no tienen densidad de puntos suficiente o que están completamente vacías no se pueden interpolar adecuadamente para crear una superficie y necesitan por consiguiente más información. Mediante el proceso de rellenado de huecos, el usuario puede aportar esta información adicional y, así, eliminar los agujeros. Los pequeños huecos se rellenan a menudo interpolando el mallado de sus alrededores, pero los más grandes necesitan interacción del usuario.

Estos huecos también se pueden dejar sin tapar dependiendo de la finalidad del modelo 3D. En nuestro caso, uno de los documentos a entregar era un modelo 3D completo de las bóvedas para realizar un análisis mediante elementos finitos, por lo que es importante tapar todos los agujeros.

5.7.3.2. Conexión de dos mallados

Unir los dos mallados antes de rellenar todos los huecos. Selecciona ambos mallados en el panel Model Manager e inicia la orden del menú *Polygons – Merge Polygon Objects* (Figura 122). El nombre del objeto resultante puede ser 'vaults_choir_merged'. La opción *Stitching* está disponible y debería coser las dos mallas, sin embargo, no siempre actúa como se espera. Por tanto, se prefiere unir las mallas manualmente.

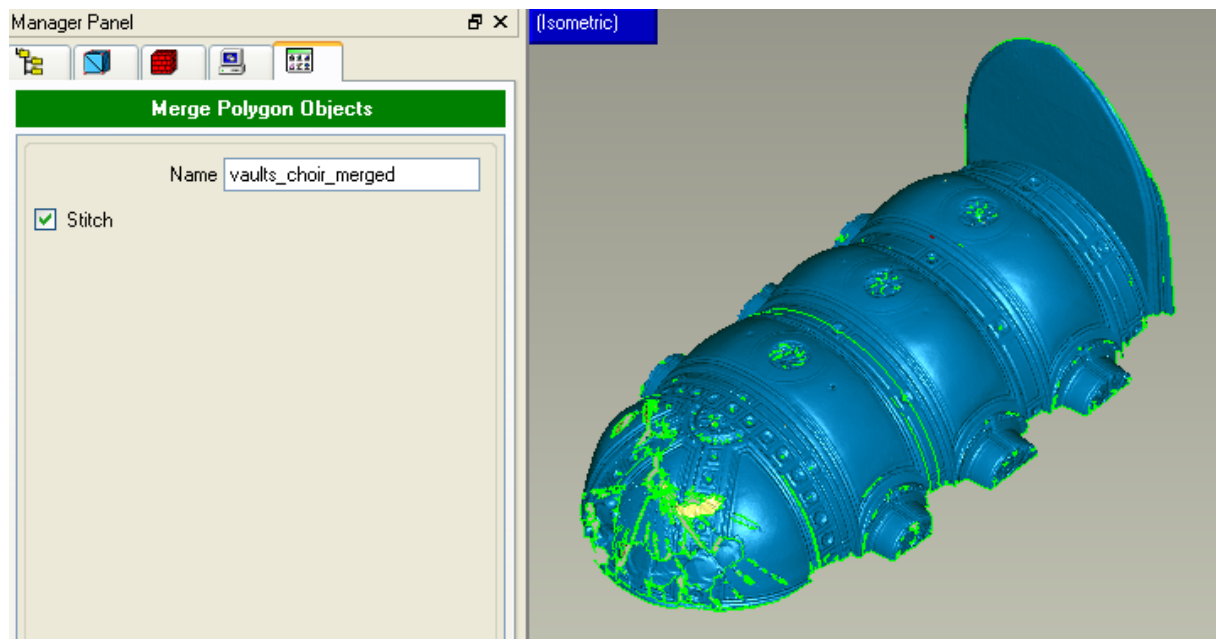



Figura 122: Unión de dos triangulaciones.

Maniobra con la vista hasta conseguir una vista superior de las bóvedas y asegúrate de que están alineadas horizontalmente. Luego, utiliza la selección de caja (icono  de la barra de herramientas de la derecha) para seleccionar el área alrededor del espacio (Figura 123). Inicia la orden *Polygons – rewrap...* El mejor resultado se obtiene con la opción *Create New Vertices*. Esta opción elimina la malla existente; luego crea nuevos vértices de manera que los triángulos de la nueva malla son aproximadamente del mismo tamaño que los triángulos de alrededor; finalmente retriangula esta parte de la nube de puntos.

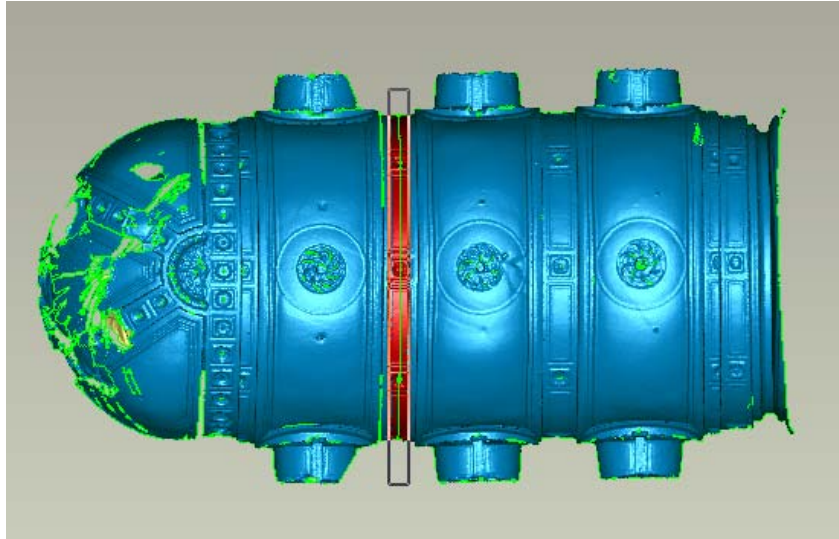


Figura 123: Nueva malla creada que conecta las mallas de las dos partes

5.7.3.3. **Eliminación de la bóveda del altar**

Como las bóvedas del lado izquierdo del altar estaban en muy malas condiciones y se escanearon desde una sola posición, el mallado de esta área está por debajo del estándar. Contiene numerosos huecos grandes debido a la falta de datos. Aunque sería posible recubrir estos agujeros, conllevaría demasiado tiempo para este tutorial. Por tanto, se eliminará del conjunto de datos. Haz los siguientes pasos para realizar la selección de la manera más fácil: en el menú Edit, las opciones *BackFace Mode* y *Select Through* deben estar activas y *Select Visible Only* desactivada. A continuación selecciona la parte de arriba del altar mediante una caja de selección y pulsa la tecla *Suprimir*. (Puede encontrarse el conjunto de datos hasta este paso en el fichero '[vaults_choir_meshed_without_altar.wrp](#)').

5.7.3.4. **Eliminación de huecos pequeños (simples)**

El siguiente paso en la creación de un modelo 3D bueno es analizar y eliminar los agujeros producidos por el algoritmo de mallado. *Geomagic Studio (v9)* ofrece herramientas automáticas para rellenar huecos, pero sólo trabaja adecuadamente con huecos pequeños. Los huecos más grandes o complejos siempre deberían rellenarse de forma manual.

Para utilizar las herramientas de rellenado de huecos, el mallado no debe contener triángulos puntiagudos ni desconectados. Por tanto, utiliza primero la orden *Polygons – Make Manifold – Open* para limpiar la malla.

Primero, todos los pequeños agujeros se rellenarán con las herramientas automáticas. Selecciona la malla entera por medio de una caja de selección e inicia la orden *Polygons – Fill holes...*

Se puede observar que *Geomagic Studio (v9)* encontró 117 huecos en la triangulación (Figura 124). Éstos se muestran coloreando su borde en rojo. El programa ofrece cinco métodos de rellenado. Para rellenar los pequeños, se utiliza el método *first fill*. Luego, se utiliza el botón *Deselect Largest* para eliminar el hueco más grande. Esta orden continua mientras se comprueba visualmente los huecos que se eliminan mediante el rellanado y se para cuando se han eliminado todos los huecos grandes.

En el conjunto de datos, se seleccionaron 7 huecos grandes, dejando entonces 110 huecos que se rellenarán automáticamente. El botón *Fill All* empezará a rellenar estos huecos automáticamente. Mantén el resto de ajustes con los valores establecidos por defecto.

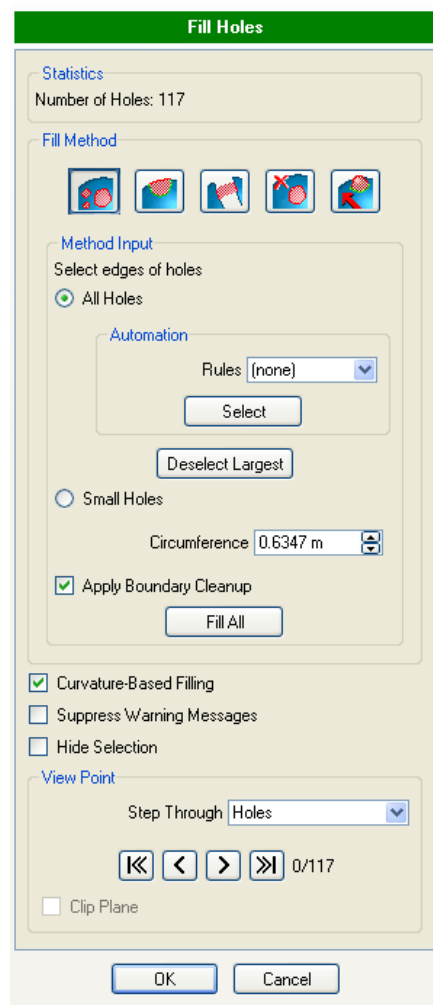


Figura 124: Cuadro de diálogo de la herramienta rellenar huecos

Cuando el programa finaliza el proceso de rellenado aparece un mensaje diciendo que no se recomienda el método de rellenado basado en curvatura en 33 huecos. Éstos huecos se comprobarán manualmente para tomar la decisión correcta de cómo rellenarlos. Por tanto, pulsa el botón *Cancel*.

Todos los huecos pequeños se tapan y destacan en color rojo. Pulsa el botón *OK* para confirmar el correcto relleno de estos huecos pequeños.

5.7.3.5. **Eliminación de partes sin información suficiente**

Ahora se puede analizar de forma manual cada uno de los 33 agujeros y elegir la manera más apropiada de rellenarlos. Observando la malla, se puede observar un número de huecos en la parte de abajo cerca de los nichos. Como no hay suficiente información para cubrir estos huecos, la estructura de abajo se eliminará. Selecciona las herramientas de selección para seleccionar las estructuras inferiores con estos huecos y luego presiona la tecla **Suprimir** (Figura 125).

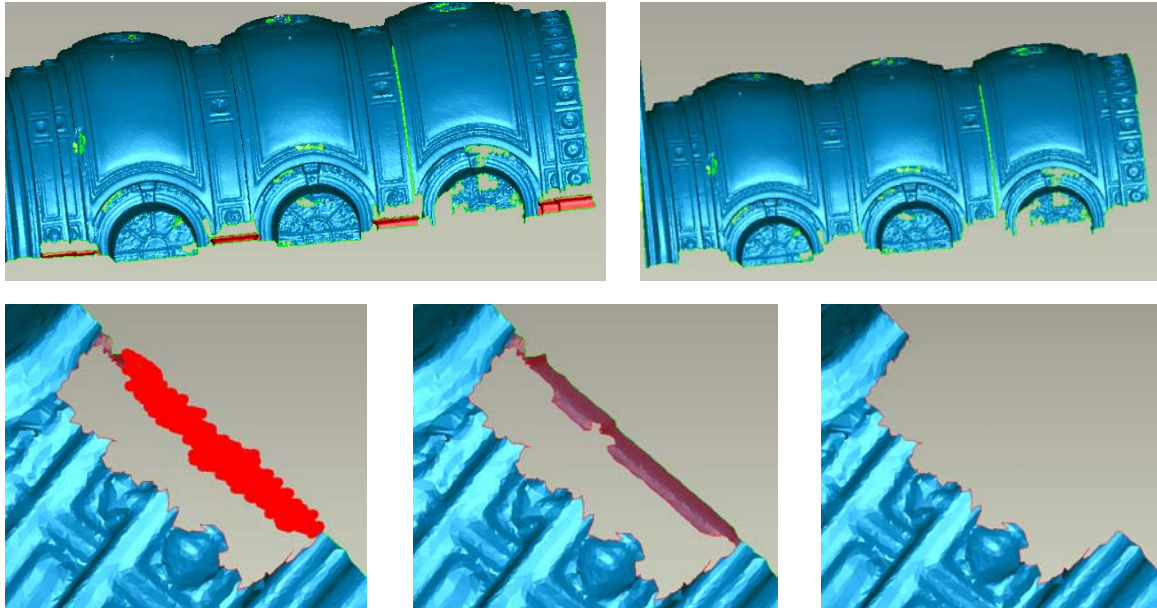




Figura 125: Eliminación de las partes que no contienen información suficiente

5.7.3.6. Relleno de huecos complejos 1

Ahora selecciona una de las áreas de decoración circular en la parte superior de las bóvedas e inicia la herramienta *Automatic hole filling*. La mayoría de estos agujeros tienen bordes irregulares y, por tanto, no se pueden cubrir correctamente. Haz zoom más en uno de los huecos e inicia la orden *Clean Up Tool*  con la opción *Triangles Selection* activada. Luego, utiliza la herramienta *Brush Selection*  para seleccionar visualmente los triángulos malos y pulsa **Suprimir**. Mientras estos triángulos están seleccionados, rota el modelo para asegurarte de que todos los triángulos malos están seleccionados (Figura 126). Durante esta fase, las herramientas de selección como *Rim Distortion* o *Poor Boundary* se podrían utilizar, pero la mayoría de las veces eliminan demasiada información.

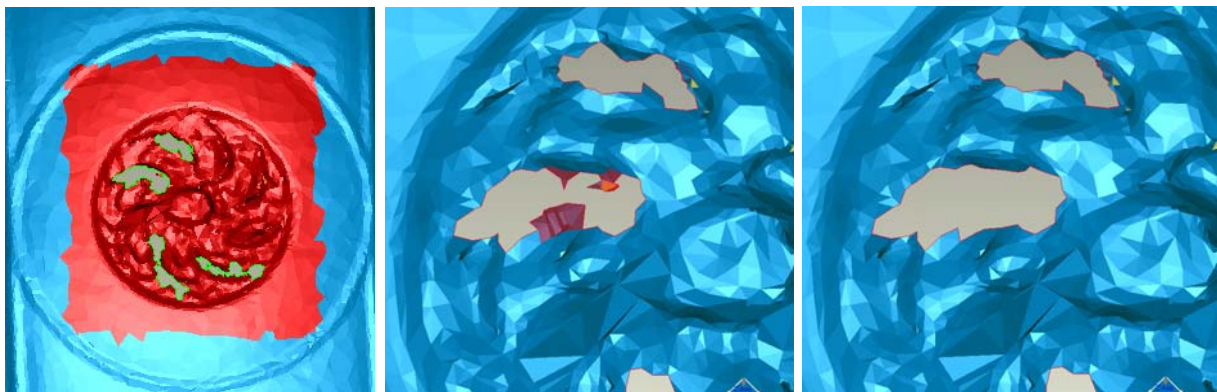



Figura 126: Limpieza de los bordes de los agujeros antes de cubrirlos.

Cuando el borde ya está limpio, reactiva la herramienta *Fill*  y selecciona el borde del hueco con el puntero del ratón. El programa cubrirá automáticamente el agujero.

A realizar: Elimina todos los otros huecos de las decoraciones circulares mediante estas herramientas.

Tras eliminar estos huecos, se puede observar que estas áreas todavía contienen triángulos puntiagudos. Selecciona estas áreas otra vez e inicia la orden *Polygons - Remove*

Spikes... Utiliza la barra deslizante para ajustar el parámetro mientras se comprueba el resultado. Mueve la barra justo lo necesario para eliminar sólo los triángulos puntiagudos sin afectar al resto de la estructura (Figura 127).

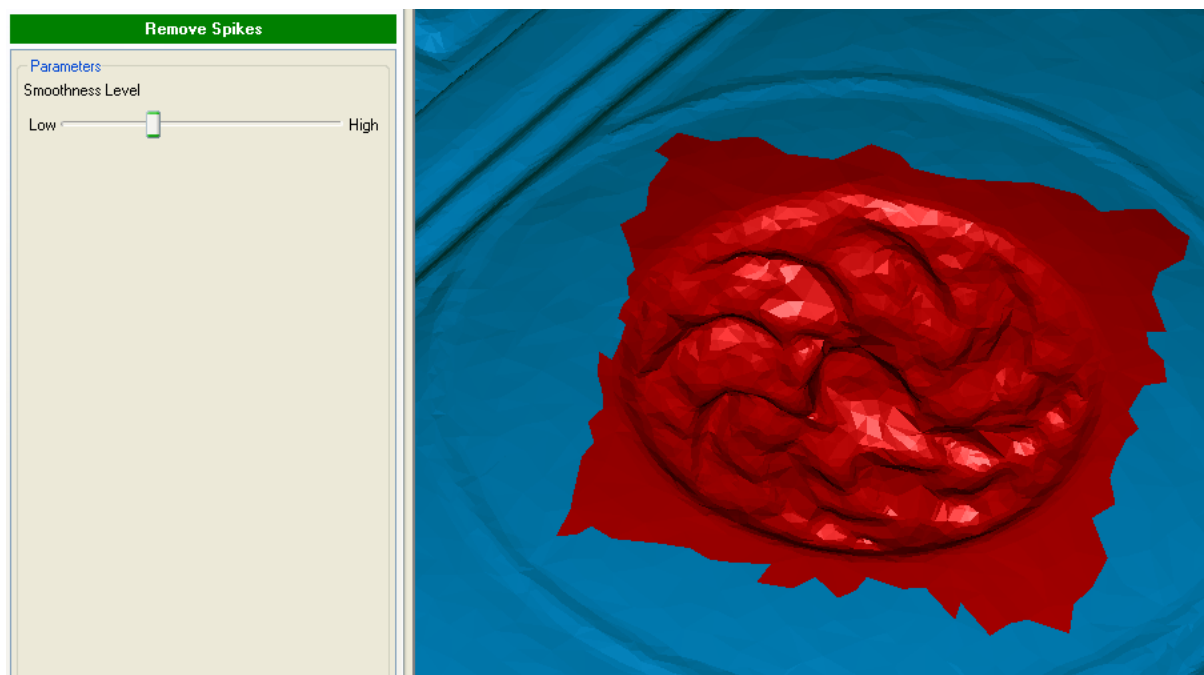


Figura 127: Eliminación de triángulos puntiagudos en las áreas rellenas

5.7.3.7. **Relleno de huecos complejos 2**

El siguiente paso consiste en empezar a rellenar el hueco estrecho y alargado que separa una gran parte de una de las bóvedas de las otras (Fig. 128).

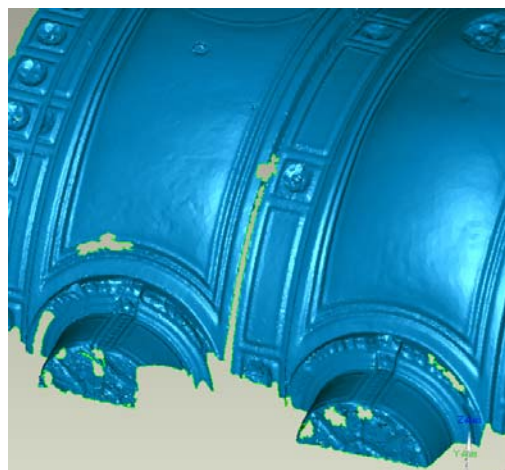


Figura 128: Ejemplo de un agujero estrecho

Inicia la herramienta **Automatic Hole Filling** y utiliza primero las herramientas automáticas para limpiar los bordes de los huecos pequeños de la parte superior como se ha visto en el apartado 5.7.3.4.

Ahora, utiliza la herramienta **Create Bridges**  para dividir el agujero largo y estrecho en múltiples agujeros más pequeños (Figura 129). Selecciona un punto a un lado del hueco y

otro punto al otro lado utilizando las opciones estándar. *Geomagic Studio (v9)* creará un puente conectando ambos lados. Este puente también se interpola utilizando la superficie del contorno.

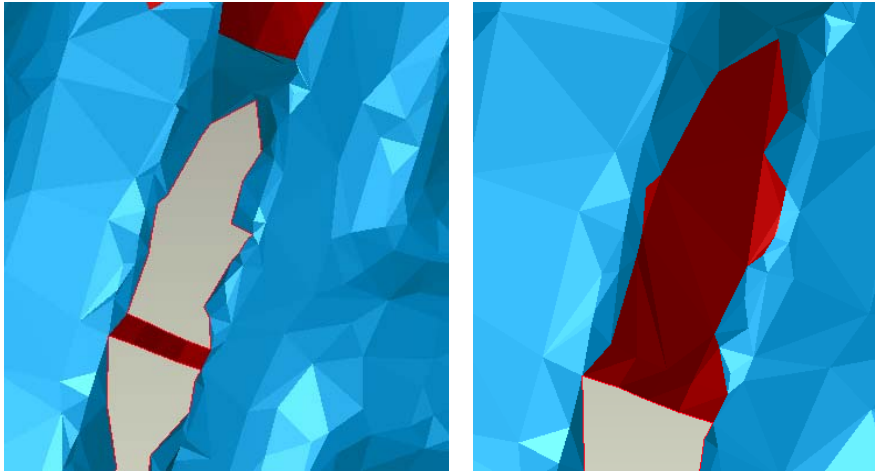


Figura 129: Creando puentes para dividir un agujero estrecho en varios agujeros más pequeños

Utiliza la herramienta *clean up* para eliminar los triángulos agudos que contaminan la suavidad de los bordes y rellena los huecos como se ha visto en los pasos anteriores.

A realizar: El resto de huecos se puede rellenar siguiendo el mismo procedimiento explicado arriba. También se puede cubrir el hueco del otro lado de las bóvedas.

El conjunto de datos hasta el momento se puede encontrar en el fichero '[vaults_choir_meshed_holeFilledPart1.wrp](#)'.

5.7.3.8. Copiar/Pegar para rellenar huecos

Los huecos muy complejos se pueden tapar algunas veces utilizando información de otras regiones, especialmente en estructuras repetitivas. Los nichos de debajo de las bóvedas están repetidos. Algunos presentan huecos de partes que son claramente visibles en otros nichos. La tarea siguiente consiste en copiar una parte de uno de estos nichos para rellenar uno de estos huecos.

Busca el siguiente hueco en uno de los nichos de la bóveda próxima al altar (véase Figura 130). Primero, limpia los bordes y los posibles triángulos contaminados.

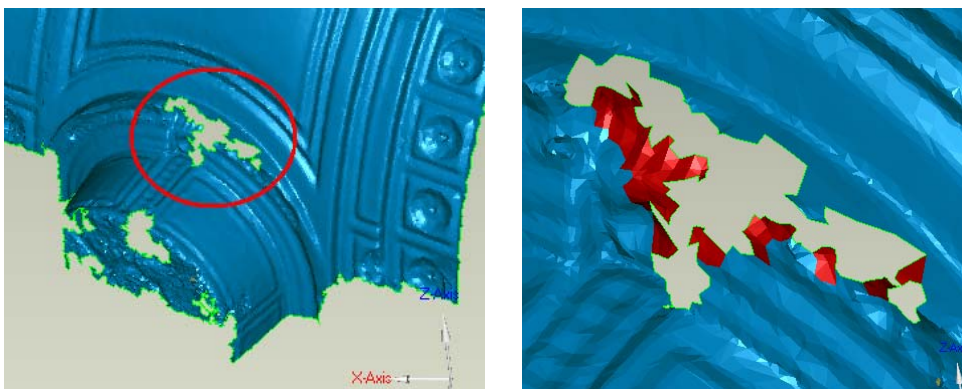


Figura 130: Ejemplo de un hueco que no tiene información suficiente para poder ser reconstruido

Luego, selecciona el área correspondiente en el nicho de la izquierda mediante las herramientas de selección (Figura 131).

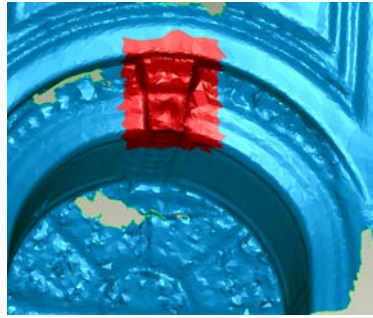


Figura 131: Búsqueda de una pieza similar para copiar/rellanar el agujero

Se puede crear un objeto nuevo utilizando esta selección. Selecciona la opción *Edit – Selection To Object* y nombra la nueva parte '*niche_copy*' usando las órdenes *Copy* y *Paste*. Asegúrate de que cuando se seleccionen estos objetos que la opción *Edit – Select Through* está activada. Ahora, esta parte se registrará en la correcta posición del nicho que contiene el hueco.

Selecciona ambos conjuntos de datos ('*niche_copy*' y '*vaults_choir_meshed*') e inicia el proceso de registro mediante el menú *Tools – Registration – Manual registration*. La interfaz cambia y se muestra un cuadro de diálogo en la izquierda (Figura 132). En este cuadro, selecciona '*vaults_choir_merged*' como el conjunto de datos fijo (**fixed**) y '*niche_copy*' como flotante (**floating**). Ambos conjuntos se mostrarán en las vistas superiores de la pantalla. El conjunto registrado se mostrará debajo.

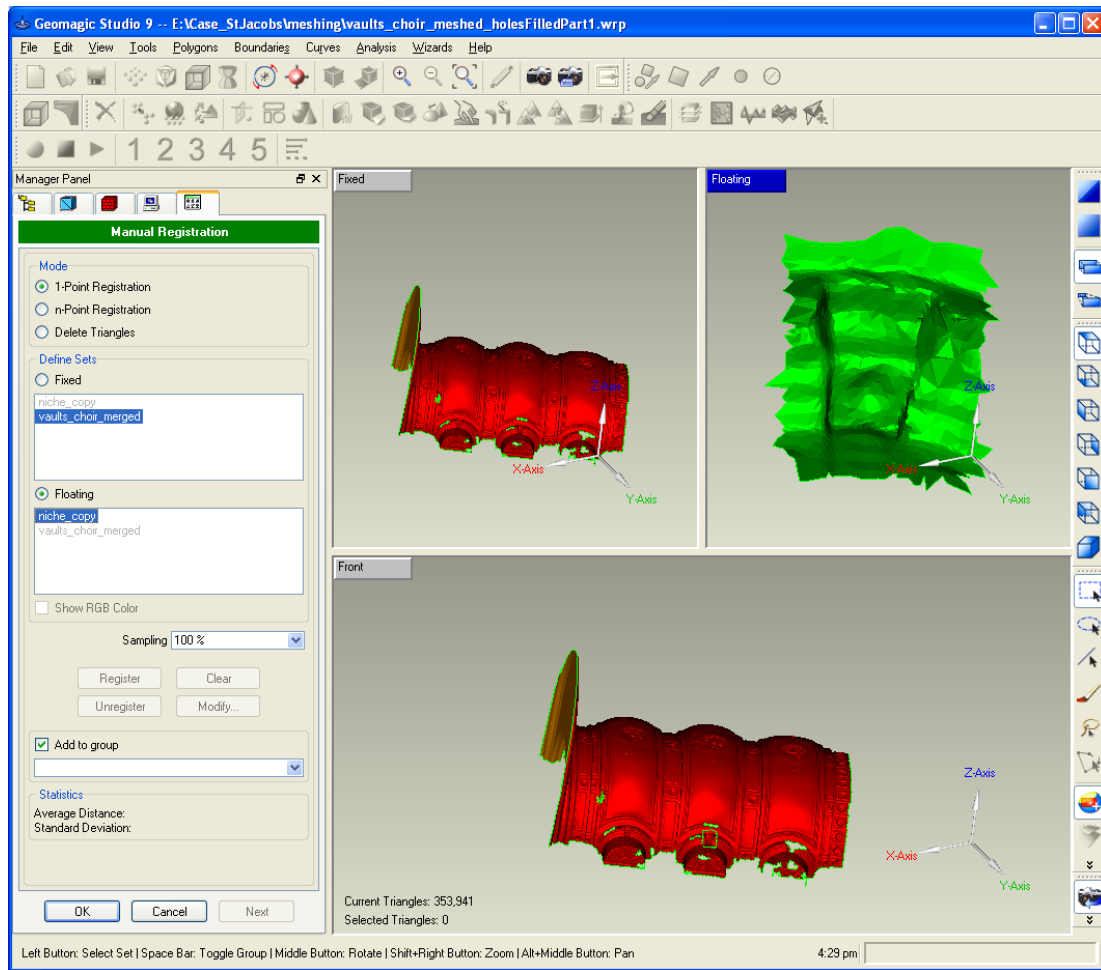


Figura 132: Registro manual

Primero se utilizará el algoritmo *1-Point Registration*. Como su propio nombre dice, sólo necesita un punto homólogo entre los dos conjuntos de datos para llevar a cabo el registro. El programa confía en la geometría de la superficie del entorno para obtener información extra. En el conjunto de la izquierda, haz zoom más en el área donde se debe colocar el conjunto de la derecha. Luego, selecciona con cuidado un punto característico que también se pueda identificar en el conjunto de la derecha y selecciónalo (Figura 133). El programa intentará alinear automáticamente los dos conjuntos de datos.

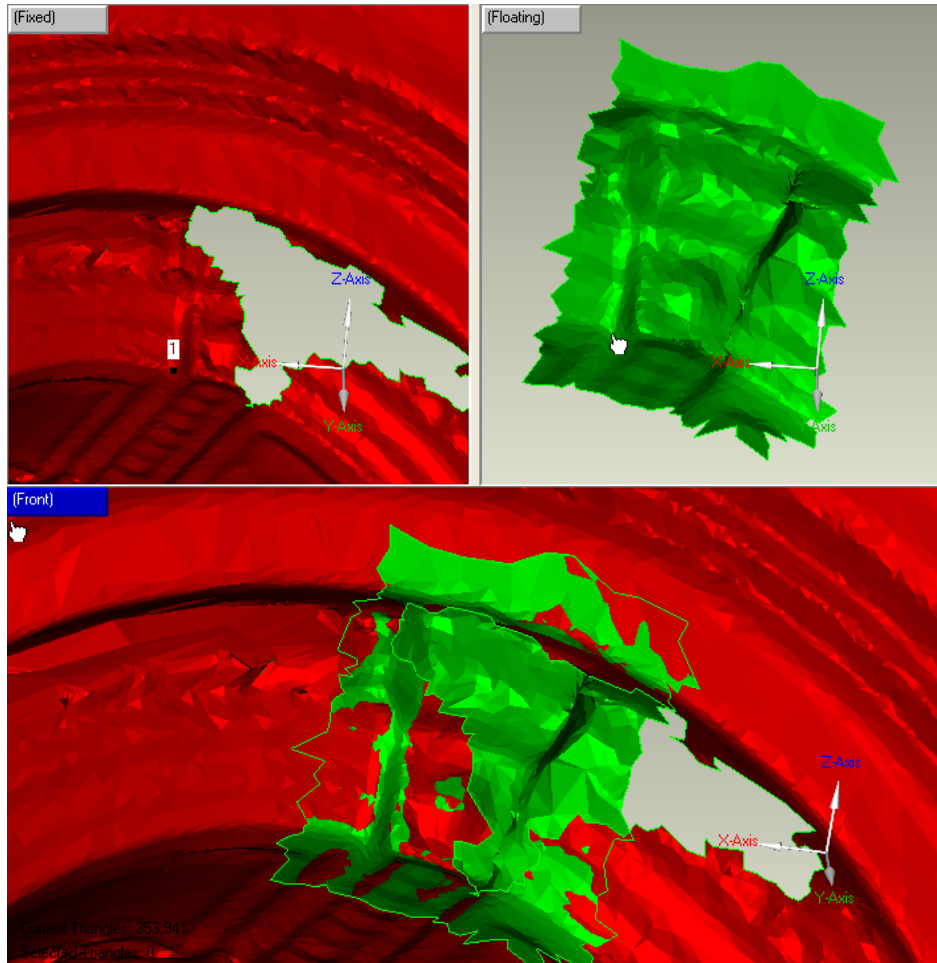


Figura 133: Registro manual para cubrir el hueco con una pieza de la malla de aspecto similar

Comprueba la alineación en la parte baja de la pantalla cuando el programa finaliza el registro. Si la alineación no es perfecta, pulsa el botón *Modify* y ajusta el registro manualmente. La distancia media y la desviación típica deben comprobarse en la parte inferior del cuadro de diálogo. Algunas veces, cuando se pulsa el botón *Registration* una vez más, el registro mejora. Cuando se está satisfecho con la alineación, se desactiva la opción *Add to group* y se pulsa **OK**.

Ahora, los dos conjuntos de puntos están alineados y se pueden unir con la opción *Polygons – Merge*. La diferencia entre este algoritmo de unión y el *Polygon – Merge Polygon Objects* es que el primer algoritmo realiza automáticamente una reducción del ruido y un registro global antes de la unión mientras que el último une solo las dos mallas en un solo objeto manteniendo los posibles solapes.

Esta herramienta de unión (*Merge*) se utiliza con los ajustes de los parámetros por defecto pero con las dos opciones de muestreo (*sampling options*) deseleccionadas (Figura 134). Luego pulsa el botón **OK** para iniciar el algoritmo.

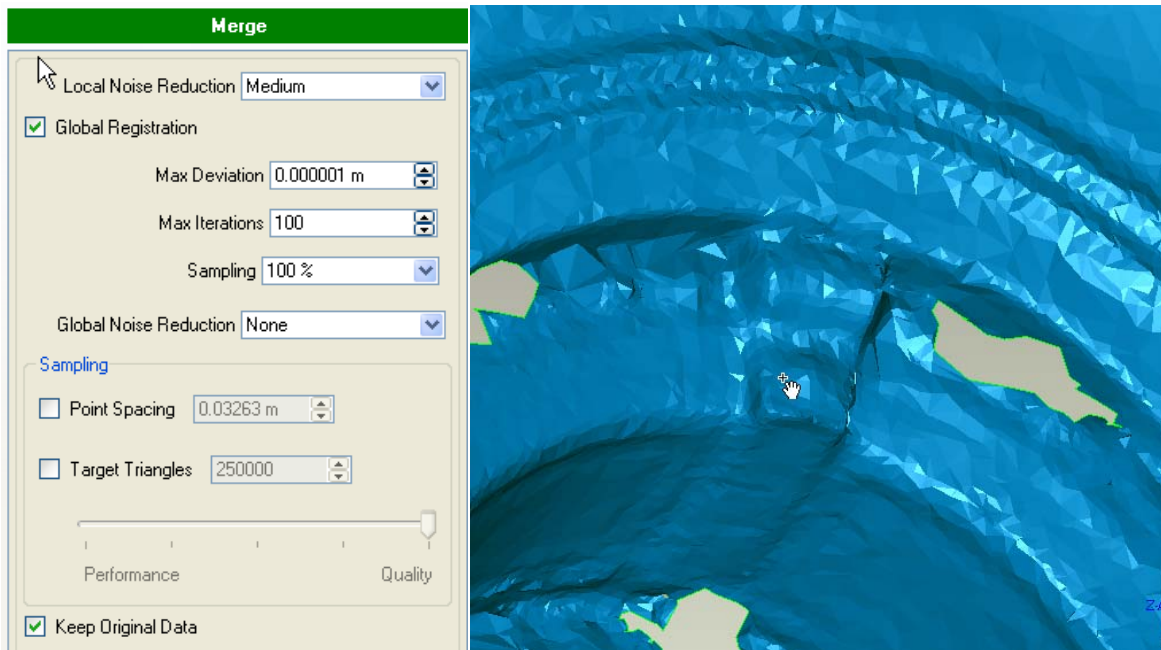


Figura 134: Cuadro de diálogo de la orden Polygon - Merge

Los huecos del lado se pueden rellenar con las herramientas explicadas en los pasos anteriores.

A realizar: Elimina el resto de los huecos mediante los principios explicados anteriormente. Analiza primero el hueco y luego decide qué método utilizar.

El modelo actual se puede encontrar en el fichero '[vaults_choir_fullyMeshed_holesFilled.wrp](#)' (véase Figura 135).

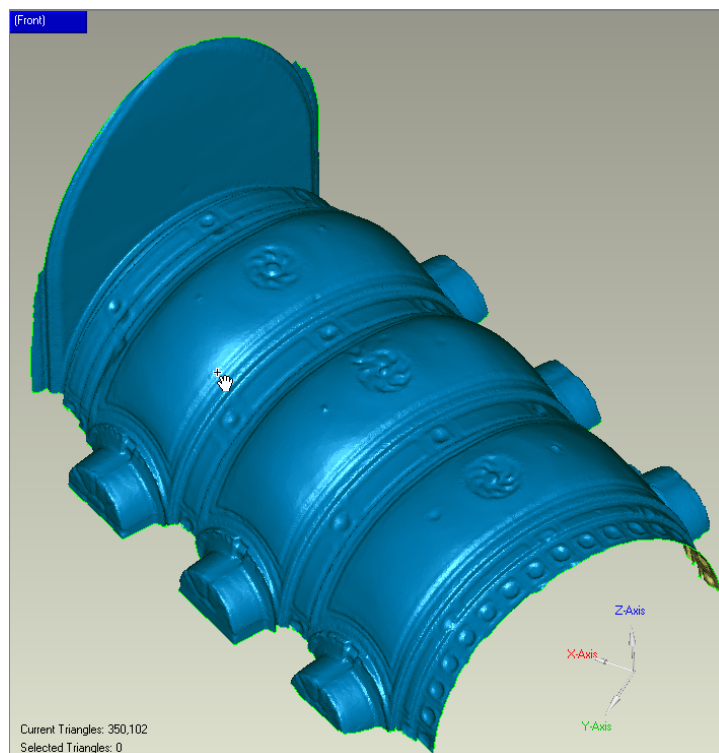


Figura 135: Modelo totalmente triangulado

5.7.4. Limpieza de bordes

El borde exterior es desigual y se requiere un borde suave. Empieza la orden *Boundaries – Relax* y selecciona el borde de la malla. No modifiques el parámetro *Entire Boundary* pero cambia el número de iteraciones a 50. Luego, pulsa el botón *Execute*. El programa suavizará el borde (Fig. 136).

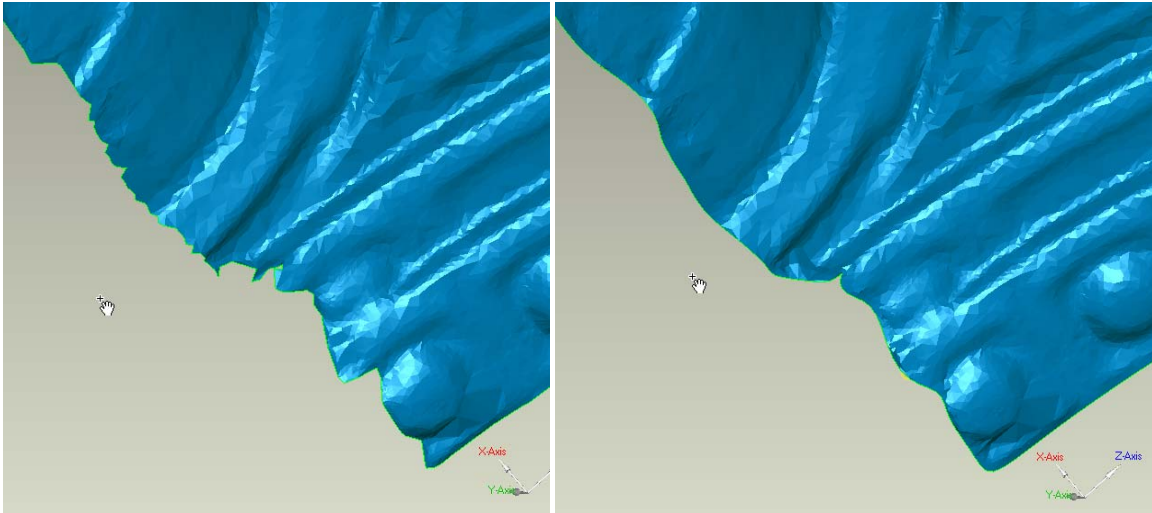





Figura 136: Triangulación antes (izquierda) y después (derecha) del suavizado del borde

5.7.5. Corte del modelo para obtener secciones transversales

5.7.5.1. Preparación de los Datums

Una manera fácil de obtener las secciones transversales es intersectando el mallado con un plano. *Geomagic Studio (v9)* ofrece una serie de herramientas para realizar esto.

Antes de proceder al corte, se debe definir el plano que intersecte con la triangulación. En este caso, las secciones se generarán perpendiculares al eje longitudinal de la nave principal de la iglesia. Se debe encontrar el eje de simetría de la bóveda y un plano perpendicular a este eje de simetría y al plano XY. (Esta idea se basa en el hecho de que los datos de la estación total utilizados para registrar las nubes de puntos se nivelaron de manera que el plano XY se puede considerar horizontal).

Inicia la orden *Tools – Datums – Create Datums...* (Figura 137). Un datum es un punto geométrico de referencia, como por ejemplo un plano o un eje. En este caso se necesita un plano, por lo que seleccionamos *Plane Datum Type* . Nombra el plano como 'Plano de simetría'. El programa puede encontrar automáticamente el eje de simetría de una malla. Selecciona el método *Best Fit Plane*  y el *Symmetry Method Type Input* . Entonces, el diálogo cambia y pregunta por el plano adecuado. Observa los ajustes como se muestran en la imagen de abajo (Fig. 137). Luego, pulsa el botón *Apply* y el programa optimizará la posición del plano según la simetría de la estructura.

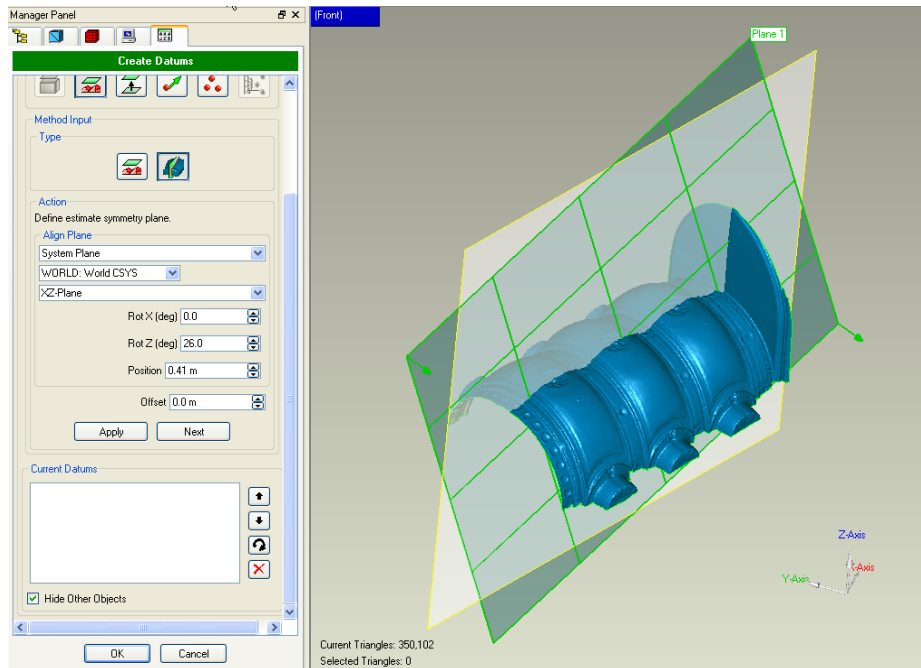





Figura 137: Creación de un plano de simetría

Si la localización es correcta, pulsa el botón *Next* y añade el plano a la lista de dátums. El plano resultante define el eje de simetría de la estructura. El plano real que se necesita para intersectar con la estructura tiene que ser perpendicular a este plano creado y al plano XY. Por tanto, crea otro dátum utilizando la opción *Plane Datum Type*  y llámalo 'Plano de corte'. Ahora, utiliza el método *Offset Plane*  y el *Perpendicular through Point Method Input* . Con este método se debe definir dos planos a los que el resultante deba ser perpendicular y un punto por el que pase. Primero, elige el plano creado anteriormente y segundo plano es el plano XY. Finalmente, indica un punto en uno de los lados de la estructura (Figura 138).

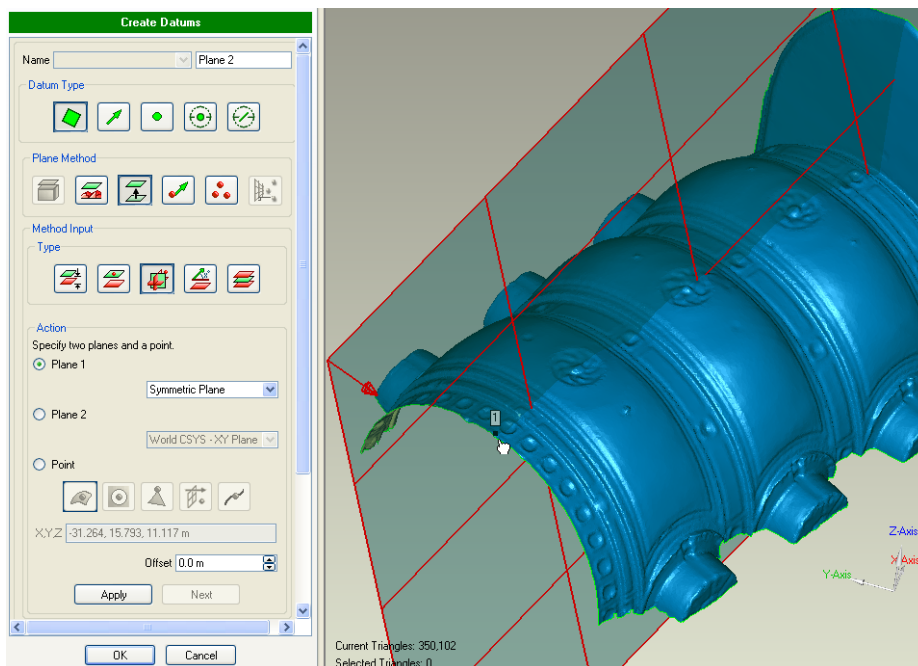


Figura 138: Definición de un plano de corte mediante el método Perpendicular through Point

Luego, pulsa el botón *Apply* y después el siguiente botón para añadir el plano nuevo a la lista de dátums. Cuando se haya terminado, pulsa el botón *OK* para cerrar el diálogo.

5.7.5.2. Corte de la malla

Para cortar la malla, utiliza el menú *Polygons – Curves by Section*. Utiliza el 'Plano de corte' como el plano de alineación y aumenta el número de secciones a 150 cortes con una separación de 10 cm. Deja el resto de ajustes por defecto y pulsa el botón *Compute* (Figura 139). El programa intersecta todos los 150 planos con la malla y genera curvas. Luego, pulsa el botón *OK* para confirmar la generación de estas curvas.

Ahora, el Model Manager muestra las curvas como elementos separados. La triangulación se puede ocultar para tener una vista mejor de las curvas generadas haciendo clic con el botón derecho sobre la triangulación y selecciona la orden *Hide*.

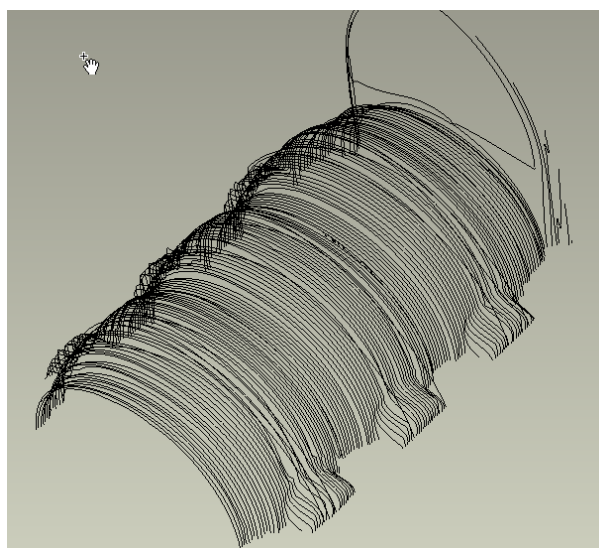
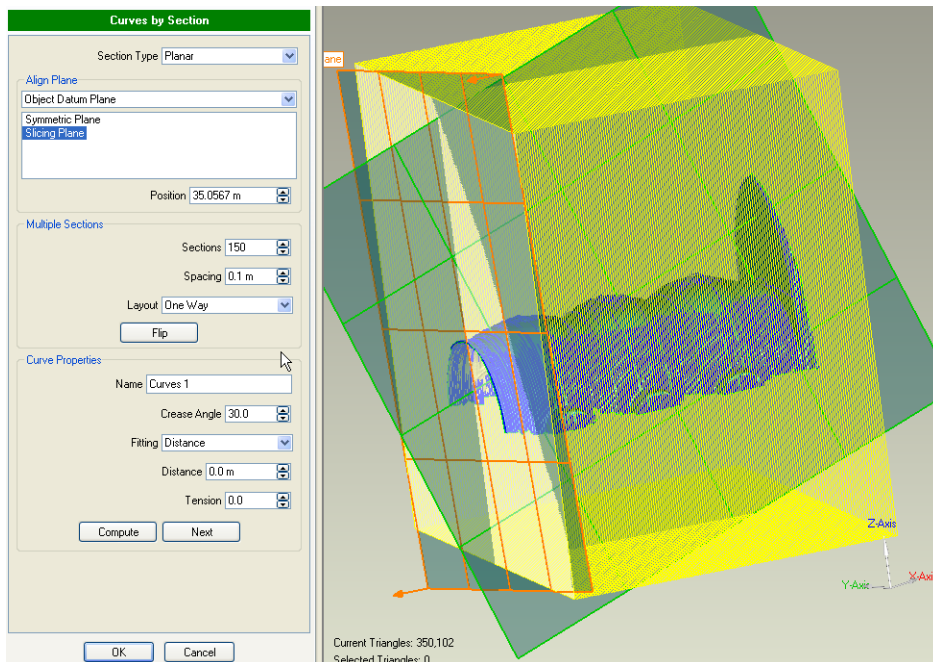


Figura 139: Secciones transversales

A realizar: Intenta realizar cortes cada 5 cm utilizando el plano XY como el plano de corte.

El modelo hasta el momento se encuentra en el fichero '[vaults_choir_fullyMeshed_holesFilled_sliced.wrp](#)'.

Estas curvas se pueden exportar a ficheros con formato *OBJ* (Wavefront Technologies) o *IGES* (Initial Graphics Exchange Specification). El formato *IGES* es un formato neutral que permite el intercambio digital de información entre diferentes sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD). Desafortunadamente, *AutoCAD* no tiene esta función en las últimas versiones. En futuras versiones de *Geomagic Studio* (v9) también será posible exportar estas curvas en formato *DXF*.

5.7.6. Creación de animaciones

Se utilizó *Cyclone* en esta parte del tutorial. *Cyclone* tiene implementada una herramienta que permite crear fácilmente paseos por la nube de puntos.

Abre una vista de ModelSpace en el conjunto de datos registrado [St.James Church - ALL](#). Cuando el programa abre el conjunto de datos se debe esperar bastante tiempo con tal de que se carguen todos los puntos.

El primer paso en la creación de una animación consiste en colocar las cámaras que se pueden utilizar luego para crear la ruta de la animación. Cambia la vista para tenerla como en el punto inicial de la animación; empieza con una vista general, utilizando la perspectiva de ojo de pájaro. Cuando estés satisfecho con el punto de arranque, utiliza la opción *Create Object - Insert - Camera* para insertar una cámara en este sitio. Ahora, cambia la vista a la siguiente localización utilizando los controles de vista. Se pueden tomar grandes pasos porque el programa interpola automáticamente la posición de la cámara entre los dos puntos introducidos mediante splines. Esto permite una transición muy suave entre los puntos de vista. Cambia la vista al segundo punto de vista; de nuevo, utiliza *Create Object - Insert - Camera* para insertar otra cámara en este sitio. Continúa emplazando cámaras en los posiciones importantes hasta que finalice la ruta de la animación.

Observa que la distancia entre dos posiciones de la cámara (keyframes) debería ser aproximadamente constante porque es más fácil establecer un número constante de posiciones interpoladas (frames) entre medias (véase después). Es aconsejable empezar con una vista general, luego hacer zoom más en la estructura y realizar posiblemente un paseo y finalizar otra vez con una vista general.

Se puede demostrar un uso básico con sólo 5 posiciones fijas de la cámara (keyframes). Las posiciones utilizadas por el autor se muestran en la Figura 140.

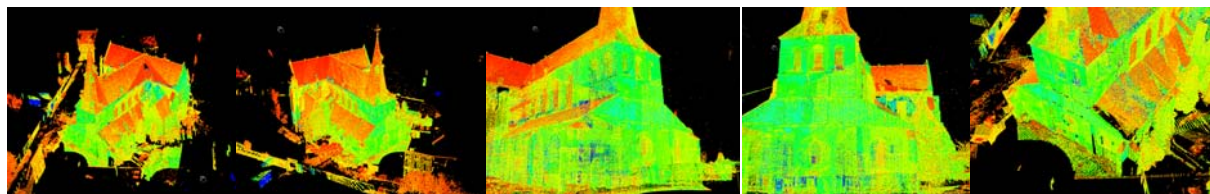


Figura 140: Vistas de las posiciones de la cámara para crear la animación

Una vez creadas todas las cámaras, selecciona todas las cámaras en orden en que fueron creadas mediante la orden *View - Set Object Visibility*. Así se abre un nuevo diálogo que permite la preparación de los elementos que deberían ser visibles y/o seleccionables. En la

lista, destaca el elemento *Camera* y pulsa el botón *Select*. Esto selecciona todas las cámaras en el orden en que se crearon. Luego, pulsa el botón *OK* (Fig. 141).

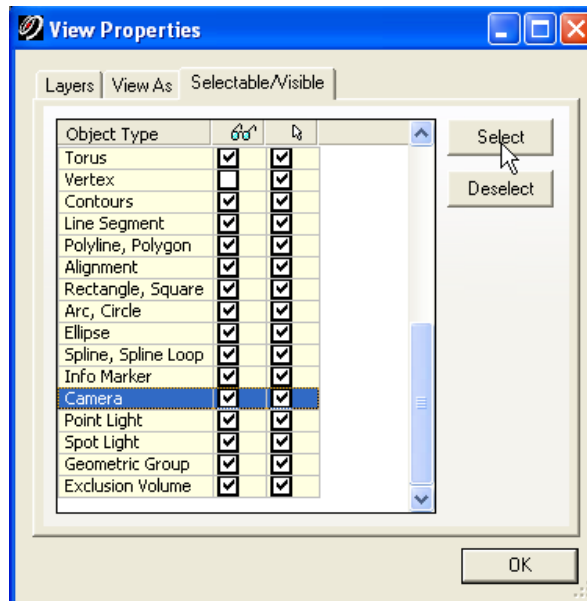


Figura 141: Cambio de las propiedades de la vista para mostrar las posiciones de la cámara

Ahora, accede al menú *Tools – Animation – Create Path (loop)*. *Cyclone* añadirá la ruta de la cámara en forma de spline. Luego, ves otra vez al *Animation menu* y selecciona la opción *Set Path*.

Para empezar la creación de la animación, utiliza la opción *Tools – Animation – Animation Editor* (Figura 142). En el nuevo diálogo, especifica el número de frames intermedios entre las posiciones de la cámara (keyframes). Generalmente, es aconsejable seleccionar primero todos los keyframes estableciendo los campos *From* y *To* de la izquierda como el primero y el último número de keyframe respectivamente, en este caso 1 y 5. A continuación, cambia el valor de *Number of Frames between Keyframes* a 20 veces el número de keyframes ($20 \times 5 = 100$). Este valor se obtiene mediante prueba y error y depende principalmente de lo rápida que vaya la animación y de la distancia entre las cámaras. Pulsa el botón *Set*. Comprueba el tamaño del paso pulsando la flecha de la derecha debajo de *Frame Number Options*. Cuando sea correcto, pulsa el botón *OK*.

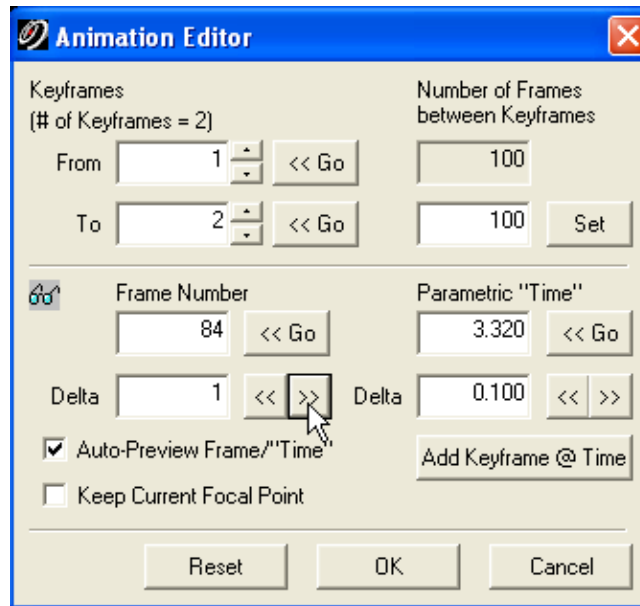


Figura 142: Cuadro de diálogo del editor de la animación

Ahora, inicia la orden *Tools – Animation – Animate* (Fig. 143) y selecciona el fichero de video de salida *Output to Video File*. Nómbralo '[Animation.avi](#)' y deja el resto de ajustes con su valor por defecto. Luego, pulsa el botón *Animate*.

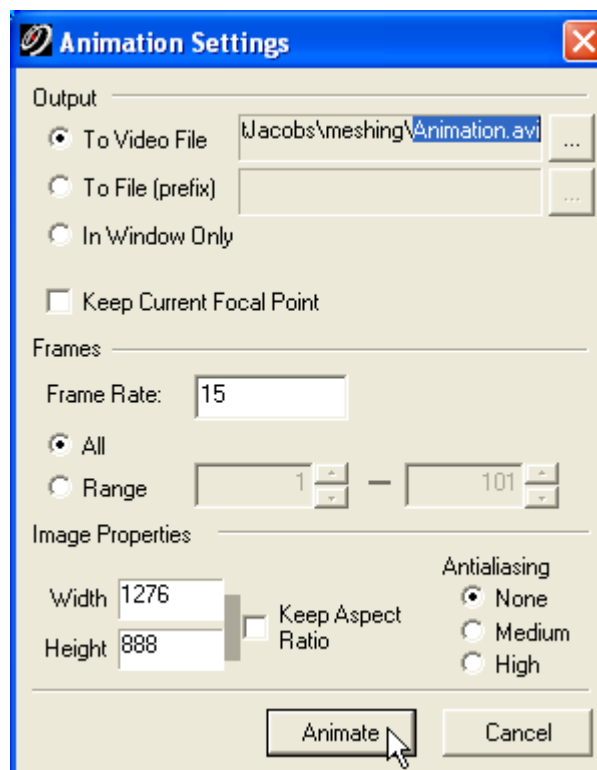


Figura 143: Cuadro de diálogo de los ajustes de la animación

Ahora *Cyclone* mostrará automáticamente un diálogo en el que se especifica el códec para comprimir el tamaño del fichero de la animación. Si está familiarizado con estos códecs, se puede seleccionar uno de ellos. En caso contrario se recomienda seleccionar la opción *Full Frames (Uncompressed)*.

La mayoría de códecs se basan en el principio de compresión *JPEG*, que es un tipo de compresión con pérdida. Los resultados de estos códecs a veces no son satisfactorios para la animación de nubes de puntos. Es aconsejable utilizar un códec gratuito llamado *CamStudio* que proporciona la opción de compresión sin pérdida.

La animación creada por el autor se encuentra en el fichero '[Animation.avi](#)'.

6. Caso de estudio de entorno industrial: buque de FPSO

6.1. Introducción

Esta aplicación trata el caso de un entorno industrial y más concretamente el escaneado de una plataforma petrolífera que también debe considerarse como un entorno peligroso.

En el siguiente capítulo se enfatizará el proceso de escaneado láser, el procesamiento de los datos y, particularmente, el registro de las nubes de puntos. Después, se pondrá atención al uso de los datos procesados.

Los objetivos principales de este caso de estudio son los siguientes:

- El escaneado láser en la práctica de entornos industriales.
- Uso de las nubes de puntos en la fase de ingeniería.

6.2. Planteamiento del problema

El cliente quiere realizar un levantamiento completo de ciertas áreas para obtener información precisa y complementar, eventualmente, las mediciones existentes parcialmente de estado as-built en un modelo PDS¹. Esto se debe realizar a bordo de un buque FPSO (Floating Production, Storage and Offloading), Figura 144, localizado en el mar a 300 km de las costas de África Occidental.



Figura 144: Imagen de un FPSO

Un buque FPSO es, básicamente, una unidad situada en los alrededores de una plataforma petrolera y sirve de refinería inicial y de almacenamiento temporal. Estos buques son, la

¹ PDS: Programa de diseño de plantas en 3D desarrollado por Intergraph (www.intergraph.com)

mayoría de veces, viejos tanques de petróleo transformados. El FPSO bombea el crudo extraído del fondo marino mediante varias torres de perforación. Cada día 250.000 barriles salen de la refinería, de manera que el buque esté totalmente cargado cada 8 días. Una vez a la semana el petróleo refinado se traspasa a un tanque (Figura 145).

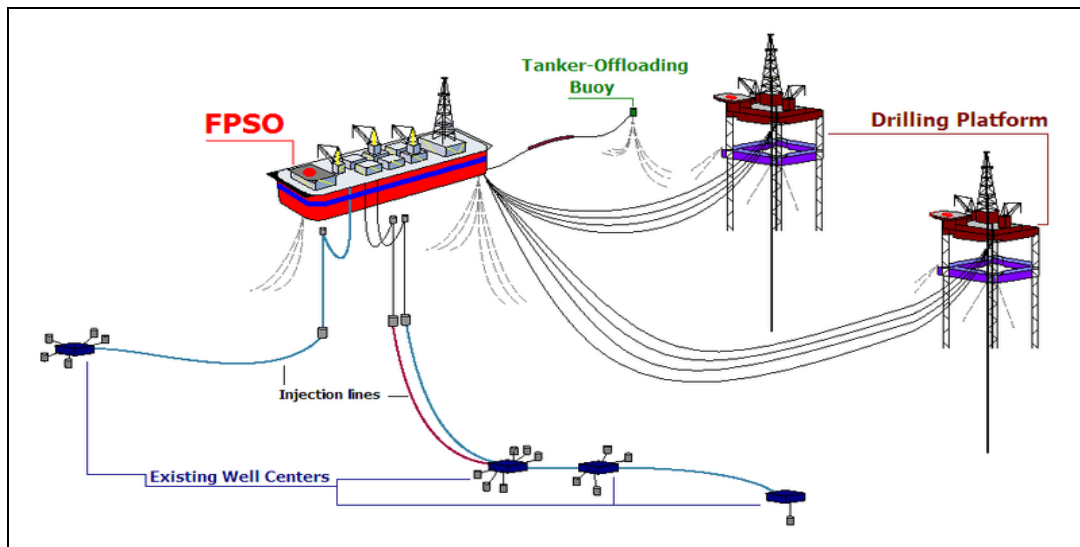


Figura 145: FPSO en un yacimiento petrolífero

El proyecto se desarrolla antes de la fase de ingeniería y pretende mejorar el FPSO para:

- Explotar nuevos yacimientos petrolíferos en los alrededores del FPSO.
- Expandir la capacidad de producción.
- Diseñar nuevas unidades y tuberías copiando los nuevos volúmenes de producción.

Como no hay planos as-built precisos, la alternativa más adecuada es producir una situación "as-is" a partir de las 33 nubes de puntos generadas por un escáner láser. Esto permitirá al cliente:

- Determinar dónde se ajustarán los nuevos módulos.
- Planificar nuevas rutas para las tuberías.
- Determinar dónde se colocarán las nuevas estructuras de acero de refuerzo.
- Reducir el riesgo de posibles desajustes durante la construcción.

6.3. Elección de la técnica de medición más apropiada

6.3.1. Técnicas de medición en las instalaciones industriales

6.3.1.1. Estación total

Hace un tiempo, la medición de cualquier objeto en instalaciones industriales se hacía exclusivamente con teodolitos o estaciones totales.

Con el incremento de la utilización de herramientas de CAD en 3D la necesidad de mediciones mejores, más precisas y más rápidas creció en paralelo.

Al mismo tiempo, la atención de las empresas de ingeniería en los países desarrollados cambió gradualmente de instalaciones greenfield (donde no se necesitan mediciones) a proyectos de rehabilitación o extensión; también llamados proyectos de modernización o de desatascamiento. Este cambio supuso un énfasis adicional en la necesidad de mediciones rápidas y precisas, en un formato 3D; más todavía como consecuencia de la falta de planos as-built.

El objetivo de estos proyectos consiste en:

- Reemplazamiento de tuberías existentes, bombas, buques...
- Ampliación y reasignación de rutas de tuberías.
- Reemplazamiento de válvulas (de control).
- Aumento de las presiones, temperaturas en los flujos de los procesos.
- Etc.

Un ejemplo típico se puede ver en la figura de abajo (Fig. 146), donde se necesitó un estudio básico de ingeniería para comprobar y garantizar la posibilidad de reemplazar un intercambiador de calor por otro de otro tipo.

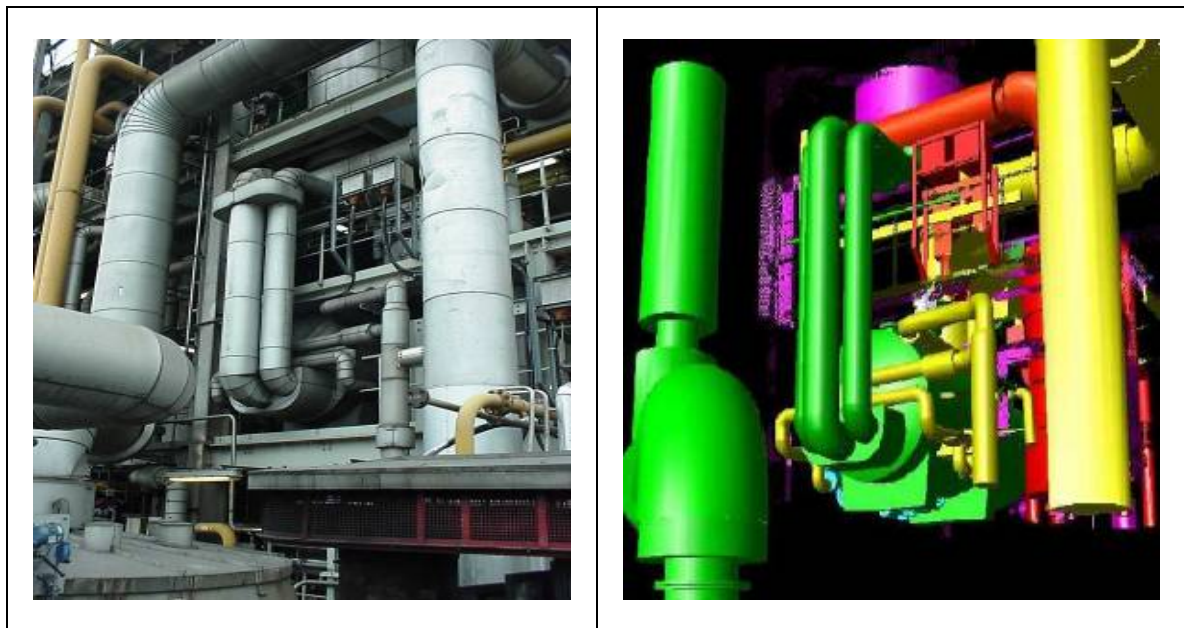


Figura 146: Izquierda: situación real – Derecha: proyecto de extensión en CAD © BnS engineering N.V.

El uso de métodos topográficos clásicos a partir de estaciones totales durante la fase de ingeniería ya no es más la solución correcta por las siguientes desventajas:

- Todos los puntos a medir tienen que estar predefinidos exactamente por el contratista antes de la campaña de medición en campo, con el riesgo de olvidarse de alguno y tener que volver varias veces.

- Todos los objetos tienen que ser alcanzables por el topógrafo; de ahí la necesidad de andamios.
- Las mediciones de puntos son lentas y costosas (en horas de trabajo).
- Las campañas de medición duran mucho tiempo antes de tener datos con significado disponibles antes de empezar la fase de ingeniería.
- Es irreal medir e informar de “espacios libres” en unidades. El espacio libre disponible es la información más valiosa en el caso de proyectos de desatascamiento.
- Sólo los puntos 3D se pueden importar en el diseño 3D.

Así pues, es necesaria una técnica más rápida, segura y efectiva que sea capaz de producir rápidamente un resultado 3D al inicio del programa de ingeniería.

6.3.1.2. Fotogrametría

Hasta el año 1995, la fotogrametría era la única solución evidente a la hora de capturar de manera efectiva objetos grandes con unidades de proceso integradas en modelos CAD en 3D.

Sin embargo, la fotogrametría estereoscópica clásica era bastante compleja y requería mucho tiempo. La tecnología nunca llegó a ser una herramienta apropiada en grandes proyectos industriales debido a inconvenientes como la falta de luz, los efectos de los brillos, las sombras, la existencia de tuberías metálicas sin textura, etc. Por otra parte, es posible encontrar programas que permiten llevar a cabo proyectos industriales mediante imágenes convergentes con capacidades de procesamiento totalmente automático.

6.3.1.3. Escaneado láser

Durante más de 25 años, la tecnología de escaneado láser se ha desarrollado y usado en la captura de objetos pequeños, especialmente en la industria automovilística y, principalmente, con fines metrológicos.

El gran avance en el escaneado láser en la topografía de grandes instalaciones industriales data de mediados de la década de los noventa, con la llegada de hardware y software adecuado.

La disponibilidad de procesadores muy potentes ha permitido el reciente desarrollo de los escáneres láser y de software capaz de manejar billones de puntos; también llamado nubes de puntos.

Sin embargo, la clave del éxito en el uso de los escáneres láser 3D continua siendo el establecimiento e implementación de la correcta metodología y flujo de trabajo que mejor se ajuste al trabajo, combinado con la selección del hardware y software más apropiado.

6.3.2. Escaneado láser: adecuación a la finalidad

El trabajo necesita realizarse en el mar sobre buques en constante movimiento. Esto significa que puede ocurrir todo tipo de deformaciones. Como se trata de un entorno industrial muy denso en cuanto a tuberías, estructuras de acero, máquinas... y como el cliente necesita tener la mayor información precisa posible, la mejor técnica a usar es el escaneado láser 3D.

De hecho, en muchos casos, el escaneado láser puede ofrecer ventajas significativas en la producción en campo en relación con los métodos topográficos tradicionales en proyectos

topográficos *as-built* o *as-is*. Las instalaciones petrolíferas marinas proporcionan grandes retos de control dimensional durante todo su ciclo de vida. Durante la construcción, las tolerancias se deben tratar de manera muy precisa entre los bordes y los cascos de las estructuras incluso aunque a menudo se construyen en diferentes instalaciones. El escaneado láser se puede utilizar para validar toda la geometría del sitio de trabajo incluyendo las conexiones y los tornillos de sujeción y verificar las dimensiones y posiciones. En el caso de daños por tormenta, la estructura tiene que ser documentada rápidamente para ayudar a la reparación o la desmantelación.

Sin embargo, es muy importante garantizar la mayor precisión posible. Esto se realiza gracias al uso de dianas que tienen que ser medidas con muy alta precisión.

El equipamiento utilizado en campo fue:

- Escáner láser: Mensi GS100².
- Estación total: Sokkia MONMOS³.

Los datos obtenidos del escáner láser se pueden utilizar eventualmente en programas CAD o entornos especializados como PDS gracias a módulos como Cloudworks.

En otro tipo de programas, las nubes de puntos se pueden visualizar junto con otros dibujos CAD (p. ej. Navisworx).

Mientras tanto, los programas libres se han hecho disponibles y permiten a los usuarios no expertos visualizar nubes de puntos (p. ej. True View). Además de ser capaces de visualizar, medir y marcar escaneados, este programa permite al usuario crear mapas con iconos que muestran la localización en la que estaba estacionado el escáner. Haciendo clic en uno de los iconos, se llama a la imagen del escáner en ese emplazamiento.

6.3.3. Minimización de riesgos utilizando el escaneado láser

La utilización de un escáner láser genera los siguientes beneficios:

- Información digital precisa, fiable y exhaustiva disponible para intercambiar desde el diseño a la fabricación y el ensamblaje.
- Reducción del tiempo de levantamiento.

Los siguientes errores se minimizan:

- Los errores de ingeniería son extremadamente reducidos gracias a la disponibilidad de un gran número de puntos 3D precisos.
- Se reducen los errores de fabricación gracias a la precisión de la ingeniería, permitiendo incluso el diseño de partes más pequeñas.
- Las actividades de ajuste en campo se pueden casi eliminar gracias a la precisión obtenida en las fases previas.

² Mensi ha sido comprada por Trimble. Escáneres alternativos para aplicaciones industriales son proporcionados por varias compañías, entre ellas: Leica, Z&F, Faro, Riegl, Optech ...

³ Sokkia Monmos (ver www.sokkia.com): Estación total diseñada para medir grandes estructuras como barcos, edificios, puentes, etc.

Como consecuencia las incertidumbres financieras en este tipo de proyectos de rehabilitación o extensión están mucho más bajo control:

- Una sola campaña de medición bien definida, con más información que la inmediatamente necesaria. Los datos 3D del escaneado permiten, más tarde, obtener dimensiones sin tener que volver a campo.
- Se mejora toda la planificación del proyecto gracias a la mejora de las revisiones y a la compartición de la información.
- Eliminación de casi todas las tareas de revisión y ajuste en campo, lo que conduce a controlar y limitar los periodos de inactividad.
- Estas tareas de revisión se realizan de forma regular llegando a representar hasta el 10% del coste global de un proyecto. En cambio, los costes de levantamientos as-built (as-is) son, normalmente, menos de un 1% de los costes del proyecto. En otras palabras, invirtiendo más en escaneados de alta definición se reducen sustancialmente las tareas de revisión: asumiendo un coste del 2% para los escaneados láser y una revisión del 4%, el coste del proyecto se reduce un 5%.
- Más ligeras actualizaciones de construcciones también conllevarán menores tiempos de inactividad.

Además, el uso del escáner láser tiene un mayor impacto en temas de seguridad:

- Como las mediciones se realizan a distancia, los equipos de medición pueden elegir las localizaciones del escáner más adecuadas.
- Gracias a la rapidez del escaneado láser, la exposición a posibles peligros es también mucho menor.

En resumen:

Temas	Beneficios
Costes	Una única campaña de medición
	Se reducen las reconstrucciones/revisiones
	Se reduce el ajuste en campo
	Revisiones mejoradas
	Se comparte la información
Planificación del proyecto	Rápida adquisición de los datos
	Diseño mejorado
	Tiempos de parada más cortos
Calidad	Menos trabajo de reconstrucción
	Fabricación precisa de más partes
	Rutinas mejoradas (detecciones de conflictos)
Seguridad	Mediciones a distancia
	Exposiciones a peligros más cortas

6.3.4. Procesos de ingeniería en instalaciones industriales

6.3.4.1. Visión general de las aplicaciones CAD 3D

Durante más de 25 años, el diseño de ingeniería en instalaciones industriales con plantas petroquímicas se ha realizado mediante aplicaciones de diseño asistido por ordenador (CAD/CAE).

Algunos de los programas de aplicaciones de diseño de plantas más conocidos son:

- **PDMS**, programa autónomo desarrollado por Aveva (www.aveva.com).
- **PDS** con *Microstation* (de Bentley www.bentley.com) como plataforma principal, desarrollado por Intergraph (www.intergraph.com).
- **Autoplant** con *Autocad* como plataforma principal, desarrollado por Autodesk (www.autodesk.com).

Todas estas aplicaciones CAD/CAE comparten los mismos principios:

- Todos los datos gráficos y componentes subyacentes se introducen y mantienen en un sistema central. Esto significa que todos los datos que conciernen tuberías, equipamiento, bandejas de cables, estructuras de hormigón y acero, aire acondicionado y electricidad son almacenados en un servidor central.

Estos datos se comparten “on-line” entre todos los miembros del proyecto,

- Figura 147: Arquitectura de programas CAD/CAE - © Bentley Systems. Así, un equipo de diseño puede estar repartido por todo el mundo sin que se pierda información alguna del diseño.

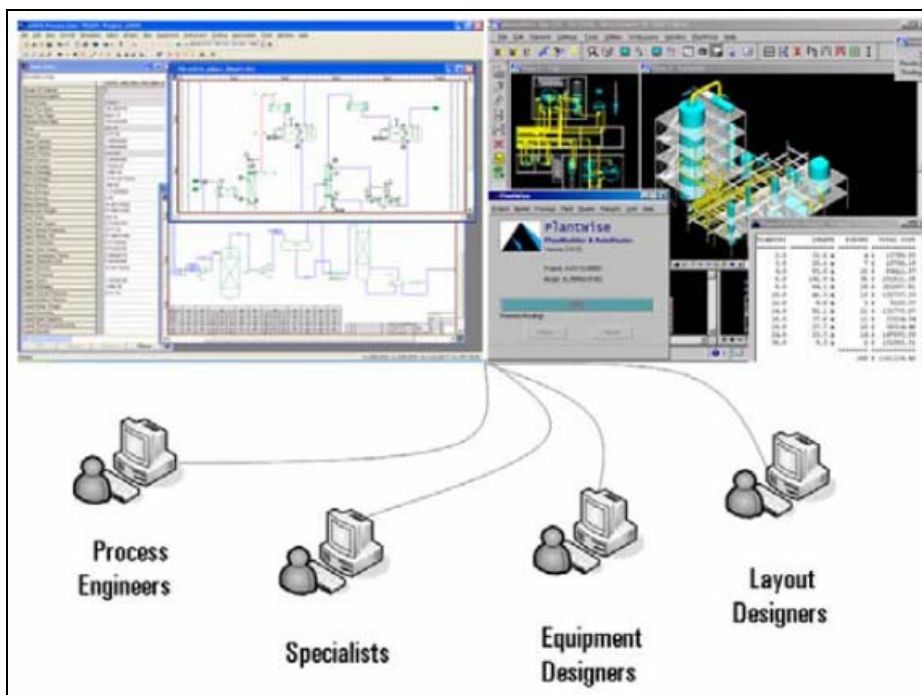


Figura 147: Arquitectura de programas CAD/CAE4 - © Bentley Systems

Otra gran ventaja de estos sistemas es que el diseño se realiza completamente en 3D, basado en especificaciones normalizadas con todas las componentes dimensionales relevantes, descripciones de materiales, etc.

Al final, todos los documentos de construcción y planos se generan a partir de estos modelos 3D. Esto significa que todos los documentos finales estarán vinculados y mantendrán su consistencia con el modelo 3D durante el período de tiempo que dure el proceso de ingeniería.

6.3.4.2. Ingeniería con datos de nubes de puntos

Los siguientes parámetros son extremadamente importantes cuando se inician trabajos de ingeniería básicos en una unidad de proceso existente:

- Margen de tiempo ingenieril.
- Coste de inversión total de las modificaciones.
- Presupuesto de ingeniería.
- Seguridad.
- Ergonomía
- Esperada reducción de tiempo de la unidad durante las modificaciones
- Minimización de las interrupciones de la producción antes del cierre.

Como ya se ha mencionado, las unidades de proceso antiguas apenas tienen documentación “as-built”, lo que significa que no hay documentos precisos ni planos en 2D o 3D disponibles al inicio de un proyecto de modernización. La única información disponible es la unidad misma.

En este tipo de proyectos, la primera prioridad no es crear modelos 3D “as-built”, sino que la unidad rejuvenecida empiece lo antes posible con todas las modificaciones aplicadas, simplemente porque cada tiempo de parada de la producción puede convertirse en un gran coste del cliente.

Pero, ¿por qué no se utiliza un método más convencional en el que se crea un modelo 3D y se importa en herramientas de diseño CAD como puede verse en la Figura 148?

⁴ CAD/CAE: Computer Aided Design (Diseño Asistido por Ordenador) / Computer Aided Engineering (Ingeniería Asistida por ordenador).

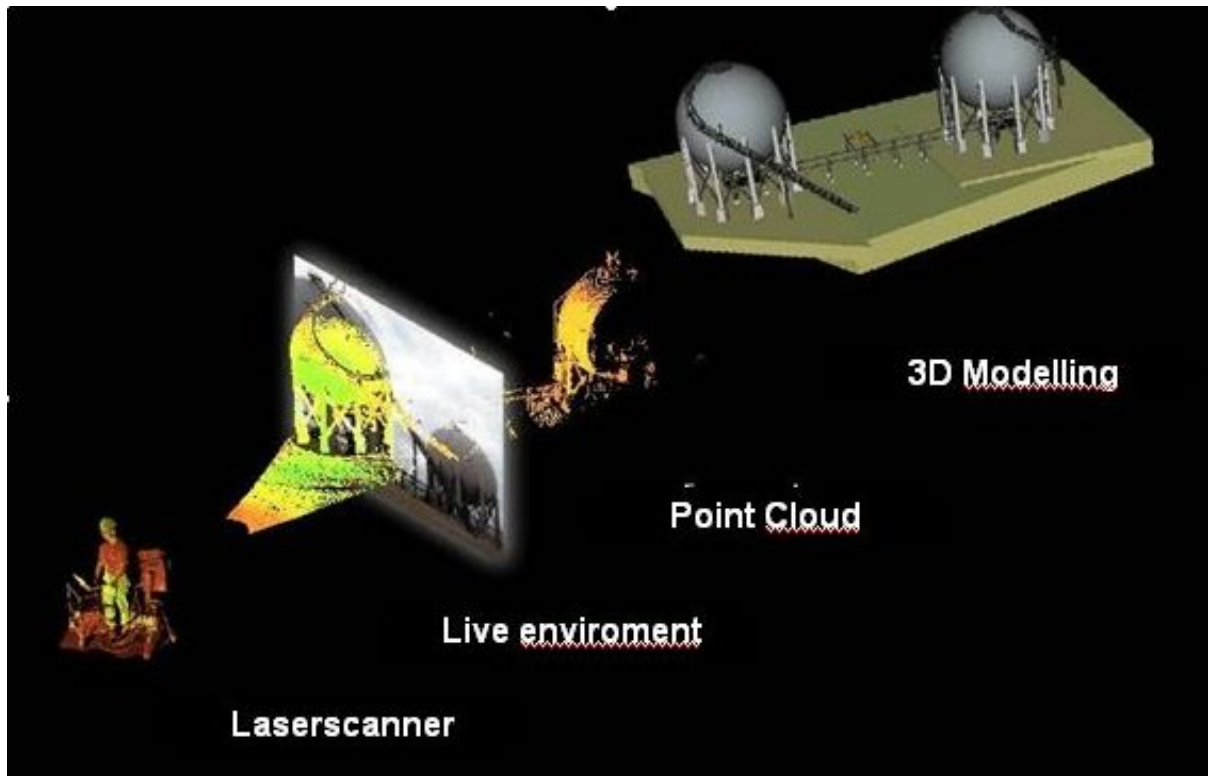


Figura 148: Desde el escaneado láser hasta el modelado 3D - © Leica Geosystems

La experiencia muestra que el trabajo de modelado 3D a partir de nubes de puntos conlleva de 8 a 10 veces el tiempo de escaneado en campo. En otras palabras, cada día de escaneado en campo generará de 8 a 10 días de modelado.

Esto significa que el esfuerzo necesario para crear un modelo 3D a partir de nubes de puntos no es realista en relación con la duración del proceso de ingeniería y el presupuesto. Además, la conversión en un modelo 3D degradará la calidad de los datos y suprimirá importantes detalles técnicos como cables eléctricos, manivelas de válvulas, etc. Por tanto, es importante definir el flujo de trabajo más apropiado para empezar a trabajar a partir de las nubes de puntos (Fig. 149).

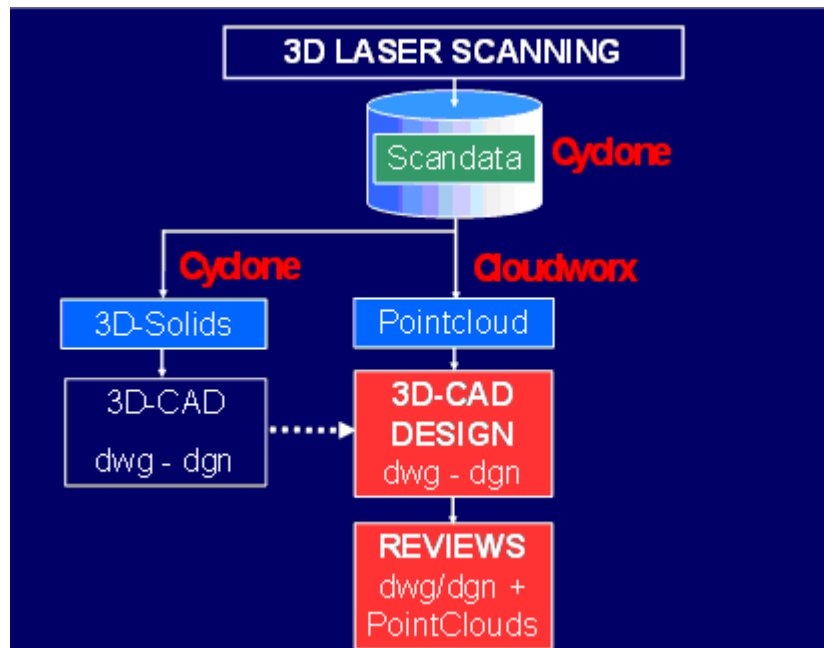


Figura 149: Flujo de trabajo a partir de una nube de puntos- © BnS engineering N.V.

El método seleccionado arriba requiere los siguientes pasos:

1. Selección de un escáner láser⁵ que disponga de las siguientes características técnicas: rapidez, alcance medio, movilidad, ángulo de escaneado de 360 grados.
2. Sistema de coordenadas definido a partir de técnicas topográficas convencionales (estaciones totales o GPS).
3. Mediciones precisas de las dianas de referencia integradas en el sistema de coordenadas de la planta.
4. Consolidación de todos los escaneados⁶ mediante la herramienta de “solape”.
5. Los escaneados consolidados se transfieren al sistema de coordenadas de la planta.
6. Importación del fichero IMP⁷ en *Autocad* ejecutando los módulos *AutoPLANT* y *Cloudworx*.
7. Modelado, solamente, de los puntos de unión⁸ en *Cloudworx*.
8. En el caso de revisiones de diseños “híbridos”, las nubes de puntos junto con el diseño CAD se importan en el programa de revisión como “Navisworks” (véase www.navisworks.com).
9. Opcionalmente, el modelo 3D de la unidad existente se puede realizar después de que la unidad empiece.

Este flujo de trabajo proporciona todos los beneficios necesarios en este proyecto específico: ingeniería basada en nubes de puntos sin la necesidad de generar ningún modelo 3D “as-built”.

⁵ Por ejemplo: el Leica HDS 6000 por diferencia de fase, alcance máximo de 79 metros, velocidad de escaneado de 500.000 puntos/s, error medio de la distancia: 6 mm.

⁶ Escaneado: cada medición de un escáner láser en una posición específica genera un escaneado.

⁷ IMP: extensión de los ficheros de Cyclone

⁸ Puntos de unión: punto de enlace entre dos objetos (por ejemplo, una tubería y un intercambiador de calor)

6.4. Planificación del proyecto de escaneado láser

6.4.1. Definición del problema

Debido a los constreñimientos dimensionales de un barco, un FPSO es, por definición, un entorno industrial altamente congestionado (véase Figura 150):



Figura 150: FPSO en el mar

En esta situación tan específica, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Condiciones ambientales:
 - El escáner láser tiene limitada su operabilidad por la temperatura, y no se puede utilizar de manera efectiva en condiciones de lluvia o ambientes con vapor.
 - Portabilidad.
- Deformaciones:
 - Estáticas: causadas por la carga y descarga del buque.
 - Dinámicas: causadas por el oleaje.
- Vibraciones:
 - El buque está en operación: planta viva.
- Áreas congestionadas:
 - Mala visibilidad.
- Necesidad de numerosas estaciones:
 - Se necesitaba algo de creatividad para posicionar el escáner en las posiciones más adecuadas (véase Figura 151).
 - Siempre no es posible colocar las dianas de los puntos de referencia en los sitios más adecuados.



Figura 151: Posicionamiento del escáner láser - © GlobeZenit

6.4.2. Objetivos

Las expectativas del cliente y los planes acerca de la utilización de los datos impactarán significativamente en la forma del proyecto. Por tanto, es esencial tener un conocimiento claro de las intenciones del cliente y los objetivos antes de proceder con el proyecto.

Algunas cuestiones a considerar son:

- ¿Cuáles son las razones por las que se hace este proyecto?
- ¿Qué objetivos persigue el cliente? ¿Cuál es su finalidad?
- ¿El cliente busca una documentación as-built completa?
- ¿El cliente sólo necesita los puntos de unión críticos? ¿Y un modelo tridimensional?
- ¿Se necesitan planos de curvas de nivel?
- ¿Cuál será su uso? ¿Ingeniería? ¿Realidad virtual o simulaciones? (En el último caso la precisión requerida será menor).

Es este caso de estudio en concreto, el cliente quería determinar el espacio disponible para:

- Analizar si los nuevos módulos encajarán en el espacio.
- Planificación de nuevas rutas.
- Definir dónde se colocarán las estructuras de refuerzo de acero.

El escáner láser 3D se utilizará también para:

- Comprobar si los modelos existentes de la plataforma cuadran con las mediciones as-built.
- Ajustar el modelo a la situación as-built cuando la divergencia es superior a 50 mm.

Los objetivos se tienen que cumplir en:

- Tuberías: diámetro de 15 mm y superiores.
- Pestañas: grosor de 10 mm.

- Acería.

6.4.3. Definición de los documentos a entregar

El proyecto debe empezar con el final en mente para identificar la información clave y los datos que se necesitará tomar, modelar y, finalmente, transmitir al cliente. Por tanto, es importante establecer primero una definición clara de los documentos finales y sus formatos (ASCII, binario), tipos de archivo, etc. De hecho, los resultados finales podrían incluir algunos de los siguientes elementos:

- Nubes de puntos.
- Modelo 3D completo.
- *AutoCAD* (2D o 3D).
- *MicroStation* (2D o 3D).
- PDMS.
- PDS.
- Planos 2D impresos (plantas, secciones y alzados).
- Plano de líneas isométricas.

En la mayoría de los casos, los clientes tienen sus propias plataformas estándar de diseño, por lo que especificarán si su entorno es *AutoCAD*, *MicroStation* u otro entorno CAD. Sin embargo, en algunos casos, el cliente puede no tener clara la idea de cuál es el mejor formato para su trabajo. Entonces, es importante entender la finalidad del cliente en el uso de los resultados o la finalidad del proyecto de modo que permita definir la solución más apropiada.

Es este caso de estudio, como el cliente ya disponía de un modelo PDS del área, los documentos finales requeridos pudieron definirse fácilmente:

- Archivo en formato IMP, para ser utilizado por un ingeniero de proyectos, en *AutoCAD* y en el módulo *Cloudworx*.

6.4.4. Factores de riesgo

Se deben de tener en cuenta los siguientes riesgos:

- Entornos petroquímicos conllevan riesgos debido a los productos que son inflamables, tóxicos...
- Entornos marinos (se necesita entrenamiento de seguridad extra).
- Como el escáner láser no está sometido a pruebas de explosiones ex-proof⁹, era obligatoria una monitorización constante del gas con un detector LEL (*Lower Explosive Limit*, límite mínimo de explosión).

⁹ Ex.-proof: Nivel de aislamiento de un equipamiento que garantiza un nivel bajo de ignición, lo que conlleva un riesgo bajo en ambientes propensos a explosiones

6.4.5. Documentación en campo

Una parte crucial de la planificación consiste en la recopilación de los documentos esenciales necesarios para completar la valoración del proyecto. Estos documentos incluyen: fotografías, planos del lugar, descripción de los equipamientos a escanear, procedimientos de seguridad local, regulaciones de trabajo y otros planos apropiados.

En este proyecto, se utilizó un extracto de modelos PDS de los clientes para determinar las diferentes áreas a escanear y el orden de prioridad.

La Figura 152 ilustra, por medio de un diagrama de bloques, estos elementos y sus prioridades (con códigos de color).

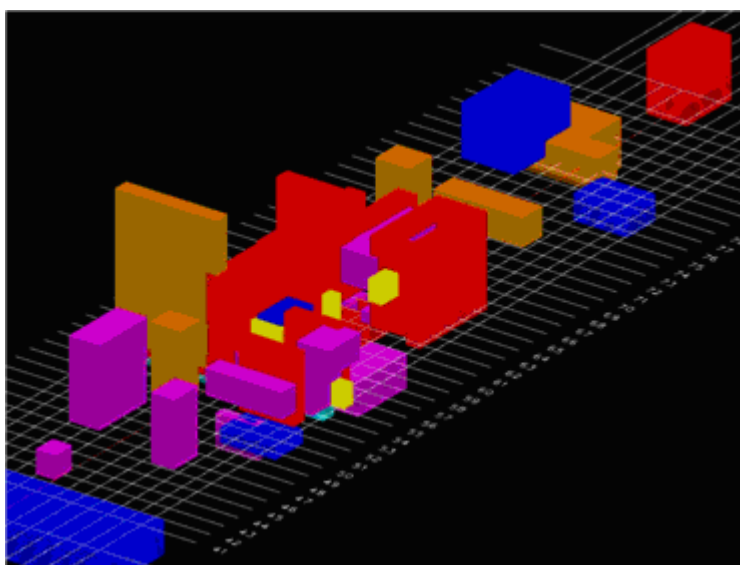


Figura 152: Diagrama de bloques del FPSO - © GlobeZenit N.V.

6.4.6. Elección del escáner

La elección del escáner más apropiado depende sobre todo de los siguientes requerimientos:

- Dimensiones generales de los objetos.
- Ambiente (temperatura, humedad...).
- Resolución.
- Precisión.
- Velocidad.

6.4.7. Entrenamiento del personal

Es obvio que cada miembro del equipo topográfico de campo está bien entrenado. Además de tener un buen conocimiento de las técnicas topográficas tradicionales, tienen que ser expertos en el trabajo con el escáner láser.

En este proyecto todo el personal que actuó en levantamientos de escaneado láser fue entrenado en la utilización del instrumental. El curso de preparación fue un entrenamiento práctico en la oficina de la compañía.

Observaciones:

- Hoy en día, algunos programas incluyen un módulo para preparar al personal antes de la salida a campo. En Cyclone, por ejemplo, hay un módulo llamado escáner simulado. Esta herramienta permite al usuario ejecutar un escaneado virtual de un modelo CAD en 3D.
- Se asumirá que el lector ya tiene algún entrenamiento gracias a esta característica y que se ha revisado los tutoriales disponibles.

6.4.8. Preparación en campo

Una vez en el sitio unos cuantos elementos se deben identificar y clarificar.

6.4.8.1. Riesgos

Los riesgos incluyen la probabilidad de accidentes relacionados con los procesos químicos dentro de instalaciones específicas u otros procesos. Esa es la razón por la que cada instalación tiene sus propios requerimientos y procedimientos a aplicar mientras se trabaja en ella. Estos requerimientos incluyen cursos de seguridad, equipamiento especial de protección, relojes seguros, etc.

Otros riesgos pueden incluir piezas móviles de equipamientos o el trabajo en progreso que se pueden estar moviendo por la instalación.

En este proyecto:

- Se realizaron cursos de seguridad especial organizados por los clientes tanto en tierra como en el mar.
- Protección individual y seguridad:
 - Ropa de seguridad, zapatos de seguridad, gafas de seguridad...
- Material de seguridad adicional:
 - Medidor de ácido sulfhídrico, chaleco salvavidas...

6.4.8.2. Elementos de suministro energético

Como la mayoría de escáneres trabajan con paquetes de baterías, es necesario saber la autonomía de la batería y, así, definir el número de paquetes de baterías necesarios durante el escaneado.

En proyectos de larga duración se debería utilizar una estación de carga para cargar las baterías. Pero hay que asegurarse que las baterías no se cargan en una zona de tipo "Ex-zone". También se debe tener en cuenta la potencia disponible (110, 230 V) y el tipo de enchufe del país.

En este proyecto se disponía de tomas de corriente de 230 V de la conexión europea, disponible en toda la instalación, a una distancia de 50 m alrededor de todas las posiciones del escáner.

6.4.8.3. Restricciones del programa de trabajo

Hay que asegurarse de los tiempos permitidos para el escaneado. Algunas instalaciones permiten escasear sólo durante las noches o los fines de semana. Otros proyectos (p.ej. carreteras) pueden permitir escanear sólo a mediodía para reducir el impacto en el tráfico.

En este proyecto no había ninguna restricción respecto al tiempo de escaneado

6.4.8.4. Notas de campo

Las notas de campo son un crítico factor de éxito y sin ellas, el fallo del proyecto es inminente. Notas claras y concisas son esenciales para una rápida resolución del registro o problemas de modelado.

A continuación se resumen rápidamente los elementos a considerar en las notas de campo:

- Croquis de las posiciones del escáner (número y nombre de cada escaneado).
- Croquis de los puntos de referencia y sus nombres.
- Medición de varias dimensiones para ayudar a verificar la precisión.
- Temperatura y condiciones ambientales generales (para cada escaneado).
- Tiempo, fecha y nombre de la persona que realizó el escaneado y tomó las notas.
- Cuando se utilizan técnicas topográficas tradicionales para llevar los datos a un sistema de coordenadas local, sería ideal anotar también la localización de la estación total.

En este proyecto, varias plantillas de documentos estaban a disposición del equipo de topografía.

6.4.8.5. Entrenamiento en campo

Generalmente, el acceso de trabajo a instalaciones petroquímicas requiere un entrenamiento específico en temas de seguridad. Este entrenamiento dura un par de horas.

En este caso, también se requería un entrenamiento adicional de supervivencia en el mar debido al entorno específico.

6.4.8.6. Deformaciones estáticas y dinámicas en un barco

Como el buque (FPSO) es una plataforma en constante movimiento y deformación, se utilizó una estación total Sokkia Monmos. Además, la distancia máxima de escaneado se limitó a 40 metros.

Cada zona de escaneado se definió con un sistema de coordenadas local. La elección y el uso de la estación total (Monmos), no se discutirá en este caso de estudio. Fue una obligación para conseguir la precisión requerida: el error global fue menor de 20 mm, que en un proyecto de este tipo es un éxito real.

6.4.9. Operaciones del escaneado láser

Una vez ya están claros los puntos mencionados arriba empieza la verdadera fase de toma de datos.

La productividad global de las tareas de escaneado está influenciada por varios factores:

- El tamaño del **equipo de escaneado** (en este caso, 2 topógrafos y varios ayudantes locales).

- El **número de estacionamientos** y la **cantidad de equipamiento** necesario para trasladarlo de una posición a otra.
- La **portabilidad** de cada pieza del equipamiento. Aparatos con ruedas han demostrado ser convenientes y ayudan a tener que reinicializar el escáner.
- El número y el tipo de dianas de los **puntos de referencia**:
 - Existen varios tipos de dianas que se utilizan para el escaneado como las de montura magnéticas, planas sobre trípode, esféricas o semiesféricas, adhesivas, de papel...
 - Las dianas se utilizarán para un registro preciso de los escaneados tomados en múltiples posiciones y para georreferenciarlos a un sistema de coordenadas adecuado.
 - Generalmente, mejor cuanto más lejos se coloca la diana del escáner (de forma que el usuario todavía pueda extraer su centro con alta precisión).
 - Normalmente, las dianas son escaneadas con una densidad muy alta (de 1.2 mm a 2 mm de distancia entre puntos) para poder extraer las coordenadas de su centro con gran precisión y, así, realizar un registro y georreferenciación adecuados.
- El **tiempo de escaneado de las dianas**. A menudo, las dianas se levantan convencionalmente con una estación total.
- La **programación** del escáner. La programación consiste en instruir el escáner por medio de un controlador. Reutilizando los mismos parámetros en cada estacionamiento, el tiempo de programación se minimiza.
- El **tiempo de escaneado**. El escaneado es un proceso automático que puede durar desde varios minutos hasta más de una hora. Para escaneados largos, es aconsejable que el equipo realice otras tareas de producción al mismo tiempo.
- **Asegurar la calidad**. Es importante determinar si los escáneres o las dianas se movieron inadvertidamente durante el escaneo. Otra herramienta altamente eficiente es importar los puntos tomados con técnicas topográficas tradicionales a los datos del escáner.

6.5. Simulación del escaneado

6.5.1. ¿Qué es la simulación del escaneado?

La simulación del escaneado consiste en disponer de los controles de un escáner real pero realizando el proceso de escaneado en un entorno virtual. Para este proyecto se utilizará la simulación del escaneado del programa Cyclone. Con este tutorial se proporciona una base de datos con un modelo 3D real de instalaciones petroquímicas.

6.5.2. Preparación de la misión de escaneado

Se proporcionan los siguientes datos para la misión de escaneado:

Escáner: Leica Geosystems HDS 2500.

Campo de visión 40*40°.
16 minutos para escaneado de 1000*1000 puntos.

Puntos de referencia artificiales: 25 dianas esféricas.

Modelo: modelo 3D de las instalaciones petroquímicas. Dimensiones aproximadas:
Longitud: 15m. Ancho: 12 m. Alto: 7 m.

Añade la base de datos [SimulatedScanningScene.imp](#) a Cyclone de manera que seas capaz de ver el modelo (véase el apartado 5.5 para detalles). Familiarízate con la instalación petroquímica. Deberías ser capaz de detectar las dianas esféricas y reconocer que el trabajo de escaneado será por el interior y el exterior.

La Figura 153 muestra un boceto del entorno de escaneado virtual. Generalmente, es importante crear un croquis para el bien de la planificación (localizaciones de las dianas y del escáner) y la comprensión del proceso de registro (véase el apartado 5.3.3).

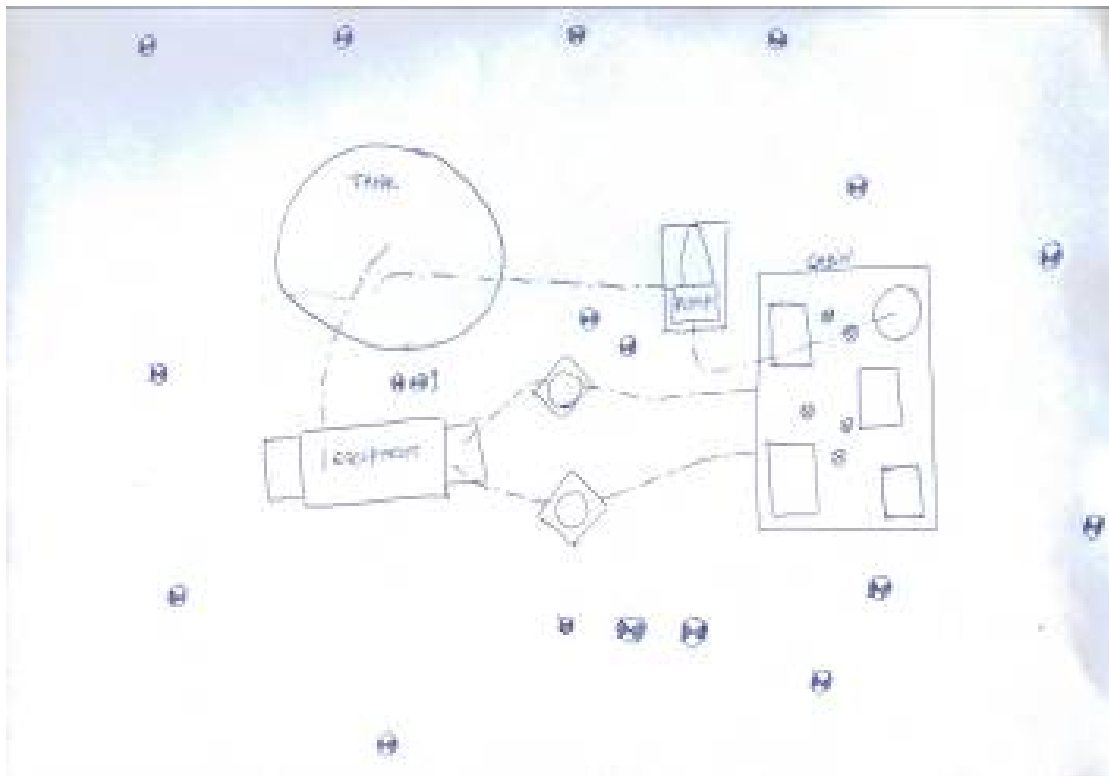


Figura 153: Boceto del entorno virtual de escaneado

En la base de datos encontrarás un ModelSpace llamado "SimulatedScanning Scene" que contiene el modelo de una pequeña planta y multitud de dianas esféricas (Figura 154).

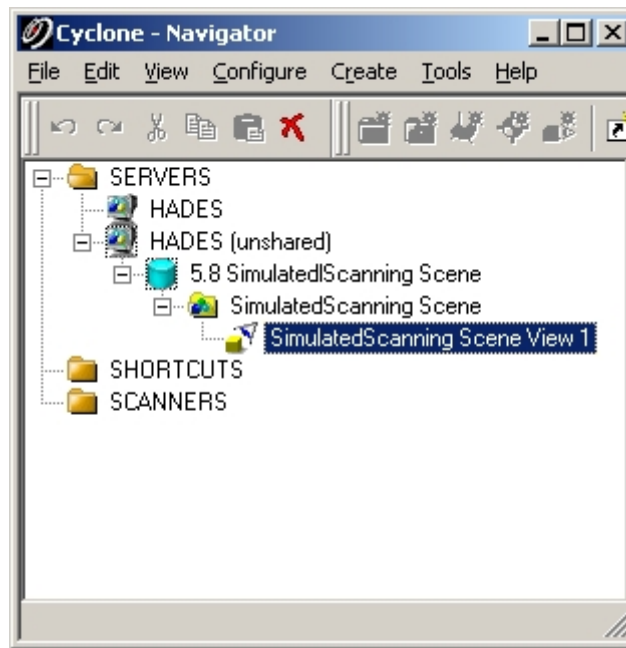


Figura 154: Navegador de Cyclone mostrando el ModelSpace simulado

A realizar: Abre SimulatedScanning Scene View 1. Muévete por la escena para familiarizarte con el modelo y las posiciones de las dianas. En un proyecto real, esto sería un paseo de reconocimiento a través del área escaneada y la identificación de los emplazamientos de las dianas.

Nota: dentro del edificio hay algunos elementos de interés que también se necesita escanear.

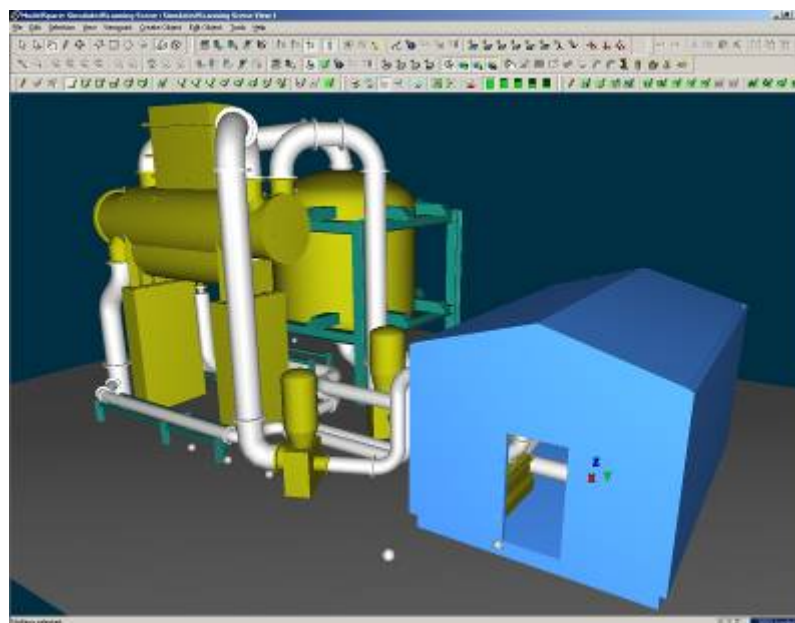


Figura 155: Vista del ModelSpace Simulated Scanner

6.5.2.1. **Estacionamiento de un escáner simulado**

Antes de estacionar el escáner, necesitamos definir la posición óptima del escáner. Como ya se ha comentado en el apartado 3.1.3, es importante encontrar una posición que tenga la máxima cobertura posible y las menos obstrucciones posibles que causan las sombras

A realizar: gira, desplaza y haz zoom en el ModelSpace hasta que creas que estás en una posición de escaneado óptima. Ten presente que el escáner necesita estar sobre el suelo o sobre una plataforma estable.

Nota: asegúrate de que la mayoría de las dianas son visibles y que una gran parte de la escena está cubierta.

Ahora empezaremos con la fase de escaneado. Crea un escáner simulado con la opción **Tools > Scanner > Create Simulated Scanner** (Figura 156).

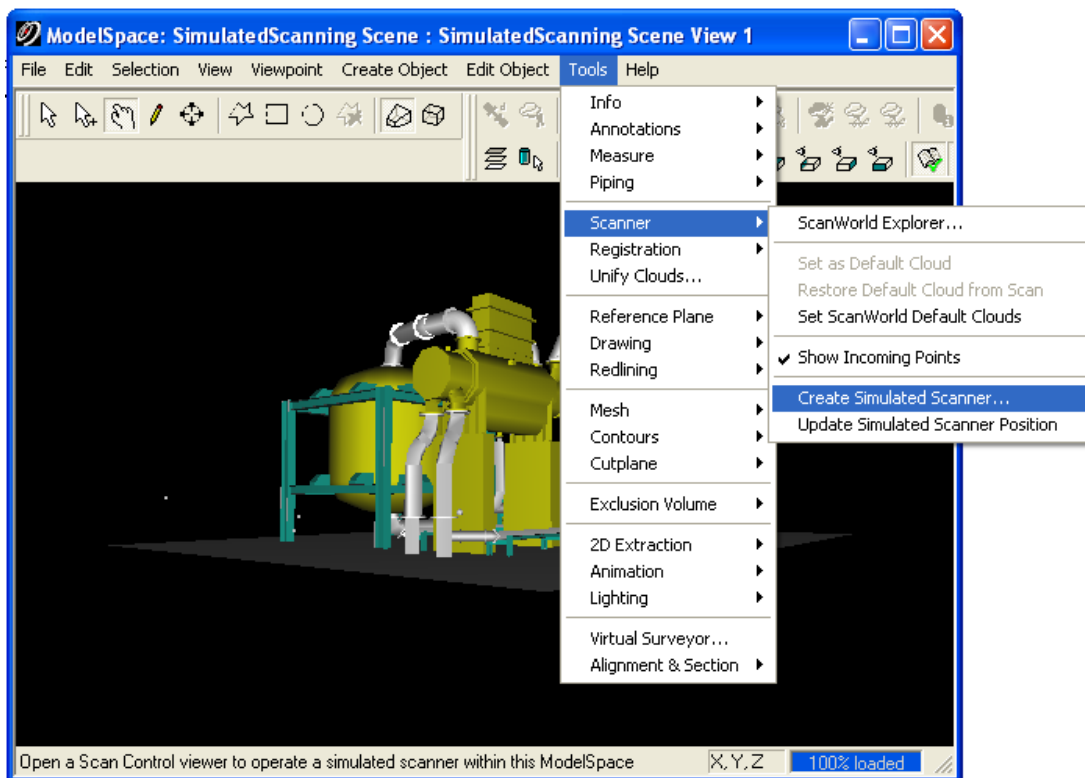


Figura 156: Creando un escáner simulado

En el cuadro de diálogo que aparece, selecciona la base de datos “5.8 SimulatedScanningScene.imp” y pulsa **Create**. En la base de datos se crea una carpeta donde se guardarán los escaneados simulados. Nombra la carpeta “Simulated Scans” y pulsa **OK** (Figura 157).

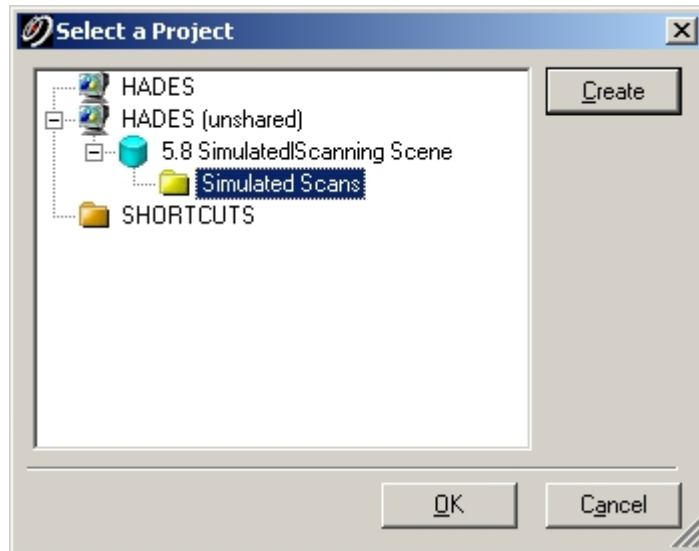


Figura 157: Cuadro de diálogo de los escaneados simulados

Entonces aparece la ventana de control del escáner simulado (Fig. 158). Conecta tu ordenador con el escáner simulado mediante la opción *Scanner > Connect*. En la parte inferior de la ventana, la barra de estado del escáner mostrará cuando está preparada la conexión.

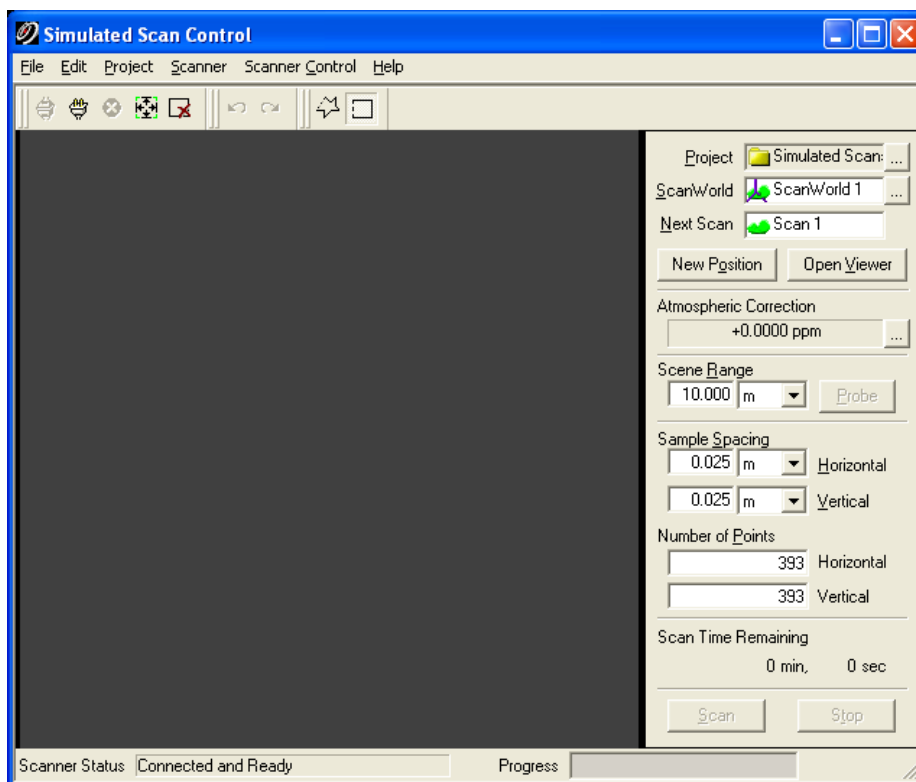


Figura 158: Ventana de control del escáner simulado

Para saber lo que el escáner escaneará, creamos una imagen con la cámara incorporada. Elegimos la opción *Scanner Control > Get Image* (Fig. 159).

La ventana del escáner simulado mostrará el área que se puede cubrir con el escáner desde la posición y orientación actuales. Comprueba que todas las dianas deseadas son visibles.

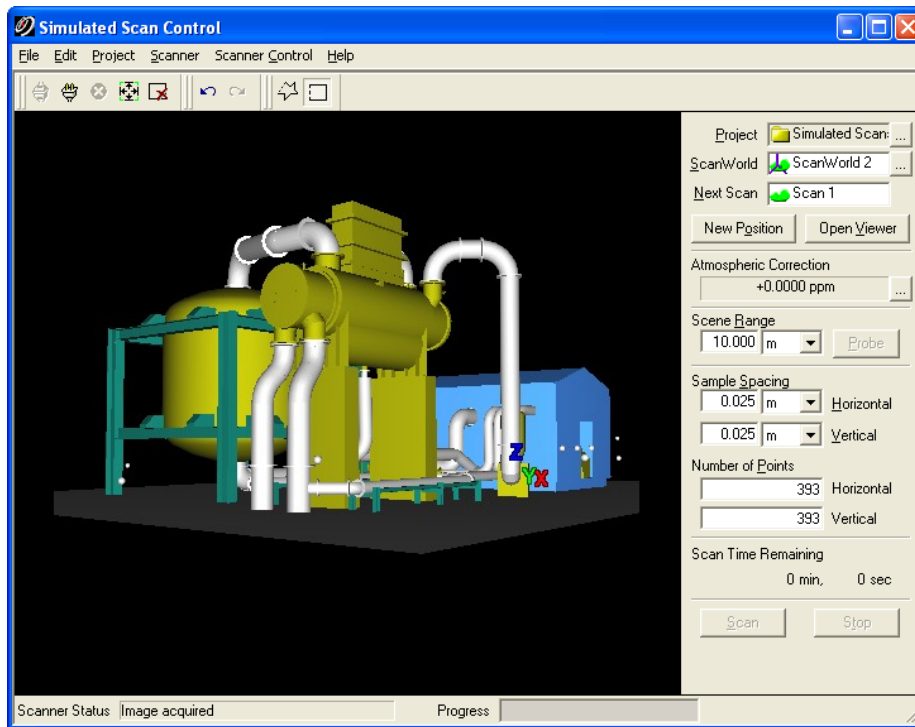


Figura 159: Adquisición de la imagen del escáner simulado

Si la vista no corresponde a la vista deseada o no están visibles todas las dianas deseadas, no cierres la simulación del escáner, sino vuelve a posicionarte en el ModelSpace original y actualiza tu posición mediante *Tools>Scanner>Update Simulated Scanner Position*.

6.5.2.2. Definición de los parámetros de escaneado

Una vez conseguido el paso anterior, se necesitará definir la resolución. Es función de la distancia del objeto al escáner porque la resolución del escáner determina el salto del incremento de ángulo, y no una distancia fija. Por tanto, la resolución se define de acuerdo a una cierta distancia del escáner. Para definir la resolución en Cyclone, se utiliza la función "*probe*". Probando se mide la distancia entre el objeto y el escáner. A partir de la distancia y el espaciado de la muestra elegida, se calcula el incremento de ángulo, definiendo así la resolución del escáner.

Nota: en realidad se debería comprobar la distancia a un objeto alejado y definir la resolución a esa distancia. Todos los objetos más cercanos al escáner se escanearán con una resolución mayor. Algunas veces puede ser preferible centrarse en objetos de interés y así reducir el número de puntos en el escaneado. Esto hace que se tarde menos tiempo.

Para probar, haz clic con el puntero del ratón sobre un objeto de interés que esté lejos del escáner. Aparecerá una marca donde se haga clic. Elige la opción *Scanner Control > Probe* o utiliza el botón *Probe* de la derecha para medir la distancia a este punto. La distancia se muestra en el campo "Scene Range" (Figura 160).

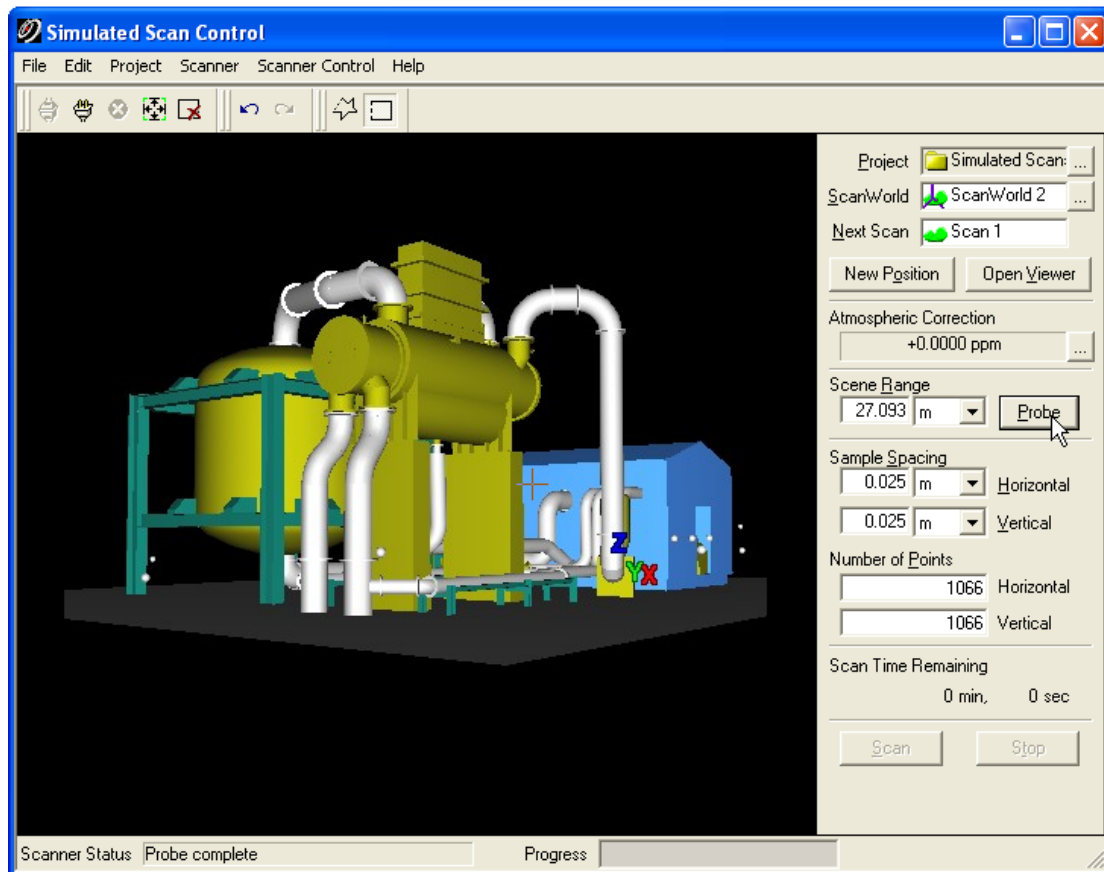





Figura 160: Pruebas para determinar la resolución del escáner

Ahora cambia el *Sample Spacing* que se muestra en el lado derecho de la pantalla. Cuando se cambia el *Sample Spacing*, el número de puntos también cambia. Alternativamente, se puede definir los parámetros *Scene Range* y *Sample Spacing* sin probar o incluso introducir el valor de *Number of Points* sin preguntarle por los parámetros *Scene Range* o *Sample Spacing*. Sin embargo, estas alternativas no proporcionan la sensibilidad requerida con la escala de la escena y el detalle de escaneado final. En este caso, se elige un valor de distancia entre puntos (*Sampling Spacing*) de 20 mm x 20 mm a una distancia de 27.093 m, dando un total de 945 por 945 puntos.

Nota: Evidentemente, la definición de Scene Range no significa que el escáner no escanee nada a una distancia mayor.

Nota: El escáner simulado se basa en uno de los primeros escáneres de Leica (HDS2500). Este escáner sólo permitía escanear 1000 puntos horizontalmente y 1000 puntos verticalmente.

6.5.2.3. Escaneado

Cuando todos los parámetros se han establecido, selecciona el área que desees escanear en la ventana de simulación del escáner. Se puede hacer utilizando las herramientas *Rectangle Fence tool* , *Polygonal Fence tool* , o eligiendo *Scanner Control > Target All* . El tiempo total de escaneado es estimado y se muestra en la parte inferior derecha del diálogo.

Pulsa el botón *Scan*. Durante el escaneado, el proceso de escaneado se puede monitorizar haciendo clic en *Open Viewer*. Esto abrirá un nuevo ModelSpace en el que se puede ver el proceso de adquisición del escáner en tiempo real (Fig. 161). Se puede rotar, hacer zoom o desplazar el nuevo ModelSpace mientras se escanea; también al final del proceso (Fig. 162).

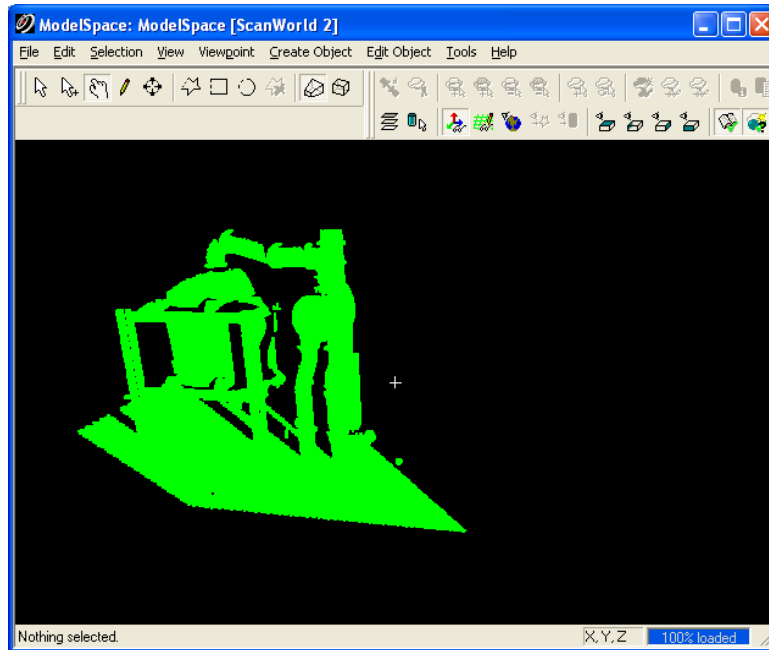


Figura 161: Vista en tiempo real del proceso de escaneado

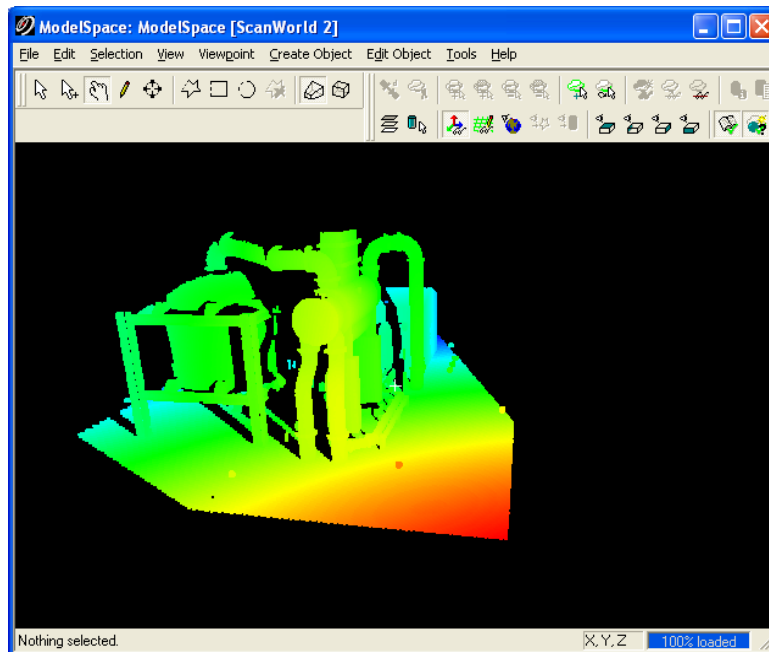


Figura 162: Escaneado final

Ahora, cierra el nuevo ModelSpace creado y vuelve a la ventana de control de la simulación del escáner.

6.5.2.4. Escaneado de las dianas

Para realizar el registro, las dianas esféricas se deben escanear a mayor resolución (escaneado fino). Utiliza la herramienta *Rectangle Fence Tool* de la ventana de simulación del escáner para seleccionar manualmente una diana esférica (Figura 163). Cambia el parámetro *Sample Spacing* a 1x1 mm o 2x2 mm, según la distancia al escáner y pulsa *Scan*. Observa que se ha añadido un nuevo *ScanWorld* dentro del actual. Un *ScanWorld* puede contener múltiples escaneados, todos ellos realizados desde la misma posición del escáner.

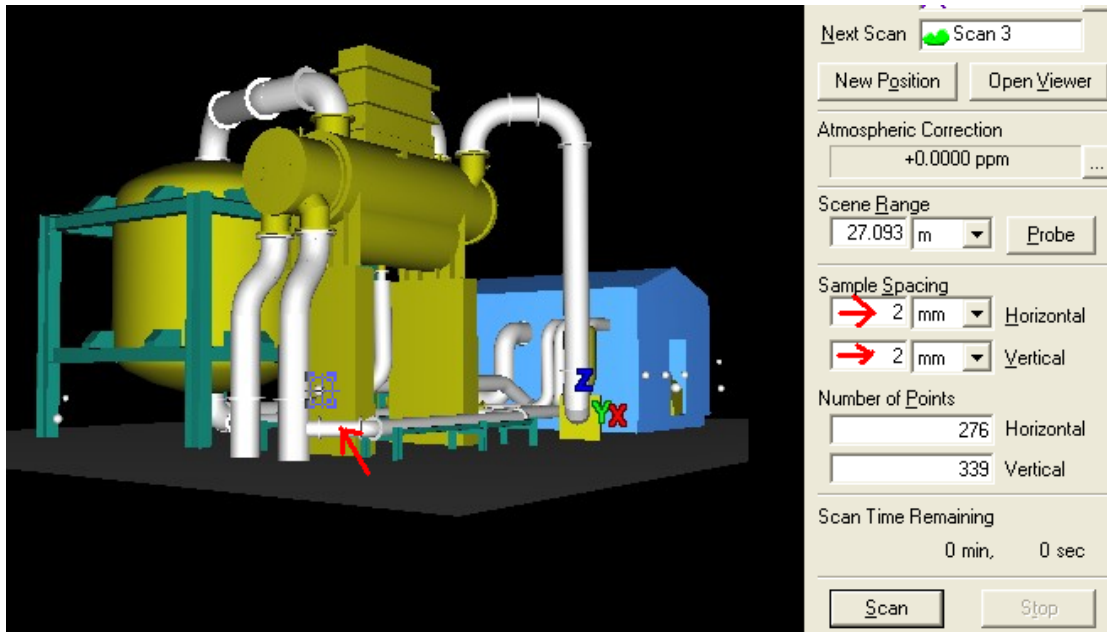


Figura 163: Selección de una diana esférica para realizar un escaneado a mayor resolución

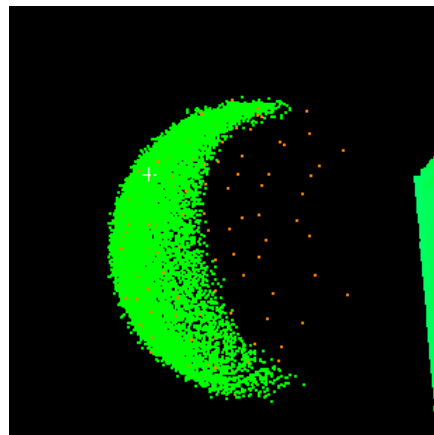


Figura 164: Escaneado a mayor resolución de una diana (los puntos rojos son parte del escaneado a menor resolución y los verdes del escaneado a mayor resolución)

A realizar: Repite este procedimiento con el resto de dianas esféricas visibles desde esta posición del escáner.

6.5.2.5. Moverse a una nueva posición

Cierra la ventana del nuevo *ModelSpace*. Activa el *ModelSpace SimulatedScanning Scene View 1* y cambia el punto de vista a la siguiente posición deseada. Informa a la simulación

del escáner sobre la nueva posición eligiendo *Tools > Scanner > Update Simulated Scanner Position* (Figura 165).

Vuelve a la ventana de simulación deseada y ejecuta *Scanner Control > Get Image*. Comprueba si todas las dianas esféricas necesarias están visibles. Entonces, pulsa *New Position*. Se crea un nuevo ScanWorld. Se puede necesitar volver a ejecutar la orden *Get Image*.

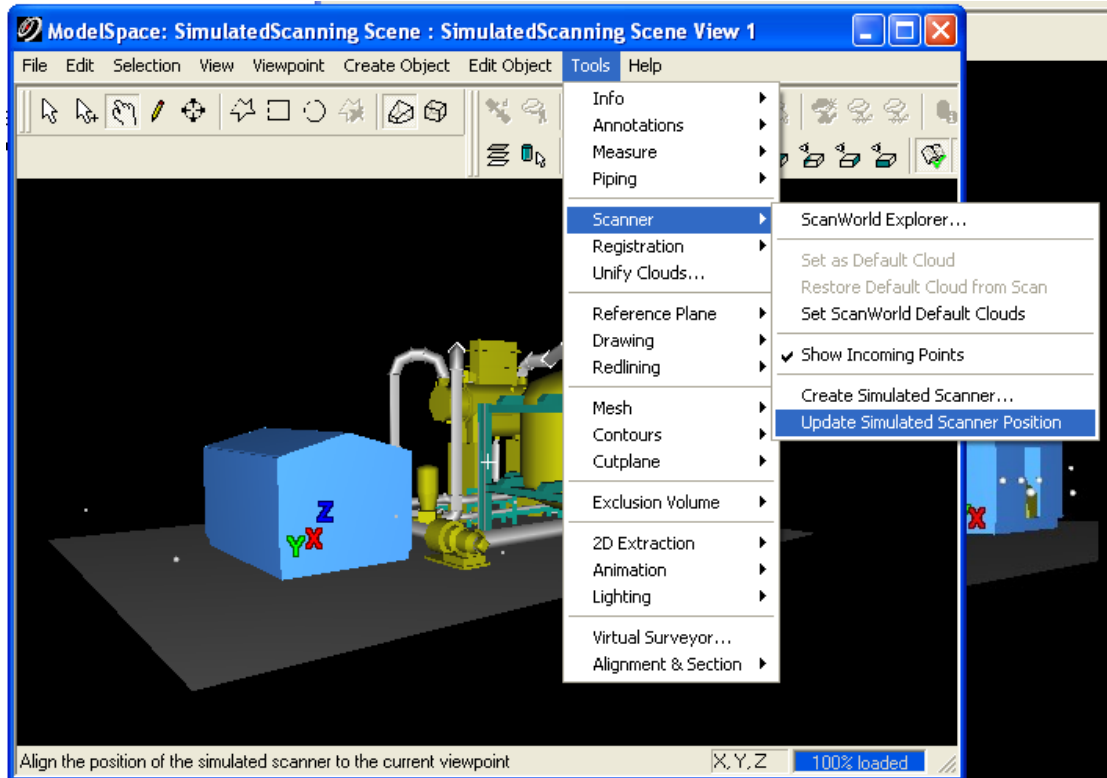


Figura 165: Actualización a una nueva posición del escáner

A partir de este punto, el procedimiento no difiere del descrito anteriormente (pasos **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.** y 0). Se pueden utilizar los mismos parámetros que el Scan1. Por consiguiente, salta el procedimiento de prueba.

6.5.2.6. Preparación de las nubes de puntos para el registro

En el navegador de Cyclone se podrán encontrar los nuevos escaneados de simulación. Para el registro a partir de dianas esféricas, se necesita etiquetar todas las dianas encontradas en cada nube de puntos.

Primero, asegúrate de que todas las dianas de la lista del croquis tienen un único nombre y número. Esto ayuda a identificarlas en cada una de las nubes de puntos.

En la ventana del navegador, abre "ScanControl: ModelSpace [ScanWorld 1] View 1" del ScanWorld 1. Este ModelSpace muestra todos los escaneados capturados desde la primera posición del escáner, incluyendo las dianas a alta resolución (Figura 166).

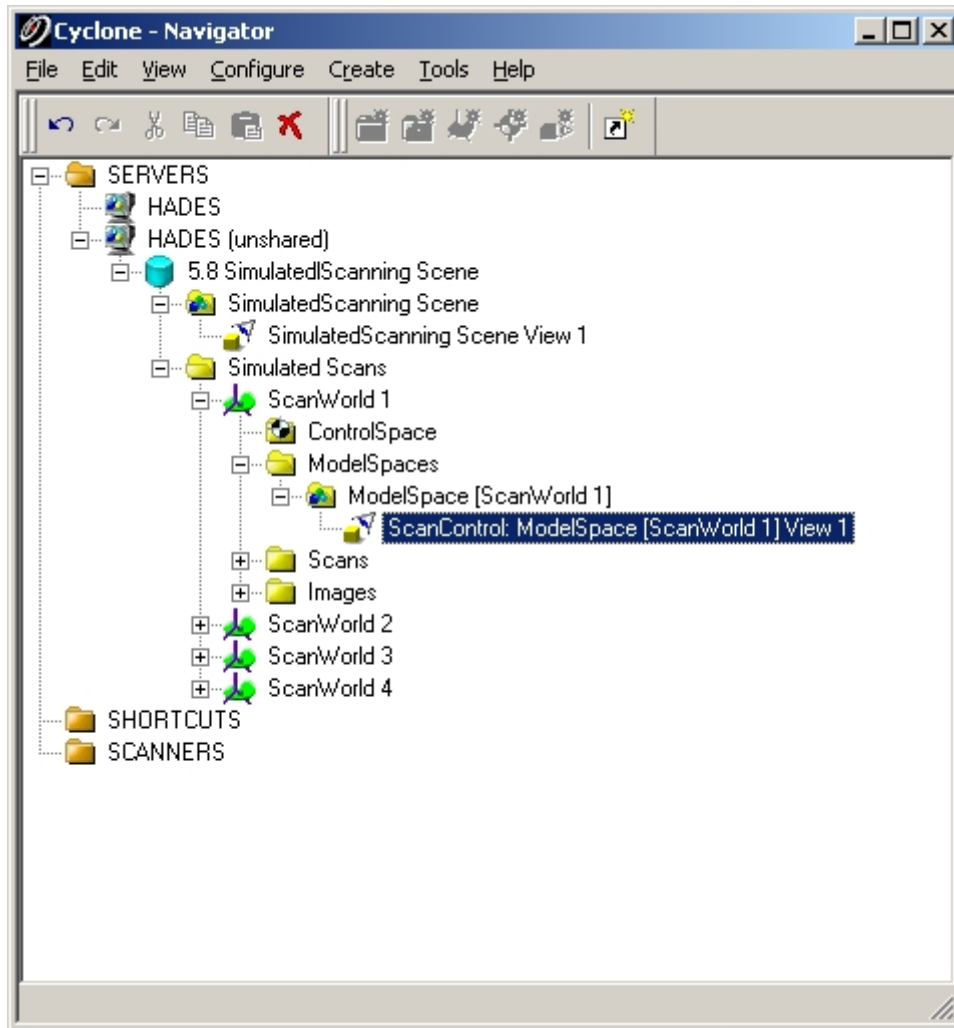


Figura 166: Selección de los escaneados simulados en el navegador de Cyclone

En este ModelSpace, localiza una diana esférica, haz zoom más y selecciona su nube de puntos haciendo clic en un punto de la diana. La nube de puntos seleccionada se destaca mientras que las otras se atenúan. A continuación ejecuta la opción *Create Object > Fit to Cloud > Sphere Target* (Figura 167).

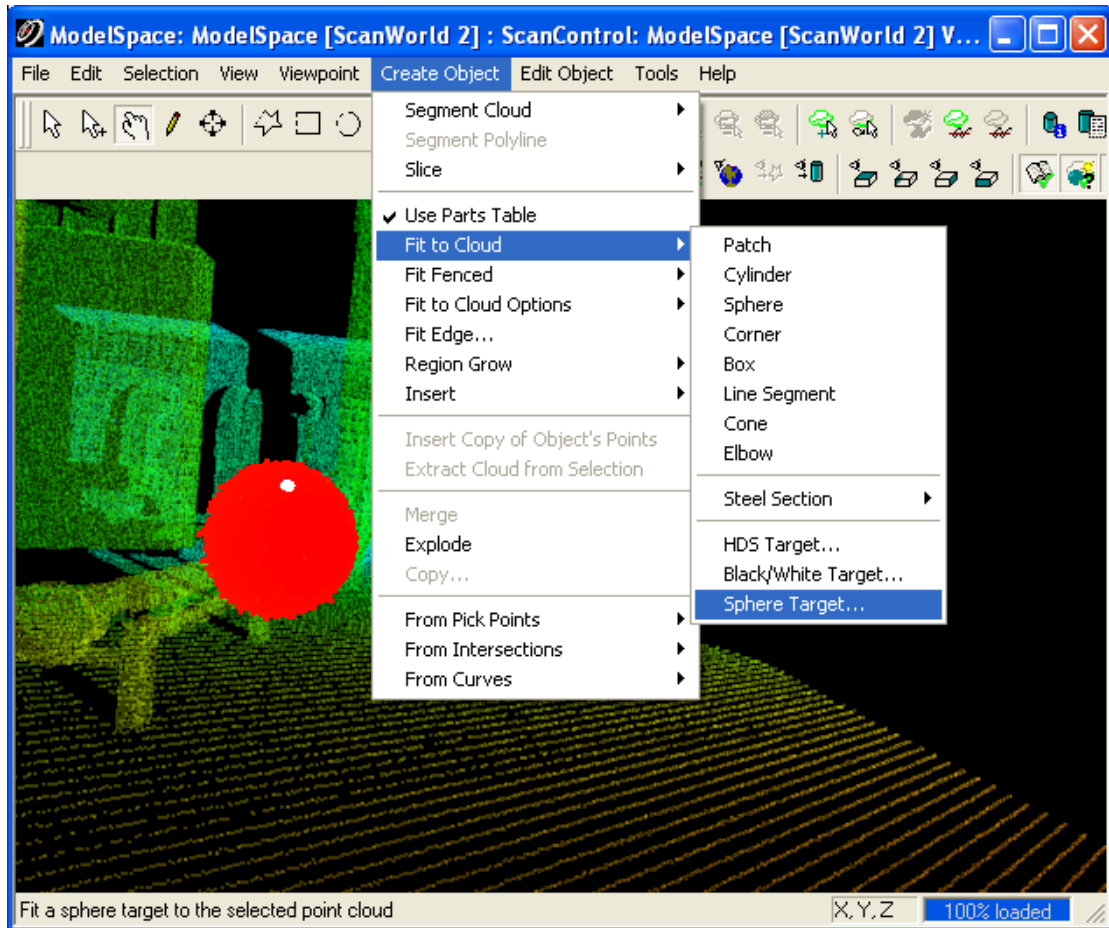


Figura 167: Ajuste de una diana esférica a la nube de puntos

Se abre una nueva ventana que permite identificar la diana. Aquí, el croquis es de gran valor. Introduce un ID para la diana (p.ej. *target#2*) y pulsa el botón *OK* (Figura 168).

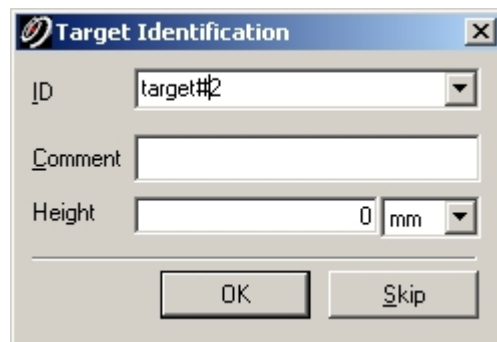


Figura 168: Ventana de identificación de las dianas

Se ajusta una esfera a la nube de puntos. Ejecuta *Tools > Annotations > Show Annotations* para mostrar la etiqueta de la diana (Figura 169).

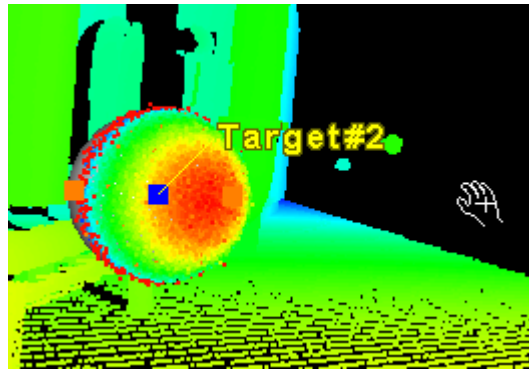


Figura 169: Diana con etiqueta

A realizar: Repite estos pasos con todas las dianas esféricas que encuentres en cada nube de puntos.

El paso necesario para realizar el registro se explica en el apartado 5.6. Las nubes de puntos registradas de esta escena deberían parecerse a las que aparecen en la Fig. 170.

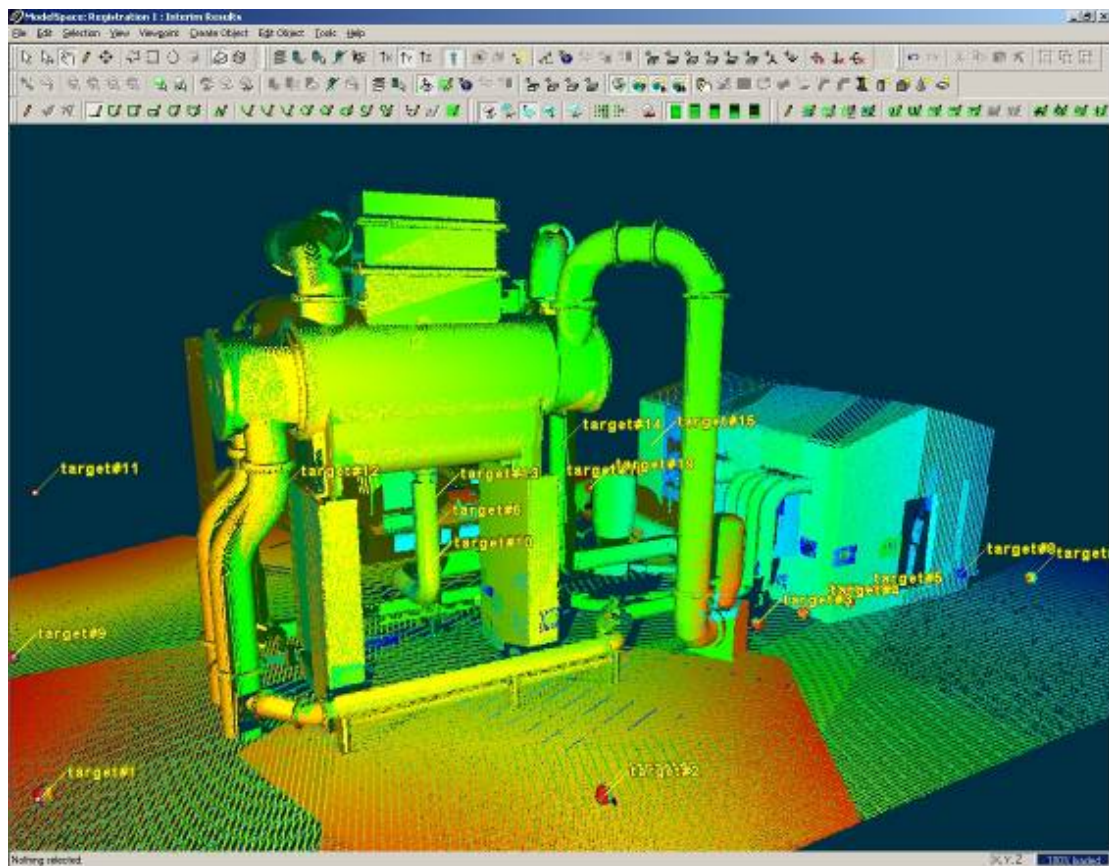


Figura 170: Nubes de puntos registradas

6.5.3. Misión de la simulación del escáner

A realizar: Escanea virtualmente toda la instalación petroquímica y registra las nubes de puntos. El resultado final debe parecerse a la imagen de arriba.

- Dibuja un croquis de la instalación petroquímica. Los detalles específicos y las localizaciones de las dianas deberían definirse bien.
- Planifica las localizaciones óptimas de las dianas a partir del croquis y las vistas del modelo.

- Escanea virtualmente la instalación petroquímica.
- Haz el registro mediante las dianas.

Es importante tener dianas divididas en todas las nubes de puntos

6.5.4. Procesamiento de los datos

6.5.4.1. Registro, elección del método

El registro es el proceso de alineación de varios escaneados individuales (localizaciones o emplazamientos del escáner) en un único sistema de coordenadas. El registro o alineación se crea estableciendo un sistema de constreñimientos en el que cada objeto, elemento geométrico o nubes de puntos aparece en la misma posición en dos o más emplazamientos del escáner para establecer una relación precisa entre cada emplazamiento.

GlobeZenit NV tiene la política de utilizar siempre dianas o puntos de referencia artificiales por las siguientes razones:

- GlobeZenit NV, un empresa de levantamientos topográficos terrestres, considera que un escáner láser es otro aparato topográfico, pero con ventajas específicas. Por tanto, el principio de medición es el mismo si se realiza el levantamiento con una estación total o con un escáner láser.
- La calidad y precisión del proyecto final es mucho más controlable si se utilizan dianas con identificadores porque se pueden realizar varias comprobaciones para verificar la precisión. Un registro típico, realizado por GlobeZenit, tiene un error medio absoluto menor de 3 mm.

6.5.4.2. Registro utilizando el solape

Algunas empresas utilizan el registro mediante solape (también llamado registro nube a nube). Esta técnica alinea nubes de puntos con solape. Se puede hacer una demostración de esta técnica con datos tomados de la simulación del escáner.

Para más información sobre este método véase los apartados 3.5.1.2 y 3.5.1.3.

6.5.4.3. Registro utilizando puntos de referencia artificiales (dianas)

En este caso de estudio, sin embargo, el registro mediante puntos de referencia artificiales o dianas se utilizó para combinar varios emplazamientos del escáner.

La nube de puntos importada se utilizará para la demostración del registro mediante dianas. Para más información sobre esta técnica se puede ver el apartado 3.5.1.1.

6.5.5. Creación de animaciones con las nubes de puntos

Como producto adicional de salida, se realizó un vuelo animado que proporciona una potente herramienta de presentación a los miembros del equipo que no han visitado el buque FPSO. En este proyecto, se utilizó Cyclone para generar la animación.

6.5.6. Proyecto de escaneado láser – Documentos a entregar

Los documentos finales a entregar al departamento de ingeniería incluyen la base de datos IMP de Cyclone y la animación.

En la Figura 171 se pueden ver imágenes de la nube de puntos registrada y procesada.

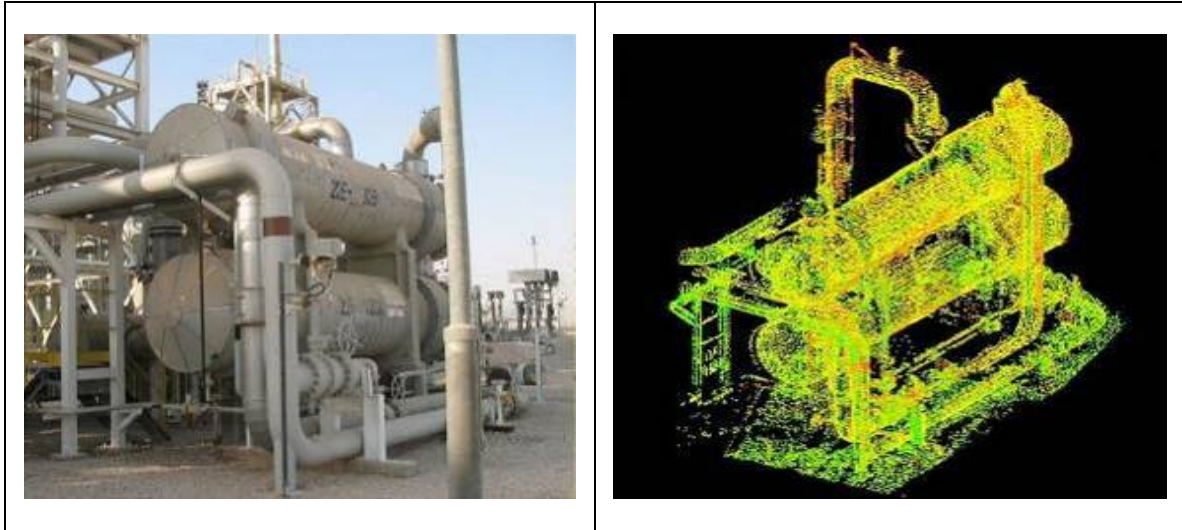


Figura 171: Izquierda: equipamiento – derecha: escaneado (nube de puntos) del mismo equipamiento - © GlobeZenit N.V.

Los últimos pasos pueden ser representaciones isométricas o incluso sólidos CAD como los que se muestran en la Figura 172.

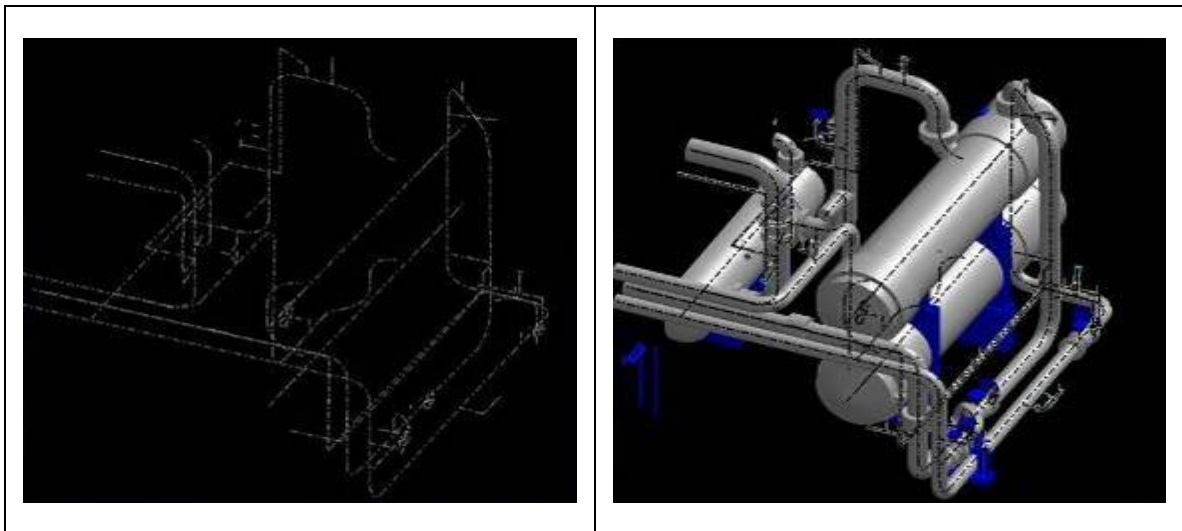


Figura 172: Izquierda: vista isométrica de los ejes de revolución – Derecha: representación sólida - © BnS engineering N.V.

6.6. Planificación del proyecto de ingeniería

6.6.1. Trabajo con Cloudworx

Las nubes de puntos se pueden importar en AutoCAD o MicroStation de la misma manera que en Cyclone, a través del formato IMP (véase el apartado 5.7.1), Figura 173.

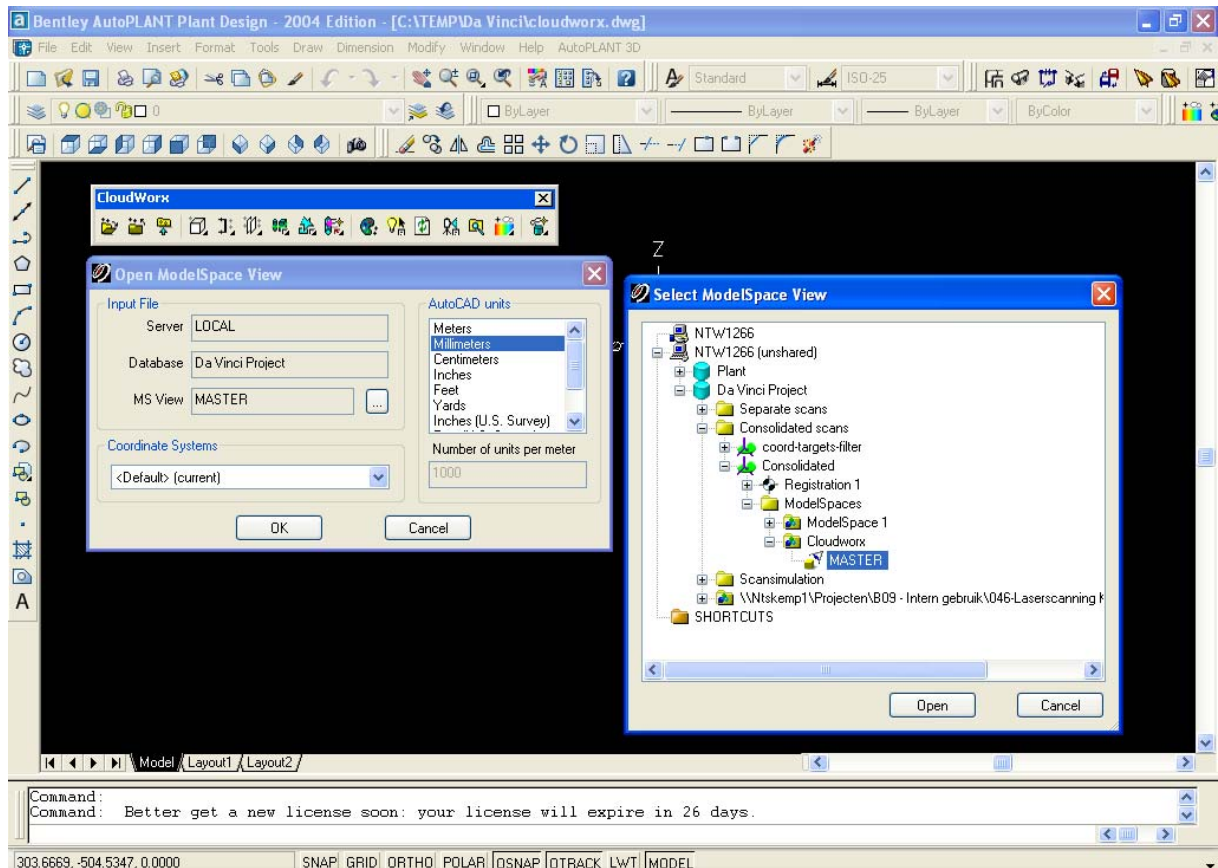


Figura 173: Carga de una nube de puntos en un programa CAD - © BnS engineering N.V.

Una vez cargada la base de datos se puede ver el escaneado importada. Pero, ¿por qué no importar todas las nubes de puntos en AutoCAD a través del formato dxf, por ejemplo?

La respuesta es que AutoCAD sólo puede manejar un millón de puntos sin la aplicación Cloudworx, aplicación que visualiza los puntos de manera más inteligente que AutoCAD. Cloudworx proporciona algunas funcionalidades (principales) adicionales:

- Selección rápida a los puntos.
- Medición entre tuberías.
- Extracciones y cortes en las nubes de puntos.
- Reconocimiento de tuberías y otras formas, y modelización.

En el siguiente ejemplo (Figura 174) lo que se pretende es añadir un bypass entre dos tuberías existentes. Cloudworx se utiliza para reconocer los ejes de las tuberías y localizar exactamente los puntos de unión.

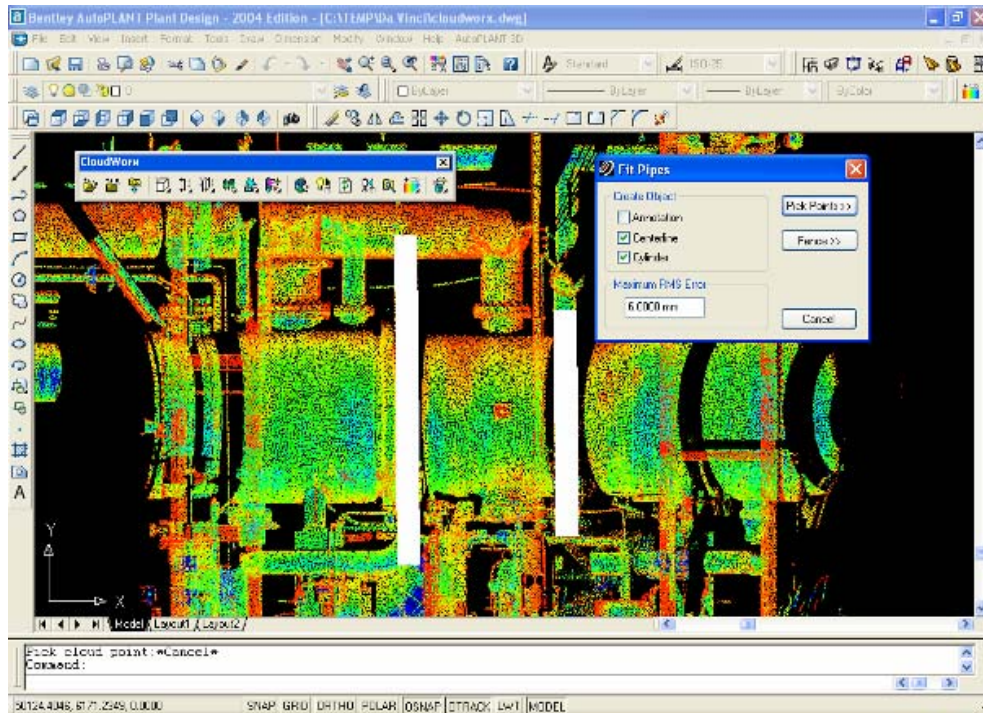


Figura 174: Modelado 3D a partir de las nubes de puntos - © BnS engineering N.V.

Ahora que ya tenemos los ejes exactos de las tuberías existentes, las piezas de la tubería se pueden ubicar con la aplicación de diseño de plantas, AutoPLANT. Una vez hecho, el nuevo bypass se puede dibujar en AutoPLANT (Figura 175 y Figura 176) a partir de especificaciones que trabajan con el producto, su presión interior y temperatura.

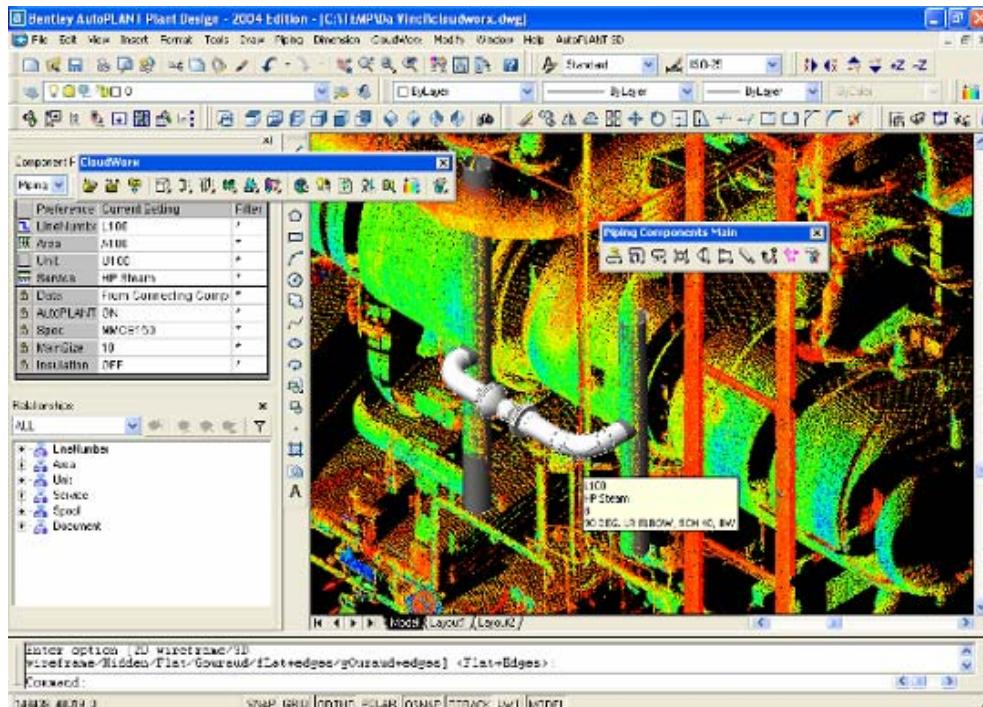


Figura 175: Diseño 3D de una extensión en una nube de puntos - © BnS engineering N.V.

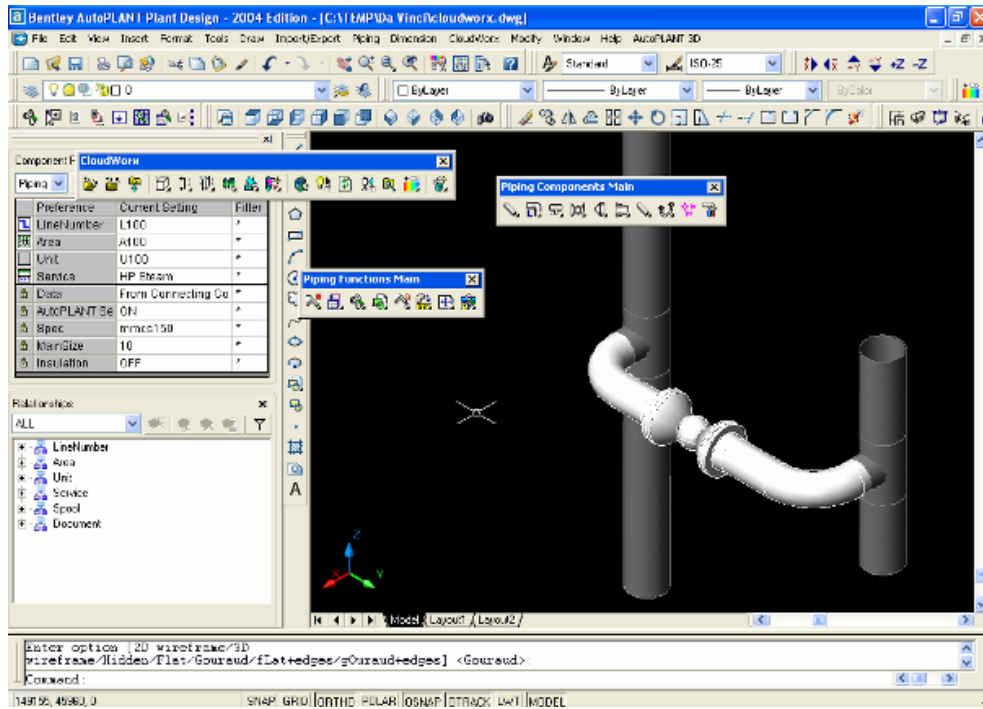


Figura 176: Representación sólida de la extensión diseñada - © BnS engineering N.V.

Ahora que ya se ha realizado en trabajo de diseño del bypass con una válvula de bloqueo, se puede generar automáticamente los documentos de prefabricación, también llamados "Isométricos" (Figura 177). Este Isométrico incluye toda la información dimensional y la lista de material necesario (Figura 178). Esto significa que la tubería nueva completa será construida y preensamblada en una tienda. En campo, las únicas acciones de soldado que se realizarán son los puntos de unión con las tuberías existentes.

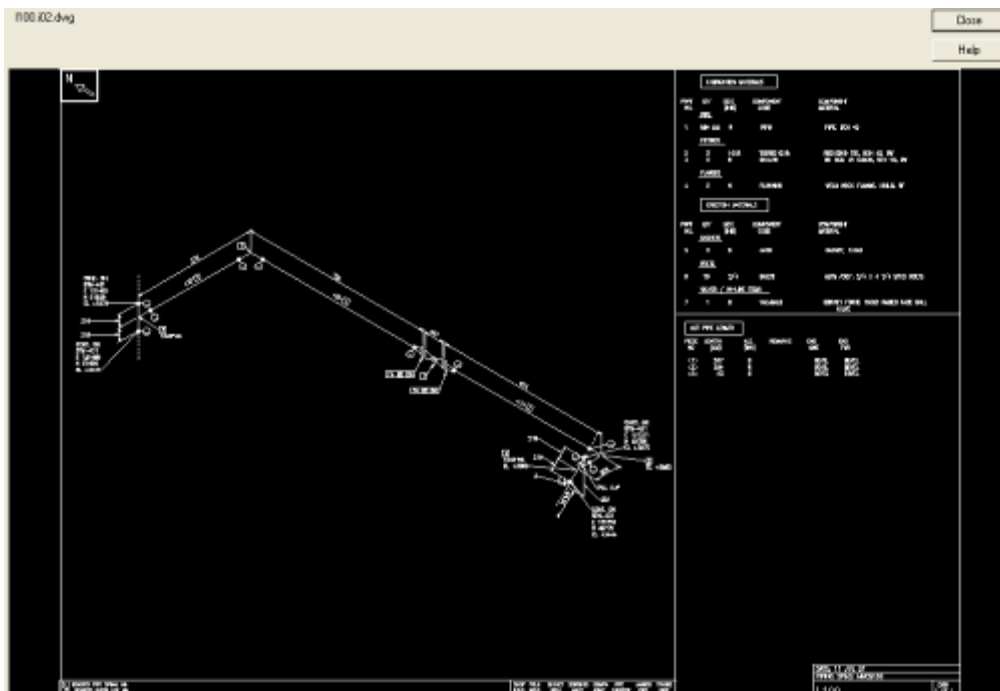


Figura 177: Plano (isométrico) de la construcción de la extensión diseñada - © BnS engineering N.V.

FABRICATION MATERIALS				
PART NO.	QTY	SIZE (INS)	COMPONENT CODE	COMPONENT MATERIAL
<u>PIPE</u>				
1	1	684 MM 8	PIP8	PIPE, SCH 40
<u>FITTINGS</u>				
2	2	10X8	TEERED10X8	REDUCING TEE, SCH 40, BW
3	2	8	90LR8	90 DEG. LR ELBOW, SCH 40, BW
<u>FLANGES</u>				
4	2	8	FLGWNK8	WELD NECK FLANGE, 150LB, RF
ERECTION MATERIALS				
PART NO.	QTY	SIZE (INS)	COMPONENT CODE	COMPONENT MATERIAL
<u>GASKETS</u>				
5	2	8	GASK8	GASKET, 150LB
<u>BOLTS</u>				
6	16	3/4	BOLT8	ASTM A307, 3/4 X 4 1/4 STUD BOLTS
<u>VALVES / IN-LINE ITEMS</u>				
7	1	8	VALVBAL8	BONNEY FORGE 150LB RAISED FACE BALL VALVE

Figura 178: Factura de los materiales de la extensión diseñada - © BnS engineering N.V.

Observación importante: cuando se trabaja con puntos de unión modelados en Cloudworx (o Cyclone):

- En el mundo real, con tolerancias aceptables, las tuberías no se instalan perfectamente paralelas.
- Por consiguiente, cuando se trabaja con datos as-built generados a partir de Cloudworks o Cyclone, puede resultar difícil entender los planos que reflejan estas pequeñas desalineaciones.
- Por tanto, los puntos de unión se deben redibujar en AutoPLANT de manera que sigan los ejes teóricos principales.
- En caso contrario, pueden ocurrir resultados extraños en los puntos de unión cuando se generan isométricos nuevos.
- Por tanto, se debe prestar atención a realizar los flujos de trabajo correctos para asegurar que los documentos a entregar encajan con las necesidades específicas.

Como ejemplo, la siguiente figura muestra las diferencias entre dos planos isométricos:

- Tubería existente dibujada con su inclinación *as-is* exacta (Fig. 179):

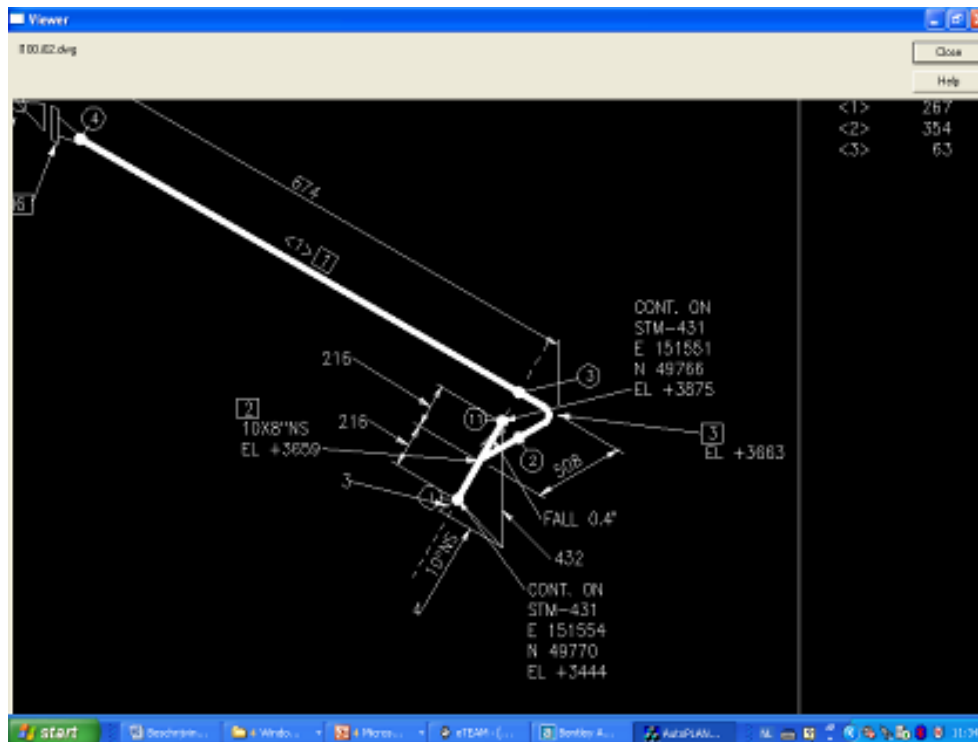


Figura 179: Tubería existente con su inclinación *as-is* exacta - © BnS engineering N.V.

- Tubería existente dibujada con su inclinación *as-built* corregida (Fig. 180):

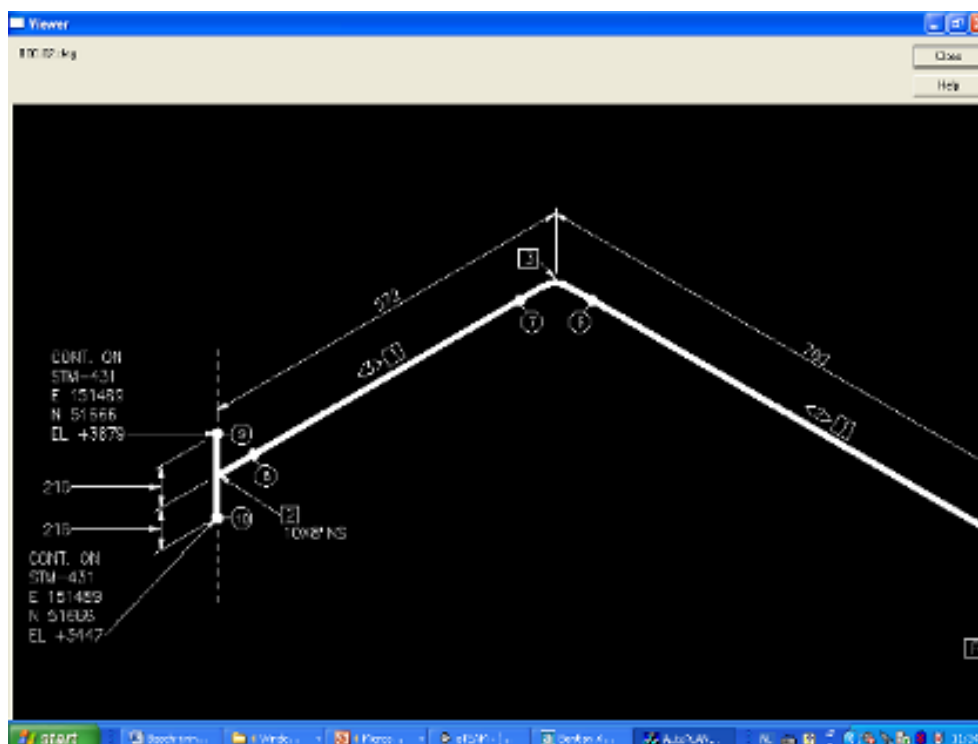


Figura 180: Tubería existente con su inclinación *as built* corregida © BnS engineering N.V.

Se crea una vista en planta del bypass como segundo documento final a entregar de la construcción. Esto también se conoce como “Plano de tubería” (ver Figura 181), utilizado como plano de instrucción de la instalación en campo.

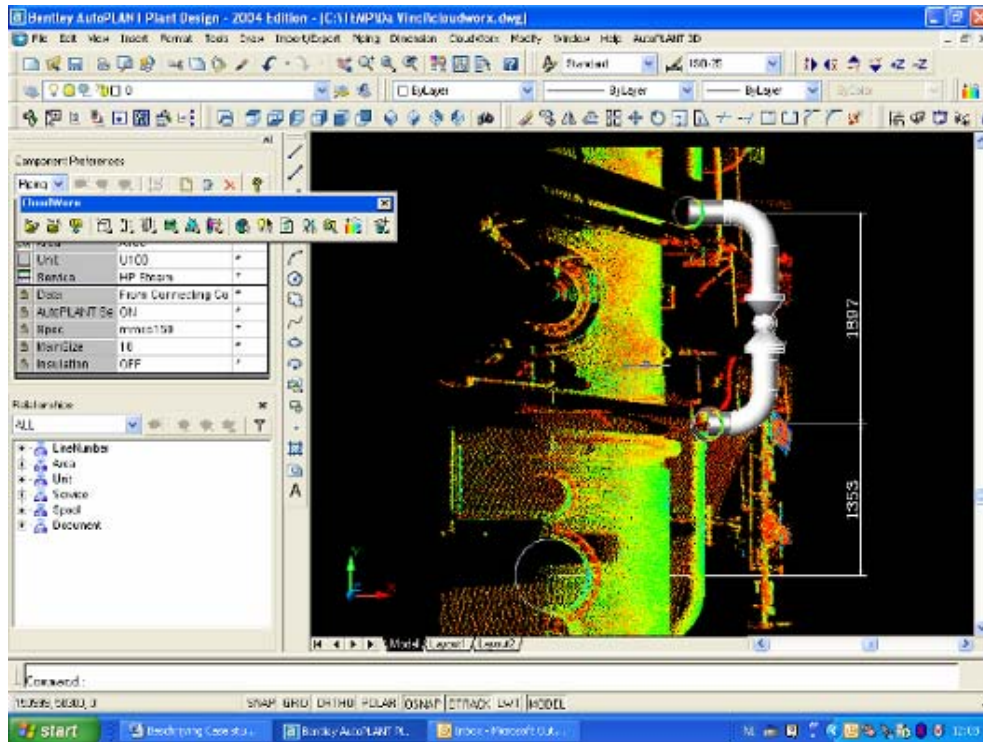


Figura 181: Preparación del plano de la tubería - © BnS engineering N.V.

6.6.2. Revisiones híbridas 3D

Una de las mayores ventajas de utilizar el escáner láser en el diseño de tuberías es la capacidad de monitorizar constantemente el nuevo modelo CAD en combinación con los entornos existentes. Así pues, con NavisWorks existe la posibilidad de leer y unir datos CAD 3D procedentes de varias disciplinas con los datos de las nubes de puntos. Además, la detección de conflictos se puede utilizar en “3D Master Model” (Fig. 182).

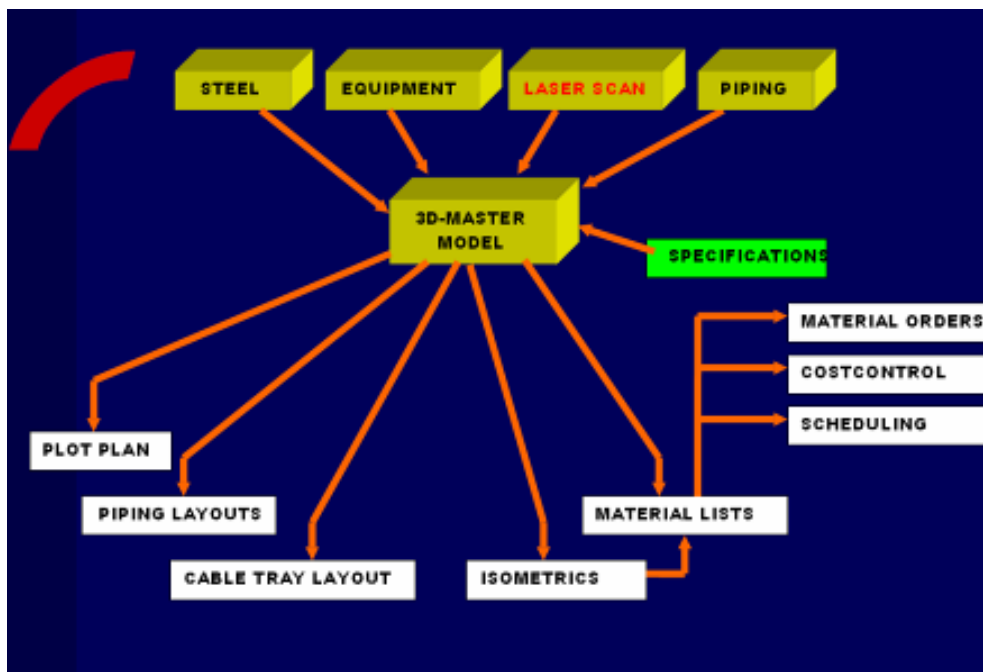


Figura 182: Flujo de trabajo híbrido de un diseño 3D - © BnS engineering N.V.

La Figura 183 ilustra una visualización híbrida utilizando NavisWorks



Figura 183: Revisión híbrida 3D utilizando Navisworks - © BnS engineering N.V.

6.6.3. *Detección de choques*

La detección de choques es un módulo que se utiliza en los procesos de ingeniería 3D. Estos módulos trabajan, mayoritariamente, sobre programas de revisión 3D como Navisworks© o Smartplant Reviewer. Se utilizan para detectar automáticamente e informar de choques entre tuberías, estructuras de acero, hormigón, cables, etc.

Se debe decir que estos choques virtuales son inevitables durante el diseño porque varios diseñadores de diferentes departamentos están trabajando simultáneamente en la misma área virtual.

Gracias a la disponibilidad del escáner láser y de sus funciones tridimensionales es posible realizar una comprobación integrando la situación actual con el nuevo diseño. Sin embargo, este tipo de control de calidad necesita realizarse con mucho cuidado. ¿Por qué? Un escaneo láser nunca estará completo. Esto significa que el informe de la detección automática de conflictos no puede garantizar el 100% de una construcción totalmente libre de conflictos. Por tanto, siempre se debe realizar este control de calidad de forma manual a través de una exploración visual en el programa de revisión.

6.6.3.1. *Simulaciones*

Cada vez más, las simulaciones se hacen con las nubes de puntos adicionales. Algunos ejemplos:

- En una plataforma perforadora existe la necesidad de tener un modelo 3D “as-built”, de manera que pueda ser importado en un programa para simular el impacto de una explosión potencial.

- En el entrenamiento del personal de evacuación, las nubes de puntos se utilizan para realizar paseos por la unidad real.

6.6.4. As-built

Algunas veces, dependiendo del programa del proyecto y del presupuesto, puede ser conveniente convertir las nubes de puntos en un modelo 3D completo. A continuación se enumeran algunas ventajas:

- Mucho más fácil implementar ficheros CAD 3D en el sistema de documentación de la planta.
- Todos los componentes se pueden etiquetar y consultar en varios niveles (p. ej. valioso para el personal de mantenimiento).
- Todos los datos se pueden estructurar y mantener en un sistema CAD.
- Los planos completos de tuberías y los isométricos se pueden modificar fácilmente.
- Los modelos CAD todavía son más fáciles de distribuir entre todos los miembros del equipo.

La Figura 184 muestra el plano de unas tuberías realizado a partir de objetos en Cyclone.

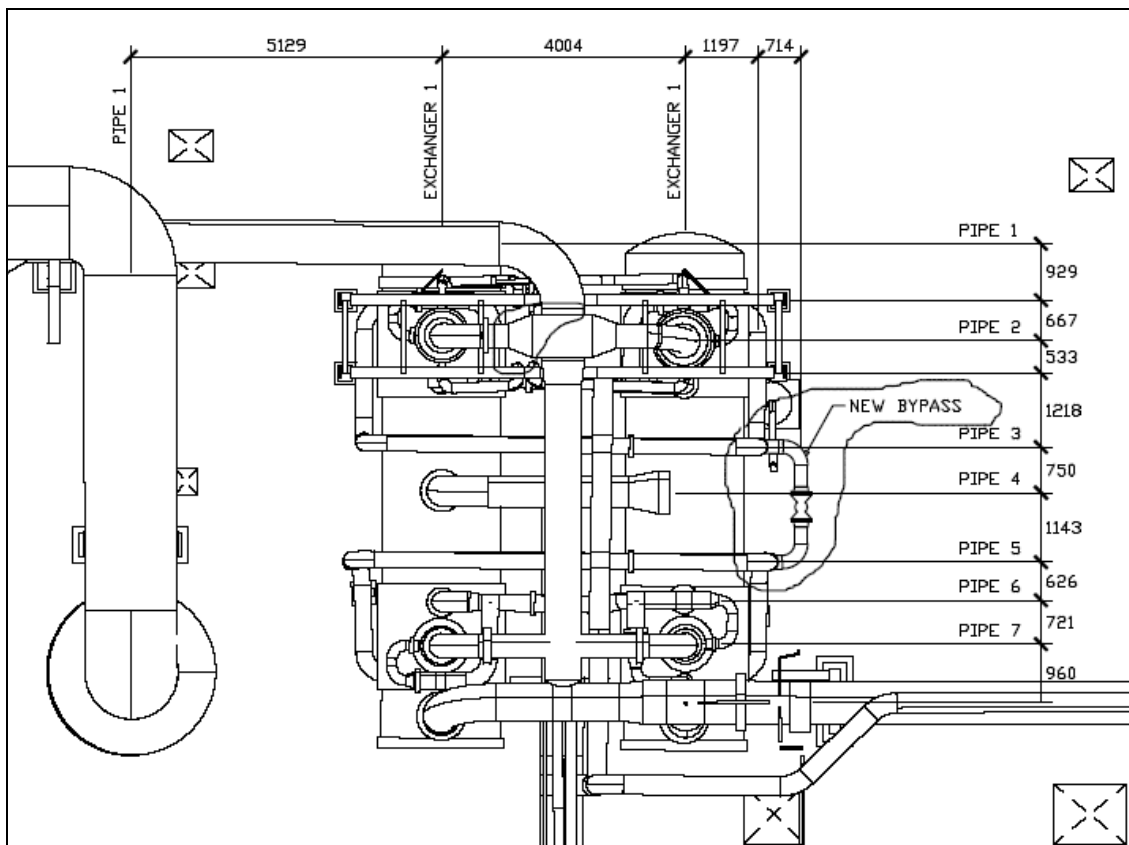


Figura 184: Plano de tuberías que incluye la nueva extensión - © BnS engineering N.V.

6.6.5. Uso del escáner láser

Una buena parte de los propietarios de las plantas están interesados en ficheros de documentación “as-built” completos. Esto se debe a las crecientes regulaciones de seguridad y al deseo de minimizar la programación ingenieril.

El problema es que sólo una minoría de los propietarios consigue con éxito este deseo debido al gran esfuerzo y a los gastos relacionados con el mantenimiento de una documentación “as-built” 3D a lo largo de los años.

El escaneado láser puede ayudar a los propietarios de las plantas a dejar de producir el trabajo “as-built” realizado con el escáner láser, de modo que se pongan cosas en 3D sólo cuando sea necesario.

6.6.6. Control de calidad

A continuación se ilustra el caso de un control de calidad de un equipamiento tras su construcción. En este caso, el diseño de una nueva columna de destilación fue realizado por el ingeniero contratista mientras que la construcción fue realizada por un constructor contratista. Como este equipamiento se tenía que instalar en una unidad de producción en un plazo de tiempo muy ajustado, era muy importante hacer un control de calidad detallado en el sitio de producción, antes de trasladar el equipamiento. El escáner láser fue la solución más apropiada. La nube de puntos se proyectó sobre el modelo CAD 3D y se detectaron algunos errores de construcción, como por ejemplo que la posición de algunos agujeros de tornillos estaban desalineados (Figura 188). De esta forma, fue posible anticipar problemas que, de otra forma, sólo hubieran sido detectados en campo. El resultado hubiera sido un dramático retraso durante la instalación de la unidad.

A continuación se muestra el flujo de trabajo seguido:

Paso 1: Posiciones del escáner (Figura 185).

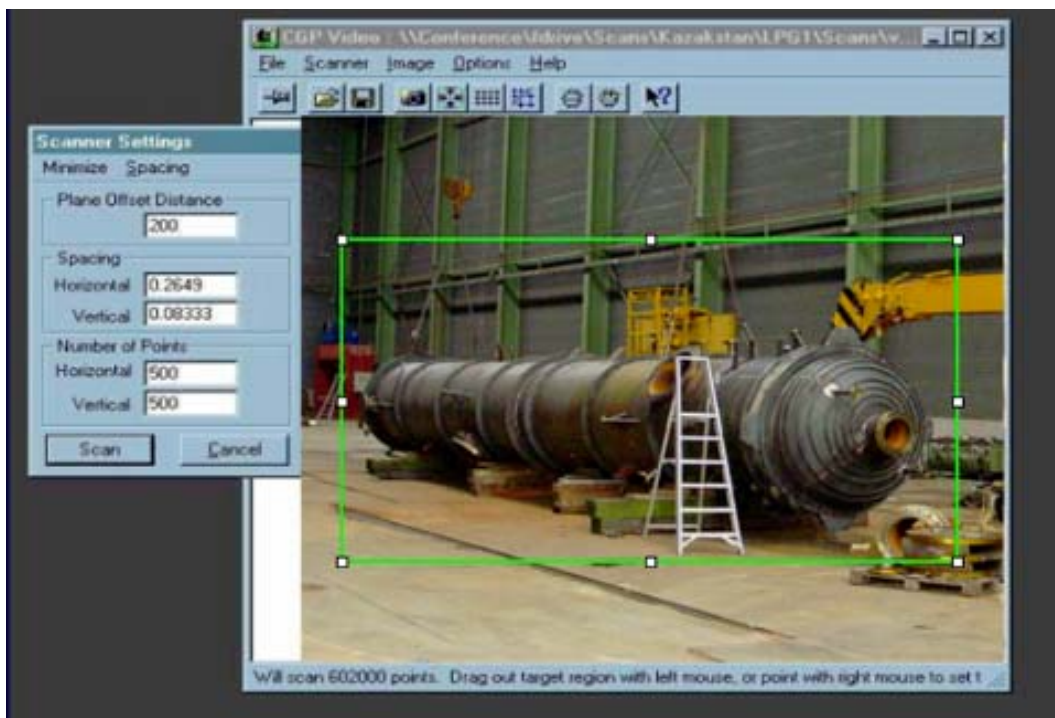


Figura 185: Equipamiento a topografiar - © BnS engineering N.V.

Paso 2: Escaneado desde diferentes posiciones (Figura 186).

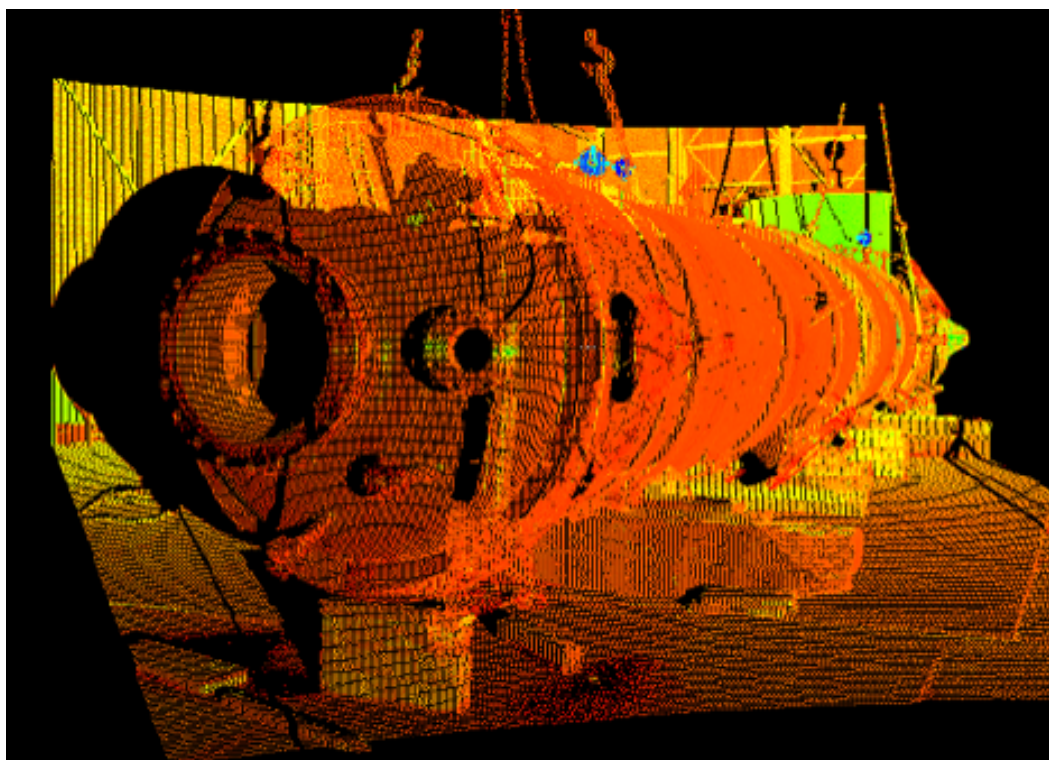


Figura 186: Nube de puntos desde una posición - © BnS engineering N.V.

Paso 3: Consolidación de cuatro escaneados en una nube de puntos (Figura 187).

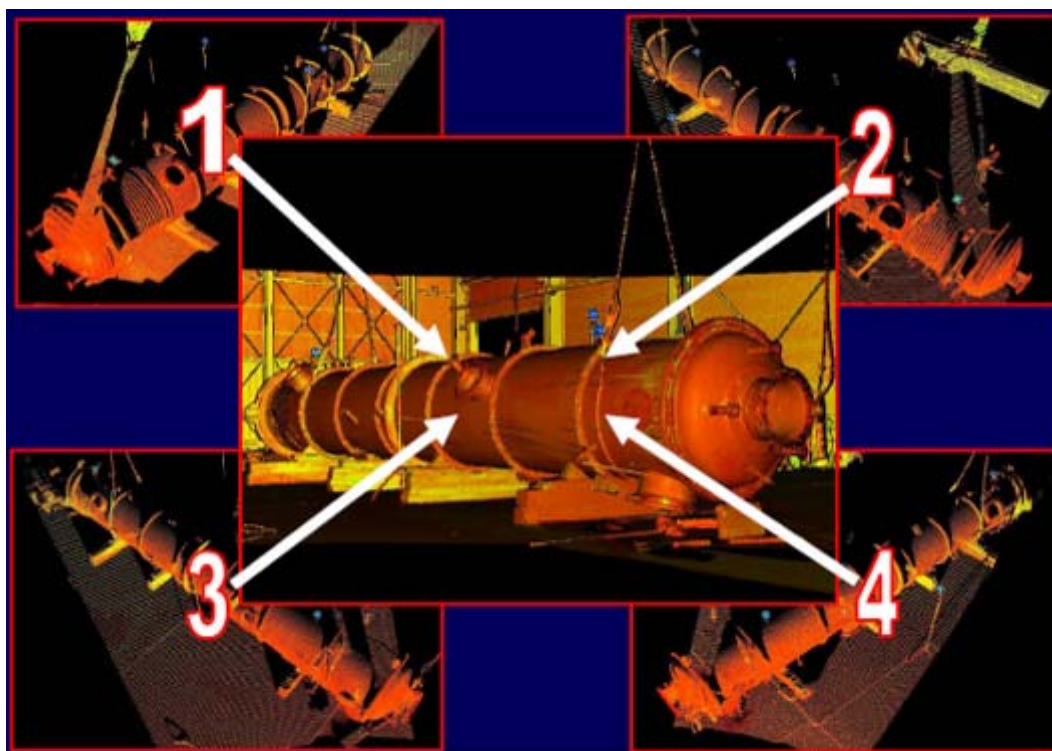


Figura 187: Consolidación de 4 escaneados en una única nube de puntos - © BnS engineering N.V.

Paso 4: Importación de las nubes de puntos en CAD y herramientas de revisión (Figura 188).

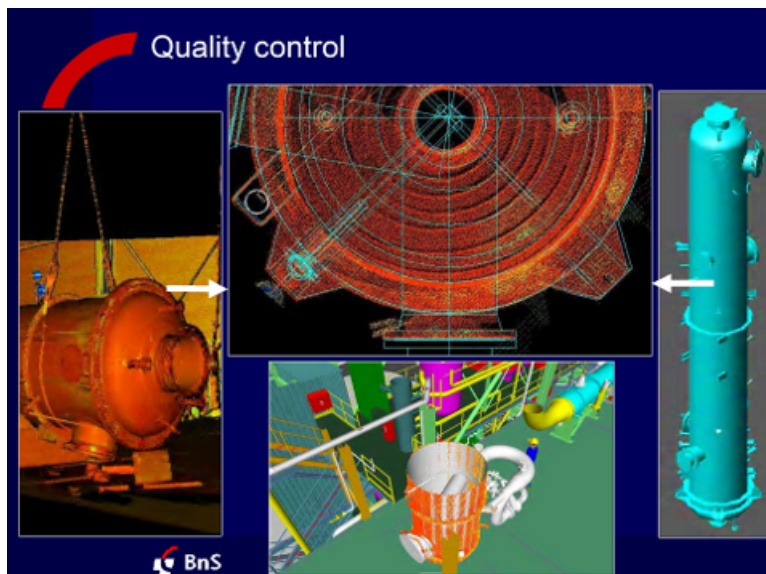


Figura 188: Control de calidad a partir de la nube de puntos - © BnS engineering N.V.

7. Caso de estudio de infraestructura civil: monitorización de la deformación de una presa hidroeléctrica

7.1. Introducción

Las plantas hidroeléctricas son construcciones que utilizan la energía potencial del agua almacenada para hacer girar una turbina asociada a un generador y producir electricidad. Se puede diferenciar entre plantas de corriente fluvial y de almacenamiento (Figura 189 y Figura 190).

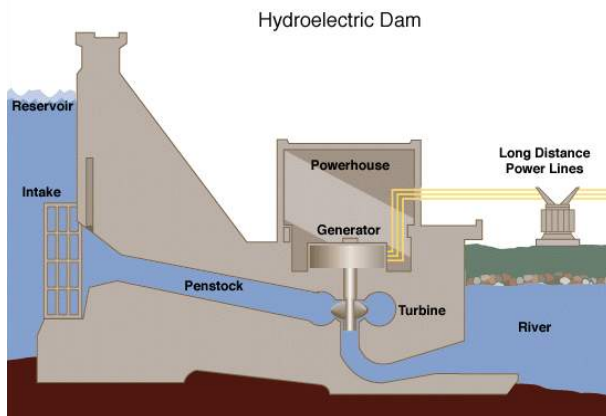


Figura 189: Esquema de planta hidroeléctrica en curso fluvial

Fuente: <http://www.tva.com/power/Figures/hydro.gif>

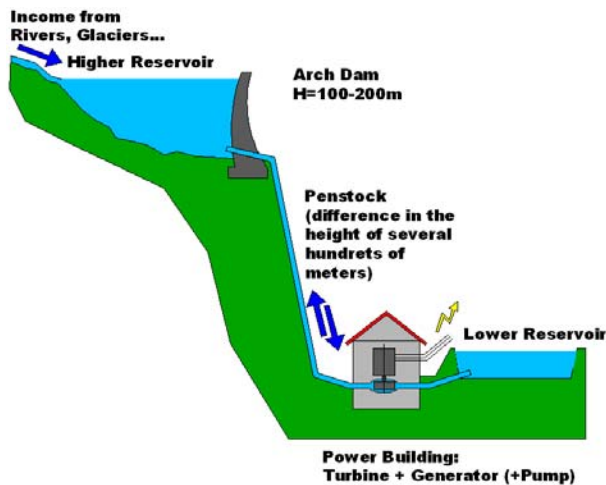


Figura 190: Esquema de planta de almacenamiento y bombeo

El primer tipo (Figura 189) funciona de manera continua. Se podría situar en grandes y lentas corrientes fluviales, normalmente con una pequeña diferencia de altitud (pequeña energía potencial) y gran corriente.

El segundo tipo (Figura 190) funciona en períodos de alto consumo de energía eléctrica. Consiste en una reserva a gran altitud y un edificio con una turbina y un generador a una altitud mucho más baja. Esto está conectado mediante una tubería de varios metros de diámetro que cubre la distancia de varios centenares de metros. El agua tiene una alta energía potencial. El volumen de agua es menor que en el primer tipo. La mayoría de ellas están situadas en las montañas, p. ej. en los Alpes.

Un tipo especial de plantas de almacenamiento son las también llamadas plantas de almacenamiento y bombeo. Estas plantas tienen una segunda reserva de agua en un nivel de altitud inferior y una turbina reversible que es capaz de bombear el agua de vuelta a la reserva en lo alto de la montaña.

Durante la noche, la demanda de electricidad es baja y, por tanto, el precio del mercado es bajo. Con este tipo de plantas es posible almacenar la sobreproducción de energía (electricidad) de otras plantas eléctricas como las nucleares, térmicas

y fluviales durante la noche al bombear el agua de vuelta a la reserva.



Figura 191: Presa de almacenamiento Kops en Austria



Figura 192: Presa de almacenamiento Kops en Austria

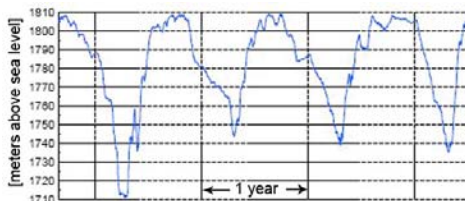


Figura 193: Fluctuación de los niveles de reserva

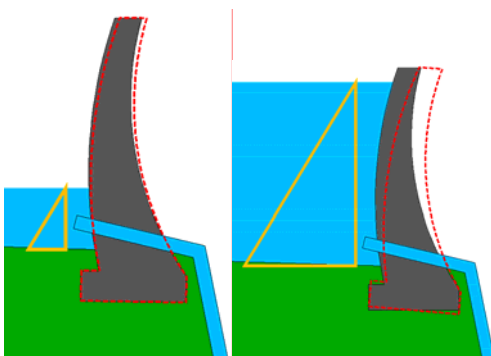


Figura 194: Diferentes cargas (naranja) y deformaciones (rojo) como resultado de diferentes niveles de llenado

Las plantas de almacenamiento y bombeo necesitan reservas. Estas reservas se crean mediante una o varias presas que se utilizan como barrera de la corriente de agua para obstaculizar su curso. Pueden estar hechas de piedras, tierra y arcilla, también llamadas presas de terraplén o de obra. Las presas de obra son de gravedad o de arco.

Una presa de arco es una estructura de hormigón o de mampuesto delgada y curva, que está curvada hacia el interior del río de manera que la fuerza del agua comprime y fuerza la estructura empujándola hacia el suelo. Las presas de arco se usan mayoritariamente en sitios estrechos de las montañas con empinadas paredes de roca sólida [Wikipedia, 2007]. Estas presas pueden alcanzar alturas de varios centenares de metros y se comportan parcialmente de manera elástico en el caso de cargas externas variables.

La presa más alta de Austria es Kölnbreintalsperre, con una altura de 200 m y una longitud de 626 m, mientras que la más alta del mundo es la de Nurek, que mide 300 m de alto; desde los años 60 se está construyendo otra en Rogun de 335 m (ambas es Tadjikistan).

El nivel de almacenamiento (Figura 193) de una reserva no es constante sino fluctuante. La fluctuación del nivel de agua se puede dividir en cambios de corta frecuencia y de larga frecuencia. La fluctuación de corta frecuencia con un periodo de un día no es un ejemplo de poca variación, en tanto que la fluctuación de gran frecuencia aparece de forma estacional y es de una cantidad mucho mayor debido a la gran demanda de electricidad en la estación más fría a la vez que también se produce la falta de alimentación de la reserva en invierno o en los períodos secos.

Debido a esta variación en el nivel de almacenamiento, la presión en la superficie de la presa difiere y produce diferentes cargas en el cuerpo de la presa (Figura 194).

Esto conduce a una deformación elástica del arco de la estructura con un cambio en su forma. La deformación plástica puede ocurrir sólo en los primeros años tras la construcción

de la presa debido al asentamiento estructural y a la consolidación del suelo en los cimientos.

7.2. Objetivos

7.2.1. Planteamiento del problema

La deformación de las presas hidroeléctricas se monitorizará periódicamente debido al enorme riesgo para la vida humana en caso de fallo. Normalmente, la monitorización se realiza analizando el movimiento en puntos concretos de la superficie de la presa o realizando mediciones a través de pasillos localizados a diferentes niveles de altura en el interior de la presa. Además, las presas pueden estar equipadas con sensores tradicionales como calibres de torceduras y sistemas de medición perpendicular para observar permanentemente el movimiento relativo de la cresta (inclinómetros). Las mediciones actuales realizadas por los operadores de la compañía relataban movimientos en la cresta de varios centímetros a lo largo de un año completo.

El objetivo de la monitorización de los movimientos de la presa a partir del el escaneado láser terrestre es medir la deformación de la presa en la superficie no sólo en puntos concretos sino en una rejilla densa con información puntual cada pocos centímetros. A partir de la nube de puntos se puede generar un modelo preciso de la superficie que describa la superficie real. Una comparación de dos o más modelos de diferentes momentos nos puede mostrar la deformación de la superficie entera. Los resultados contienen más información relevante, por ejemplo si la deformación es homogénea en toda la presa o si hay una deformación local mayor. Además, se pueden destacar zonas con mayor riesgo de deformaciones que después pudieran ser analizadas con más frecuencia con otros equipamiento, como estaciones totales monitorizadas con reconocimiento automático de dianas (TPS).

Las ventajas de determinar la deformación de la estructura de una presa comparando superficies generadas a partir de nubes de puntos mediante escáner láser las muestran diversos autores [31-33]. Rudig [34] demostró que la aplicación de algoritmos NURBS para la representación de superficies ofrece la posibilidad de valorar deformaciones de la estructura de una presa de sólo 3 mm. En esta aplicación, la distancia entre el escáner y el objeto era de unos 60 m y la precisión de cada punto ± 6 mm.

7.2.2. Objetivos

La presa de arco de la reserva *Kops* en los Alpes austriacos fue medida dos veces en diferentes momentos con la intención de conseguir un conjunto de datos completo para la práctica de este proyecto.

Por consiguiente, estos dos conjuntos de datos reales ofrecen la posibilidad de:

- Ilustrar el proceso entero de escaneado láser en cuanto a planificación de las sesiones, escaneado y postproceso de forma completa y detallada.
- Realizar la evaluación de riesgos comparando las superficies de la presa deformadas en dos momentos con diferentes niveles de reserva de agua.

Este caso de estudio debe proporcionar un mejor entendimiento y planificación del escaneado láser terrestre para realizar mediciones efectivas. En particular, la superficie de la presa se analizará para evaluar la deformación. Este caso se centra en:

- **El mejor montaje:** Definir la mejor manera de montar el aparato del escáner: horizontal, vertical o inclinado.
- **Definición de la distancia óptima entre el objeto (la presa) y el escáner:** Para definir las distancias óptimas de las diferentes posiciones del escáner se tiene en cuenta la precisión homogénea y la ondulación de la topografía.
- **Determinación del ángulo mínimo entre la superficie y el haz láser:** Calcular el ángulo mínimo entre el haz láser y la superficie con la máxima precisión.
- **Optimizar el tipo de diana para los puntos de referencia artificiales:** Definir las mejores dianas para las diferentes distancias de escaneado.

Adicionalmente, este caso de estudio nos va a permitir calcular la deformación entre dos periodos. La finalidad de esta investigación es estudiar su la deformación es homogénea o heterogénea, conteniendo zonas de mayor abombamiento y riesgo.

7.2.3. Documentos a entregar

Los resultados de este caso de estudio deberían ser:

- Dos *modelos digitales del terreno (MDTs)* representando la superficie de la presa en dos momentos con diferente nivel de almacenamiento.
- Un *modelo diferencial* de estos dos MDTs que describa la deformación (vectores de desplazamiento en una densa malla).

7.2.4. Factores de riesgo

- Relacionados con el objeto:

Un fallo debido a una deformación excesiva puede producir:

- Peligro de muerte para la plantilla de la planta hidroeléctrica y los habitantes del valle.
 - Peligro para la flora y la fauna de las áreas de alrededor.
 - Pérdida de producción eléctrica durante varios años.
- Relacionados con el proyecto:
 - La ondulación del terreno y las malas condiciones ambientales pueden contribuir a unas malas condiciones de trabajo, incluyendo el riesgo de caída desde precipicio.
 - La deformación de la presa puede no ser detectada por la precisión insuficiente de los métodos topográficos (sistema del escáner, constelación de escaneados, procesamiento de los datos, etc.).



Figura 195: Pantano Kops, vista desde el SO

7.2.5. Documentación en campo

La presa de este caso de estudio está situada al oeste de Austria, en la provincia de Vorarlberg (VBG). El nombre de este lago o pantano es Kops (Figura 195). Está situado a una altitud de 1800 m sobre el nivel del mar y tiene una longitud de 400 m y altura de 100 m.

7.3. Metodología

7.3.1. Planificación de las sesiones

Las campañas de medición se realizaron a mediados de abril de 2007 (nivel bajo de reserva) y a mediados de Septiembre (reserva casi en su nivel máximo). En el momento de la primera medición la reserva estaba a un tercio de su capacidad. Una fecha anterior con un nivel menor hubiera sido mejor para detectar la deformación total, pero las fuertes nevadas y el riesgo de avalanchas en la primavera de 2007 impidieron el trabajo en campo.

En una planificación detallada de las sesiones es imprescindible teniendo en cuenta el alcance máximo y el campo de vista del escáner utilizado. Además, las características del objeto a escanear (400 m de largo x 100 m de alto) y el terreno de los alrededores (topografía montañosa y ondulada) deben ser simulados con antelación debido a su influencia en el trabajo de levantamiento.

Para describir las deformación de la presa es necesario realizar al menos dos capturas de datos: una durante la estación de invierno/primavera (en este caso se realizó en abril) antes de que se empiece a fundir la nieve y cuando el pantano está vacío, y una segunda al final del verano cuando el pantano está en su nivel máximo.

Durante la sesión de primavera el terreno estaba parcialmente cubierto de nieve y hielo. Además, el terreno es rocoso y el área de los lados derecho e izquierdo de la presa presenta mucha inclinación (Figura 196 y Figura 197). Por otra parte, la población arbórea está compuesta mayoritariamente por coníferas (hasta 40 m de altura), sauces (hasta 2.5 o 3 m) y pino de montaña (hasta 2 m de altura).



Figura 196: Parte izquierda de la presa, febrero 2007



Figura 197: Centro y parte derecha de la presa, febrero 2007

Como resultado, las posiciones del escáner se tienen que determinar antes de empezar el trabajo de campo de la manera más precisa posible. Para esto, es esencial tener en cuenta lo siguiente:

- Características del escáner y del objeto.
- La topografía.
- La seguridad del personal.

7.3.1.1. Elección del escáner y del software

Actualmente, hay muchos tipos de escáneres especializados en el mercado. La lista del Apéndice 8.3 da una pequeña muestra de los escáneres más populares que cumplen los requisitos para esta aplicación relacionados con el alcance y la precisión.

La topografía montañosa y ondulada dificulta el posicionamiento del escáner. Distancias de escaneado mayores de 200 m por una parte y ángulos de incidencia del haz láser muy inclinado por otra, requieren un escáner de largo alcance con medición precisa de ángulos y distancias para cumplir los requerimientos de la monitorización de la presa hidroeléctrica. Por tanto, el escáner láser terrestre Trimble GX 3D fue elegido para este proyecto.

Dependiendo de la finalidad, la toma de datos o el procesamiento de los mismos, Trimble ofrece diferentes programas:

- PointScape (para ordenadores portátiles) o PocketScape (para Pocket PC) para la toma de datos.
- RealWorks Survey para el procesamiento de los datos.

Las principales características de PointScape y PocketScape son:

- Inicialización y calibración del sistema en campo.
- Control de la cámara integrada.
- Visualización de los escaneados a través de la cámara para localizar los puntos de referencia/dianas de referencia, y definir el área de escaneado directamente sobre las fotografías hechas por la cámara.
- Adquisición, control y almacenamiento de los datos topográficos.

Las principales características de RealWorks Survey son:

- Visualización de las nubes de puntos.

- Análisis de las dianas esféricas y planas.
- Gestión de los puntos de referencia.
- Ajuste geométrico.
- Registro y georreferenciación de nubes de puntos por medio de puntos de referencia y dianas.
- Triangulación de las nubes de puntos.
- Mediciones de ángulos y distancias.
- Edición de las triangulaciones.
- Creación de ortoimágenes.

7.3.1.2. Determinación de las posiciones óptimas del escáner

La optimización de las posiciones del escáner se puede realizar en tres pasos:

1 Determinación de la mínima distancia a la presa

Se minimizan los errores como la desviación estándar y la precisión posicional. En el caso de escanear un objeto con una altura de 100 m con un campo de visión de $\pm 30^\circ$ (Figura 198), el escáner Trimble GX 3D requiere una distancia horizontal al objeto de:

$$\text{Solución 1: } l = 100\text{m}/\tan(30^\circ) = 173.20 \text{ m} \approx 175 \text{ m}$$

Sin embargo, se puede disminuir la distancia inclinando el escáner algunos grados (p. ej. 20° , Figura 199), dando una distancia menor al objeto:

$$\text{Solución 1: } l = 100\text{m}/\tan(50^\circ) = 83.91 \text{ m} \approx 85 \text{ m}$$

Para reducir más la distancia entre el escáner y la presa es necesario utilizar una montura del escáner totalmente diferente. Se puede utilizar un soporte ortogonal como montura para girar el escáner un ángulo de 90° . En este caso, la distancia vertical se convierte en la horizontal y viceversa. Así, el campo de vista resultante del escáner es de 360° verticalmente y de 60° horizontalmente (Figura 200). Con este ajuste, se puede estacionar más cerca del objeto. Para evitar la aparición de ángulos de intersección agudos, mantenemos un ángulo de 30° entre la superficie del objeto y el haz láser:

$$\text{Solución 3: } l = 100\text{m}/\tan(60^\circ) = 57,73 \text{ m} \approx 60 \text{ m}$$

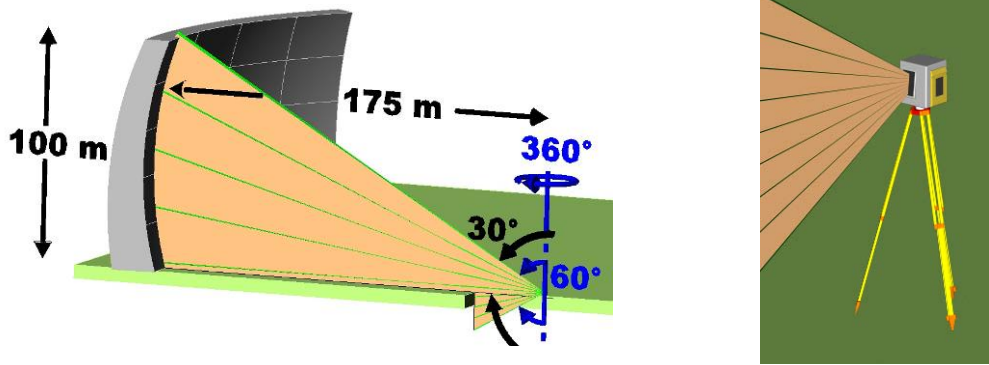


Figura 198: Mediciones del láser escaner terrestre con el eje vertical (posición normal)

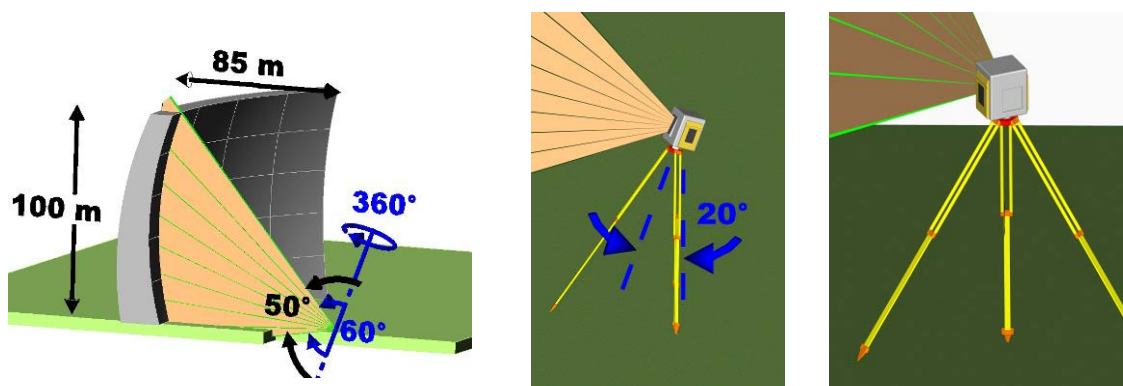


Figura 199: Tras inclinar 20° el eje vertical

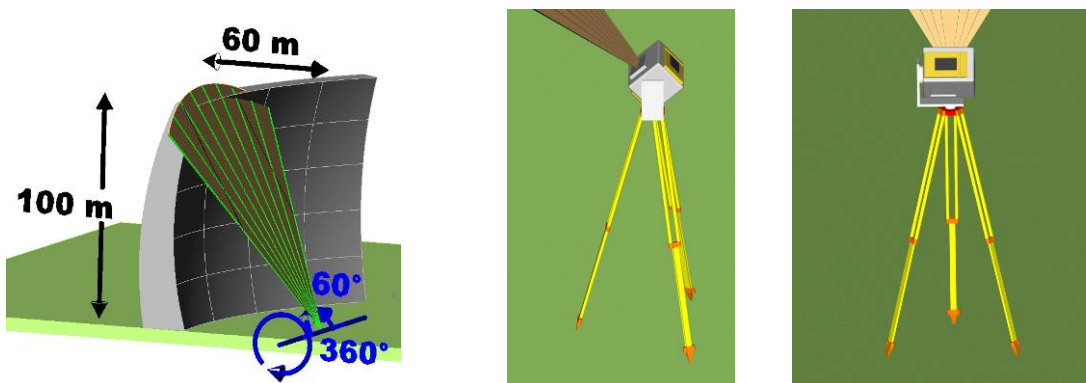


Figura 200: Adquisición con un soporte ortogonal

2 Minimización de los ángulos de intersección agudos

Si el ángulo entre el haz láser y la superficie del objeto disminuye, la intensidad del haz reflejado también lo hace. Entonces, la medición del punto falla o proporciona valores incorrectos. Además, la precisión de la medición disminuye cuanto menos perpendicular es el haz a la superficie y más se alarga la huella del haz (Figura 201).

Para evitar este fenómeno, el ángulo entre la superficie y el haz láser debe ser mayor de 10° [34].

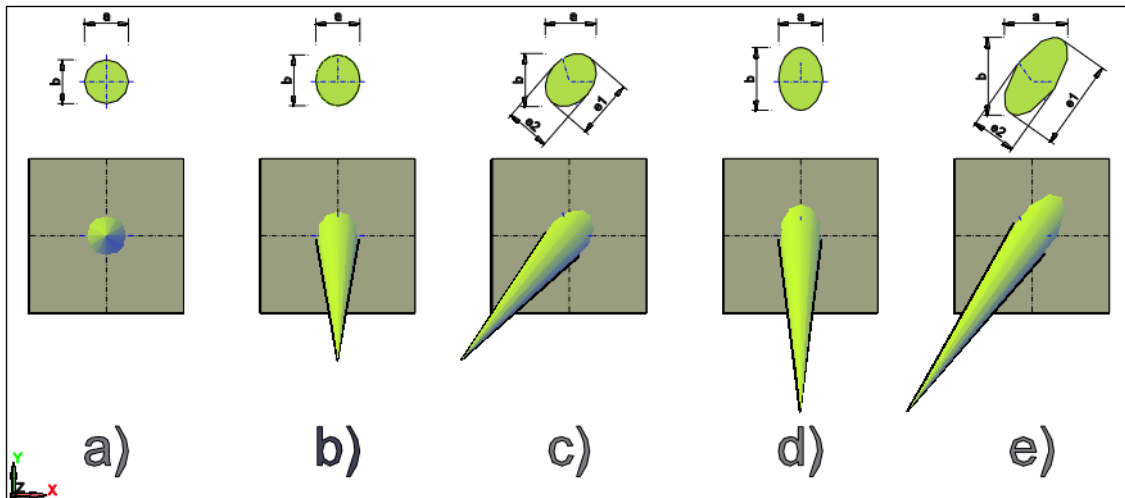


Figura 201: Huellas del haz láser: a) perpendicular, b) inclinación de 30° en el plano YZ, c) inclinación de 30° en los planos XZ e YZ, d) inclinación de 45° en el plano YZ, e) inclinación de 45° en los planos XZ e YZ

3 Reducción de los estacionamientos del escáner

Un menor número de estacionamientos del escáner proporciona menos tiempo de trabajo en campo y de procesamiento. Aumentando la distancia al objeto, el área de escaneado aumenta y disminuye el número de estacionamientos necesarios del escáner. Sin embargo, la precisión empeora.

Es recomendable simular con antelación diferentes estacionamientos de escaneado para atender a todas estas demandas.

Es necesario tener a nuestra disposición, al menos, un mapa de curvas de nivel de los alrededores de la presa y un croquis de las dimensiones de la presa para considerar todas las condiciones nombradas anteriormente a la hora de planificar el trabajo de campo, así como los estacionamientos del escáner. La mejor manera de simular el trabajo de campo de escaneado es modelando la situación de forma aproximada mediante un SIG o un CAD. No importa si la planificación se realiza de forma manual con papel, lápiz y regla o digitalmente. Lo que importa es que se realice.

7.3.1.3. Simulación en CAD

En nuestro caso, se dispone de un MDT y de una ortoimagen digital (Figura 202). También hay otras fuentes georreferenciadas que nos pueden proporcionar información útil.

La ortoimagen ha sido adquirida durante un proyecto LiDAR desde un escáner aéreo, con una malla de 1m x 1m. Con la información de la altitud, se modeló un MDT en Autodesk® CIVIL 3D 2007™. A causa de la calidad reducida de los datos de la presa a partir del escaneado LiDAR, fue necesario modelarla por extrusión de las líneas de la cresta de la presa (Figura 203 y Figura 204) y unirla después con el MDT.

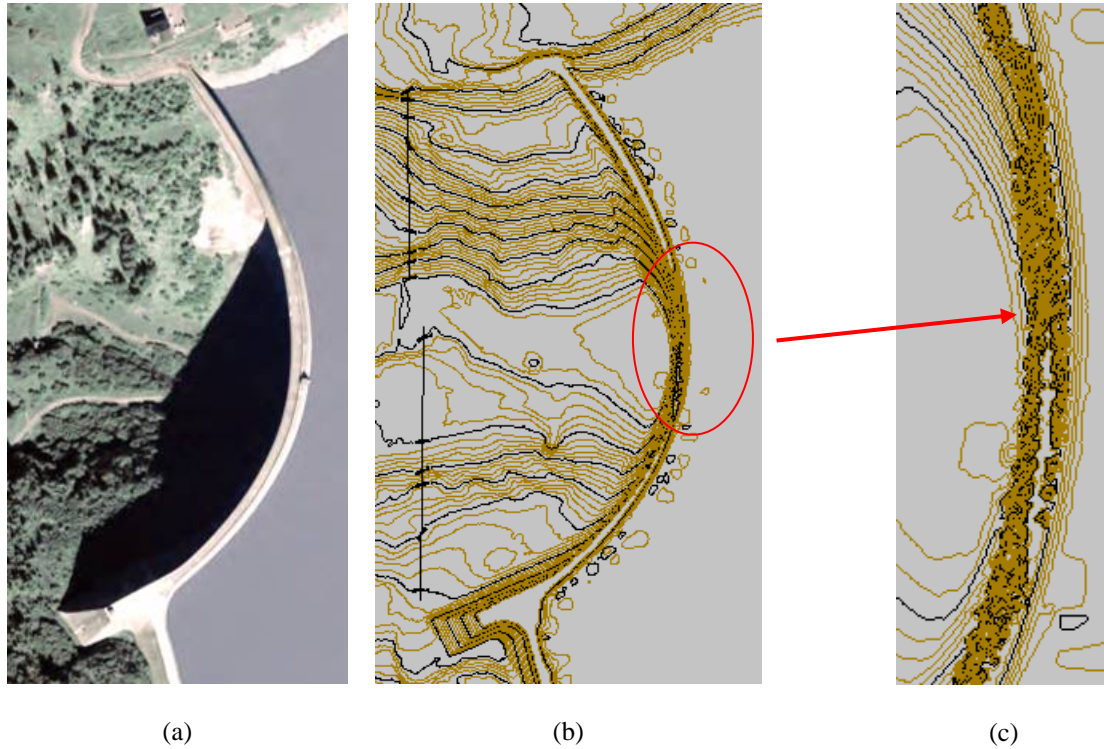


Figura 202: Ortoimagen (a) MDT (b,c) con el dibujo erróneo de la cresta

En un segundo paso, se simuló un escáner con un campo de visión de $60^\circ \times 360^\circ$ con una inclinación del eje vertical de 20° . Diferentes colores muestran los alcances de 50 m, 100 m, 150 m y 200 m. Véase la Figura 205.



Figura 203:
Contorno de la cresta
de la presa

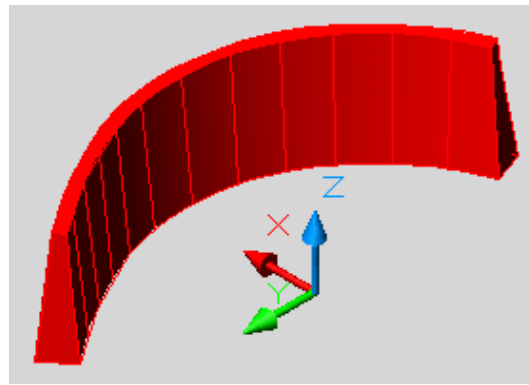


Figura 204: Modelo 3D de la presa

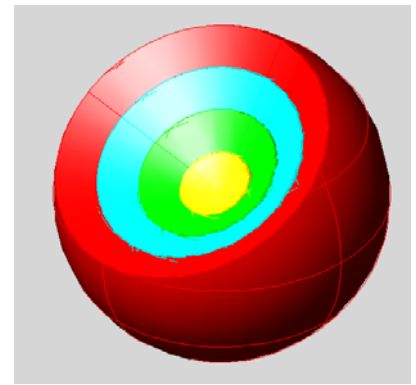


Figura 205: Campo de visión de $60^\circ \times 360^\circ$
tras inclinar 20° el eje vertical

En un tercer paso, los modelos de los campos de visión se distribuyen como posibles estacionamientos del escáner y se intersectan con la pared y el MDT. Figura 206, Figura 207 y Figura 208 muestran los resultados de tres estaciones cercanas a la presa en arco.

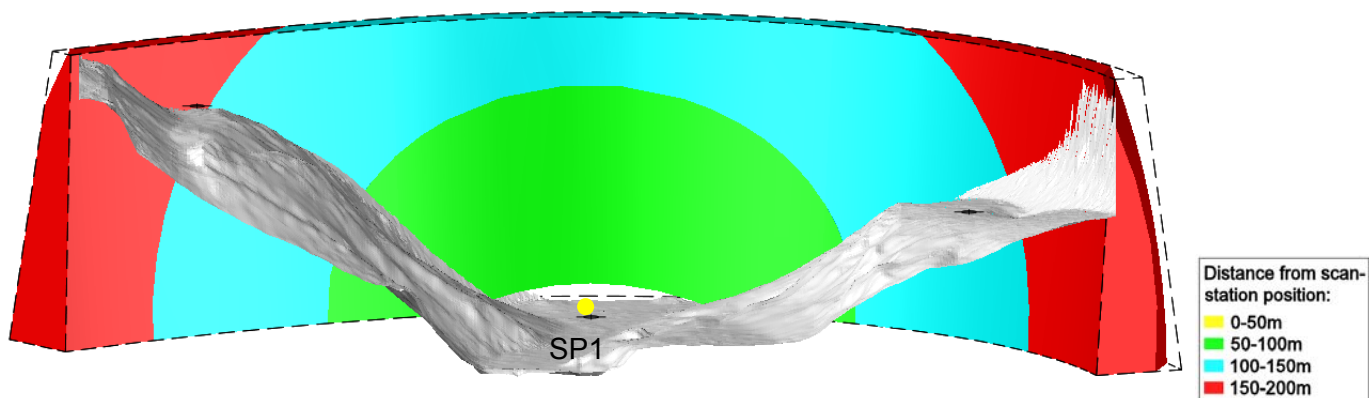


Figura 206: Resultado final de la estación 1

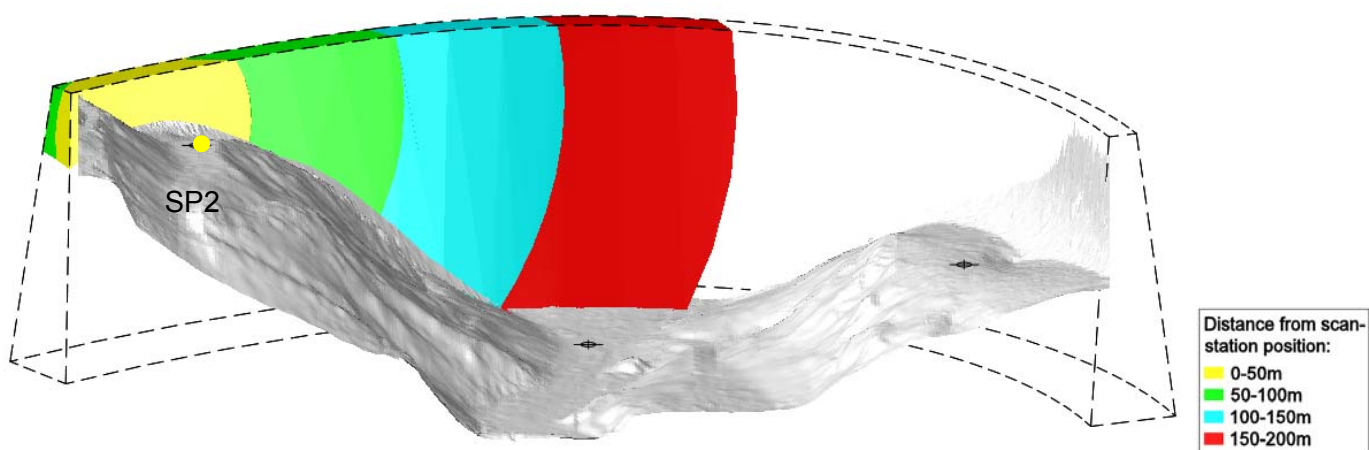


Figura 207: Resultado final de la estación 2

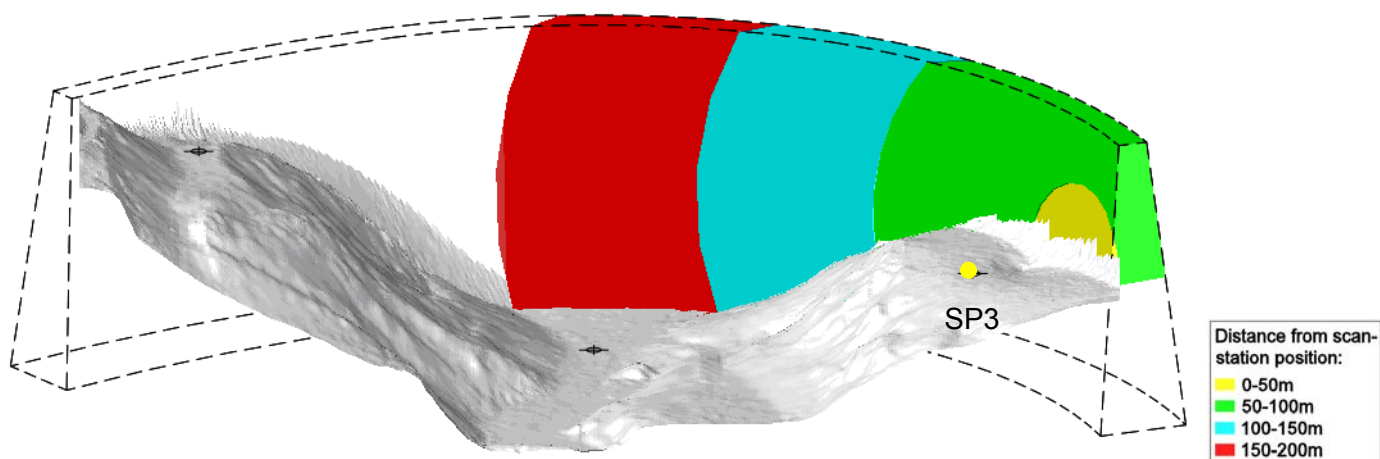


Figura 208: Resultado final de la estación 3

7.3.1.4. Listado de comprobación

Como preparación del trabajo de campo se debería generar una lista de materiales/comprobación que incluyera todo el equipamiento de escaneado y topográfico, y los accesorios necesarios para el levantamiento. En el Apéndice 8.2 se encuentra un ejemplo.

7.4. Adquisición de los datos

7.4.1. Sistema de coordenadas de referencia

La compañía hidroeléctrica realiza levantamientos periódicos que monitorizan la deformación de la presa. Para ello, existe un sistema de referencia local materializado por un conjunto de pilares de hormigón alrededor de la presa. Este sistema de referencia local también se utilizó en las campañas de escaneado.

7.4.2. Escáner Móvil

Se utilizó una plataforma llamada Escáner Móvil (Scanner Mobile) para evitar la densa vegetación existente en los alrededores de los estacionamientos del escáner (ver Figura 209). Es un conjunto de palancas similares a las que se utilizan en el teatro y en los sistemas de iluminación que permite posicionar el escáner a 6 m del suelo. Por tanto, el campo de vista del escáner está menos obstaculizado por la vegetación y por oclusiones adicionales.



Figura 209: Escáner Móvil, h=6m

7.4.3. Dianas

Las dianas esféricas de Trimble, con un diámetro de 7.6 cm (Figura 211) se utilizaron en distancias menores de 50 m. Para distancias superiores (hasta 200-300 m) se utilizaron esferas más grandes y dianas planas.

Durante las mediciones de abril, se utilizaron dianas planas (como las pegatinas verdes pegadas en las señales de tráfico, Figura 210) y bolas de bolos pintadas (Figura 213). En septiembre, se utilizaron esferas de madera pintadas con prismas auto-acoplados (véase Figura 212).

Es imprescindible utilizar estas dianas lejanas en los límites externos de las secciones, como la corona de la presa. Así, se asegura una georreferenciación estable de la nube de puntos y aumenta significativamente la precisión.

Las coordenadas de las dianas se determinaron mediante mediciones con la estación total Leica TCRP 1202, que se estacionó sobre los pilares de la red geodésica en los alrededores de la presa.



Figura 210: Diana plana sobre una señal de tráfico



Figura 211: Esfera de Trimble, $d=7.6\text{cm}$ y prisma intercambiable



Figura 212: Esfera de madera pintada con un prisma acoplado, $d=23.85\text{cm}$

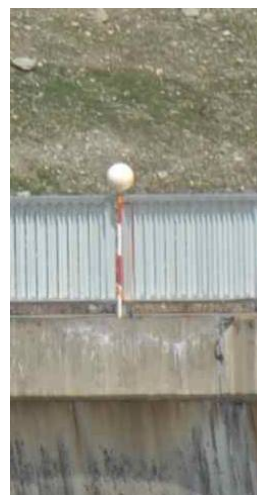


Figura 213: Bola de bolos, $d=21.9\text{cm}$

7.4.4. Estacionamientos del escáner

El escáner se colocó en las posiciones definidas en la planificación. El programa Trimble Point Scape 3.2 se utilizó para controlar el escáner a través de un Tablet PC Colibri X6. Hasta 8 dianas se distribuyeron alrededor del escáner en cada estacionamiento.

Durante el trabajo de campo de abril, las nubes de puntos se tomaron en tres sesiones diferentes. Después de cada sesión, el escáner se reinició. Así, los puntos se almacenaron como si se hubieran tomado desde tres estaciones diferentes (una estación por sesión). La primera estación contenía las nubes de puntos de prueba. La segunda y la tercera contenían nubes de puntos con parte de las dianas de referencia presa a mayor resolución y nubes de puntos de prueba. Toda la fase de escaneado duró alrededor de 8 horas.

En el trabajo de campo de septiembre, las nubes de puntos se tomaron desde 7 posiciones diferentes (de la A a la G). En algunas de ellas, se realizaron dos o más secciones de la presa (A1, A2, A3...) porque se utilizó un soporte especial para inclinar el escáner (Figura 200). Cada sección incluye el menos tres dianas de referencia bien distribuidas y un objeto escaneado. En total, se tomaron 12 secciones y 16 dianas. La numeración de las dianas fue la siguiente: Las esferas de Trimble (D=76mm) incluyen un número adicional menor que 100 (p. ej. B2-15), las esferas de madera (D=240 mm), un número mayor de 100 (p.ej. C3-128).

En cada sección, primero se escanearon las dianas visibles, después la presa y, finalmente, una diana. La última diana siempre se llamaba "control target" y tiene el sufijo "...(ctrl)". La diana de control se utilizó para comprobar la estabilidad del escáner durante la sesión de escaneado. En los procesos de registro y georreferenciación, sólo se utilizaron las primeras dianas. En total, se tomaron aproximadamente 16.7 millones de puntos en dos días. El nombre del fichero de salida refleja el estacionamiento del escáner.

7.4.5. Ajustes del escáner

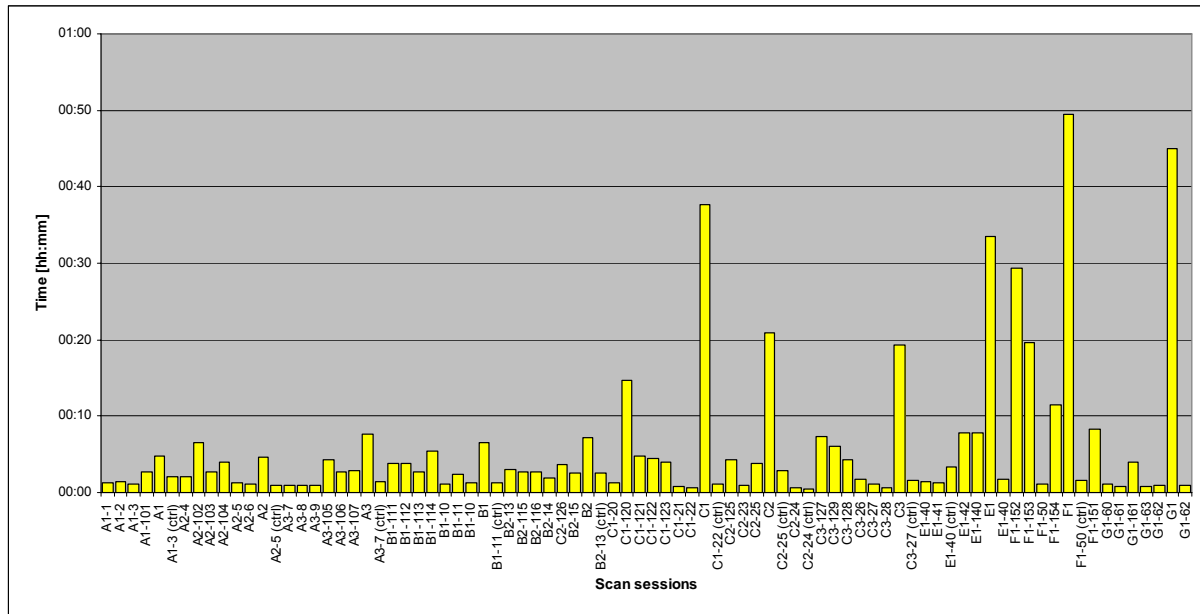
Se seleccionó una resolución de 50x50 mm a una distancia de 90 m para escanear el objeto. La mayor resolución posible, 2x2 mm a 160 m, se utilizó para escanear las dianas.

La siguiente tabla muestra algunos parámetros típicos utilizados para escanear la superficie de la presa en la campaña de septiembre:

Tabla 2: Parámetros típicos de un escáner

	Diana	Objeto
Tipo	Scan Sphere	Scan Object
Nombre	C1-120	C1
Número de puntos	68593	2860089
Duración	00h 14m 47s	00h 38m 01s
Puntos por seg.	77	1253
Resolución	2 x 2 mm a 160 m	50 x 50 mm a 90 m
Número de dispar.	20	2
Autofoco	Activado	Desactivado (fijado a 50 m)
Tipo de malla	Calidad óptima	Rápida
Color en tpo. real	Desactivado	Activado
Distancia Mínima	0 m	0 m
Distancia Máxima	300 m	300 m

Para tener una idea del tiempo de escaneo de una diana o de la superficie de la presa, observa la Figura 214. En total, se necesitaron dos días en la campaña de septiembre.



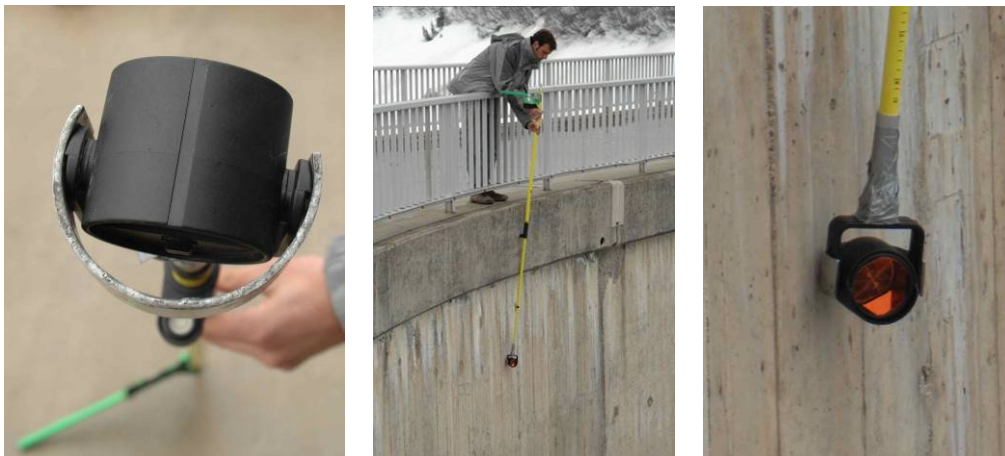


Figura 215: Mediciones taquimétricas de la cresta de la presa

7.5. Procesamiento de los datos

7.5.1. Inicio de RealWorks Survey

La finalidad de este caso de estudio es el control de deformación de la presa. Esta deformación se evaluará de la mejor manera comparando dos modelos 3D. En este apartado, el lector se familiarizará con el programa RealWorks Survey, elegido para procesar los datos.

- 1 Tras hacer doble clic en el icono de RealWorks Survey, se abre la siguiente ventana (Figura 216)

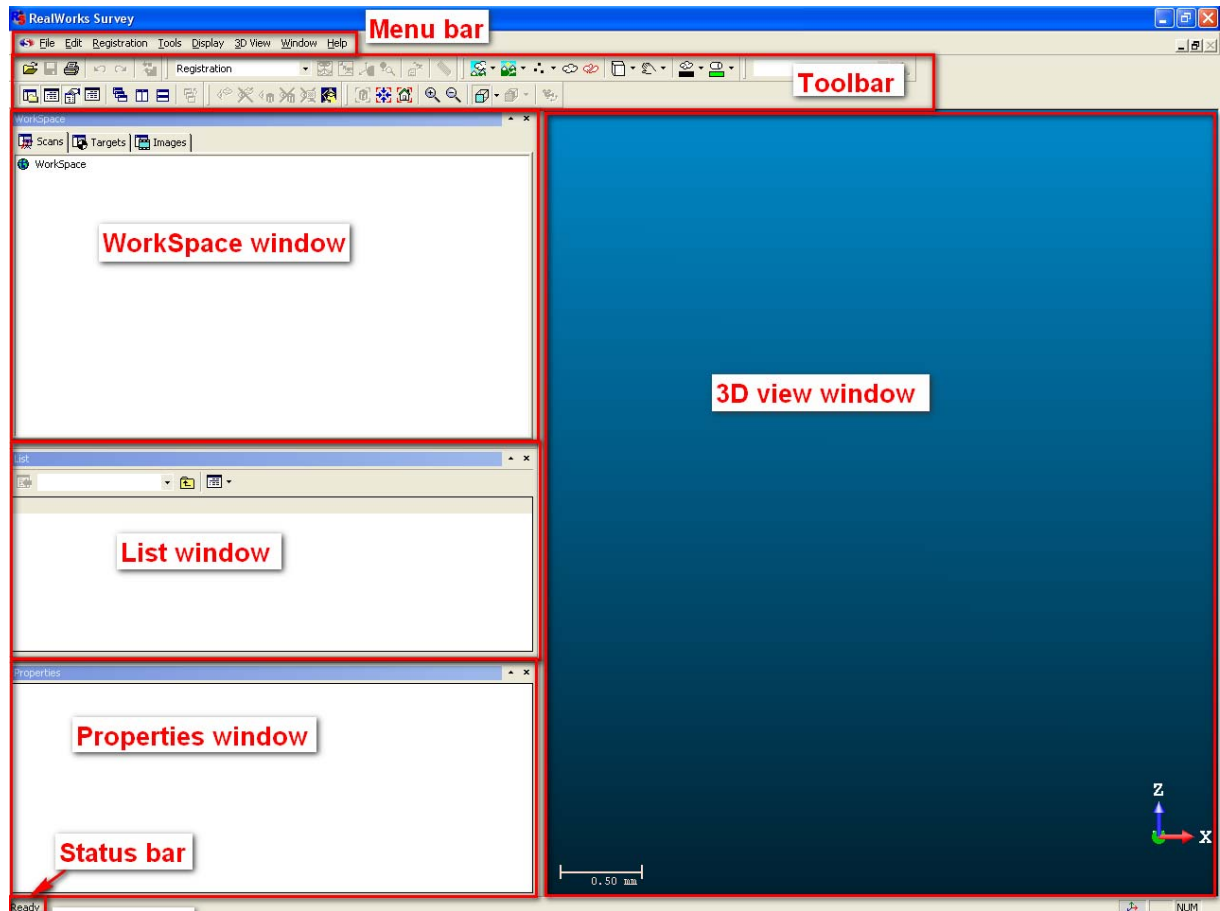



Figura 216: Ventana de RealWorks Survey

2 Abrir los datos

- 2.1 En el menú File, selecciona la opción Open o haz clic en el botón  de la barra de herramientas. Se abre un diálogo. Busca y selecciona el fichero 'A+B+C+E+F+G S0.ppf'. Pulsa *Open*.
- 2.2 Mientras se abre el fichero, se pregunta si se ajustan las dianas esféricas automáticamente. Acepta.
- 2.3 Cuando ya están todos los datos cargados, los puntos se visualizan en la ventana de vista 3D. El proyecto toma el nombre del fichero '*.ppf' y se crea un subproyecto llamado *Sub-Project1* con todos los datos. En el área de la ventana List aparece un objeto llamado Project Cloud.

3 Cambia el modo de visualización

Hay varios modos para visualizar las nubes de puntos (Figura 217). Elige uno en el submenú *Rendering* del menú *3D View*. También se puede hacer clic con el botón derecho en la ventana de la vista (excepto sobre los objetos) para desplegar un menú y seleccionar la opción *Rendering*. Entonces se despliega otro submenú.

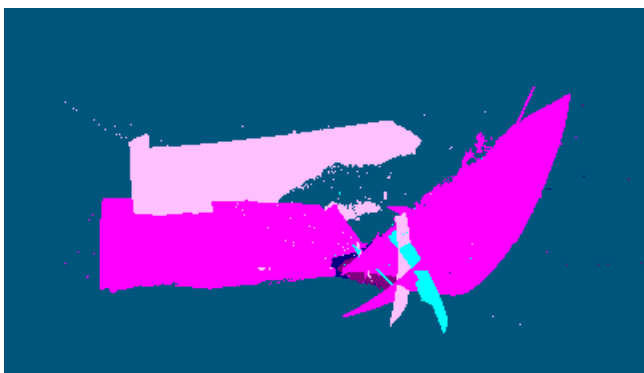


White Colour

Visualiza todos los puntos en color blanco.

Cloud Colour

Visualiza los puntos con un color según la nube a la que pertenecen.



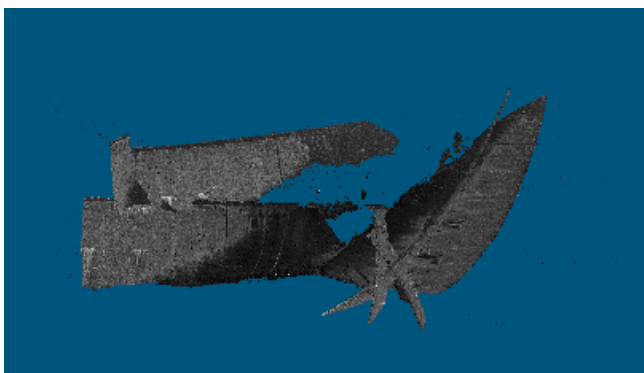
Station Colour

Visualiza los puntos con un color diferente según la estación a la que pertenecen.



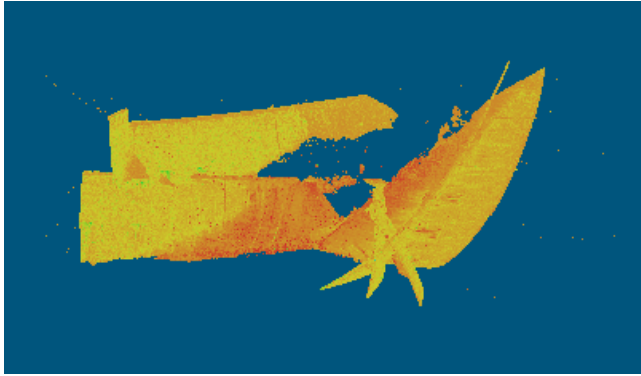
Scan Colour

Visualiza los puntos con un color diferente según el escaneado al que pertenecen. Normalmente, hay varios escaneados en una estación.



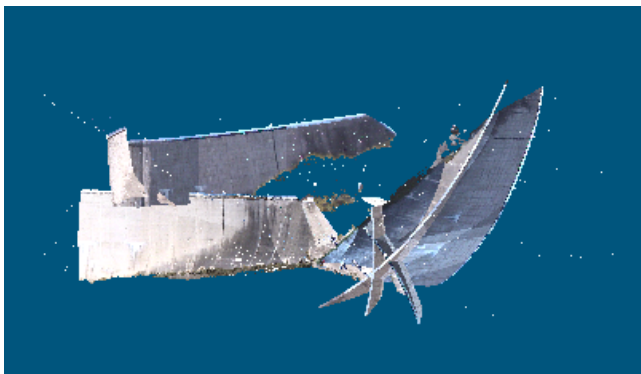
Grey Scaled Intensity

Colorea los puntos con un nivel de gris según su valor de intensidad.



Colour Coded Intensity

Los puntos se colorean del rojo al azul en función de su valor de intensidad.



True Colour

Los puntos se visualizan con su color real.

Figura 217: Modos de visualización de las nubes de puntos

Pregunta 10: Si quieres visualizar los datos de cada estación en un color diferente ¿Qué modo de visualización se debe utilizar?

- 4 Guarda el proyecto: selecciona la opción *Save* del menú *File* o haz clic en el botón



. Se creará un fichero con la extensión '*.rwp'

7.5.2. Registro

En un proyecto de escaneado láser, es normal tratar con varias nubes de puntos tomadas desde diferentes estacionamientos. Cada nube de puntos está referenciada al sistema de referencia del escáner es esa misma estación. Tras el registro, dos o más estacionamientos del escáner tendrán el mismo sistema de referencia. Normalmente se establece una estación como estación de referencia y las otras se transformarán para tener el mismo origen y la misma orientación (véase también apartado 3.5).

El objetivo de este apartado es aprender a registrar varias estaciones de un proyecto de escaneado láser.

Para registrar estaciones de un proyecto en *RealWorks Survey* tenemos que elegir el módulo de trabajo *Registration* en la barra de herramientas. Entonces, todas las estaciones aparecerán bajo el nombre del proyecto en la ventana *Workspace*.

RealWorks Survey presenta dos opciones para realizar el registro:

- **Cloud-Based registration:** Se debe indicar tres pares de puntos homólogos en dos nubes de puntos para iniciar el registro. Luego, el programa puede mejorar este registro utilizando partes comunes en las dos nubes de puntos.

- **Target-Based registration:** Se puede registrar un conjunto de estaciones mediante dianas. Estas dianas se pueden haber obtenido durante el proceso de escaneado, se pueden haber creado manualmente durante el proceso de registro u obtenerse mediante instrumentos topográficos tradicionales como una estación total. El registro se basa en un ajuste mínimo-cuadrático de las observaciones de los dianas correspondientes de cada estación.

En este caso de estudio, se utilizaron dianas tanto para el registro como para la georreferenciación de las nubes de puntos, por lo que elegiremos la segunda opción de las anteriores. Para ello, primero examinaremos las dianas ajustadas automáticamente, las modificaremos si fuera necesario y, finalmente, registraremos las nubes de puntos.


Para realizar el registro, es necesario cambiar el módulo de trabajo. *RealWorks Survey* ofrece tres módulos de trabajo diferentes: *Registration*, *OfficeSurvey* y *Modelling*, accesibles desde la barra de herramientas. Haz clic en la flecha de la barra de herramientas *Tools* y elige la opción *Registration* (Figura 218).



Figura 218: Cambio de módulo

7.5.2.1. **Análisis de las dianas**

Las dianas se pueden detectar automáticamente en el programa (véase apartado 2 en 7.5.1). Desafortunadamente, ocurren algunos errores y se deben corregir manualmente. Para comprobarlos, sigue estos pasos y mira el video [01-RWS Fit a sphere Object.avi](#):

- 1 Abre el proyecto 'A+B+C+E+F+D S0.rwp'.
- 2 Selecciona el proyecto en la ventana WorkSpace.
- 3 En el menú *Registration*, selecciona *Target Analyzer Tool* o haz clic en el botón . Se abre el diálogo Target Analyzer (Figura 219).

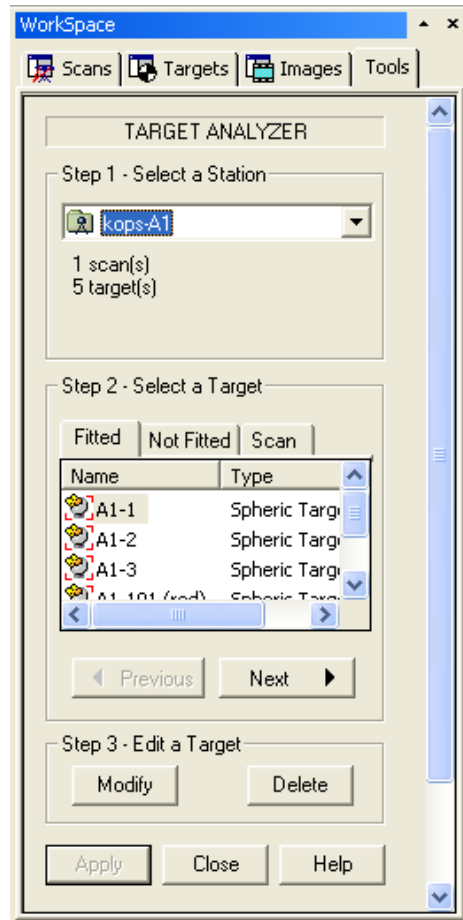


Figura 219: Cuadro de diálogo Análisis de dianas

Cuando se escanea un objeto, se indica si es una diana o no. Si se ha indicado que la nube de puntos corresponde a una diana, aparecerá en las listas *Fitted* o *Not Fitted*. En cambio, si no es una diana, aparecerá en la lista *Scan*. Se puede seleccionar una diana ajustada, examinar su nube de puntos y ajustar la geometría. Si la esfera ajustada a la nube de puntos se ha estimado incorrectamente, se puede modificar o eliminar.

4 Modifica una diana esférica

4.1 Selecciona la estación *kops-A1*

4.2 Selecciona la diana *A1-101(red)*: *RealWorks Survey* ajusta esferas con un diámetro determinado para las dianas esféricas de Trimble. En este caso se utilizó una esfera que no era de Trimble. Sin embargo, el programa la ajustó (Figura 220). Por tanto, se produjo un error que se debe corregir.

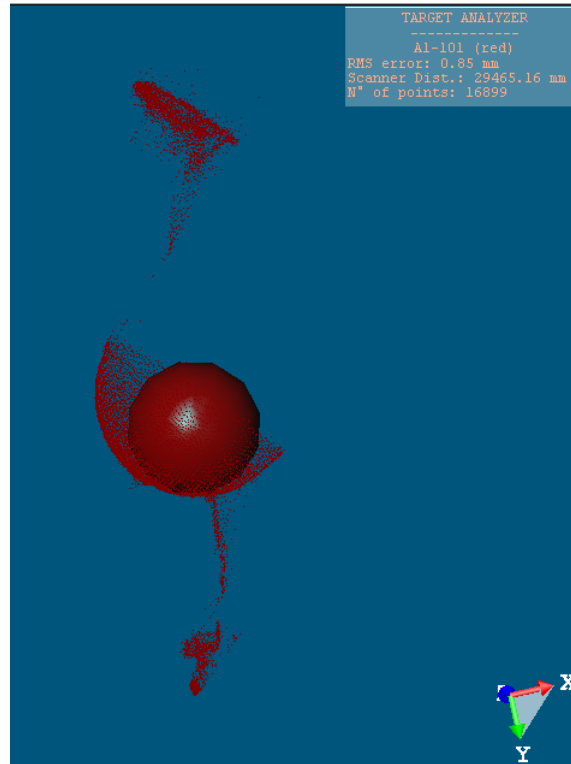



Figura 220: Diana A1-101(roja)

4.3 Haz clic en el botón *Modify* del Target Analyzer Tool.

4.4 Dibuja un cercado alrededor de los puntos de la diana (Figura 221) y haz clic en el botón  para eliminar el resto de puntos de la nube (Figura 222).

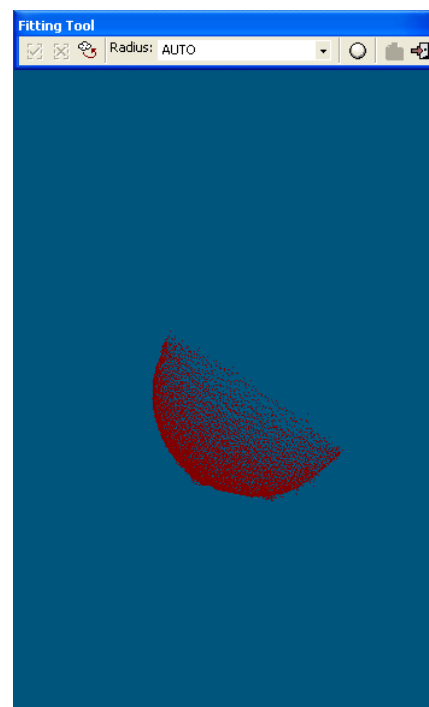
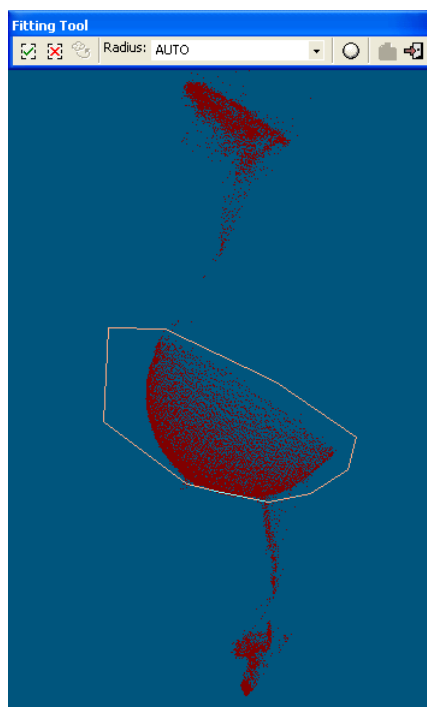





Figura 221: Modificando la diana A1-101(red) Figura 222: Modificando la diana A1-101(red)

- 4.5 Establece el radio como **AUTO** o, en caso de conocerlo, introduce el radio de la esfera. En este caso, se estableció un radio de 119.85 mm.
- 4.6 Haz clic en el botón  para definir el objeto como diana esférica.
- 4.7 Haz clic en los botones *Create Fitted Geometry*  y *Close Tool* .

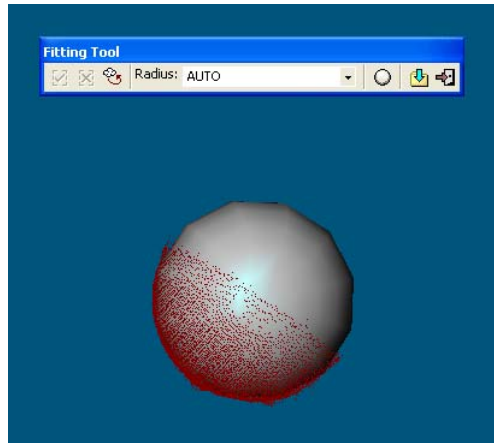


Figura 223: Nueva diana A1-101(red)

A realizar: Revisa todas las dianas ajustadas automáticamente y realiza una lista con las que estén ajustadas erróneamente.
Pregunta 11: ¿Qué dianas están mal ajustadas? ¿Hay alguna diana en la lista "Not fitted"?

5 Modifica todas las dianas ajustadas incorrectamente y guarda el proyecto

7.5.2.2. Registro de estaciones

Para registrar dos o más nubes de puntos, éstas deben tener, al menos, tres dianas en común. En este proyecto, un misma diana tiene nombres diferentes en dos nubes de puntos. La siguiente tabla muestra los nombres de las dianas en las diferentes nubes de puntos:

Tabla 3: Dianas en común


A1-1 / A2-4
A1-101 / A2-102
A2-5 / A3-7
A2-6 / A3-8
A2-103 / A3-105 / B1-111
A2-104 / A3-106 / B1-112
A3-107 / B1-113 / B2-115
B1-12 / B2-13
C1-120 / B1-114 / B2-116
C1-123 / C2-125
C2-126 / C3-129

Todos los nombres de una misma fila corresponden a un misma diana. Es fácil saber de qué nube de puntos ha tomado el nombre (véase el apartado 7.4.4). Por tanto, sólo hay tres pares de nubes de puntos que comparten, al menos, tres dianas.

Tabla 4: Pares de nubes de puntos con dianas comunes

Pares de nubes de puntos	Dianas en común
A2-A3	A2-5 / A3-7
	A2-6 / A3-8
	A2-103 / A3-105
	A2-104 / A3-106
A3-B1	A3-105 / B1-111
	A3-106 / B1-112
	A3-107 / B1-113
B1-B2	B1-113 / B2-115
	B1-12 / B2-13
	B1-114 / B2-116

Las nubes de puntos *A2*, *A3*, *B1* y *B2* se podrán registrar y referenciar al mismo sistema de referencia. Las otras nubes de puntos no se pueden referenciar por este procedimiento ya que no tiene suficientes puntos de referencia en común. Éstas otras se registrarán por medio de la herramienta *Cloud-Based registration*. Esto requiere identificar pares de puntos correspondientes en dos nubes de puntos, lo que es muy difícil en este caso por la forma del objeto. (Para información adicional, véase el video [02-RWS Registration.avi](#)):

- 1 Abre el fichero '*A+B+C+E+F+G S1.rwp*'. En este proyecto ya se han corregido todas las dianas.
- 2 Selecciona las nubes de puntos *kops-A2* y *kops-A3* en la ventana List.
- 3 En el menú *Registration*, selecciona *Target-Based Registration Tool* o haz clic en el botón . Se abrirá el cuadro de diálogo Target-Based Registration.
- 4 Haz clic en la flecha de la lista *Reference Station* y selecciona *kops-A2* de la lista desplegable. Observa que el nombre de *kops-A2* se habrá puesto en negrita en el cuadro de abajo.
- 5 Selecciona las estaciones *kops-A2* y *kops-A3* y cambia su estado a *ON* en la ventana *Station List*. Su representación se muestra en la ventana de vista 3D (Figura 224).

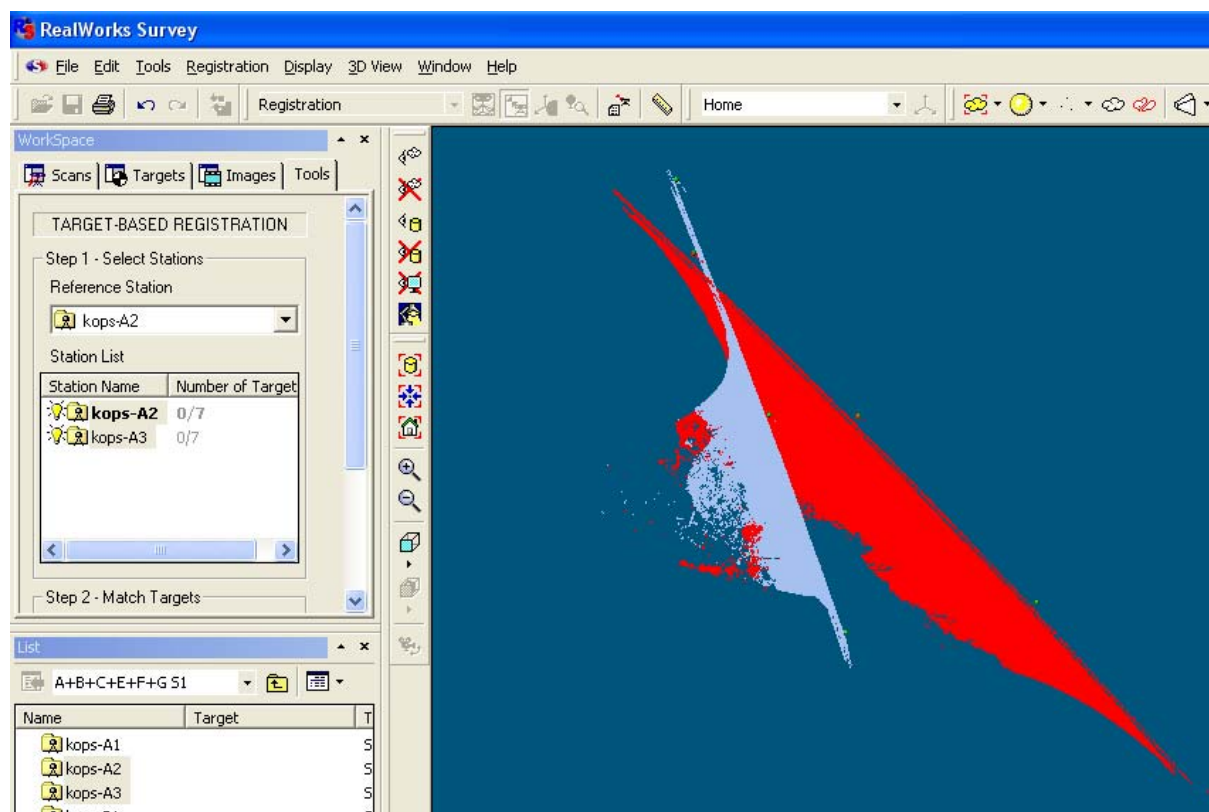


Figura 224: Nubes de puntos kops-A2 y kops-A3 antes de registrarse

6 Pulsa el botón *Automatic* en el apartado *Matching Targets*

Observa que antes de enlazar los puntos de referencia, *Number of Targets* para kops-A2 y kops-A3 tiene el valor 0/7. Cuando finaliza el enlace automático, esto cambia a 5/7. Esto significa que hay cinco puntos de referencia en común entre ambas estaciones. Éstos pueden verse en la vista 3D (Figura 225).

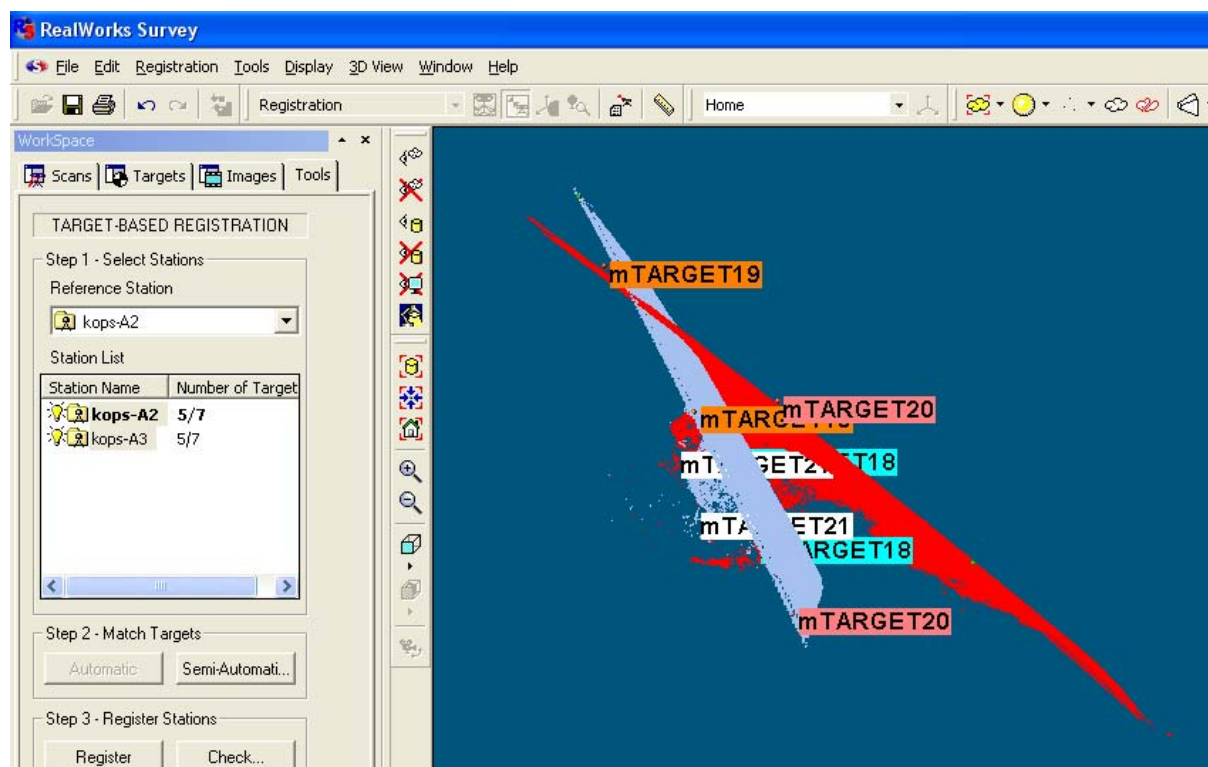


Figura 225: Dianas emparejadas en kops-A2 y kops-A3

Cada par de diana emparejada se incluye en una nueva carpeta independiente llamada *mTarget*, bajo el nodo del proyecto en el árbol de dianas. Las dianas que no se han enlazado permanecen en la carpeta *Unmatched*.

- 7 Registra las estaciones: haz clic en el botón *Register* para realizar el ajuste de mínimos cuadrados. La Figura 226 muestra ambas nubes de puntos tras el registro.

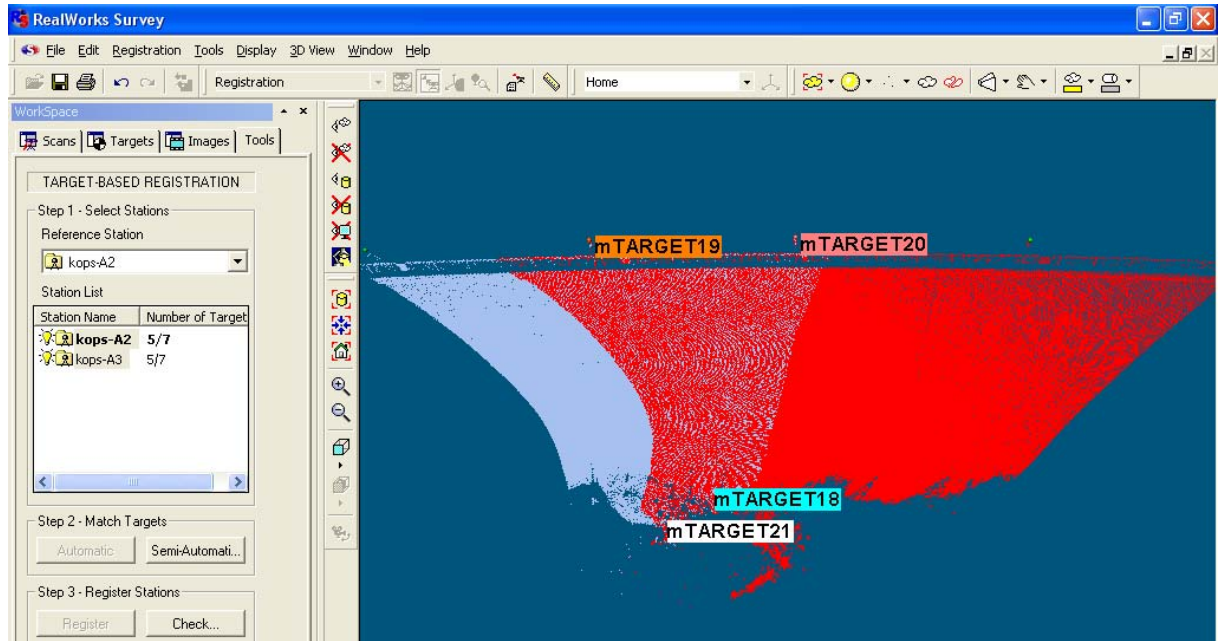


Figura 226: kops-A2 y kops-A3 tras el registro

- 8 Comprueba el resultado del registro: haz clic en el botón *Check*. Esto abre la ventana *Control Tool* (Figura 227). Se puede comprobar los residuos de cada par de dianas (dentro de cada uno de ellos podemos encontrar todas las observaciones de esta diana desde las diferentes estaciones) y también los residuos para cada estación (con todos las dianas escaneadas desde cada estación Figura 228). Si el error de un punto excede la tolerancia, se puede utilizar el botón *Unmatch* para deseleccionarlo en el próximo registro. Después, se debe de volver a realizar el registro. Los errores del registro se muestran en la unidad actual establecida, mm (esto se puede modificar en el menú *Edit > Preferences*). En el diálogo *Control Tool* se puede ordenar los datos de una columna en orden ascendente haciendo clic en su encabezado. Esto puede servir de ayuda a la hora de tener en cuenta las dianas con mayor error.

Name	Scan Per Station	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting E
kops-A2	7			1.34 mm				
A2-4		--	--	--	--	--	--	1.45 mr
A2-102 (red)		--	--	--	--	--	--	1.12 mr
A2-103 (green)		mTARGET19	2	1.77 mm	0.98 mm	-0.85 mm	-1.21 mm	0.98 mr
A2-104 (blue)		mTARGET20	2	1.55 mm	-0.21 mm	-0.98 mm	1.18 mm	1.15 mr
A2-5		mTARGET17	2	1.23 mm	-0.87 mm	0.74 mm	-0.46 mm	1.62 mr
A2-6		mTARGET18	2	1.32 mm	0.68 mm	1.13 mm	-0.07 mm	0.94 mr
A2-5 (ctrl)		mTARGET21	2	0.81 mm	-0.58 mm	-0.03 mm	0.56 mm	1.55 mr
kops-A3	7			1.34 mm				
A3-7		mTARGET17	2	1.23 mm	0.87 mm	-0.74 mm	0.46 mm	1.67 mr
A3-8		mTARGET18	2	1.32 mm	-0.68 mm	-1.13 mm	0.07 mm	1.00 mr
A3-9		--	--	--	--	--	--	0.96 mr
A3-105 (blue)		mTARGET19	2	1.77 mm	-0.98 mm	0.85 mm	1.21 mm	1.04 mr
A3-106 (yellow)		mTARGET20	2	1.55 mm	0.21 mm	0.98 mm	-1.18 mm	1.04 mr
A3-107 (white)		--	--	--	--	--	--	1.13 mr
A3-7 (ctrl)		mTARGET21	2	0.81 mm	0.58 mm	0.03 mm	-0.56 mm	1.45 mr

Figura 227: Ventana con el informe del registro para cada estación (nota: los puntos de control también se han enlazado)

Name	Scan Per Target	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z
mTARGET17	2		1.23 mm			
A2-5		kops-A2	1.23 mm	-0.87 mm		0.74 mm
A3-7		kops-A3	1.23 mm	0.87 mm		-0.74 mm
mTARGET18	2		1.32 mm			
A2-6		kops-A2	1.32 mm	0.68 mm		1.13 mm
A3-8		kops-A3	1.32 mm	-0.68 mm		-1.13 mm
mTARGET19	2		1.77 mm			
A2-103 (green)		kops-A2	1.77 mm	0.98 mm		-0.85 mm
A3-105 (blue)		kops-A3	1.77 mm	-0.98 mm		0.85 mm
mTARGET20	2		1.55 mm			
A2-104 (blue)		kops-A2	1.55 mm	-0.21 mm		-0.98 mm
A3-106 (yellow)		kops-A3	1.55 mm	0.21 mm		0.98 mm
mTARGET21	2		0.81 mm			
A2-5 (ctrl)		kops-A2	0.81 mm	-0.58 mm		-0.03 mm
A3-7 (ctrl)		kops-A3	0.81 mm	0.58 mm		0.03 mm

Figura 228: Ventana con el informe del registro para cada diana (nota: los puntos de control también se han enlazado)

Nota en las Figura 227 y Figura 228: la diana esférica A2-5 se escaneó dos veces. La primera, de nombre A2-5, se escaneó siguiendo el proceso normal de escaneado y se utilizó para el registro y la georreferenciación. La segunda, llamada A2-5 (ctrl), se escaneó después del objeto (scan A2) y se utilizó en el postproceso para comprobar un posible movimiento del escáner durante el trabajo. Por tanto, las dianas que contiene el sufijo ctrl no se deberían incluir en los procesos de registro y georreferenciación; solo en el proceso de control.

Pregunta 12: ¿Por qué se deben omitir las dianas con el sufijo "ctrl"?

- 9 Para omitir las dianas de control: selecciónalos en el diálogo *Control Tool* haciendo clic sobre ellos y, luego, pulsa el botón *Unmatch*.
- 10 Cierra la herramienta y vuelve a realizar el registro haciendo clic en el botón *Register*. Los resultados se muestran en Figura 229 y Figura 230

Name	Sca...	Corre...	Sca...	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
kops-A2	7			1.44 mm					
A2-4		--	--	--	--	--	--	1.45 mm	11715.38 mm
A2-102 (red)		--	--	--	--	--	--	1.12 mm	29487.65 mm
A2-103 (green)		m...	2	1.77 mm	1.01 mm	-0.87 mm	-1.17 mm	0.98 mm	28158.96 mm
A2-104 (blue)		m...	2	1.51 mm	-0.30 mm	-0.89 mm	1.19 mm	1.15 mm	31432.58 mm
A2-5		m...	2	1.30 mm	-1.11 mm	0.66 mm	-0.19 mm	1.62 mm	10679.53 mm
A2-6		m...	2	1.18 mm	0.40 mm	1.10 mm	0.17 mm	0.94 mm	14939.46 mm
A2-5 (ctrl)		--	--	--	--	--	--	1.55 mm	10679.51 mm
kops-A3	7			1.44 mm					
A3-7		m...	2	1.30 mm	1.11 mm	-0.66 mm	0.19 mm	1.67 mm	10665.47 mm
A3-8		m...	2	1.18 mm	-0.40 mm	-1.10 mm	-0.17 mm	1.00 mm	14922.67 mm
A3-9		--	--	--	--	--	--	0.96 mm	14855.24 mm
A3-105 (blue)		m...	2	1.77 mm	-1.01 mm	0.87 mm	1.17 mm	1.04 mm	28146.16 mm
A3-106 (yellow)		m...	2	1.51 mm	0.30 mm	0.89 mm	-1.19 mm	1.04 mm	31421.25 mm
A3-107 (white)		--	--	--	--	--	--	1.13 mm	38862.27 mm
A3-7 (ctrl)		--	--	--	--	--	--	1.45 mm	10665.26 mm

Figura 229: Ventana con el informe del registro para cada estación (nota: las dianas de control se han omitido)

Name	Scan Per Target	Corresponding Station	Residual Error	Delta X
mTARGET17	2		1.30 mm	
A2-5		kops-A2	1.30 mm	-1.11 mm
A3-7		kops-A3	1.30 mm	1.11 mm
mTARGET18	2		1.18 mm	
A2-6		kops-A2	1.18 mm	0.40 mm
A3-8		kops-A3	1.18 mm	-0.40 mm
mTARGET19	2		1.77 mm	
A2-103 (green)		kops-A2	1.77 mm	1.01 mm
A3-105 (blue)		kops-A3	1.77 mm	-1.01 mm
mTARGET20	2		1.51 mm	
A2-104 (blue)		kops-A2	1.51 mm	-0.30 mm
A3-106 (yellow)		kops-A3	1.51 mm	0.30 mm

Figura 230: Ventana con el informe del registro para cada par de dianas (nota: las dianas de control se han omitido)

- 11 Para guardar los resultados del registro:
 - 11.1 Pulsa **Apply** para validar el registro.
 - 11.2 Pulsa **Group** para validar y agrupar las nubes de puntos registradas en un nuevo grupo. Se crea un grupo de estaciones llamado *New Group*.
 - 11.3 Renombra el grupo anterior con el nombre *Group A2-A3*. Haz clic con el botón derecho sobre *New Group* y selecciona la opción **Properties**. Cambia el nombre en la caja de propiedades.
- 12 Registra las nubes de puntos *B1* y *B2*. Nombra el grupo como *Group B1-B2*.
- 13 Registra los dos grupos anteriores (*Group A2-A3* y *Group B1-B2*). Nombra el grupo final como *Group A2-A3-B1-B2*.

Pregunta 13: ¿Cuántas dianas tienen en común *Group A2-A3* y *Group B1-B2*?
¿Sería posible unir ambos grupos con un número menor de dianas comunes?

7.5.2.3. Informe de los resultados del registro

Se puede crear un informe del proceso de registro a través de los siguientes pasos:

- 1 Selecciona el proyecto en la ventana *WorkSpace*.
- 2 En el menú *Registration*, selecciona **Entity-Based Registration Report**. Se abre el cuadro de diálogo.
- 3 Navega hasta la carpeta donde quieres guardar el informe.
- 4 Introduce un nombre para el fichero. La extensión **.rtf* se añade de forma automática.
- 5 Pulsa **Save**.

Pregunta 14: ¿Cuál es la distancia media entre las dianas en el registro realizado en el apartado anterior?

Pregunta 15: ¿Hay alguna otra estrategia para registrar las nubes de puntos *A2*, *A3*, *B1* y *B2*?
¿Encuentra RealWorks la misma solución en todos los casos?
¿Cuál es la distancia media y máxima entre todas las dianas en estas estrategias?
¿Cuál es la mejor estrategia? ¿Por qué?

7.5.3. Georreferenciación

La georreferenciación es el proceso de transformar un objeto descrito en un sistema de coordenadas locales a un sistema de coordenadas globales, por ejemplo redes nacionales. Para ello, tenemos que conocer al menos tres puntos en ambos sistemas de coordenadas. Si se conocen más de tres puntos se puede realizar un ajuste por mínimos cuadrados para calcular la mejor transformación. También se puede importar un conjunto de puntos tomados con instrumentos topográficos tradicionales y utilizarlos para asignar las coordenadas.

En este caso de estudio, la georreferenciación de nubes de puntos es un paso esencial para comparar modelos de diferentes periodos. Para ello, las dianas de referencia se midieron con instrumentos topográficos de alta precisión (estación total) y se conocen sus coordenadas en el sistema de coordenadas global de la presa, que también se utiliza para su control.

Normalmente, cuando se procesan los datos del escáner, primero se registran las nubes de puntos (con lo que todas están en un mismo sistema de referencia) y luego se georreferencian (el sistema de referencia local se transforma al sistema de referencia global). Como ya se ha visto en el apartado anterior, en este caso no se pueden registrar todas las nubes de puntos porque hay nubes que no tienen suficientes dianas en común. La solución pasa por georreferenciar cada nube individualmente sin realizar ningún registro. Así, al final, todas las nubes de puntos georreferenciadas estarán referenciadas al mismo sistema de referencia global.

Hay que hacer hincapié que esta forma de georreferenciar sólo se debe aplicar si no se puede realizar el registro común de nubes de puntos, porque la precisión de cada una de las nubes de puntos georreferenciadas puede ser peor que si se hubieran registrado primero y georreferenciado luego.

En este apartado se aprenderá a georreferenciar un conjunto de estaciones. Para ello, realiza los siguientes pasos y mira el video [03-RWS Georeferencing.avi](#):

- 1 Abre el proyecto 'A+B+C+E+F+G_S1.rwp'. En él ya se han corregido todas las dianas y las nubes de puntos se encuentran en su sistema de referencia original
- 2 Importa las coordenadas de las dianas:
 - 2.1 Abre el fichero ASCII 'Coordinates Spheres September.txt'.
 - 2.2 Cuando se abra el cuadro de diálogo, marca la opción **Add to project** y selecciona el proyecto actual.
 - 2.3 En el asistente Surveying Network Import (Figura 231), selecciona las siguientes opciones:
 - Import: as a Topo Station
 - Lines to skip: 1
 - File Format: Point#, X, Y, Z, Description
 - Separator: Tabulation
 - Units: Meter

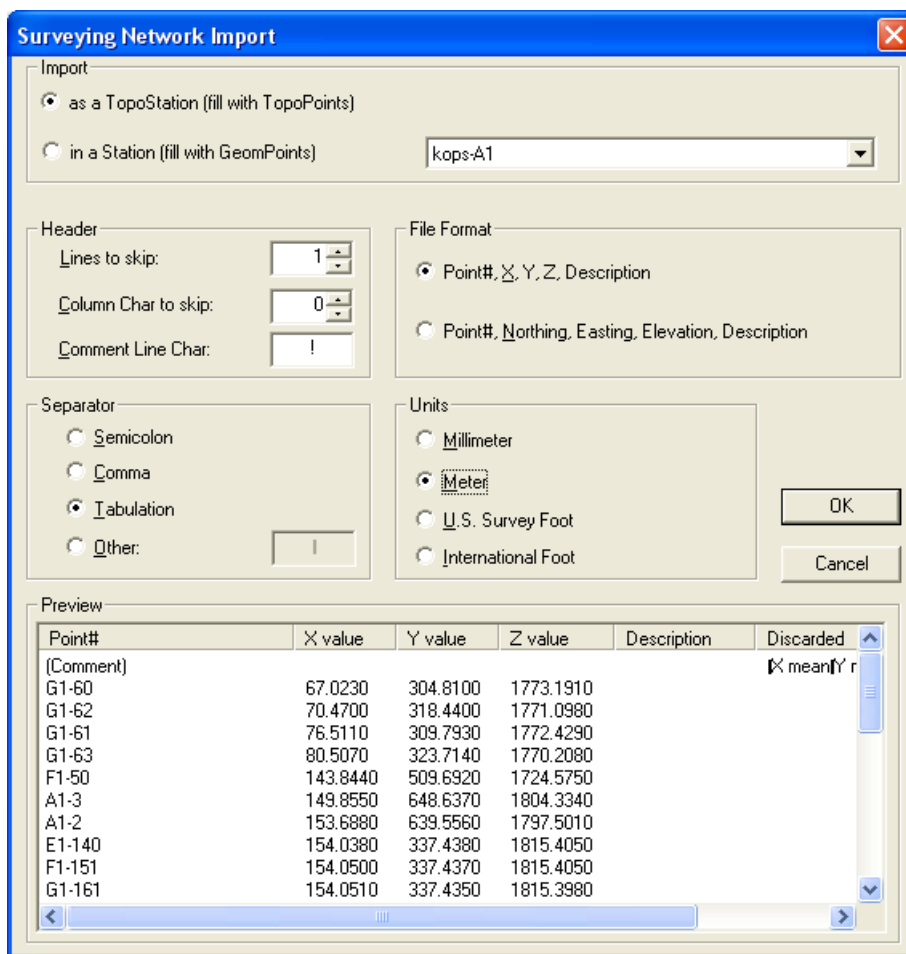


Figura 231: Asistente para importar el fichero ASCII con las dianas en un sistema global

Observa que se crea una nueva carpeta llamada Coordinates Spheres September con un conjunto de puntos de referencia llamados TopoPoints (Figura 232).

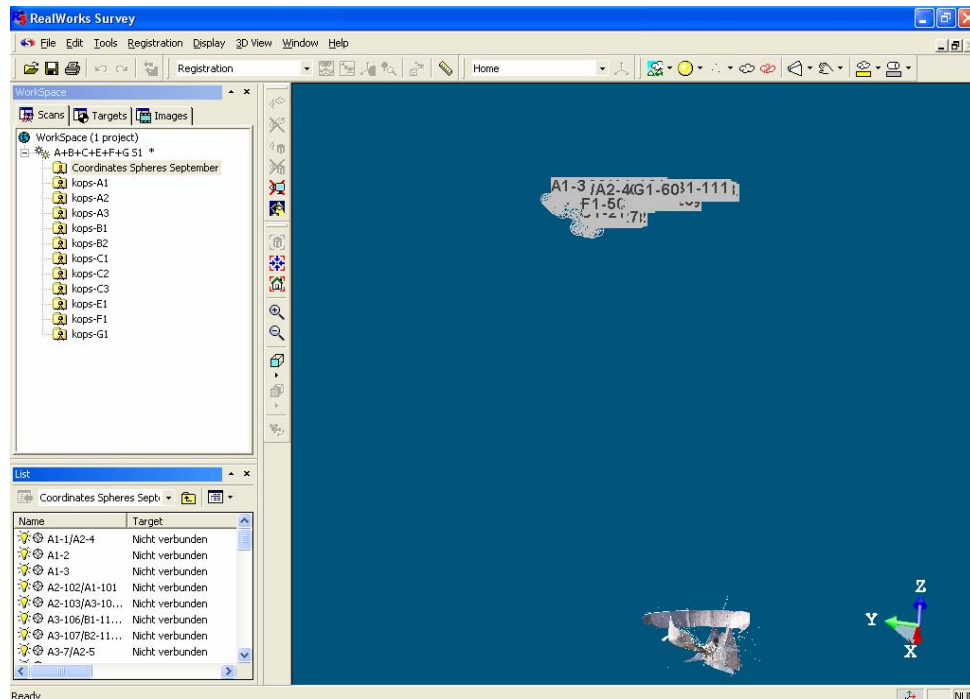



Figura 232: Nube de puntos y dianas (*TopoPoints*)

- 3 Selecciona todas las nubes de puntos de la ventana List
- 4 En el menú **Registration**, selecciona la herramienta **Georeferencing** o haz clic en el botón . Se abre el cuadro de diálogo Georeferencing.
- 5 Selecciona la estación *kops_A1*.
- 6 Selecciona las dianas ya ajustadas y los puntos de referencia correspondientes (*TopoPoints*).
 - 6.1 Selecciona la diana *A1-1* en la ventana Target List. El botón **By Target** se activa (Si no, haz clic en la ventana de la vista y pulsa Intro)
 - 6.2 Pulsa el botón **By Target**. Se abre el cuadro de diálogo Coordinates Assigning.
 - 6.3 Selecciona el punto de referencia (*TopoPoint*) *A1-1/A2-4*.
 - 6.4 Pulsa **OK**.
 - 6.5 Repite las cuatro órdenes anteriores con todas las dianas de la estación *A1-1*.

La transformación para georeferenciar objetos requiere siete parámetros. Por tanto, tiene que haber disponible, al menos, tres puntos. Una vez se han asignado las coordenadas a tres o más puntos, se aplicará automáticamente un ajuste por mínimos cuadrados para calcular la mejor transformación. Se puede seleccionar y eliminar una diana ya asignada. También se puede desmarcar una diana y el ajuste se recalculará automáticamente.

Pregunta 16: Como el mínimo de dianas requerido es tres, ¿se debe desmarcar el punto A1-101? ¿Por qué?

Pregunta 17: ¿Se podría desmarcar alguna otra diana? ¿Por qué?

- 7 Elige la mejor combinación de dianas: la combinación óptima es la que presenta todas las dianas distribuidas regularmente por todo el objeto. Además, normalmente proporciona el error medio más bajo.
- 8 Pulsa **Apply**.
- 9 Repite los pasos del 5 al 8 con el resto de nubes de puntos.

Nota: ¡Las dianas de control nunca se utilizarán en la georreferenciación!

¿Qué ocurre con el escaneado *kops-F1*?

Tras asignar todas las dianas con sus correspondientes puntos de referencia (*TopoPoints*), el error medio es 109.04 mm. Este valor es demasiado grande, lo que significa que ha ocurrido algo mal. De hecho, este error se debe a un ligero movimiento del escáner durante la toma de datos, por lo que esta nube no se referenciará ni se utilizará en los próximos pasos.

10 Pulsa *Close*. Las nubes de puntos se ubicarán en el nuevo sistema de referencia (Figura 233).

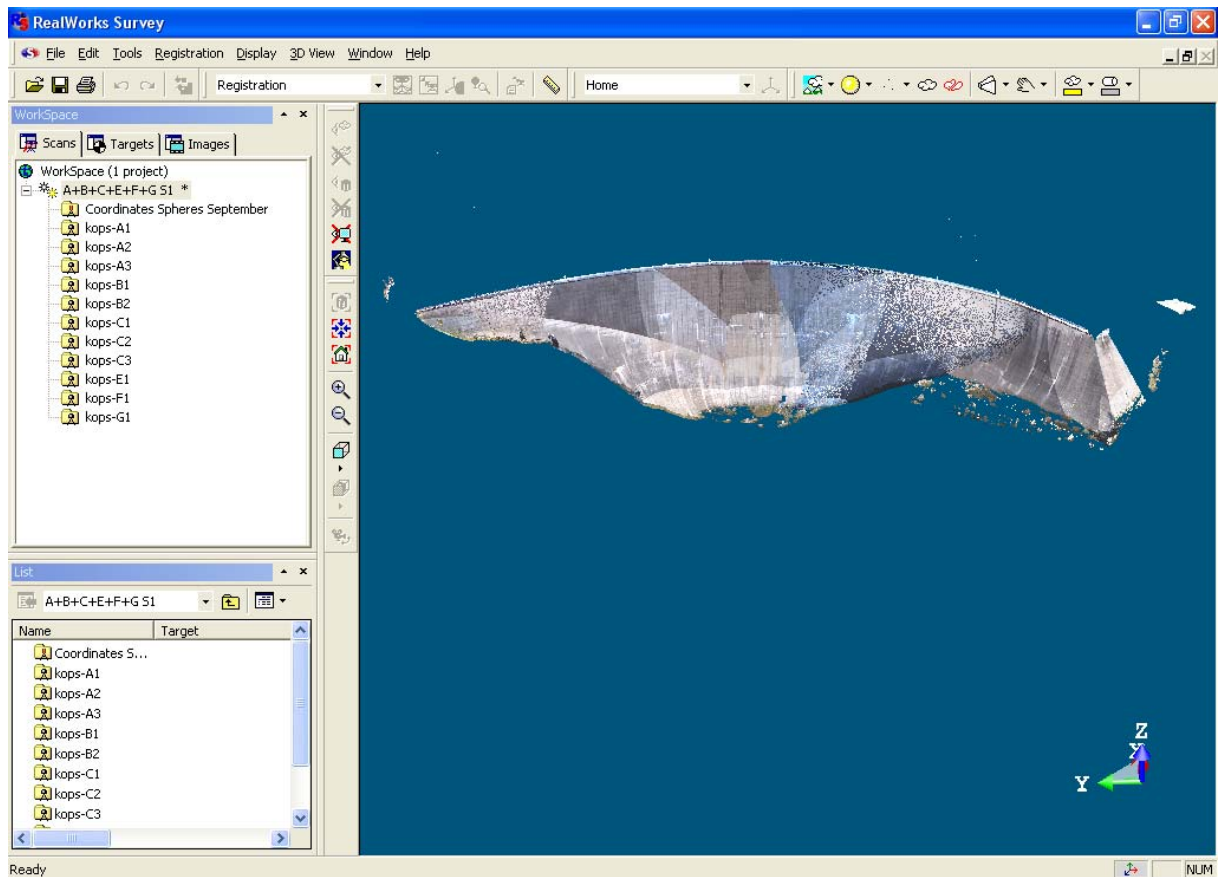



Figura 233: Nubes de puntos georreferenciadas

- 11 Guarda el informe de georreferenciación
 - 11.1 Selecciona el proyecto *A+B+C+E+F+G S1* en la ventana *Workspace*.
 - 11.2 En el menú *Registration*, selecciona *Entity-Based Registration Report* o haz clic en el botón .
- 12 Guarda el proyecto con otro nombre.

7.5.4. Control de los estacionamientos del escáner

Para realizar una comprobación de un movimiento eventual del escáner durante la medición, utilizamos los datos apantallados del informe de propiedades. Este método se muestra para los escaneados *A1* y *F1*.

- 1 Exportar el informe de propiedades.
 - 1.1 Selecciona los escaneados *A1* y *F1* de la ventana List.
 - 1.2 Haz clic en la opción *File > Export Object Properties...* y crea un fichero *.rtf
Entonces, se crea un fichero con todas las propiedades de las dianas de las estaciones *A1* y *F1*
- 2 Selecciona las coordenadas de las dianas control y de sus dianas normales correspondientes y cópialas en una hoja de cálculo (véase Figura 234).

A1-3 Type: Spheric Target Number of Points: 12121 Number of Points Loaded: 12121 Standard Deviation: 1.22 mm Center: 149855.34 mm; 648637.76 mm; 1804338.69 mm Diameter: 76.20 mm Direction of Axis: -0.82; 0.57; -0.03 ...	A1-3 (ctrl) Type: Spheric Target Number of Points: 23568 Number of Points Loaded: 23568 Standard Deviation: 1.18 mm Center: 149856.26 mm; 648635.94 mm; 1804336.57 mm Diameter: 76.20 mm Direction of Axis: -0.82; 0.57; -0.03 ...
F1-50 Type: Spheric Target Number of Points: 12603 Number of Points Loaded: 12603 Standard Deviation: 1.07 mm Center: 143831.62 mm; 509686.92 mm; 1724627.35 mm Diameter: 76.20 mm Direction of Axis: -0.17; 0.02; 0.99 ...	F1-50 (ctrl) Type: Spheric Target Number of Points: 17855 Number of Points Loaded: 17855 Standard Deviation: 1.11 mm Center: 143846.66 mm; 509669.43 mm; 1724650.75 mm Diameter: 76.20 mm Direction of Axis: -0.17; 0.02; 0.99 ...

Figura 234: Informe de propiedades de las dianas *A1-3* y *F1-50* con las coordenadas de sus centros (en negrita)

- 3 Comparando las coordenadas de las dianas normales con la de control, se puede observar un movimiento eventual del escáner (Figura 235).

$\text{diff} = \sqrt{(x_{(\text{normal})} - x_{(\text{ctrl})})^2 + (y_{(\text{normal})} - y_{(\text{ctrl})})^2 + (z_{(\text{normal})} - z_{(\text{ctrl})})^2}$				
	X	Y	Z	
A1-3	149855.34	648637.76	1804338.69	
A1-3 (ctrl)	149856.26	648635.94	1804336.57	
	-0.92	1.82	2.12	diff: 2.94 mm
F1-50	143831.62	509686.92	1724627.35	
F1-50 (ctrl)	143846.66	509669.43	1724650.75	
	-15.04	17.49	-23.4	diff: 32.86 mm

Figura 235: Cálculo de posibles desviaciones

Nota: ¡El escaneado F1 no se puede utilizar en los siguientes pasos (p.ej. el modelado) debido al gran error detectado en las coordenadas X, Y y Z!

7.5.5. Eliminación de puntos

Durante la adquisición de los datos, también se escanean obstrucciones tales como árboles, edificios adjuntos o mobiliario urbano. Estos puntos deberían eliminarse antes del modelado. Además, en nuestro caso, el escaneado *kops-F1* no se georreferenció y se eliminó. Para este propósito se debe seguir los siguientes pasos y ver el video [04-RWS Deleting points.avi](#):

- 1 Abrir el proyecto 'A+B+C+E+F+G S2.rwp'. Se abre un proyecto que contiene todos los escaneados georreferenciados (excepto *kops-F1*).
- 2 Selecciona la nube *kops-F1* en la ventana List.
- 3 En el menú *Edit*, selecciona *Delete*. Se avisa de que la operación no se podrá deshacer. Pulsa *Yes*.

Para eliminar un conjunto de puntos de la nube se utiliza la herramienta *Segmentation*:


- 4 Ir al módulo *OfficeSurvey*.
- 5 Cambia el modo de visualización a *True Colour*.
- 6 Selecciona la nube de puntos en la ventana List (*Project Cloud*).
- 7 Selecciona la opción *Tools > Segmentation Tool* o haz clic en el botón . Aparece la barra de herramientas Segmentation Tool (Fig. 236).



Figura 236: Barra de herramientas de segmentation

- 8 Dibuja un cercado alrededor de los puntos que se necesita eliminar (Fig. 237). Los botones *In* y *Out* se activan.

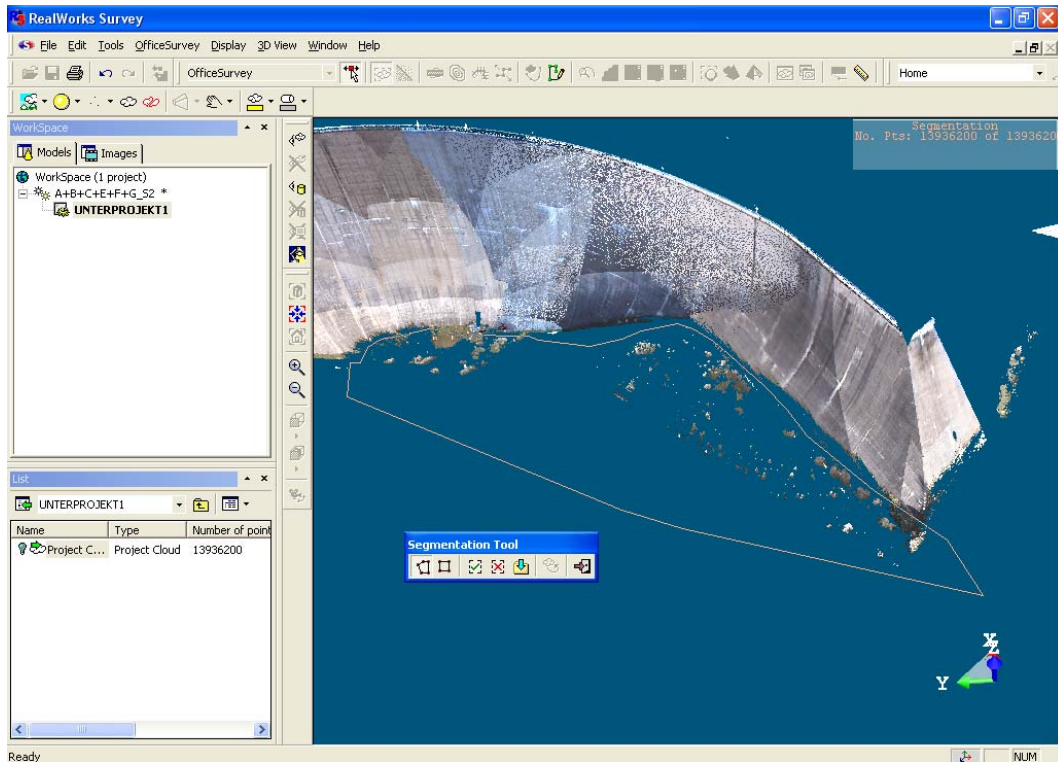





Figura 237: Eliminación de puntos

- 9 Haz clic en el botón *Out*  para eliminar los puntos del interior del cercado.
- 10 Repite los pasos 8 y 9 hasta que se eliminen todos los puntos innecesarios.
- 11 Haz clic en el botón *Create* .
- 12 Haz clic en el botón *Close* .

Ahora, en la ventana **List** aparece (adicionalmente al objeto *Project Cloud*) una nueva nube de puntos llamada *OBJECT1*. Esta nube de puntos no contiene ninguno de los puntos eliminados (Figura 238).

- 13 Selecciona el objeto *Project Cloud* de la lista.
- 14 En el menú *Edit > Advanced*, selecciona *Erase Points*. Se avisa que esta operación no se puede deshacer.
- 15 Pulsa *Yes*. Ahora, el objeto *Project Cloud* no contiene ningún punto.
- 16 Haz clic con el botón derecho en el objeto *Project Cloud* y selecciona la opción *Get all Points*.
- 17 Selecciona *OBJECT1*. Haz clic con el botón derecho y selecciona *Delete*. Se pregunta al usuario si está seguro. Pulsa *Yes*.

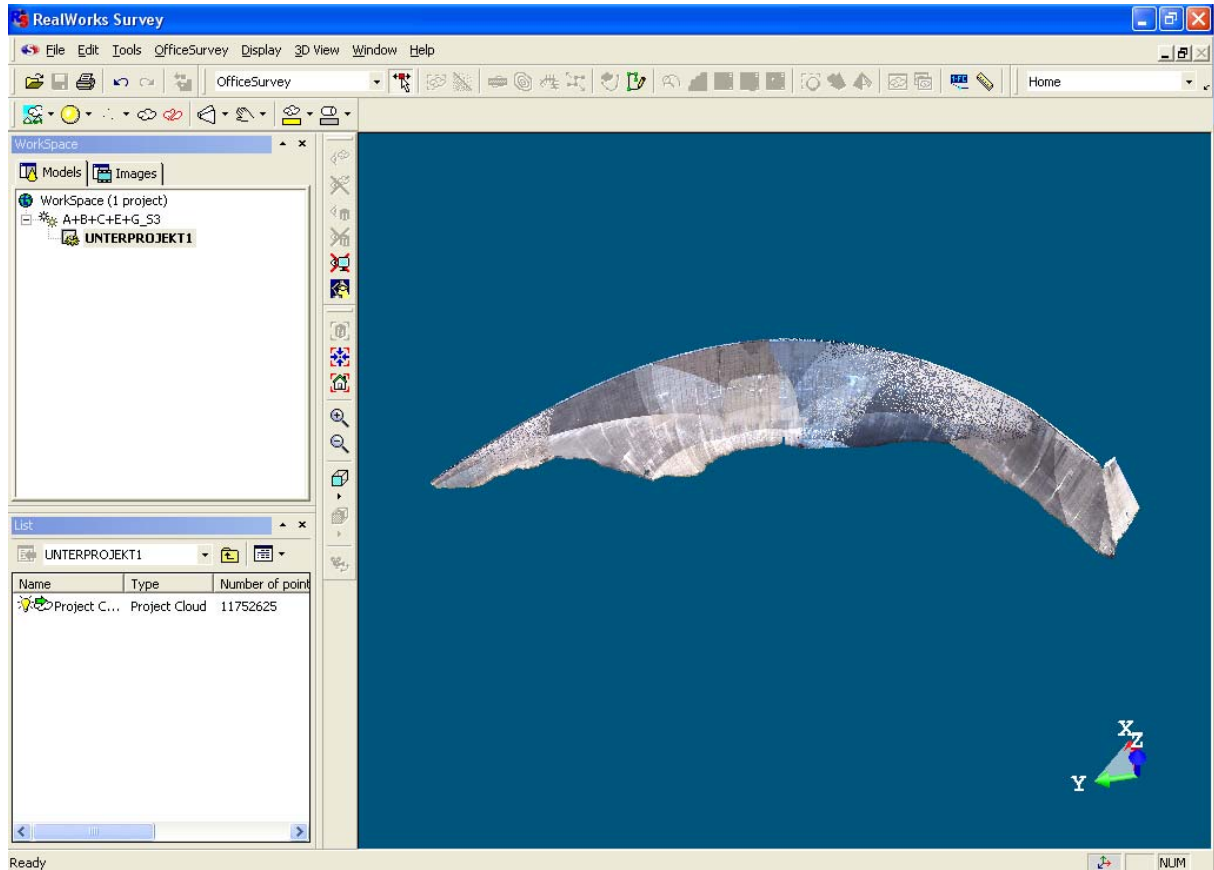



Figura 238: Nube de puntos filtrada

18 Guarda el proyecto.

7.5.6. Hacer secciones

Para estudiar la deformación de la presa entre los meses de abril y septiembre podemos utilizar secciones. Éstas se pueden obtener a partir de la nube de puntos (haciendo cortes de la nube de puntos y convirtiendo los cortes en líneas) o directamente del modelo 3D. En esta apartado se explica cómo obtener las secciones a partir de cortes de la nube de puntos. Otra posibilidad de obtener el mismo resultado a partir del modelo 3D también se menciona. Para realizar los cortes de la nube de puntos sigue los siguientes pasos y mira el video [05-RWS Slicing.avi](#):

- 1 Abre el proyecto 'A+B+C+E+G_S3.rwp'. Este proyecto contiene una única nube de puntos con todas la nubes de puntos anteriores georreferenciadas (¡el escaneo kops-F1 no existe!).
- 2 Selecciona el objeto *Project Cloud* en la ventana **List**.
- 3 Selecciona la herramienta *OfficeSurvey > Cutting Plane Tool* o haz clic en el botón .

Primero se debe definir un plano de corte para obtener los cortes de una nube de puntos. Con el cuadro de diálogo *Cutting Plane* también abre una vista plana con una rejilla 2D

debajo de la vista 3D. También aparece un plano de corte perpendicular a la pantalla y una barra deslizante en la ventana de vista 3D (Figura 239).

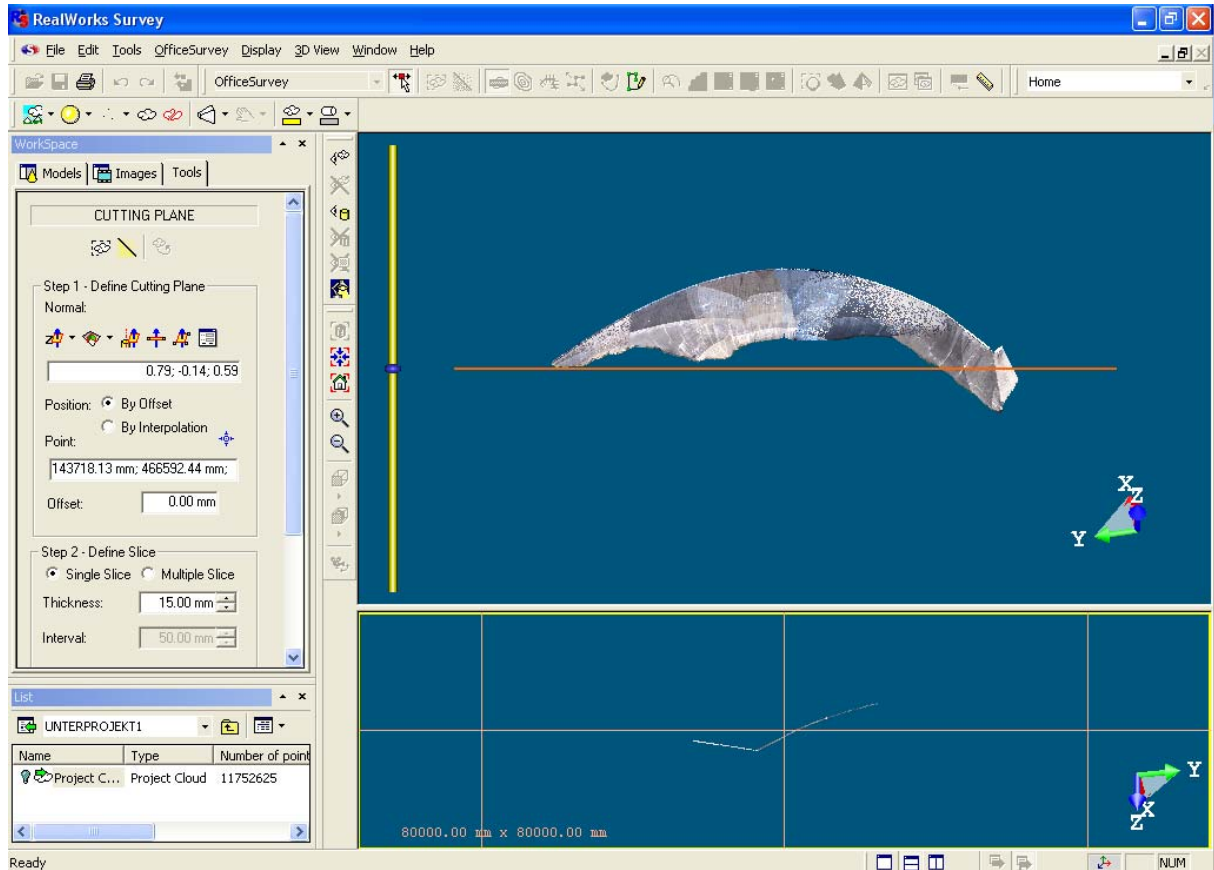



Figura 239: Ventanas de la herramienta Cutting Plane

- 4 Define el plano de corte: primero se debe determinar su orientación y luego su posición.

Hay varias maneras para definir la orientación del plano de corte:

- Seleccionando un eje.
- Seleccionando el marco local de un objeto.
- Seleccionando dos puntos.
- Seleccionando tres puntos.
- Introduciendo coordenadas.
- Ajustando geometrías.
- Editando parámetros.

4.1 Define la orientación del plano seleccionando un eje:

- Pulsa la flecha del botón *Set From Frame* . Aparece la siguiente lista:

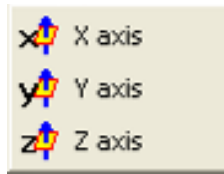


Figura 240: Lista de ejes

- Selecciona un eje.

Observa que las componentes del vector normal han cambiado y aparece un plano semitransparente que atraviesa la nube de puntos.

4.2 Define la orientación del plano de corte ajustando la geometría.

- Haz clic en la flecha del botón *Fit* . Se despliega la siguiente lista:

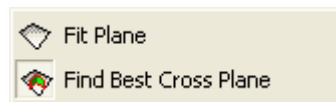


Figura 241: Lista de geometrías

- Selecciona la opción *Fit Plane*. Aparece la barra de herramientas Fitting Tool.
- Dibuja un cercado alrededor del conjunto de puntos a los que quieres ajustar el plano.
- Haz clic en el botón *Plane* . Se calcula el plano que mejor se ajusta.
- Pulsa *Close*.

El plano ajustado define la orientación del plano de corte. También se puede seleccionar un conjunto de puntos para definir el plano que mejor los atraviesa. Para ello, sigue estos pasos:


- Selecciona la opción *Find Best Cross Plan*. Aparece la barra de herramientas Fitting Tool.
- Selecciona los puntos para ajustar el plano de corte.
- Haz clic en el botón *Plane* . Se calcula el plano que mejor atraviesa los puntos.
- Pulsa *Close*.

4.3 Define la orientación del plano escogiendo el marco local de un objeto.


- Haz clic en el botón *Pick Axis From Object* .
- Haz clic en la pestaña *Models*.
- Haz clic con el botón derecho en la selección y selecciona *Display Geometry*.

En este proyecto no hay ningún objeto geométrico. Si hubiera alguno, la orientación del plano de corte seleccionado sería paralelo al eje principal del objeto.


4.4 Definir la orientación del plano de corte escogiendo dos puntos.

- Haz clic en el botón *Plane Perpendicular to Screen* .
- Haz clic sobre dos puntos en la pantalla. El plano de corte es perpendicular a la pantalla y pasa por los puntos escogidos.

4.5 Definir la orientación del plano de corte escogiendo tres puntos.

- Haz clic en el botón *Pick 3 Points on Plane* .
- Haz clic sobre tres puntos de la nube. Otra alternativa es introducir las coordenadas de los puntos deseados. El plano de corte pasa por los tres puntos.

4.6 Definir la orientación del plano editando los parámetros.

- Haz clic en el botón *Edit Parameters* . Se abre el cuadro de diálogo 3D Plane Editing.
- Escoge el conjunto de parámetros a editar e introduce los valores.

Pregunta 18: ¿Cuál es el mejor método para crear secciones paralelas al suelo?

Para definir la posición del plano de corte podemos utilizar la barra deslizante de la izquierda de la vista 3D; definir un punto por el que pasará el plano (opción *By Offset*) o por medio de dos puntos, de manera que el plano pasará por en medio de ambos (opción *By Interpolation*). Las coordenadas de un punto se pueden teclear o picar sobre el objeto.

5 Define los cortes.

Para cada corte se debe definir el grosor. Se puede crear uno o múltiples cortes. En el caso de realizar múltiples cortes, podemos definir la distancia entre dos cortes consecutivos. Todos los cortes tendrán la misma separación.

Pregunta 19: Una presa se ha escaneado con una resolución espacial de 1 punto cada 10x10 mm. ¿Qué valor será el apropiado para el grosor de los cortes si se desea obtener una sección horizontal?

En los siguientes pasos se crearán cortes horizontales con una separación de 2 m. El grosor apropiado se debe averiguar:

5.1 Define la orientación del plano de corte como paralela al eje Z.

5.2 Selecciona la opción *Multiple Slice*.

5.3 Establece el valor del intervalo como 2000 mm e introduce un valor para el grosor.

5.4 Pulsa el botón *Preview*.

5.5 Haz zoom para inspeccionar la presa.

a) Si observas que los cortes son discontinuos, aumenta el grosor y pulsa otra vez *Preview*. Repite los pasos hasta que los cortes tengan buena apariencia.

b) Cuando los cortes tengan buena apariencia y sean suaves, intenta reducir el grosor y pulsa otra vez *Preview*. Repite este paso para averiguar el grosor mínimo y obtener cortes continuos.

Los cortes se calculan y se muestran en la ventana de vista 3D. La parte de Control del cuadro de diálogo permite seleccionar un corte. Este corte seleccionado aparece en color rosa en la vista 3D y sus puntos se muestran en la ventana de vista 2D de abajo (Figura 242).

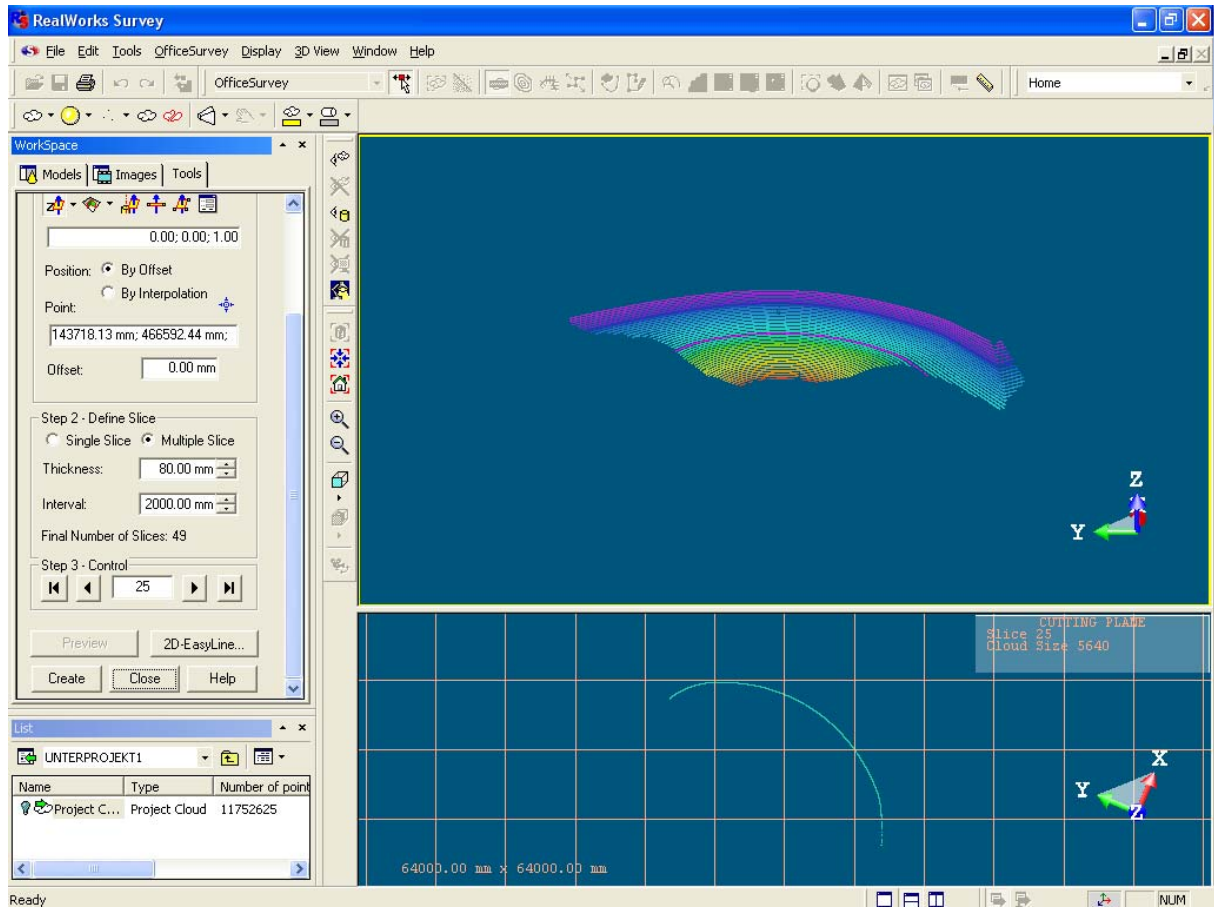


Figura 242: Previsualización de los cortes


6 Crea los objetos Slice:

- 6.1 Haz clic en el botón *Create* al final del cuadro de diálogo. En las ventanas *Workspace* y *List* aparecerá una carpeta con todas las nubes de puntos de los cortes.
- 6.2 Pulsa el botón *Close*.


Los cortes también se pueden crear después de haber triangulado las nubes de puntos (apartado 7.5.7). El procedimiento es el mismo pero se debe seleccionar una triangulación en lugar de una nube de puntos. En este caso, los cortes obtenidos son polilíneas.

7.5.6.1. Convertir los cortes en líneas 2D

Como se ha mencionado anteriormente, crear cortes a partir de una nube de puntos es un paso importante porque se pueden convertir en líneas y exportar a un fichero CAD. Las polilíneas 2D resultantes pueden contener sólo segmentos o combinación de segmentos y arcos circulares. Para aprender cómo convertir los cortes en polilíneas 2D y generar ficheros CAD, sigue los siguientes pasos y mira el vídeo [06-RWS Converting slices to 2D Lines.avi](#):

- 1 En la ventana *List*, selecciona la nube de puntos de un corte en la carpeta que los contiene.
- 2 En el menú *OfficeSurvey*, selecciona *2D-EasyLine Tool* o haz clic en el icono . Se abre el cuadro de diálogo *2D-EasyLine* y una vista plana con una rejilla 2D en la que se visualiza el corte.

- 3 Pulsa el botón *Preview*. Marca la opción *Display Polyline* y desmarca *Display*. Haz zoom en la vista para explorar las partes de la polilínea.
- 4 Si encuentras discontinuidades en la polilínea, selecciona la opción *Fill Line Breaks* en la lista e introduce un valor para rellenar los huecos. Pulsa *Fill*.
- 5 Pulsa *Apply* y *Close*.

Nota: el símbolo de corte en la ventana List ha cambiado a . El tipo de objeto también ha cambiado de Cloud a Polyline-Fitted.

Se pueden repetir los pasos del 1 al 3 seleccionando todos los otros cortes. Todas las polilíneas se crearán a la vez, pero se pueden analizar individualmente.


- 6 Crea las polilíneas 2D de todos los otros cortes. Elige entre hacerlo con todos los cortes a la vez o de uno en uno.

Las polilíneas de las secciones se pueden exportar para trabajar con ellas en un programa CAD. Para ello:


- 7 Selecciona la carpeta que contiene todas las polilíneas de las secciones.
- 8 En el menú *File*, selecciona *Export Selection*. Se abre el cuadro de diálogo para la exportación.
- 9 Selecciona el formato '*.dxf' y escribe el nombre del fichero. Pulsa *Save*. Entonces se abre el cuadro de exportación al formato dxf.
- 10 Selecciona exportar sólo *Selected Geometries*, en caso contrario también se exportarán los puntos. Si en el futuro quieres editar las polilíneas como polilíneas 3D, marca la casilla correspondiente.
- 11 Pulsa *Export*.

7.5.7. Muestreo y triangulación

El objetivo de este apartado es aprender a cómo se debe crear una triangulación de una nube de puntos para tener un modelo 3D del objeto escaneado. Para ello, sigue estos pasos y mira el vídeo [07-RWS Sampling and Meshing.avi](#):

- 1 Abre el proyecto 'A+B+C+E+G_S3.rwp'.
- 2 Selecciona en objeto *Project Cloud*.
- 3 En el menú *OfficeSurvey* selecciona *Mesh Creation Tool* o haz clic en el botón . Se abre el cuadro de diálogo Mesh Creation.

Crear una triangulación con toda la nube de puntos requiere una gran cantidad de cálculo. Por otra parte, no es necesaria la alta densidad de puntos para crear una buena triangulación. Por tanto, se puede reducir el número de puntos. Para ello, *RealWorks Survey* ofrece una herramienta de muestreo.

- 4 Haz clic en el botón . Se abre el cuadro de diálogo de muestreo.
- 5 Se puede elegir entre seis métodos diferentes para realizar un muestreo de la nube de puntos:
 - 5.1 *Random sampling*: La nube de puntos se muestrea utilizando un ratio de porcentaje que determinará la cantidad de puntos que se conservarán. Estos puntos se seleccionarán de forma aleatoria de la nube original.
 - 5.2 *Spatial sampling*: Las nubes de puntos obtenidas desde estacionamientos diferentes a distancias distintas presentan una densidad de puntos no uniforme.

Este método permite definir al usuario una densidad de puntos homogénea en una nube de puntos.

5.3 *Scan-based sampling*: Este método crea una nube de puntos a partir de un grupo de escaneados.

5.4 *Intensity-based sampling*: La nube de puntos final contiene puntos cuyo valor de intensidad se encuentra en un determinado rango.

5.5 *Discontinuity-based sampling*: *RealWorks Survey* trata tres discontinuidades diferentes:

- *Edge*: algunos puntos tienen la dirección de su normal opuesta o diferente al resto.
- *Gap*: todos los puntos tienen la misma dirección de la normal pero algunos de ellos se encuentran separados por una distancia irregular.
- *Other*: cualquier discontinuidad que no se clasifique como las anteriores.

La primera vez que se cargan los datos, las discontinuidades de los tipos *Edge* y *Gap* se detectan automáticamente. Si se han corregido incorrectamente, de manera insuficiente o se han omitido algunas, se puede utilizar la herramienta *Edge Detection*. Desmarcando las casillas en la herramienta de muestreo, omitiremos los correspondientes tipos de discontinuidad.

5.6 *Topographical-based sampling*: Este método separa puntos válidos de puntos inválidos. Esta herramienta es necesaria si hay que procesar una nube de puntos que contenga vegetación (puntos inválidos) y suelo (puntos válidos).

Pregunta 20: En este caso de estudio, la resolución media en cada nube de puntos es de 70 mm, pero las zonas de solape presentan una densidad mayor. ¿Qué método de muestreo se debería utilizar para obtener una densidad homogénea?

6 Elige la opción *Spatial Sampling* y define la distancia entre puntos como 100 mm.

7 Pulsa *Preview*. Observa que quedan alrededor de 3.2 millones de puntos.

8 Pulsa *Apply*. El cuadro de diálogo se cierra automáticamente.

Para realizar la eliminación de discontinuidades, el programa utiliza diferentes proyecciones:

- *Plane-Based Projection*: El usuario puede definir el plano de proyección. Las opciones para definir este plano de proyección son las mismas que para definir el plano de corte (véase el apartado 7.5.6).
- *Cylinder-Based Projection*: La superficie de la rejilla es un cilindro definido por el usuario.
- *Screen View-Based Projection*: La dirección de la vista actual define el plano de proyección.
- *Station-Based Projection*: La dirección de escaneado define el plano de proyección.
- *No projection*: Este método realiza un mallado de las geometrías que son más complejas.

9 Selecciona el modo *Station-Based Projection*.

10 Marca la opción *RemoveDiscontinuities* y haz clic en *PreviewMeshes*.

11 Pulsa **Create**.

Este proceso puede durar varios minutos.

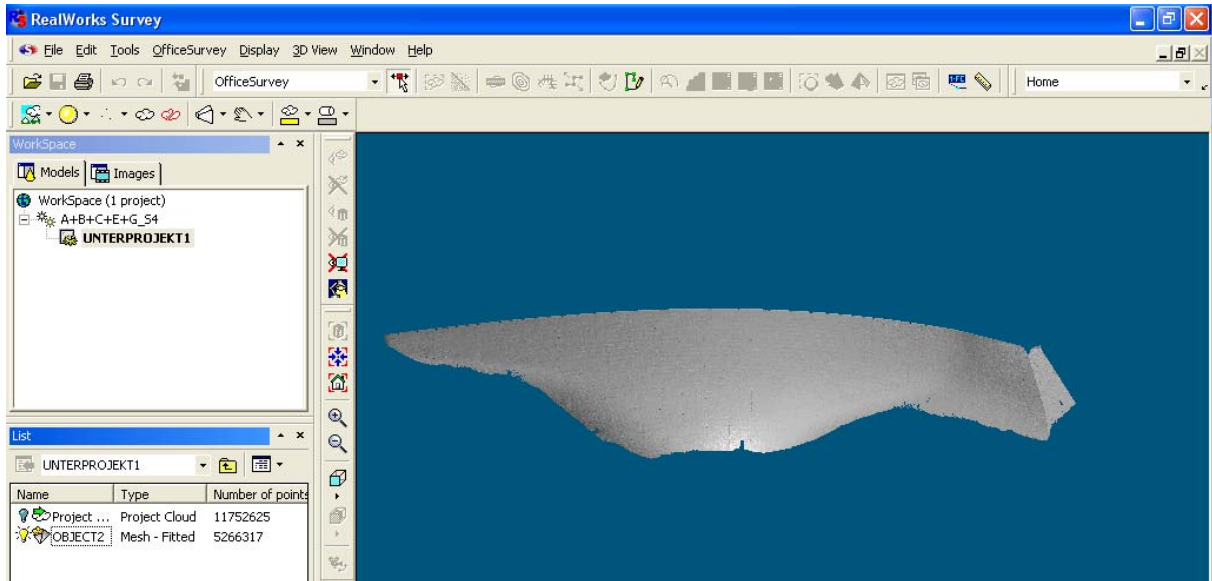



Figura 243: Mallado

Observa que el nuevo símbolo de OBJECT2 es  (Figura 243). Esto significa que el objeto contiene una nube de puntos y una triangulación. La nube de puntos y la geometría (malla) se pueden mostrar u ocultar por medio del menú del botón derecho.

Esta triangulación se puede exportar para trabajar con ella en un programa de modelado 3D. Para ello:

- 12 Selecciona OBJECT2 en la ventana List.
- 13 En el menú *File*, selecciona *Export Selection*. Se abre el cuadro de diálogo para la exportación.
- 14 Selecciona el formato '*.asc' e introduce el nombre del fichero. Pulsa *Save*. Entonces se abre el cuadro de diálogo para la exportación a formato .asc.
- 15 Marca las casillas para exportar el color RGB y las normales.
- 16 Pulsa *Export*.

Como resultado final hemos obtenido un modelo 3D de la presa a partir de los datos de septiembre. Realizando el mismo proceso con los datos de abril, se generará otro modelo 3D. Ambos se podrán comparar para evaluar las deformaciones.

7.6. Análisis de las deformaciones

Los datos de partida para el análisis de las deformaciones son los resultados de las dos campañas de medición: una con el pantano vacío (abril) y la otra con el pantano lleno (septiembre del mismo año). En el análisis de deformaciones, se comparan las nubes de puntos registradas y georreferenciadas de estas dos campañas.

Los datos de septiembre se han procesado en los apartados anteriores y ya están disponibles para el análisis. Los datos de Abril, se han sido procesados por los autores y se pueden descargar de la página web del proyecto 3DRiskMapping.

Una forma sencilla de realizar la comparación de superficies es generando secciones de las mismas (descritas en el apartado 7.5.6), exportarlas a formato .dxf y en un programa CAD medir las distancias (apartado 7.6.1.2).

Un trabajo más intensivo, pero que también proporciona una solución más detallada, se puede realizar en el programa *Geomagic® Studio*. En este programa se pueden crear superficies poligonales y compararlas con una herramienta que permite calcular distancias directas entre dos superficies poligonales (apartado 7.6.2.2). Otros programas que también permiten realizar comparaciones de superficies son, entre otros, *Rhinoceros®* y *PolyWorks®*.



Pregunta 21: ¿Cuál es la gran ventaja de una herramienta de comparación ("programa profesional") en relación con un análisis de secciones en un programa CAD?

7.6.1. Utilizar software CAD

Para este proceso, utilizamos el fichero 'A+B+C+E+G_S3.rwp'. Como ya se ha comentado anteriormente, *RealWorks Survey* nos permite generar secciones con una orientación (eje) y un intervalo definido. Estas secciones se pueden generar en la dirección del eje vertical (eje Z) así como en una dirección horizontal (ejes X e Y). En nuestro caso, el objeto está orientado a lo largo de los ejes Y y Z aproximadamente, por lo que podremos utilizar este plano como el plano de corte.

7.6.1.1. Crear el conjunto de datos en RealWorks Survey

Para asegurarse la correcta comparación de los dos modelos, es necesario que las secciones se encuentren en la misma posición. Para ello, necesitamos el mismo origen del sistema de coordenadas.

- 1 Realización de los cortes:
 - 1.1 Elegimos el eje Z como la normal del plano de corte a través del botón .
 - 1.2 Hacemos clic en el botón *Pick first point*  y seleccionamos el centro de la presa para tener una idea de las dimensiones de las coordenadas.
 - 1.3 Como punto de origen definimos el 227000.00 mm; 475000.00 mm; 1750000.00 mm (XYZ).
 - 1.4 Establecemos el *Offset* desde el origen para el primer corte como 0.
 - 1.5 Elegimos la opción de *Multiple Slices*, con un grosor (*Thickness*) de 50 mm.
 - 1.6 Definimos el valor del intervalo como 10000 mm.
 - 1.7 Tras pulsar el botón *Preview*, aparecen los cortes. Su orientación es horizontal (Figura 244).
- 2 Después de pulsar *Create*, cambiamos la dirección de la normal al eje Y y repetimos los pasos descritos arriba. Los cortes creados ahora son verticales (Figura 245).

Pregunta 22: ¿Por qué es importante definir un origen?

Pregunta 23: ¿Es posible establecer el punto (0,0,0) como origen o es importante que el origen esté situado en la superficie?

Nota: se han creado cortes cada 10 m tanto en vertical como en horizontal. Sin embargo, también es posible utilizar otros intervalos.

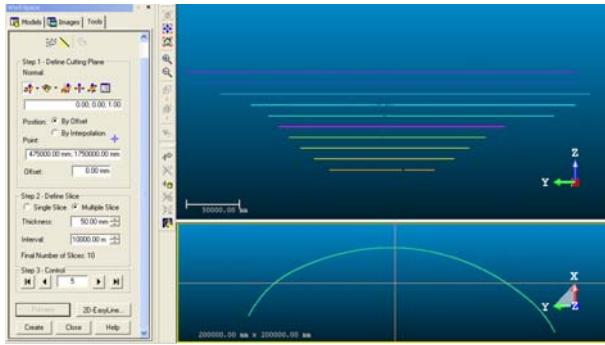


Figura 244: Herramienta de cortes horizontales

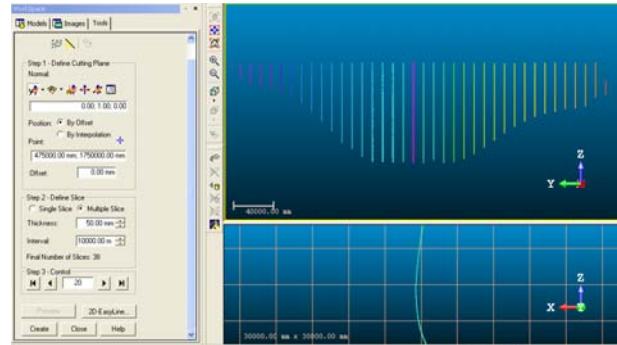





Figura 245: Herramienta de cortes verticales

- 3 Tras cerrar la herramienta *Cutting plane*, se crean dos nuevas carpetas en la ventana *List*, una con los cortes horizontales y la otra con los verticales. Ahora, se crearán las polilíneas a partir de estas nubes de puntos (Fig. 246).
 - 3.1 Abrimos la carpeta con los cortes horizontales y los seleccionamos todos.
 - 3.2 Haciendo clic en el icono  podemos crear las líneas (proceso descrito en el apartado 7.5.6.1)
 - 3.3 Utilizamos los valores estándar para los parámetros (mostrado en la Figura 250).
 - 3.4 Pulsamos el botón *Fill*.
 - 3.5 Tras hacer clic en *Apply*, se crean las polilíneas.
 - 3.6 Para verlas, seleccionamos las opciones *Hide Cloud* y *Display Geometries*. ( y ).

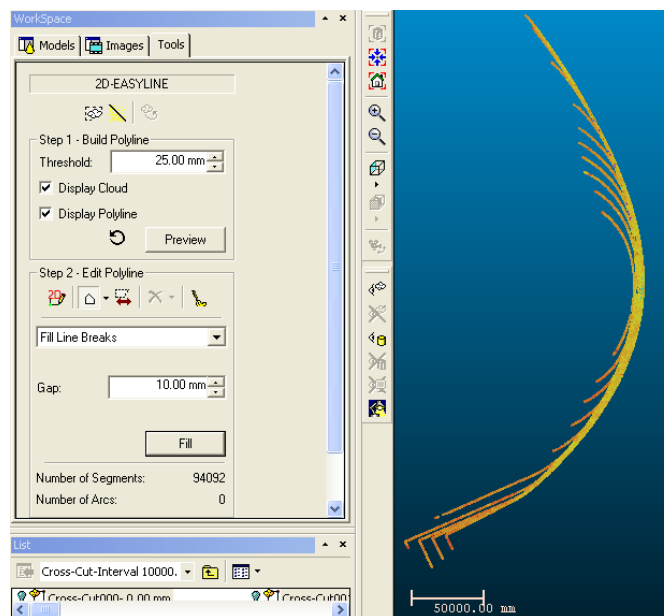


Figura 246: Creación de polilíneas (herramienta *2D-Easy-Line*)

- 4 Repetimos el paso 3 con los cortes verticales.
- 5 Antes de exportar las secciones las combinamos en una única carpeta para crear un único fichero con todas ellas.

- 5.1 Seleccionamos las secciones de una carpeta y las movemos a la otra manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón (drag & drop).
- 5.2 Algunas secciones se renombran con un (2).
- 6 Para exportarlas:
 - 6.1 Las seleccionamos y ejecutamos la orden *File > Export selection*.
 - 6.2 Elegimos el formato *Auto CAD Files (*.dxf)*, le asignamos un nombre y pulsamos *Save*.
 - 6.3 Marcamos y/o desmarcamos casillas para exportar sólo *Selected geometries*.

7.6.1.2. Visualización y medición en AutoCAD

- 1 Abrimos AutoCAD y con la orden *Insert-Block* importamos el fichero con las secciones (con la orden *Browse* y seleccionando el formato **.dxf* podemos cambiar la ruta). Los parámetros se muestran en la Figura 247.

Nota: hay que tener cuidado para insertar el bloque en el punto X: 0, Y: 0, Z: 0 y desmarcar las opciones Scale y Rotation

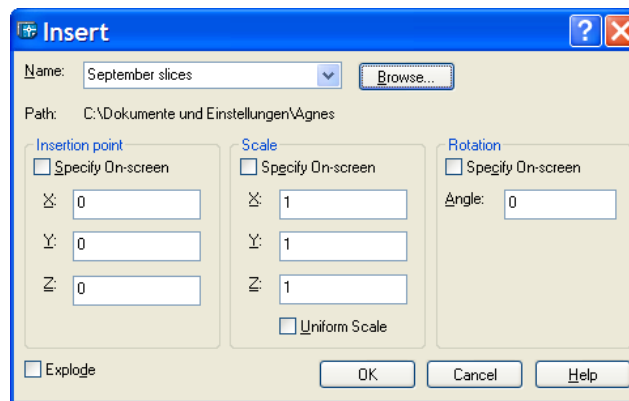


Figura 247: Panel de la orden Insert-Block

- 2 Repetimos el paso anterior pero con las secciones de la campaña de abril, fichero *'April slices.dxf'*. Este fichero aparece ya preparado siguiendo los mismos pasos que en los datos de la campaña de septiembre

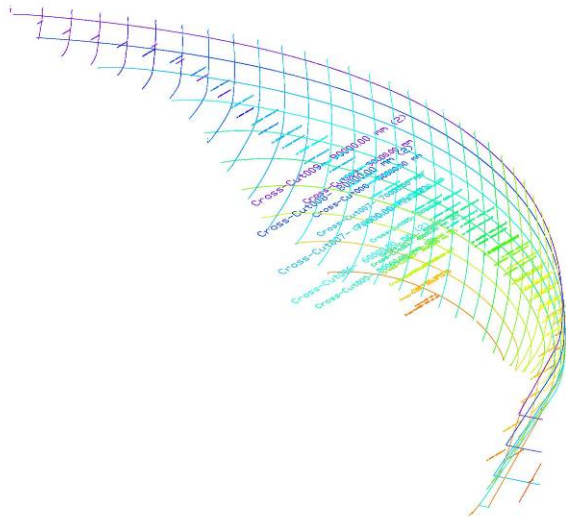


Figura 248: Comparación de las secciones

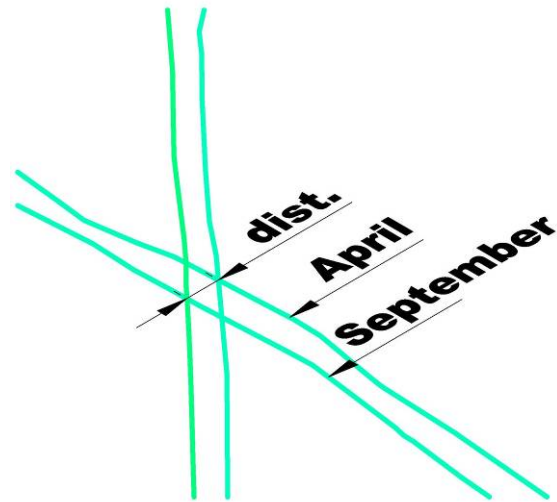



Figura 249: Nodo de la rejilla compuesta por las secciones con la deformación horizontal

- Las distancias en los nodos de las rejillas compuestas con las secciones entre septiembre y abril son los valores de la deformación (Figura 249). Estas distancias se pueden medir mediante la herramienta de la orden *Tools > Inquiry-Distance*, tecleando *_dist* o haciendo clic en el icono .

7.6.2. Uso de Geomagic® Studio

Geomagic Studio es un programa para posprocesar las nubes de puntos. En nuestro caso utilizaremos, principalmente, la herramienta *3D Compare Tool* para analizar las distancias entre las dos campañas de medición. Para ello, utilizaremos la muestra de la nube de puntos de 100 x 100 mm realizada en *RealWorks Survey* (véase el apartado 7.5.7).

Si sólo se desea tener una visión general del programa *Geomagic* y del análisis de deformaciones pasa al apartado 7.6.2.1. Si se desea tener un conocimiento más amplio en procesos de filtrado se recomienda seguir el primer caso de estudio de este tutorial (véase el apartado 5.7.2.3 y siguientes) utilizando los datos sin filtrar (fichero 'A+B+C+E+G_S3.rwp'). El caso de estudio patrimonial también contiene introducción relativa al modelado general de superficies con el programa. Los valores de los parámetros recomendados se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 5: Parámetros esenciales para el filtrado de datos con el programa Geomagic

Paso	Parámetros
1. Exportar los datos desde RealWorks (apartado 7.5.7)	Fichero 'A+B+C+E+G_S3.rwp' como '*.asc'
2. Importar los datos en Geomagic (apartado 5.7.2.3)	Ratio: 100% Mantén activado Full Data on Sampling: Unidad: milímetro
3. Selección de Outliers (apartado 5.7.2.4)	Sensitividad 66.667
4. Eliminación de ruido (apartado 5.7.2.4)	Free-form shapes: seleccionado Smoothness: al máximo

	Iteraciones: 1 Deviation limit: por defecto. Tras la eliminación del ruido, asegurarse que el ángulo de pliegue es menor que 3. En caso contrario, repetir el paso.
5. Remuestreo uniforme (apartado 5.7.2.5)	Absolute Spacing: 100mm Curvature priority: al mínimo Keep Boundary: activado
6. Modelado (apartado 5.7.2.6)	Wrap type: Surface Noise Reduction: none Target Triangles: 500.000
6. Eliminación de agujeros (apartado 5.7.3)	1º Ajustes por defecto 2º Deselect Largest 3º Fill All

7.6.2.1. Creación de superficies

Para crear superficies, sigue los siguientes pasos y mira los vídeos [08-GM Import, Hide, Zoom, Pan, Rotate.avi](#), [09-GM Reduction of the Pointcloud.avi](#) y [10-GM WRAP, Flip Normals, Fill Holes.avi](#):

- 1 Importa la nube de puntos filtrada en *Geomagic*:
 - 1.1 Para cargar los puntos, selecciona la orden *File > Import* y el fichero 'Sept - 100.asc' (Datos de Septiembre, remuestreados en *RealWorks Survey* a una resolución de 100x100mm) o tu propio fichero exportado de *RealWorks Survey* (apartado 7.5.7).
 - 1.2 En la ventana que aparece, selecciona *100% sampling ratio* para cargar toda la nube y selecciona los milímetros como unidad.
 - 1.3 Repite el mismo proceso con el fichero 'April - 100.asc' (datos de abril). Los datos cargados se pueden ver en la Figura 250.

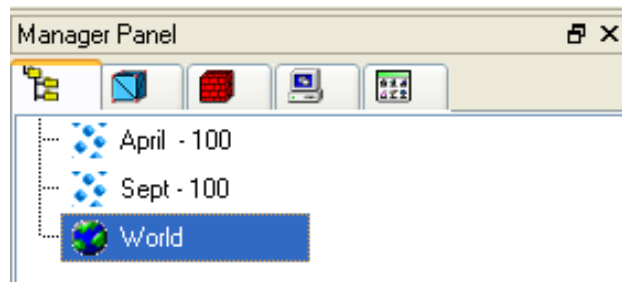


Figura 250: Nubes de puntos cargadas

Pregunta 24: ¿Cuántos puntos hay cargados en cada una de las nubes?

- 2 La superficie de la presa se muestra en el área de vista.
 - 2.1 Para ocultar o ignorar las diferentes nubes de puntos, las seleccionamos en el *Model Manager* y con el menú del botón derecho seleccionamos las órdenes *Hide/Show* o *Ignore/Consider*.

- 2.2 Podemos hacer zoom (con el scroll del ratón), rotar (manteniendo presionado el scroll) o desplazar (con la tecla Alt+scroll) la nube de puntos en el área de visión.
- 3 Como se puede ver en la Figura 251, la nube de puntos de septiembre y la de abril no tiene el mismo tamaño. La mayor deformación aparece en el centro de la presa y no tanta en los lados. Para evitar tiempo de cálculo en vano, reducimos la nube de puntos al área de interés.

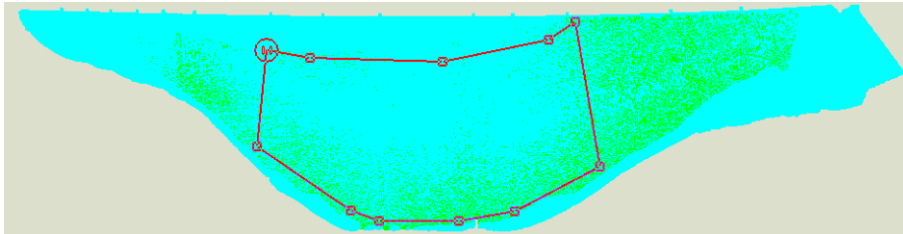




Figura 251: Área central en común de las nubes de puntos

- 3.1 Marca las dos nubes de puntos en el *Model Manager*: selecciónalas con el botón izquierdo del ratón y la tecla Control.
- 3.2 En el *Model Manager* cambia a la segunda pestaña *Primitives*  y selecciona *Object Colour*.
- 3.3 Para seleccionar el área necesaria, utiliza el icono *Custom Region Selection*  de la barra de herramientas y haz un cercado en el centro de la nube de puntos.
- 3.4 Su color cambia a rojo, que significa que los puntos están seleccionados.
- 3.5 Haciendo clic con el botón derecho y seleccionando *Reverse Selection* se cambia al estado de selección opuesto (Figura 252).

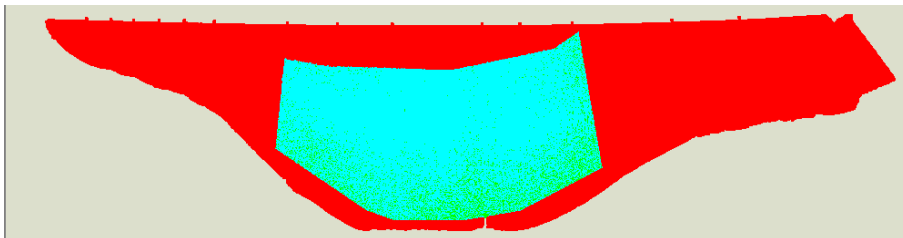




Figura 252: selección inversa

- 3.6 Con el botón , se elimina la selección.

Nota: las nubes de puntos se redujeron a, aproximadamente, 1.47 millones de puntos (abril) y 1.43 millones de puntos (septiembre).

- 4 En el siguiente paso calculamos la superficie poligonal, también llamada WRAP.
- 4.1 Seleccionamos ambas nubes de puntos y pulsamos el icono *WRAP*  de la barra de herramientas.
- 4.2 En el panel aparece el editor *Compute Wrap*. En la Figura 253 se pueden ver los valores de los parámetros: *Wrap Type* como *Surface*, en *Advanced Options* seleccionamos *Noise Reduction: Auto*, *Point Spacing* está desactivado y *Target Triangles* tiene un valor de 500.000 (para cada nube de puntos) y seleccionamos

Keep Original Data. El cálculo de la superficie toma varios minutos y crea dos nuevos conjuntos de datos (Figura 254).

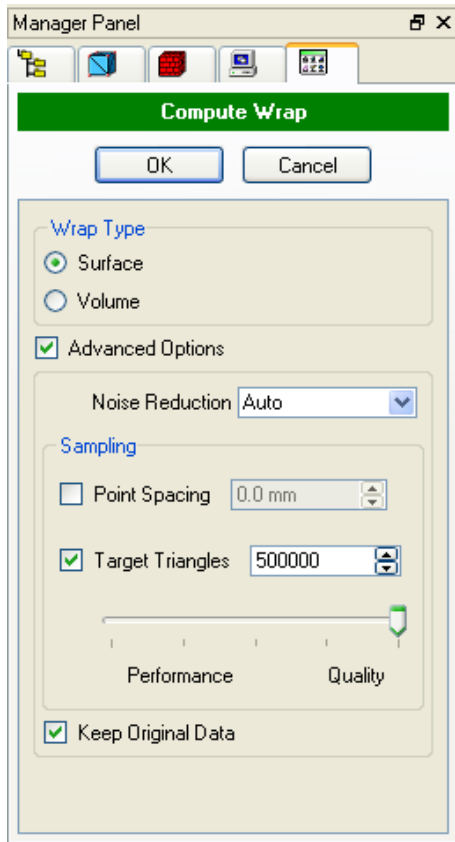


Figura 253: Parámetros para el cálculo de las superficies wrap

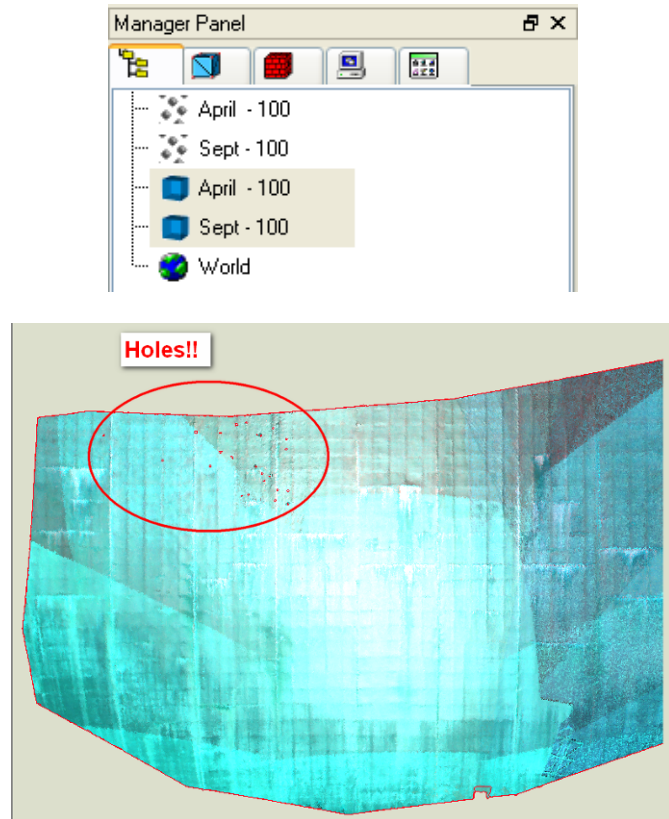



Figura 254: Superficie poligonal resultante

- 5 En la pestaña *Primitives*, desactivamos las opciones *Object Colour* y *Vertex Colour*.
- 6 Ahora se puede comprobar la dirección de las normales de la superficie. El color azul significa dirección positiva y el amarillo, dirección negativa. Para la herramienta *3D Compare Tool* es importante que la dirección de las normales de las superficies sea casi la misma. Para ello, seleccionamos el conjunto de datos y con la orden *Polygons > Flip Normals...* cambiamos las direcciones. (La superficie frontal debe ser azul).

Pregunta 25: ¿Por qué es necesario que las normales tengan el mismo sentido?

- 7 Si hay bastantes agujeros en la superficie (como en la Figura 254: sólo en los polígonos de septiembre) se deben eliminar. El apartado 5.7.3 del primer caso de estudio explica exactamente cómo se debe realizar este procedimiento.
 - 7.1 Selecciona los polígonos de septiembre en la pestaña del *Model Manager*.
 - 7.2 Selecciona *Fill Holes* . Aparece el panel que se muestra en la Figura 255.
 - 7.3 Haz clic en *Deselect Largest* y *Fill All*.
 - 7.4 Pulsa *OK*. El proceso de eliminación de agujeros necesita algunos minutos.

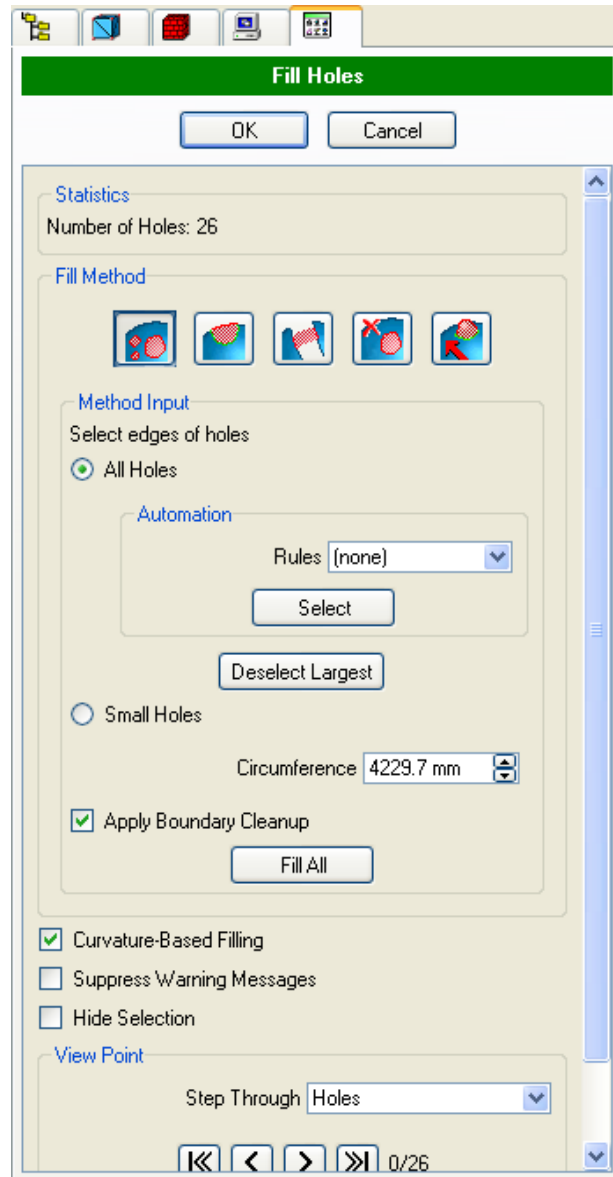


Figura 255: Eliminación de agujeros

7.6.2.2. Herramienta 3D Compare

Como el propio nombre sugiere, la herramienta *3D Compare* es un método para analizar diferencias tridimensionales entre las dos superficies o una superficie y una nube de puntos. Las diferencias se pueden mostrar en un mapa con un código de colores. El vector de diferencia coloreado se puede visualizar en una escala mayor. Generalmente en la orden *Tools > Options > Operations > Comparison* podemos elegir entre dos algoritmos distintos: *shortest distance* o distancia más corta (Figura 256) y *distance along a given direction*, es decir, en una dirección dada (Figura 257). Además, se puede definir el *Critical Normal Angle* (ángulo crítico de la normal).

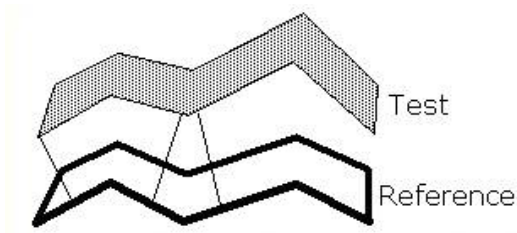


Figura 256: Comparación 3D: Shortest Distance
(Fuente: Ayuda de Geomagic)

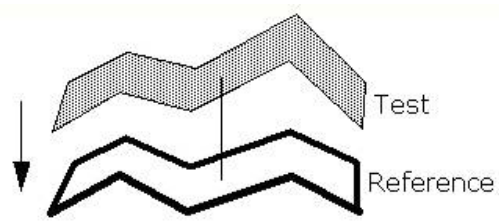


Figura 257: Comparación 3D: Orthogonal Distance
(Fuente: Ayuda de Geomagic)

Para utilizar la herramienta 3D Compare, sigue estos pasos y mira el vídeo [11-GM 3D Compare.avi](#):

- 1 Selecciona las nubes de puntos de abril y septiembre en el *Model Manager*. Haz clic con el botón derecho sobre ellas y selecciona las opciones *Ignore* y *Hide*
- 2 Selecciona la superficie poligonal de abril
- 3 Abre la herramienta *3D Compare* en el menú (*Analysis > 3D Compare*):
 - 3.1 El objeto *Reference* se establece automáticamente como *April-100* (seleccionado antes de abrir la herramienta).
 - 3.2 Elige la superficie *September-100* como objeto *Referente*.
 - 3.3 Introduce el valor de 150 mm para el parámetro *Maximal Deviation*.
 - 3.4 Todos los demás parámetros se muestran en la Figura 258.

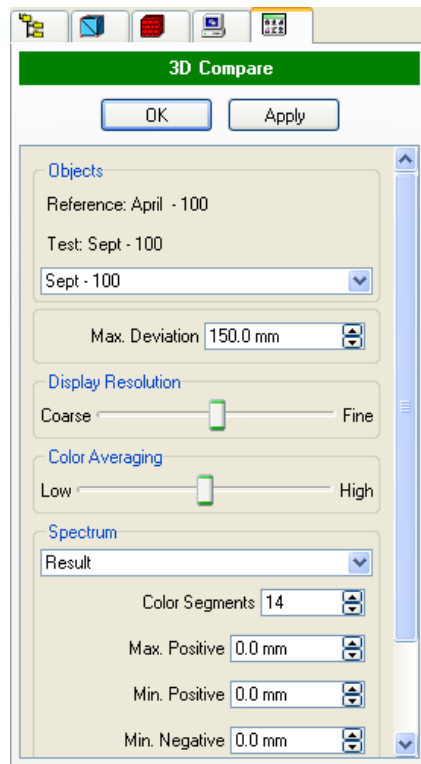


Figura 258: Parámetros de la herramienta 3D Compare

- 3.5 Pulsa **Apply**. El cálculo durará algunos minutos.
- 3.6 Como ajustes para el espectro se propone: **25 Segmentos, Max. Positive 120 mm, Min. Positive 10 mm, Min. Negative -10 mm, Max. Negative -120 mm** (Figura 259).

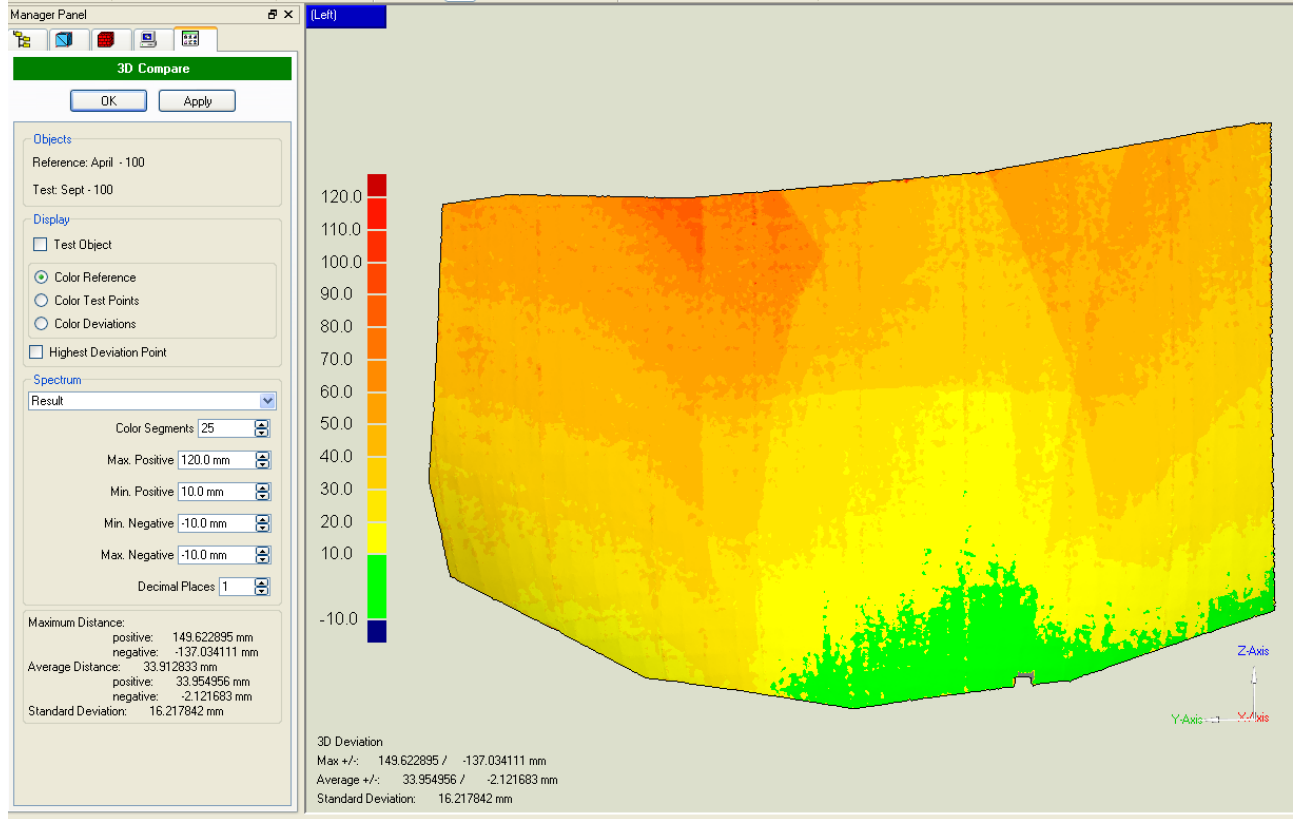


Figura 259: Resultados de la herramienta 3D Compare

La Figura 259 muestra la desviación de la superficie de la presa entre las dos campañas de medición. Esta deformación es el resultado de diferentes niveles de agua almacenada. La parte inferior de la presa no se movió porque está fija al suelo (color verde). La cresta de la presa presenta la máxima deformación, mayoritariamente en el centro (colores naranja y rojo).

Las deformaciones resultantes son consistentes con los resultados del control taquimétrico (véase el apartado 7.4.7) y también con las mediciones perpendiculares de la compañía que opera en la presa.

8. Apéndice

8.1. Conversión de datos de Cyclone (*.imp) a otros formatos

- Abre el navegador de *Cyclone*
- Despliega la carpeta *Database*
- Despliega la carpeta *Project*
- Despliega uno de los *ScanWorlds*
- Haz clic con el botón derecho en uno de *ModelSpaces* y selecciona *Export...*
- Al final del diálogo *Export to File'* selecciona la extensión del fichero (tipo de dato dxf, ptz, ptx, pts...)
- Introduce un nombre para el fichero
- Pulsa el botón *Save*
- Repite este proceso para cada nube de puntos que se necesite exportar







8.2. Listado de comprobación

- Escáner láser:
 - Escáner láser TRIMBLE GX3D con cámara integrada, con hardware, software y alimentación de energía incluidos
 - Tablet PC Colibrí X6
 - Plataforma móvil para posicionar el escáner a una altitud de 6 m
 - Trípode del escáner
 - Soporte para inclinar el escáner 90°
- Estación total:
 - Estación total LEICA 1202
 - Tarjeta Smart Card para la estación total
 - Lector de tarjetas
 - Baterías para la estación total
 - Cargador de las baterías para la estación total
 - Trípode para la estación total
 - Sombrilla para la estación total
 - Miniprisma
 - Prismas de Leica
- Dianas:
 - Esferas de Trimble (d=7,6cm), con trípode incluido
 - Esferas de madera (d=24cm), con trípode y prisma acoplado incluido
 - Bolas de bolos (d=22cm), con material de montaje incluido

- Señales de tráfico (d=60cm), con adhesivos Trimble incluidos
- Accesorios:
 - Cámara de fotos NIKON D2X
 - Baterías
 - Cables
 - Radio
 - Cintas métrica
 - Vehículo todoterreno
 - Alimentación energética
 - Aparato de medición de las condiciones atmosféricas (temperatura, presión y humedad)
- Software y planos adicionales:
 - Ortoimagen del pantano Kops
 - MDT de los alrededores del pantano
 - Coordenadas de los puntos de referencia
 - Plano de la presa
 - Visita previa al lugar de documentación (fotos, etc.)
 - Software para simular el trabajo en campo: AUTODESK Civil3D 2006
 - Software para simular las mediciones del escáner: GeoSi 6.0 y LEICA Geo Office
 - Software para analizar los datos Trimble: Real Works Survey 6.0
 - Software para analizar la deformación: Geomagic Studio 9

8.3. Lista de escáneres y software

La siguiente lista es una muestra pequeña de los escáneres láser más conocidos que cumplen los requerimientos de esta aplicación, teniendo en cuenta el alcance y la precisión

	TRIMBLE GX 3D Fuente: www.trimble.com	RIEGL LMS Z420i Fuente: www.riegl.com	LEICA ScanStation 2 Fuente: www.leica-geosystems.com	OPTECH Iris 3D Fuente: www.optech.ca	ZÖLLER+FRÖHLICH Imager 5006 Fuente: www.zf-laser.com	FARO Photon™ 80/20 Fuente: www.faro.com
						
Principio de medición	Pulso-tiempo de vuelo	Pulso-tiempo de vuelo	Pulso-tiempo de vuelo	Pulso-tiempo de vuelo	Diferencia de fase	Pulso-tiempo de vuelo
Color del láser	Verde	--	Verde	--	Visible	Visible
Clase del láser	Clase 2 (21 CFR §1041.10) y Clase 3R (IEC 60825-1)	Clase 1 (IEC 60825-1 y 21 CFR §1041.10)	Clase 3R (IEC 60825-1)	Clase 1 (IEC 60825-1 y 21 CFR §1041.10)	3R (ISO EN 60825-1)	3R
Alcance	200m con un 90% de reflexión	350-1.000m (según la reflexión)	300m con un 90% de reflexión	1200m con un 90% de reflexión	79m	76m (Photon™ 80) 20m (Photon™ 20)
Campo de visión	60° vertical 360° horizontal	80° vertical 360° horizontal	270° vertical 360° horizontal	40° vertical 40° horizontal	310° vertical 360° horizontal	320° vertical 360° horizontal
Definición de las dianas de los puntos de referencia	Geométricas (esféricas o planas)	Intensidad de la reflexión	Geométricas (esféricas o planas)	--	--	--
Desviación estándar	1.4mm a ≤50m 2.5mm a 100m 3.6mm a 150m 6.5mm a 200m	10mm a 50m	--	--	--	--
Precisión en la distancia (un Sigma)	Posición=12mm a 100m Alcance= 7mm a 100m	Precisión: 10mm a 50m Repetibilidad 8mm a 50m (un pulso) 4mm a 50m (promedio)	Posición=6mm a 50m Alcance= 4mm a 50m	Posición=8mm a 100m Alcance= 7mm a 100m	Precisión del espejo= 0.007° rms	Error sistemático en la distancia : ±2mm a 25m Repetibilidad: 0.45/0.9mm rms a 10m, 0.60/1.2mm rms a 25m
Resolución máxima	3mm a 100m (32μrad; 0.0018°)	7mm a 100m (70μrad; 0.004°)	< 1 mm	0.00115°	0.0018°	0.009°
Diámetro de la mancha del láser / Divergencia del haz	3mm a 50m Auto focus: 0.3mm a 5m	12.5mm a 50m	4mm a 50m (FWHH) 6m a 50m (Gausiano)	0.009474°	0.22 mrad	3.3 mm en la salida
Velocidad máxima de escaneado	5.000 Pt/s	11.000 Pt/s (espejo oscilante) 8.000 Pt/s (espejo rotatorio)	50.000 Pt/s	2.500 Pt/s	500.000 Pt/s	120.000 Pt/s
Cámara	Integrada	Externa	Integrada	Integrada, CMOS	Integrada	Externa
Eje vertical inclinable	Con soporte especial inclinable hasta 90°	Cualquier posición deseada	no	Base desplazable e inclinable como accesorio	No	No
Software des escáner	PointScape 2.1 (Campo) RealWorks Survey 6.0 (Postproceso)	RiScan PRO 1.2.1b19	Cyclone 5.5	Salida: variedad de metaarchivos y coordenadas XYZ	Z+F Lasercontroll (Campo) LFM (Postproceso)	--

9. Repuestas de las preguntas

Respuesta a la Pregunta 1:

El *ScanWorld* 11 sólo tiene un punto de referencia en común con los otros, en concreto Target 21, que también está visible en otros *ScanWorlds* a través de la puerta pequeña en el panel de madera. Un solo punto de referencia no es suficiente para realizar el registro diana a diana.

Se debe emplear el método nube a nube para registrar el *ScanWorld* 11 a otros *ScanWorlds*. Para llevar a cabo este registro se requiere un solape entre las nubes de puntos. Es recomendable un solape mínimo del 30%.

Respuesta a la Pregunta 2:

Los *ScanWorlds* 9 y 11 no tienen suficiente solape, por lo que se debe utilizar el método de registro nube a nube.

Respuesta a la Pregunta 3:

Se puede observar que la diana Target 17 en el *ScanWorld* 6 (en la vista de la derecha) no está definida bien.

Respuesta a la Pregunta 4:

El resultado muestra 10 constreñimientos que contienen este punto; en el conjunto de datos reducidos son 3.

Respuesta a la Pregunta 5:

La diana Target 13 existe dos veces en el *ScanWorld* 16.

Respuesta a la Pregunta 6:

La diana Target 7 en el *ScanWorld* 7 está en una posición errónea. Sin embargo, el escaneado a alta resolución muestra el punto correctamente. Esto significa que ocurrió algo mal durante el etiquetado del punto. La mayoría de estos errores se deben a procesos manuales o semiautomáticos durante la fase de adquisición y son casi inevitables. La falta de concentración o el uso incorrecto de técnicas semiautomáticas para detectar los puntos de referencia en la nube de puntos produce resultados erróneos.

Cuando compruebes los constreñimientos que contienen la diana Target 7 observarás que la etiqueta de este punto en el *ScanWorld* 7 no está en su posición correcta.

Respuesta a la Pregunta 7:

El error más alto debería ser alrededor de 1.2 cm, lo que es un valor aceptable para un edificio de este tamaño.

Respuesta a la Pregunta 8:

Los *ScanWorlds* 33, 34, 35, 36 y 37 no contienen dianas adecuadas. *Cyclone* responderá a la orden de registro con un mensaje de error diciendo que los constreñimientos actuales son insuficientes para realizar un registro inicial. Cuando se analizan los constreñimientos se observa que el *ScanWorld* 32 sólo tiene 2 constreñimientos.

Respuesta a la Pregunta 9:

El *ScanWorld* 37 tiene un solape adecuado con el *ScanWorld* 31, y los *ScanWorlds* 35 y 36 tienen un solape correcto con el *ScanWorld* 30.

Respuesta de la Pregunta 10: Si quieres visualizar los datos de cada estación en un color diferente ¿Qué modo de visualización se debe utilizar?
El modo Station Color.

Respuesta de la Pregunta 11

Lista de las dianas mal ajustadas:

Estación	Diana	Estación	Diana
kops-A1	A1-101 (red)	kops-C1	C1-122 (yellow)
kops-A2	A2-102 (red)	kops-C2	C1-123 (blue)
	A2-103 (green)		C2-125 (blue)
	A2-104 (blue)		C2-126 (green)
kops-A3	A3-105 (blue)	kops-C3	C3-127 (yellow)
	A3-106 (yellow)		C3-129 (green)
	A3-107 (white)		C3-128 (blue)
kops-B1	B1-111 (green)	kops-E1	E1-42
	B1-112 (blue)	kops-F1	E1-140 (red)
	B1-113 (yellow)		F1-153 (green)
	B1-114 (white)		F1-152 (yellow)
kops-B2	B2-115 (yellow)		F1-154 (blue)
	B2-116 (white)	F1-151 (red)	
kops-C1	C1-120 (white)	kops-G1	G1-161 (red)
	C1-121 (red)		

Estas dianas se han ajustado mal porque RealWorks Survey ajusta esferas con un valor de diámetro determinado, el valor de las esferas Trimble. Las dianas en la lista corresponden a esferas que no son de Trimble. En este proyecto no hay ninguna diana “Not fitted”. Véase la pestaña “Not fitted” del Target Analyzer para cada estación.

Respuesta de la Pregunta 12: ¿Por qué se deben omitir las dianas con el sufijo “ctrl”?
Deberíamos desactivar todas las dianas de control porque se utilizan más tarde en el control de calidad de las dianas normales, de apoyo (al final del documento).

Respuesta de la Pregunta 13: ¿Cuántas dianas tienen en común Group A2-A3 y Group B1-B2?

Tienen tres dianas en común. Sería imposible registrar ambos grupos con menos de tres dianas.

Respuesta de la Pregunta 14: ¿Cuál es la distancia media entre las dianas en el registro realizado en el apartado anterior?

La distancia media entre las dianas es de 1.31 mm.

Respuesta de la Pregunta 15 : ¿Hay alguna otra estrategia para registrar las nubes de puntos A2, A3, B1 y B2?

Otras estrategias para registrar los cuatro escaneados son:

- Registrarlas todas a la vez.
- Registrar A2 y A3. Luego, registrar A3 y B1 tomando A3 como estación de referencia. Finalmente, registrar B1 y B2 tomando B1 como estación de referencia.

La solución dada de forma automática en el primer caso no se corresponde con la posición real de las nubes de puntos. Sin embargo, la segunda estrategia sí que proporciona la posición real.

Para el primer caso:

	Distancia media (mm)	Distancia máxima (mm)
4 estaciones	22.99	39.00
8 puntos de referencia	21.74	64.09

Para el segundo caso:

	Distancia media (mm)	Distancia máxima (mm)
4 estaciones	1.31	1.44
7 puntos de referencia	1.33	1.77

En este caso, la mejor estrategia para el registro es la explicada en el punto 7.5.2.2 porque las distancias media y máxima entre las estaciones y las dianas son las menores.

Respuesta de la Pregunta 16: Como el mínimo de dianas requerido es tres, ¿se debe desmarcar el punto A1-101? ¿Por qué?

No, porque para georreferenciar objetos se deben situar puntos de referencia objeto por todo el objeto, tratando de cubrir la mayor parte del mismo en 3D. Si se desactiva el punto de referencia A1-101, la parte superior de la presa no se tiene en cuenta en el momento de georreferenciar la nube de puntos y el desplazamiento de esta parte respecto de su posición real puede ser mayor, incluso aunque el error medio sea menor.

Respuesta de la Pregunta 17: ¿Se podría desmarcar alguna otra diana? ¿Por qué?

Sí, se puede desactivar el punto de referencia A1-2 por dos razones. La primera es que ya hay más puntos de referencia en la parte baja de la nube de puntos. La segunda razón es porque los puntos de referencia A1-1, A1-2 y A1-3 están casi en la misma línea y, por tanto, el punto A1-2, que está en el centro de la línea, es redundante.

Respuesta de la Pregunta 18: ¿Cuál es el mejor método para crear secciones paralelas al suelo?

Definir la orientación por medio del eje Z. Otra opción es introducir por teclado las coordenadas 0,0,1 para la Normal.

Respuesta de la Pregunta 19: Una presa se ha escaneado con una resolución espacial de 1 punto cada 10x10 mm. ¿Qué valor será el apropiado para el grosor de los cortes si se desea obtener una sección horizontal?

El valor mínimo sería 10 mm. El máximo grosor depende de la precisión de la sección.

Respuesta de la Pregunta 20: En este caso de estudio, la resolución media en cada nube de puntos es de 70 mm, pero las zonas de solape presentan una densidad mayor. ¿Qué método de muestreo se debería utilizar para obtener una densidad homogénea?

El método de muestreo sería el Spatial Sampling.

Respuesta de la Pregunta 21: ¿Cuál es la gran ventaja de una herramienta de comparación ("programa profesional") en relación con un análisis de secciones en un programa CAD?

Un algoritmo de comparación trabaja con las superficies generadas, mientras que el procesamiento con las secciones (como se presenta en el apartado 7.6.1) trabaja con las secciones y una separación determinada. Por tanto, el primero da información más detallada (prácticamente para cada punto deseado). Además, el programa incluye la posibilidad de

una mejor visualización. La información de las secciones aumenta con el desplazamiento entre ellas, ¡pero también el trabajo de visualización (manual)!

Respuesta de la Pregunta 22: ¿Por qué es importante definir un origen?

Para establecer un mismo origen de coordenadas al segundo conjunto de datos proveniente de otra campaña de medición.

Respuesta de la Pregunta 23: ¿Es posible establecer el punto (0,0,0) como origen o es importante que el origen esté situado en la superficie?

El origen se puede colocar donde se quiera, pero para la visualización es necesario escoger un punto cercano a la superficie.

Respuesta de la Pregunta 24: ¿Cuántos puntos hay cargados en cada una de las nubes?

Los datos se muestran en la esquina inferior izquierda del área de vista. La nube de puntos de abril contiene 2.297.429 puntos y la de septiembre 3.068.443.

Respuesta de la Pregunta 25: ¿Por qué es necesario que las normales tengan el mismo sentido?

Porque el algoritmo de comparación calcula las distancias con los vectores normales de la superficie y si se encuentran en sentidos opuestas, el cálculo no se puede realizar.

10. Lista de Figuras

Figura 1: Ciclo de la gestión de riesgos (tomado de [1]).....	12
Figura 2: Aplicaciones del láser escáner.....	15
Figura 3: Prisma convirtiendo la luz blanca en los diferentes colores.....	16
Figura 4: El espectro electromagnético.....	16
Figura 5: Categorización de los métodos de medida que utilizan la luz [tomado de [4]].....	20
Figura 6: Principios de la triangulación.....	21
Figura 7: Principio del Láser Escáner por triangulación.....	21
Figura 8: Diferentes técnicas de proyección usadas en los escáneres de triangulación.....	22
Figura 9: Proyección de un patrón regular (tomado de [5]).....	23
Figura 10: Patrón de código binario modulado en fase, también llamado proyección fringe.....	23
Figura 11: Patrón Moiré formado por dos conjuntos de líneas paralelas. Un conjunto está inclinado un ángulo de 5° respecto al otro (tomado de [6]).....	23
Figura 12: Principio de un láser escáner por tiempo de vuelo.....	24
Figura 13: Medición láser por pulsos.....	25
Figura 14: Máximo Rango de Certeza en función de la frecuencia de pulso (tomado de [7]).....	26
Figura 15: Escáner por tiempo de vuelo existentes en el mercado.....	27
Figura 16: Principio de medición por fase.....	27
Figura 17: Esquema de dos modulaciones de onda y una onda portadora para la medición láser por fase. (de [8]).....	29
Figura 18: Láser escáneres por fase disponibles en el mercado.....	29
Figura 19: Un interferómetro Michelson [9].....	30
Figura 20: Métodos de desviación del haz (tomado de [10]).....	31
Figura 21: Reflexión ideal, iluminación parcial, oclusión parcial.....	32
Figura 22: Problema del borde partido.....	33
Figura 23: Ambigüedad en la distancia para diferentes tipos de escáner láser (tomado de [4]).....	34
Figura 24: Reflexión sobre una superficie lambertiana.....	35
Figura 25: Respuesta de la señal cuando se escanean superficies con diferente reflectividad (tomado de [4]).....	36
Figura 26: Efectos de la refracción en materiales semitransparentes no homogéneos.....	36
Figura 27: Flujo del escaneado láser terrestre.....	40
Figura 28: Diagrama de la planificación.....	41
Figura 29: (arriba) Mal posicionamiento del escáner, presenta ángulos muy inclinados. (Abajo) Buen posicionamiento del escáner.....	43
Figura 30: Huellas del láser cuando se escanea con diferentes ángulos.....	44
Figura 31: (arriba) Mala configuración de las dianas. (Abajo) Buena configuración de las dianas.....	45
Figura 32: Tipos de dianas artificiales.....	46
Figura 33: Estacionamiento de un escáner láser (de [27]).....	47
Figura 34: Control integrado en el escáner <i>Leica HDS6000</i> (de [27]).....	47
Figura 35: ejemplo del campo de visión de un escáner <i>Leica HDS6000</i> (de [27]).....	48
Figura 36: Definición del área a escanear.....	49
Figura 37: Densidades de puntos apropiadas para elementos de patrimonio cultural [28].....	50
Figura 38: Filtrado inicial a partir de la distancia.....	51
Figura 39: Escaneado de dianas.....	52
Figura 40: Escaneado de alta resolución de una diana.....	53
Figura 41: Registro de dos estacionamientos de un escáner.....	54
Figura 42: Técnicas de Georreferenciación.....	55
Figura 43: Propagación del error debido al registro nube a nube de varias nubes de puntos de una fachada.....	56
Figura 44: Automatización de las fases del procesamiento de un escaneado láser terrestre (tomado de A.Gruen).....	58
Figura 45: Imagen de una nube de puntos.....	59
Figura 46: Mapa de profundidades.....	60
Figura 47: Resultado de un muestreo láser (izquierda), acercamiento a un muestreo láser (derecha).....	60
Figura 48: Ejemplo del criterio de Delaunay. (a) Cumple el criterio mientras (b) no. (Tomado de [30]).....	63
Figura 49: (a) Cubo sin información de la textura, (b) plantilla UV, (c) cubo texturizado, (d) textura.....	65
Figura 50: Plano de proyección ortográfica y superficie.....	66
Figura 51: Flujo del control de calidad.....	68
Figura 52: Fotografía de la Iglesia de St. James en Leuven, Bélgica.....	74
Figura 53: Plano de la planta con las obstrucciones.....	75
Figura 54: Fotografía panorámica del interior de la Iglesia de St. James.....	76
Figura 55: Escáner por fase <i>Leica HDS 4500</i>	78
Figura 56: Escáner por tiempo de vuelo <i>Leica HDS3000</i>	79
Figura 57: Zonas separadas por las obstrucción de la visión.....	80
Figura 58: Descripción de las posiciones del escáner en el interior del templo.....	81
Figura 59: Descripción de las posiciones del escáner en el exterior de la iglesia.....	82
Figura 60: Vista de todas las posiciones del escáner y puntos de referencia propuesta por los autores.....	83
Figura 61: Cargando una base de datos en Cyclone.....	84
Figura 62: Navegador de Cyclone – Creando un proyecto de registro.....	86
Figura 63: Cuadro de diálogo del proyecto de registro.....	86
Figura 64: Importando los datos de la estación total desde un fichero ASCII.....	87
Figura 65: Estructura de los datos de una estación total importados en Cyclone.....	88
Figura 66: insertando todos los ScanWorlds al proyecto de registro.....	88
Figura 67: Opción Auto-Add Constraints del menú.....	89
Figura 68: Punto 17 en los ScanWorlds 5 (posición correcta - izquierda) y 6 (posición incorrecta - derecha).....	90

Figura 69: Lista de constreñimientos después del registro	90
Figura 70: Punto en el <i>ScanWorld 7</i> , posición incorrecta	91
Figura 71: Resultados del registro	92
Figura 72: Opción Auto-Add Cloud Constraints	93
Figura 73: Cuadro de diálogo del registro nube a nube, (a) después de 5 iteraciones, (b) después de 50 iteraciones	93
Figura 74: Resultados del ajuste de las nubes de puntos	94
Figura 75: (A) Vista de los puntos correspondientes; (B) Esquina de la pared con el tejado cercana a la entrada; (C) Parte superior del Segundo arco de la derecha; (D) Esquina de un rectángulo en la pared de la izquierda	96
Figura 76: Bases de datos en el navegador de Cyclone	97
Figura 77: Copia del registro de las nubes del interior	98
Figura 78: Crear una copia completa o una referencia	98
Figura 79: Proyecto del registro de las nubes de puntos del interior copiadas en el Nuevo proyecto de registro (interior y exterior juntos)	98
Figura 80: Insertando los proyectos de registro del interior y exterior al proyecto de registro global	99
Figura 81: Crear un Nuevo fichero de dibujo para importar la nube de puntos en <i>MicroStation</i>	101
Figura 82: Cargando el <i>plug-in</i> CloudWorx en <i>MicroStation</i>	102
Figura 83: Cajas de herramientas de CloudWorx	102
Figura 84: Cajas de herramientas de CloudWorx	103
Figura 85: Abriendo la vista ModelSpace de la nube de puntos en CloudWorx	103
Figura 86: Parámetros para abrir la vista de un ModelSpace	104
Figura 87: Nube de puntos cargada en <i>MicroStation</i> CloudWorx	104
Figura 88: Ajuste de los parámetros de CloudWorx	105
Figura 89: Elección de una elevación	107
Figura 90: Ocultando todos los puntos de fuera del cercado	107
Figura 91: Creación de una línea para definir el plano de elevaciones	108
Figura 92: Caja de herramientas Vista 2D	108
Figura 93: Vistas alineadas con el plano de elevación	109
Figura 94: Guardando las vistas	109
Figura 95: Definiendo un nuevo ACS	110
Figura 96: Vista frontal de la elevación	110
Figura 97: Sección	111
Figura 98: Vista de planta	111
Figura 99: Creando y abriendo un ModelSpace dentro del registro de las nubes de puntos del interior	113
Figura 100: Vista superior del proyecto del interior	113
Figura 101: Seleccionando una parte de la nube de puntos mediante un cercado	114
Figura 102: Área seleccionada de las nubes de puntos	114
Figura 103: Dialogo de información del ModelSpace para ver cuántos puntos hay en la nube	115
Figura 104: Copia del área seleccionada en un nuevo ModelSpace	115
Figura 105: Exportación de las nubes de puntos a un fichero	116
Figura 106: Interfaz gráfica de Geomagic Studio (v9)	117
Figura 107: Ratio para cargar los puntos	117
Figura 108: Especificando el tipo de unidad para los datos cargados	118
Figura 109: Cuadro de diálogo con los ajustes de Display Statistics	118
Figura 110: Sombreado de la vista de los puntos para un mejor entendimiento	118
Figura 111: Vista de toda la nube de puntos cargada en Geomagic Studio (v9)	119
Figura 112: División de la nube de puntos en partes menores para una mejor manipulación	120
Figura 113: Eliminación de partes de la memoria	120
Figura 114: Eliminación manual de las partes desconectadas	121
Figura 115: Eliminación de ruido mediante la herramienta automática	121
Figura 116: Eliminación de ruido mediante herramientas automáticas	122
Figura 117: Vista previa de los parámetros de reducción de ruido en una pequeña muestra	123
Figura 118: Crease Info	124
Figura 119: Cuadro de diálogo para el método Uniform Resampling	124
Figura 120: Cuadro de diálogo de la opción Wrap Meshing	125
Figura 121: Modelo triangulado	126
Figura 122: Unión de dos triangulaciones	127
Figura 123: Nueva triangulación que conecta las triangulaciones de las dos partes	128
Figura 124: Cuadro de diálogo para ajustar los parámetros de la herramienta Hole Filling	129
Figura 125: Eliminación de partes que no tienen suficiente información	130
Figura 126: Limpieza de los bordes de los agujeros antes de cubrirlos	130
Figura 127: Eliminación de triángulos puntiagudos en las áreas cubiertas	131
Figura 128: Ejemplo de un agujero estrecho	131
Figura 129: Creando puntos para dividir un agujero estrecho en varios agujeros más pequeños	132
Figura 130: Ejemplo de un agujero que no tiene suficiente información para poder ser reconstruido	132
Figura 131: Encontrando una pieza similar para copiar y tapar el agujero	133
Figura 132: Registro manual	134
Figura 133: Registro manual para cubrir el agujero con una pieza de la triangulación de aspecto similar	135
Figura 134: Cuadro de diálogo de la orden Polygon - Merge	136
Figura 135: Modelo totalmente triangulado	136
Figura 136: Triangulación antes (izquierda) y después (derecha) del suavizado del borde	137
Figura 137: Creando un plano de simetría	138
Figura 138: Definiendo un plano de corte mediante el método Perpendicular through Point	138
Figura 139: Secciones transversales	139
Figura 140: Vistas de las posiciones de la cámara para crear la animación	140
Figura 141: Cambiando las propiedades de la vista para mostrar las posiciones de la cámara	141

Figura 142: Cuadro de diálogo del Editor de Animación.....	142
Figura 143: Cuadro de diálogo de los ajustes de la Animación	142
Figura 144: Imagen de un FPSO.....	144
Figura 145: FPSO en un campo petrolífero	145
Figura 146: Izquierda: situación real – Derecha: proyecto de extensión en CAD © BnS engineering N.V.	146
Figura 147: arquitectura de programas CAD/CAE - © Bentley Systems	151
Figura 148: Desde del escaneado láser hasta el modelado 3D - © Leica Geosystems	152
Figura 149: Flujo de trabajo a partir de una nube de puntos- © BnS engineering N.V.	153
Figura 150: FPSO en el mar.....	154
Figura 151: Posicionamiento del escáner láser - © GlobeZenit	155
Figura 152: Diagrama de bloques del FPSO - © GlobeZenit N.V.	157
Figura 153: Boceto del entorno virtual de escaneado.....	161
Figura 154: Navegador de Cyclone mostrando el ModelSpace simulado	162
Figura 155: Vista del ModelSpace Simulated Scanner	162
Figura 156: Creando un escáner simulado	163
Figura 157: Cuadro de diálogo de los escaneados simulados.....	164
Figura 158: Ventana de control del escáner simulado	164
Figura 159: adquisición de la imagen del escáner simulado.....	165
Figura 160: Pruebas para determinar la resolución del escáner.....	166
Figura 161: vista en tiempo real del proceso de escaneado	167
Figura 162: Escaneado final.....	167
Figura 163: Seleccionando una diana esférica para realizar un escaneado a mayor resolución	168
Figura 164: Escaneado a mayor resolución de una diana (los puntos rojos son parte del escaneado a menor resolución y los verdes del escaneado a mayor resolución).....	168
Figura 165: Actualización a una nueva posición del escáner	169
Figura 166: Seleccionando los escaneados simulados en el navegador de Cyclone.....	170
Figura 167: Ajustando una diana esférica a la nube de puntos	171
Figura 168: Ventana de identificación de las dianas.....	171
Figura 169: diana con etiqueta.....	172
Figura 170: Nubes de puntos registradas	172
Figura 171: Izquierda: equipamiento – derecha: escaneado (nube de puntos) del mismo equipamiento - © GlobeZenit N.V. ..	174
Figura 172: Izquierda: vista isométrica de los ejes de revolución – derecha: representación sólida - © BnS engineering N.V. ..	174
Figura 173: Cargando una nube de puntos en un programa CAD - © BnS engineering N.V.	175
Figura 174: Modelado 3D a partir de las nubes de puntos - © BnS engineering N.V.	176
Figura 175: Diseño 3D de una extensión con la nube de puntos - © BnS engineering N.V.	176
Figura 176: Representación sólida de la extensión diseñada - © BnS engineering N.V.	177
Figura 177: Plano (isométrico) de la construcción de la extensión diseñada - © BnS engineering N.V.	177
Figura 178: Factura de los materiales de la extensión diseñada - © BnS engineering N.V.	178
Figura 179: Tubería existente en su inclinación real - © BnS engineering N.V.	179
Figura 180: Tubería existente con su inclinación real y limpiada © BnS engineering N.V.	179
Figura 181: Preparación del plano de la tubería - © BnS engineering N.V.	180
Figura 182: Flujo de trabajo de un diseño 3D híbrido - © BnS engineering N.V.	180
Figura 183: Revisión híbrida 3D utilizando Navisworks - © BnS engineering N.V.	181
Figura 184: Plano de tuberías que incluye la nueva extensión - © BnS engineering N.V.	182
Figura 185: Equipamiento a topografiar - © BnS engineering N.V.	183
Figura 186: Nube de puntos desde una posición - © BnS engineering N.V.	184
Figura 187: Consolidación de 4 escaneados en una única nube de puntos - © BnS engineering N.V.	184
Figura 188: Control de calidad a partir de la nube de puntos - © BnS engineering N.V.	185
Figura 189: Esquema de planta hidroeléctrica en curso fluvial Fuente: http://www.tva.com/ power/Figures/hydro.gif	186
Figura 190: Esquema de planta de almacenamiento y bombeo	186
Figura 191: Presa de almacenamiento Kops en Austria	187
Figura 192: Presa de almacenamiento Kops en Austria	187
Figura 193: Fluctuación de los niveles de reserva	187
Figura 194: Cargas diferentes (naranja) y deformaciones (rojo).....	187
Figura 195: Pantano Kops, vista desde el SO	189
Figura 196: Parte izquierda de la presa, Febrero 2007.....	190
Figura 197: Centro y parte derecha de la presa, Febrero 2007,	191
Figura 198: mediciones del láser con el eje vertical (posición normal)	193
Figura 199: Tras inclinar 20° el eje vertical	193
Figura 200: Toma con el soporte ortogonal	193
Figura 201: Huellas del haz láser: a) perpendicular, b) inclinación de 30° en el plano YZ, c) inclinación de 30° en los planos XZ e YZ, d) inclinación de 45° en el plano YZ, e) inclinación de 45° en los planos XZ e YZ	194
Figura 202: Ortoimagen (a) MDT (b,c) con el dibujo malo de la cresta	195
Figura 203: Contorno de la cresta de la presa	195
Figura 204: modelo 3D de la presa	195
Figura 205: campo de visión de 60° x 360° tras inclinar 20° el eje vertical	195
Figura 206: Resultado final para la estación 1	196
Figura 207: Resultado final para la estación 2	196
Figura 208: Resultado final para la estación 3	196
Figura 209: Escáner Móvil, h=6m.....	197
Figura 210: Diana plana en una señal de tráfico.....	198
Figura 211: Esfera de Trimble, d=7.6cm y prisma intercambiable	198
Figura 212: Esfera de madera pintada con un prima acoplado, d=23.85cm	198
Figura 213: Bola de bolos, d=21.9cm.....	198
Figura 214: tiempo de escaneado de las diferentes sesiones de la campaña de medición de Septiembre.....	200

Figura 215: Mediciones taquimétricas de la cresta de la presa	201
Figura 216: ventana de RealWorks Survey	202
Figura 217: Modos de visualización de las nubes de puntos	204
Figura 218: Cambio de módulo	205
Figura 219: Cuadro de diálogo Target Analyzer	206
Figura 220: Diana A1-101(red)	207
Figura 221: Modificando la diana A1-101(red)	208
Figura 222: Modificando la diana A1-101(red)	208
Figura 223: Nueva diana A1-101(red)	208
Figura 224: nubes de puntos kops-A2 y kops-A3 antes de registrarse	210
Figura 225: Puntos de referencia comunes en las nubes de puntos kops-A2 y kops-A3	211
Figura 226: kops-A2 y kops-A3 tras el registro	212
Figura 227: Ventana con el informe del registro para cada estación (<i>nota: los puntos de control también se han enlazado</i>)	213
Figura 228: ventana con el informa del registro para cada par de puntos enlazados (<i>nota: los puntos de control también se han enlazado</i>)	213
Figura 229: Ventana con el informe del registro para cada estación (<i>nota: los puntos de control se han omitido</i>)	214
Figura 230: ventana con el informa del registro para cada par de puntos enlazados (<i>nota: los puntos de control se han omitido</i>)	215
Figura 231: Asistente para importar el fichero ASCII con los puntos de referencia en un sistema global	217
Figura 232: Nube de puntos y puntos de referencia (<i>TopoPoints</i>)	218
Figura 233: Nubes de puntos georreferenciadas	219
Figura 234: Informe de propiedades de las dianas A1-3 y F1-50 con las coordenadas de sus centros	220
Figura 235: Cálculo de posibles desviaciones	220
Figura 236: Barra de herramientas Segmentation Tool	221
Figura 237: Eliminando puntos	222
Figura 238: Nube de puntos filtrada	223
Figura 239: ventanas de la herramienta Cutting Plane	224
Figura 240: Lista de ejes	225
Figura 241: Lista de geometrías	225
Figura 242: Previsualización de los cortes	227
Figura 243: Triangulación	230
Figura 244: realizando cortes horizontales	232
Figura 245: realizando cortes verticales	232
Figura 246: Creación de polilíneas (herramienta <i>2D-Easy-Line</i>)	232
Figura 247: Panel de la orden Insert-Block	233
Figura 248: Comparación de las secciones	234
Figura 249: Nodo de la rejilla compuesta por las secciones con la deformación horizontal	234
Figura 250: Nubes de puntos cargadas	235
Figura 251: Área central en común de las nubes de puntos	236
Figura 252: selección inversa	236
Figura 253: Parámetros para el cálculo de las superficies wrap	237
Figura 254: Superficie poligonal resultante	237
Figura 255: Eliminación de agujeros	238
Figura 256: Comparación 3D: Shortest Distance (Fuente: ayuda de Geomagic)	239
Figura 257: Comparación 3D: Orthogonal Distance (Fuente: ayuda de Geomagic)	239
Figura 258: parámetros de la herramienta 3D Compare	239
Figura 259: Resultados de la herramienta 3D Compare	240

11. Bibliografía

1. Caballero, D., J. Esteban, and B. Izquierdo. *ORCHESTRA: a unified and open architecture for risk management applications*. in *European Geosciences Union General Assembly*. 2007. Vienna, Austria.
2. WWW, Paschotta, R. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. [cited 19/12/2007]; Available from: <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>.
3. IEC, 2001. *Safety of laser products – Part 1: Equipment - classification, requirements and users guide. Edition 1.2. International Standard, IEC 60825-1*. 2001.
4. Blais, F., *Terrestrial Laser Scanning*, in *International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling"*. 2006: Aghios Nikolaos, Crete, Greece.
5. WWW, Magnor, M., H. Lensch, and H. Seidel. *3D Figure Analysis and Synthesis*. [Powerpoint presentation] [cited 01/07/2008]; Available from: <http://www.mpi-inf.mpg.de/departments/irg3/ss03/3diaas/digacqui-2804.pdf>.
6. WWW, <http://en.wikipedia.org/wiki/Moire>. [cited 19/12/2007].
7. WWW, <http://utopia.cord.org/cm/leot/Module6/module6.htm>. [cited 19/12/2007].
8. Pfeifer, N. and C. Briese. *Laser scanning – principles and applications*. in *GeoSiberia 2007*. 2007.
9. WWW, <http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>. [cited 20/12/2007].
10. Brenner, C. *Aerial laser scanning*. in *International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling"*. 2006. Aghios Nikolaos, Crete, Greece.
11. Lichti, D., et al. *Calibration and testing of a terrestrial laser scanner*. in *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000.
12. Lichti, D., et al. *Comparison of digital photogrammetry and laser scanning*. in *Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording*. 2002.
13. Kern, F., *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscannerdaten*. 2003, Technische Universität Braunschweig.
14. Johansson, M. *Explorations into the behavior of three different high-resolution ground-based laser scanners in the built environment*. in *Proceedings of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording*. 2002.
15. Balzani, M., et al. *A terrestrial 3D laser scanner: Accuracy tests*. in *Proceedings of the 18th Int. Symp. CIPA 2001*. 2001.
16. WWW, <http://scanning.fh-mainz.de>. [cited 20/12/2007].
17. Weichel, H., *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. 1990, Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press.
18. Hughes, A.J., *Laser Beam Scanning: Opto-Mechanical Devices, Systems and Data Storage Optics*. *Journal of Modern Optics*, 1986. 33(8): p. 950-951.
19. Lichti, D. and S.J. Gordon. *Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording*. in *Proc. of FIG Working Week*. 2004. Athens, Greece.
20. Beraldin, J.-A., et al. *Virtual Reconstruction of Heritage Sites: Opportunities and Challenges Created by 3D Technologies*. in *International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*. 2005. Ascona, Switzerland.
21. Boehler, W., M. Bordas, and A. Marbs. *Investigating laser scanner accuracy*. in *Proc. CIPA XIXth Int. Symposium*. 2003. Antalya, Turkey.
22. Clark, J. and S. Robson. *Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner against surfaces of known colour*. in *Proc. of XXth ISPR 2004*. 2004. Istanbul, Turkey.
23. Ingesand, H., A. Ryf, and T. Schulz. *Performances and experiences in terrestrial scanning*. in *Proc. Optical 3D Measurement Techniques*. 2003. Zurich, Switzerland.

24. Mechelke, K., T.P. Kersten, and M. Lindstaedt. *Comparitive investigations into accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems*. in *Optical 3D Measurement techniques VIII*. 2007. Zurich.
25. Barber, D., J. Mills, and P. Bryan. *Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage*. in *CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage*. 2003.
26. Kopacik, A. and M. Korbassova. *Optimal Configuration of Standpoints by Application of Laser Terrestrial Scanners*. in *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*. 2004. Bratislava, Slovakia.
27. Leica. *Leica Manual HDS 6000*.
28. WWW, English_Heritage. *3D Laser Scanning for Heritage, Advice and Guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. 2007 [cited 01/07/2008]; Available from: <http://www.heritage3d.org/downloads/3dscanning.pdf>.
29. WWW, English_Heritage. *An addendum to the metric survey specifications for english heritage – the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods*. 2006 [cited 01/07/2008]; Available from: <http://www.ceg.ncl.ac.uk/heritage3d/downloads%5Caddendum2006.pdf>.
30. WWW, <http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/survey/tetsurv.html>. [cited 05/01/2008].
31. Alba, M., et al., *Structural Monitoring of a Large Dam by Terrestrial Laser Scanning*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2006: Dresden, Germany.
32. Eling, D., *Terrestrisches Laserscanning für die Deformationsanalyse an Talsperren*. Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida, 2006. 1: p. 31-40.
33. Hesse, C. and H. Kutterer. *Automated form recognition of laser scanned deformable objects*. in *IAG Symposia on Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*. 2006. Berlin, Germany: Springer.
34. Rudig, S., *Analyse flächenhafter Deformationen aus Laserscannerdaten*. 2005, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck: Innsbruck.