

Universidad de
Oviedo



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS

ÁREA DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA, GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

RECONSTRUCCIÓN DE OBJETO CERCANO MEDIANTE
FOTOGRAMETRÍA Y ESCANEADO LÁSER: UNA
APLICACIÓN PRÁCTICA

AUTOR: Pablo Hevia Pose
TUTOR: Silverio García Cortés

Mayo de 2022

«La luz está ahí y los colores nos rodean. Sin embargo, si no hubiera luz ni colores en nuestro propio ojo, no percibiríamos tales cosas fuera de nosotros».

—Johann Wolfgang Von Goethe (1749–1832)

1 Resumen

Este documento relata el procedimiento seguido para la digitalización de una serie de moldes metálicos para la fabricación de recipientes de vidrio proporcionados por la Real Fábrica de Vidrios y Cristales de La Granja. Describe el instrumental utilizado, el escáner 3D, y detalla las fases de las que constó el proceso, los problemas encontrados a lo largo del mismo, así como las soluciones adoptadas.

Esta experiencia sirvió de base para la construcción de una metodología que puede aplicarse en sucesivos proyectos similares, capaz de adaptarse a las características de cualquier objeto y entorno de trabajo.

Además, se comparan los resultados obtenidos con los procedentes de aplicar la metodología de la Fotogrametría.

2 Palabras clave

Escáner, 3D, nube de puntos, modelo, digitalización, Fotogrametría.

Tabla de contenidos

1	Resumen.....	3
2	Palabras clave.....	3
3	Introducción.....	10
4	Objetivos.....	10
5	Marco teórico.....	11
5.1	Escáneres 3D: clasificaciones.....	11
5.1.1	De contacto.....	11
5.1.2	Sin contacto.....	11
5.2	Principio de medición del escáner de triangulación.....	13
6	Metodología.....	14
6.1	Escaneado 3D.....	14
6.1.1	Fase de adquisición de datos.....	14
6.1.1.1	Planificación.....	14
6.1.1.1.1	Elección de la instrumentación.....	15
6.1.1.1.2	Cualidades del objeto.....	17
6.1.1.1.3	Número de barridos.....	18
6.1.1.1.4	Geometría del objeto.....	19
6.1.1.1.5	Lente y composición de la escena.....	20
6.1.1.1.6	Iluminación.....	21
6.1.1.1.7	Equipo de adquisición.....	24
6.1.1.1.8	Equipo de procesado.....	25
6.1.1.2	Escaneado.....	25
6.1.2	Fase de procesado.....	27
6.1.2.1	Importación.....	27
6.1.2.2	Limpieza.....	28
6.1.2.2.1	Herramientas de limpieza automática.....	29
6.1.2.3	Alineación.....	30
6.1.2.4	Fusionado.....	33
6.1.2.5	Modelado.....	34
6.1.2.5.1	Terminología.....	34
6.1.2.5.2	Características de una malla óptima.....	35
6.1.2.5.3	Métodos de modelado.....	37

6.1.2.6	Revisión de integridad.....	39
6.1.3	Fase de postprocesado.....	39
6.1.3.1	Optimización.....	39
6.1.3.2	Edición.....	42
6.1.3.2.1	Eliminación de elementos ajenos al objeto.....	42
6.1.3.2.2	Reparación de agujeros en la malla.....	42
6.1.3.2.3	Eliminación de protuberancias.....	44
6.1.3.2.4	Reparación de solapamientos.....	44
6.1.3.2.5	Reorientación de piezas móviles.....	44
6.1.3.2.6	Extracción de positivos de molde.....	46
6.1.3.2.7	Texturas.....	49
6.1.3.3	Orientación absoluta.....	51
6.1.3.3.1	Extraer geometrías de referencia.....	51
6.1.3.3.2	Giro y traslación.....	52
6.1.3.4	Exportación.....	52
6.2	Comparativa: Escáner 3D frente a Fotogrametría.....	54
6.2.1	Cualitativa.....	54
6.2.2	Cuantitativa.....	55
6.2.2.1	Registro de modelos.....	55
6.2.2.1.1	Registro inicial.....	55
6.2.2.1.2	Registro fino.....	56
6.2.2.1.3	Exportación.....	58
6.2.2.2	Cálculo de diferencias entre modelos.....	59
6.2.2.3	Cálculo de propiedades de los modelos.....	62
7	Resultados.....	62
7.1	Resultados del escaneado 3D.....	62
7.1.1	Imágenes de los modelos.....	62
7.1.2	Tiempos de adquisición y procesado.....	70
7.1.3	Almacenamiento y seguridad.....	71
7.1.4	Optimización de recursos.....	72
7.2	Resultados de la comparativa.....	73
8	Presupuesto.....	74
8.1	Mano de obra.....	74
8.2	Materiales.....	75

8.3	Otros gastos.....	76
8.4	Resumen presupuesto.....	76
9	Conclusiones.....	77
9.1	Adquisición de datos.....	77
9.2	Procesado y postprocesado.....	78
10	Futuras líneas de investigación.....	78
11	Bibliografía.....	79

Índice de figuras

Figura 1: Tecnologías de escáner 3D.....	11
Figura 2: Esquema de funcionamiento de un escáner de triangulación.....	13
Figura 3: Diagrama del flujo de trabajo.....	14
Figura 4: Precisión frente a exactitud.....	16
Figura 5: Esquema del láser de triangulación Konica Minolta VI-910 [12].....	17
Figura 6: Pieza sobre la plataforma giratoria.....	18
Figura 7: Objetos alargados. Posición más adecuada.....	19
Figura 8: Zonas inaccesibles.....	19
Figura 9: Distribución de la profundidad de campo.....	20
Figura 10: Esquemas de iluminación de caja de luz: con dos o tres luces.....	22
Figura 11: Esquema de iluminación con dos luces sin caja de luz. Vista en planta.....	22
Figura 12: Ajuste de balance de blancos [12].....	24
Figura 13: Esquema de polarización cruzada.....	24
Figura 14: Importación de archivos CDM con textura fotográfica asociada.....	28
Figura 15: Limpieza manual por selección poligonal.....	29
Figura 16: Filtrar ruido.....	29
Figura 17: Suavizado de nube de puntos.....	30
Figura 18: Alineación de nubes de puntos.....	31
Figura 19: Estructura general de la matriz de roto-traslación.....	31
Figura 20: Ejemplo de histograma de ajuste de puntos.....	32
Figura 21: Ejemplo de resultados numéricos de alineado.....	33
Figura 22: Fusionado de nubes de puntos.....	33
Figura 23: Paso de nube de puntos a modelo 3D.....	34
Figura 24: Elementos de una malla.....	35
Figura 25: Botella de Klein.....	35
Figura 26: Policaras en abanico: triángulos manifold.....	35
Figura 27: Ejemplos de policaras non-manifold.....	36
Figura 28: Policaras cruzadas.....	36
Figura 29: Normales a una superficie.....	37
Figura 30: Bloque o clúster de triángulos aislados.....	37
Figura 31: Fases de la triangulación 2D sobre plano virtual.....	37
Figura 32: Esquema de fases de triangulación 3D.....	38

Figura 33: Voxelizado y posterior mallado.....	39
Figura 34: Menú Polígonos, con el Asistente de reparación.....	40
Figura 35: Opciones del asistente de reparación.....	40
Figura 36: Herramientas de selección.....	42
Figura 37: Herramientas para rellenar orificios.....	43
Figura 38: Herramienta para eliminar entidades.....	44
Figura 39: Rotación de pieza mediante Transformar datos de escaneado.....	45
Figura 40: Extracción de eje a partir de puntos de un cilindro.....	46
Figura 41: Fases de extracción de positivos.....	46
Figura 42: Definir plano de corte.....	47
Figura 43: Desplazar plano.....	48
Figura 44: Herramienta espesor.....	49
Figura 45: Positivo obtenido.....	49
Figura 46: Herramienta copiar textura/color de vértice.....	50
Figura 47: Segmentación automática.....	51
Figura 48: Comparativa de tamaños de sensores.....	54
Figura 49: Comparativa de texturas: Fotogrametría frente a Escáner 3D.....	55
Figura 50: Resultado del alineado/escalado inicial.....	56
Figura 51: Opciones del registro fino de CloudCompare.....	57
Figura 52: Resultado del ajuste fino ICP.....	58
Figura 53: Consumo de recursos en el proceso de registro fino.....	58
Figura 54: Convertir textura a RGB en CloudCompare.....	59
Figura 55: Elección de roles de los modelos.....	60
Figura 56: Descarte de puntos con distancia máxima mayor a 1 mm.....	60
Figura 57: Diferencias entre modelos.....	61
Figura 58: Histograma de distribución de diferencias entre modelos.....	61
Figura 59: 3041-A: Molde rodado (IL-3-01204). Cuerpo.....	62
Figura 60: 3041-B: Molde rodado (IL-3-01204). Peana.....	63
Figura 61: 4041-A: Molde licorera(IL-4-01292). Cuerpo.....	63
Figura 62: 4041-B: Molde licorera (IL-4-01292). Peana.....	64
Figura 63: 4041-C: Molde licorera (IL-4-01292). Positivo.....	65
Figura 64: 5114-A: Molde centrifugado.....	65
Figura 65: 5114-B: Molde centrifugado. Tapón.....	66
Figura 66: 5114-C: Molde centrifugado. Positivo.....	66

Figura 67: 6047-A: Prensa cuchara. Base.....	67
Figura 68: 6047-B: Prensa cuchara. Cuerpo.....	67
Figura 69: 6047-C: Prensa cuchara. Pinza.....	68
Figura 70: 6061-1-A: Molde prensa labrado. Bulón.....	68
Figura 71: 6061-1-B: Molde prensa labrado. Tapón.....	69
Figura 72: 6061-1-C: Molde prensa labrado. Cuerpo.....	69
Figura 73: 6061-1-D: Molde prensa labrado. Tenaza.....	70
Figura 74: Relación entre tiempos de escaneado y modelado.....	71
Figura 75: Monitorización de uso del hardware durante operaciones exigentes.....	73

3 Introducción

La digitalización 3D es una herramienta fundamental en el ámbito de la preservación del patrimonio. Disponer de una réplica virtual de una pieza única, especialmente si es delicada, permite experimentar con ella, visualizarla, manipularla o realizar estudios analíticos, sin exponer el original a riesgos de deterioro. Por todo ello, es una técnica especialmente indicada en Arqueología.

Por otro lado, en el caso de piezas industriales de las que no se dispone de planos de fabricación, permite reproducirlas mediante impresión 3D, generar planos mediante ingeniería inversa, producir piezas derivadas y un sinfín de opciones más.

Documentar de esta manera la realidad permite el acceso remoto a los objetos y disponer de ellos en un almacén virtual, bien ordenado y que no ocupa metros cúbicos, sino gigabytes.

Este equipo de trabajo ya había aplicado la técnica de digitalización mediante escáner 3D a la Arqueología, registrando piezas procedentes del Castro de Llagú, en Latores, Oviedo, con destino al Museo Arqueológico de Asturias. En esta ocasión, se aplica la misma metodología al patrimonio industrial procedentes de la Real Fábrica de Cristales de La Granja. Una fábrica que lleva produciendo objetos suntuarios desde el siglo XVIII, manteniendo los procesos tradicionales, y que se incorpora ahora la tecnología más puntera.

Aunque no son las únicas, tenemos a día de hoy dos principales técnicas para el registro tridimensional de objetos:

- La Fotogrametría, que reconstruye la geometría 3D a partir de la detección de puntos homólogos en fotografías. En los últimos años, con las mejoras en hardware y software, ha experimentado un fuerte crecimiento.
- El escaneado 3D, conjunto de técnicas que se desarrollarán a fondo en ese documento.

Para el presente trabajo, se empleó el escaneado 3D y se compararon los resultados obtenidos con los generados por otro equipo de trabajo, que empleó Fotogrametría sobre las mismas piezas.

4 Objetivos

- Sentar las bases de un flujo de operaciones de digitalización 3D de objeto próximo.
- Identificar los posibles problemas en el proceso y plantear soluciones.
- Conocer las ventajas del método de escaneado láser 3D y sus limitaciones en comparación con la Fotogrametría.

5 Marco teórico

Un escáner 3D es un aparato que es capaz de capturar la forma y algunas características físicas, como el color —en el caso de que disponga de un sensor adecuado para ello—, de un objeto real existente a base de explorar su superficie y tomar medidas en ella respecto a unos puntos de referencia.

5.1 Escáneres 3D: clasificaciones

Existen diferentes tecnologías englobadas bajo el nombre Escáner 3D [1]:

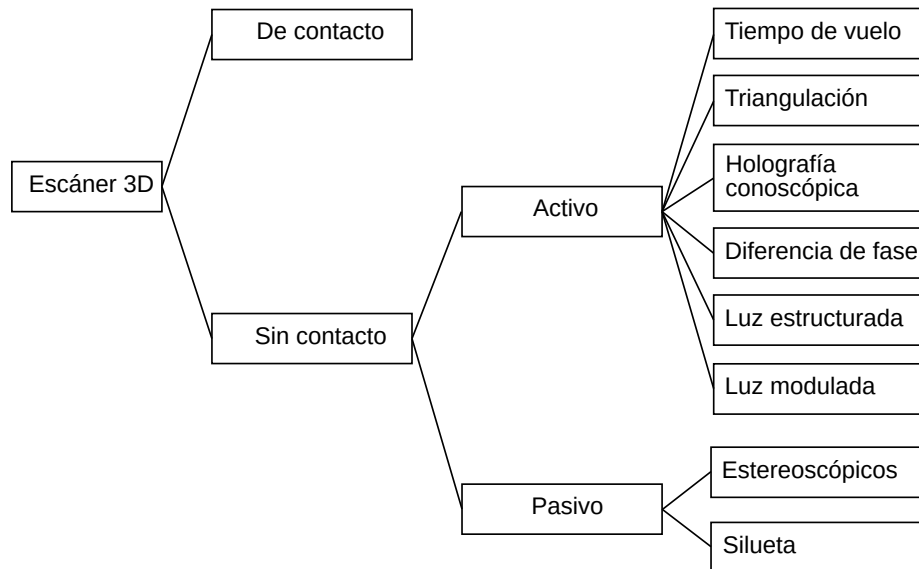


Figura 1: Tecnologías de escáner 3D

5.1.1 De contacto

Digitalizan el objeto apoyando un palpador sobre la superficie del mismo. Para cada contacto realizado, el sistema determina la posición espacial de la punta del palpador.

Alcanzan precisiones de 0.01 mm, aunque el flujo de trabajo, punto a punto, es lento y, al requerir contacto, puede producir modificaciones en el objeto.

También se denominan máquinas de medición por coordenadas o CMM (del inglés *Coordinate-measuring machine*)

5.1.2 Sin contacto

- **Activos:** emiten señal electromagnética o ultrasonidos y analizan su retorno para reconstruir la geometría del objeto.
 - **De tiempo de vuelo:** emiten un pulso de luz láser y cronometran el tiempo de ida y vuelta. Conocida la velocidad de la luz, ese tiempo de ida y vuelta determina la distancia recorrida por el pulso láser, que será el doble de la distancia entre el escáner y la superficie. La precisión de un escáner

láser 3D de tiempo de vuelo dependerá de la precisión con la que pueda medir el tiempo.

Permiten muestrear miles de puntos por segundo, con precisiones subcentimétricas y rangos de distancia de uso de hasta 1000 m. Estas características los hacen especialmente indicados en obra civil, minería o industria.

En esta categoría se engloban los sistemas LIDAR, SONAR y RADAR.

- **De triangulación** (se abordará en profundidad en la sección 5.2).
- **De diferencia de fase:** la distancia que recorre la luz se puede obtener calculando el desfase entre una señal enviada por el instrumento y la misma señal reflejada por el objeto. Cuando la distancia de captura es mayor de la mitad de la longitud de onda, se produce una ambigüedad en el número de ciclos completos, que se puede calcular si empleamos dos pulsos, a diferente longitud de onda, combinados.
- **Holografía conoscópica:** es una técnica basada en la propiedad de doble refracción de los cristales birrefringentes [2]. Cuando un rayo de luz monocromática polarizada atraviesa este tipo de cristal, se divide en dos —el rayo ordinario y el extraordinario—, polarizados ortogonalmente. La velocidad del rayo ordinario es constante, mientras que la del extraordinario depende del ángulo de incidencia. Esto permite calcular la distancia original al punto del objeto. Se obtienen precisiones submilimétricas y permite trabajar en rangos de distancia submétrica.
- **Luz estructurada:** el objeto es irradiado con un patrón de luz conocido. Una o varias cámaras registran la imagen que produce el patrón sobre el objeto y el sistema analiza la deformación producida y, con ello, la posición espacial de los puntos analizados. Proporciona precisiones submilimétricas.
- **Luz modulada:** emiten una luz continuamente cambiante sobre el objeto. Por lo general, la fuente de luz simplemente hace un ciclo de su amplitud en un patrón sinusoidal. Una cámara detecta la luz reflejada y la cantidad de desplazamiento del patrón determina la distancia que ha recorrido la luz. La luz modulada también permite al escáner ignorar la luz de otras fuentes que no sean un láser, por lo que no hay interferencias [3].
- **Pasivos:** no emiten radiación, sino que detectan de la radiación ambiental reflejada. Habitualmente utilizan la luz visible, pero también pueden utilizar otros tipos de radiación, como los infrarrojos.
- **Estereoscópicos:** aplican el mismo principio de la visión estereoscópica humana y de la Fotogrametría. Se emplean dos cámaras ligeramente separadas, registrando la misma escena. Analizando la posición de cada punto del objeto en las dos imágenes es posible reconstruir tridimensionalmente la escena.

- **De silueta:** se toma una serie de fotografías alrededor del objeto sobre un fondo bien contrastado, siendo conocido el desplazamiento angular de cada toma. Se extrae la silueta del objeto en cada imagen y se extruyen, se giran e interseccionan, calculando la superficie envolvente del objeto . La técnica tiene carencias en en objetos con cavidades.

Cada tecnología tiene sus ventajas y sus limitaciones, y la decisión final en cuanto a la mejor alternativa depende de varios factores:

- La complejidad y el tamaño del objeto.
- La inversión económica.
- Los plazos de producción.
- El tipo de producto final deseado.

5.2 Principio de medición del escáner de triangulación

Los escáneres 3D de triangulación emiten un haz láser sobre el objeto y analizan la señal reflejada. En el triángulo formado por el emisor, el punto del objeto y la lente del sensor, son conocidos los siguientes parámetros:

- Distancia D entre emisor y lente, que es constante por construcción.
- El ángulo de emisión α .
- El ángulo de recepción β , que se obtiene examinando la proyección del punto P sobre el sensor fotográfico.

Con estos tres datos, queda plenamente definida la forma y el tamaño del triángulo, por lo que puede calcularse por trigonometría la posición del punto P .

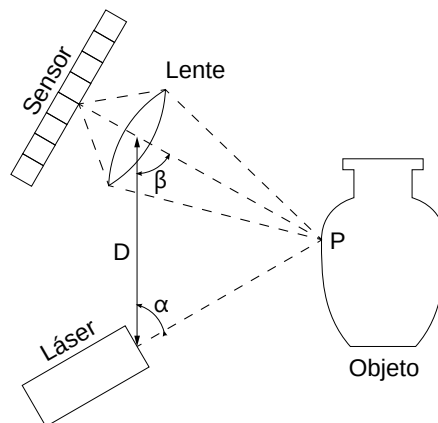


Figura 2: Esquema de funcionamiento de un escáner de triangulación

El láser emisor suele producir un haz lineal en lugar de puntual, lo que acelera considerablemente el proceso de toma de datos de las piezas.

6 Metodología

6.1 Escaneado 3D

El flujo de trabajo consta de tres grandes fases:

- Adquisición de datos.
- Reconstrucción o procesado.
- Postprocesado.

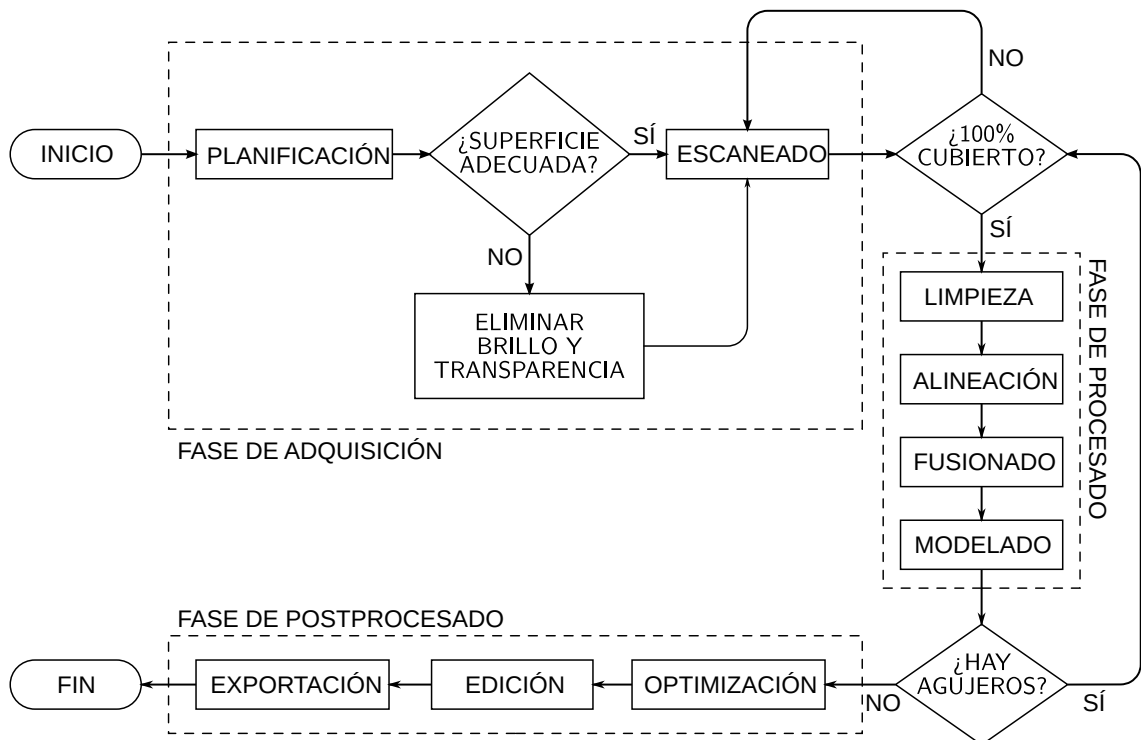


Figura 3: Diagrama del flujo de trabajo

6.1.1 Fase de adquisición de datos

Es el conjunto de operaciones destinadas a la toma de información del objeto. El resultado de la fase de adquisición son varias nubes inconexas de puntos.

6.1.1.1 Planificación

En la fase de planificación de la adquisición de datos se hace inventario de los objetos a procesar y sus características. Además, se evalúan los medios con los que se cuenta y se decide cómo abordar el trabajo de digitalización.

Salirse de la planificación óptima durante la adquisición de datos conllevará un mayor trabajo posterior de edición o incluso la necesidad de repetir esta fase.

6.1.1.1.1 Elección de la instrumentación

En nuestro caso particular, a la hora de elegir la instrumentación, la finalidad del trabajo y la naturaleza de los objetos con los que trabajábamos imponía ciertos requisitos:

- Debía ser un método no destructivo.
- Alta precisión en piezas de pequeño tamaño.
- Que captase, además de la nube de puntos, la textura de las piezas.
- Que fuese capaz de capturar las piezas en su totalidad, y no sólo ciertos puntos clave.

La tecnología láser escáner —y, en concreto, de triangulación— se adaptaba perfectamente a los condicionantes:

- No hay contacto directo con el objeto y emplea un láser de baja potencia, inofensivo con las piezas.
- Precisiones del orden de la micra y densidades altísimas en las nubes de puntos.
- Permite capturar color asociado a cada punto.

El instrumento disponible que cumplía estos requisitos fue el modelo Konica Minolta VI-910, cuyas características generales son las siguientes:

Modelo	Konica Minolta VI-910
Tipo de instrumento	Escáner láser de triangulación
Rango de distancia de escaneado	De 0.60 m a 2.5 m
Profundidad de campo	De 0.60 m a 1.2 m
Clase de láser	Clase 2 (IEC 60825-1, Europa) / Clase 1 (FDA, EE.UU.). Color rojo.
Resolución máxima	Modo <i>Fast</i> : 320×240 puntos Modo <i>Fine</i> : 640×480 puntos
Velocidad de escaneado	Modo <i>Fast</i> : 76800 puntos en 0.3 s (256000 puntos/s) Modo <i>Fine</i> : 307200 puntos en 2.5 s (122880 puntos/s)

Cuenta con tres lentes intercambiables —*Tele*, *Middle* y *Wide*— que le confieren las siguientes características:

	Lente <i>Tele</i>	Lente <i>Middle</i>	Lente <i>Wide</i>
Distancia focal	25 mm	14 mm	8 mm
Exactitud en X	± 0.22 mm	± 0.38 mm	± 1.40 mm
Exactitud en Y	± 0.16 mm	± 0.31 mm	± 1.04 mm
Exactitud en Z	± 0.10 mm	± 0.20 mm	± 0.40 mm
Precisión	0.008 mm	0.016 mm	0.032 mm

Cabe reseñar que la exactitud mide la proximidad de los resultados respecto al valor real, mientras que la precisión indica la repetibilidad de la medida.

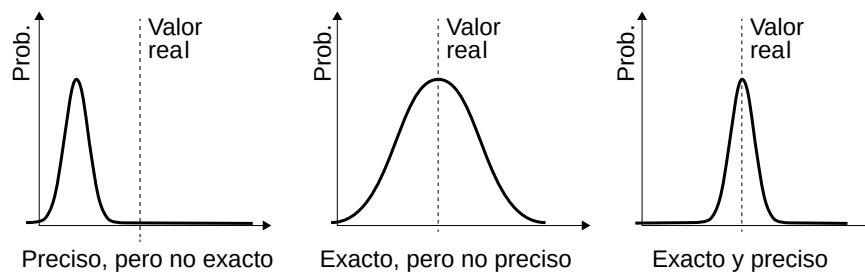


Figura 4: Precisión frente a exactitud

Además, el VI-910 puede crear una imagen en color con este mismo sensor CCD. Para ello, después de cada emisión horizontal del haz láser, y ya con éste desactivado, registra en tres ocasiones la luz natural que refleja el objeto, pasándola en cada ocasión a través de un filtro diferente: rojo, verde y azul. Combinando la información obtenida después de todos los barridos, se consigue una sola imagen RGB de 640×480 píxeles y 24 bits (8 bits por canal).

Finalmente, la información de cada nube de puntos se guarda en un solo fichero en el cual cada punto queda almacenado con sus coordenadas (X, Y, Z) y su color (RGB).

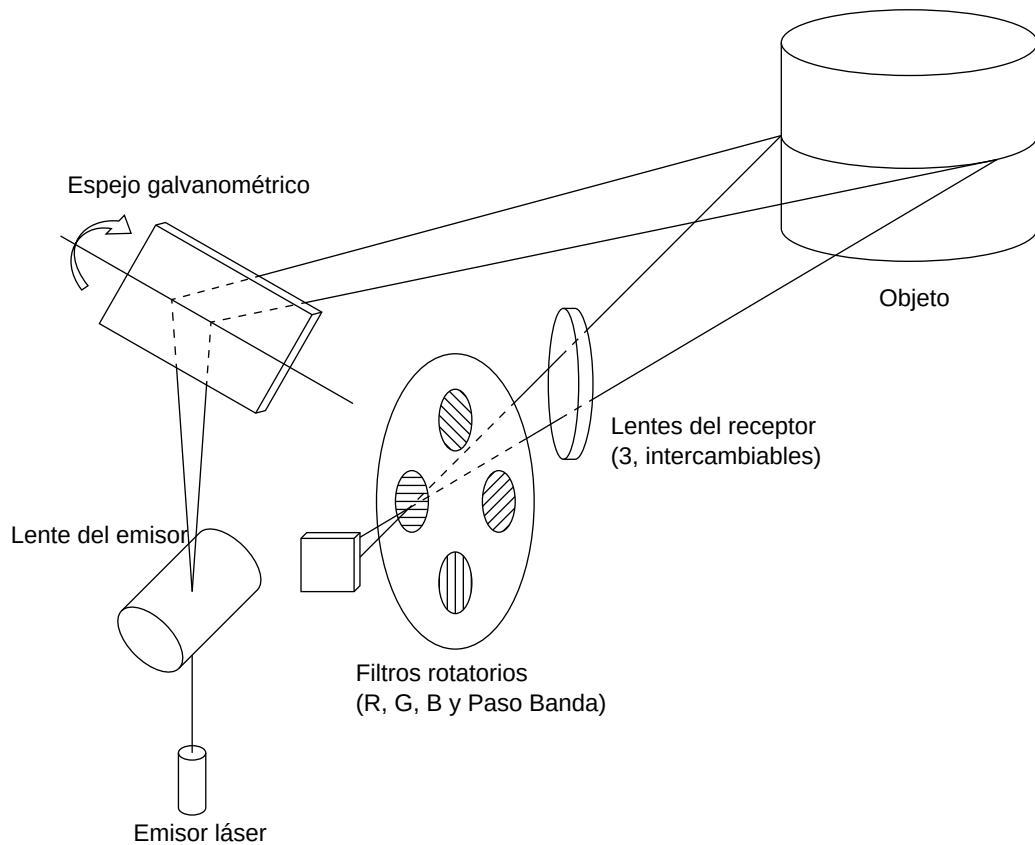


Figura 5: Esquema del láser de triangulación Konica Minolta VI-910 [12]

6.1.1.1.2 Cualidades del objeto

La tecnología láser escáner tiene dificultades con algunos tipos de superficies:

- Objetos transparentes: la señal láser los atraviesa y no devuelven información.
- Objetos especulares: producen reflejos, generando puntos aberrantes.
- Objetos que emiten luz: producen interferencias con la luz láser.
- Objetos de color negro o azul oscuro: absorben la señal láser sin devolver información.

Para objetos que respondan a cualquiera de estos supuestos, la solución más efectiva es cubrir el modelo con una fina película opaca y de un color claro que refleje la luz correctamente, con una sustancia lo más inocua posible. Existen pulverizadores comerciales fabricados con este propósito, a base de talco o pintura gomosa fácilmente retirable. También se emplean otro tipo de soluciones, como puede ser aplicar harina de trigo o maicena, o —en objetos menos delicados— ceras.

La desventaja de estos métodos es que ocultan la textura y colores reales de la pieza, por lo que, para recuperarla será necesario, o bien simularla en la fase de edición, o bien obtener la textura por métodos fotogramétricos y añadirla posteriormente a nuestro modelo procedente del escaneado.

Otra técnica que mejora los resultados en las texturas con los objetos brillantes es la Polarización cruzada (ver apartado 6.1.1.1.6 Iluminación).

6.1.1.1.3 Número de barridos

Para completar el digitalizado, cada pieza ha de escanearse desde distintas posiciones. Debemos planificar la adquisición de datos de tal manera que cada parte del objeto quede registrada en, al menos, uno de estos barridos. Además, es imprescindible que haya puntos comunes entre cada barrido y su contiguo; esto permitirá la posterior reconstrucción del modelo.

Una manera efectiva de asegurarse que se cubra el 100% de la superficie es situar el objeto sobre una superficie giratoria que iremos rotando ligeramente después de cada barrido. Al completar los 360° de giro, será necesario voltear la pieza para completar el escaneado de la parte inferior de la misma, que ha quedado oculta.

En nuestro caso, utilizamos una plataforma circular negra. Sobre ella, cada 30° , situamos marcas adhesivas blancas, numeradas. El hecho de que la plataforma sea negra reduce el número de puntos registrados ajenos al objeto. Por otro lado, las marcas blancas regularmente distribuidas, además de ayudar a realizar giros homogéneos, facilitan la posterior tarea de localizar puntos comunes entre escaneados.

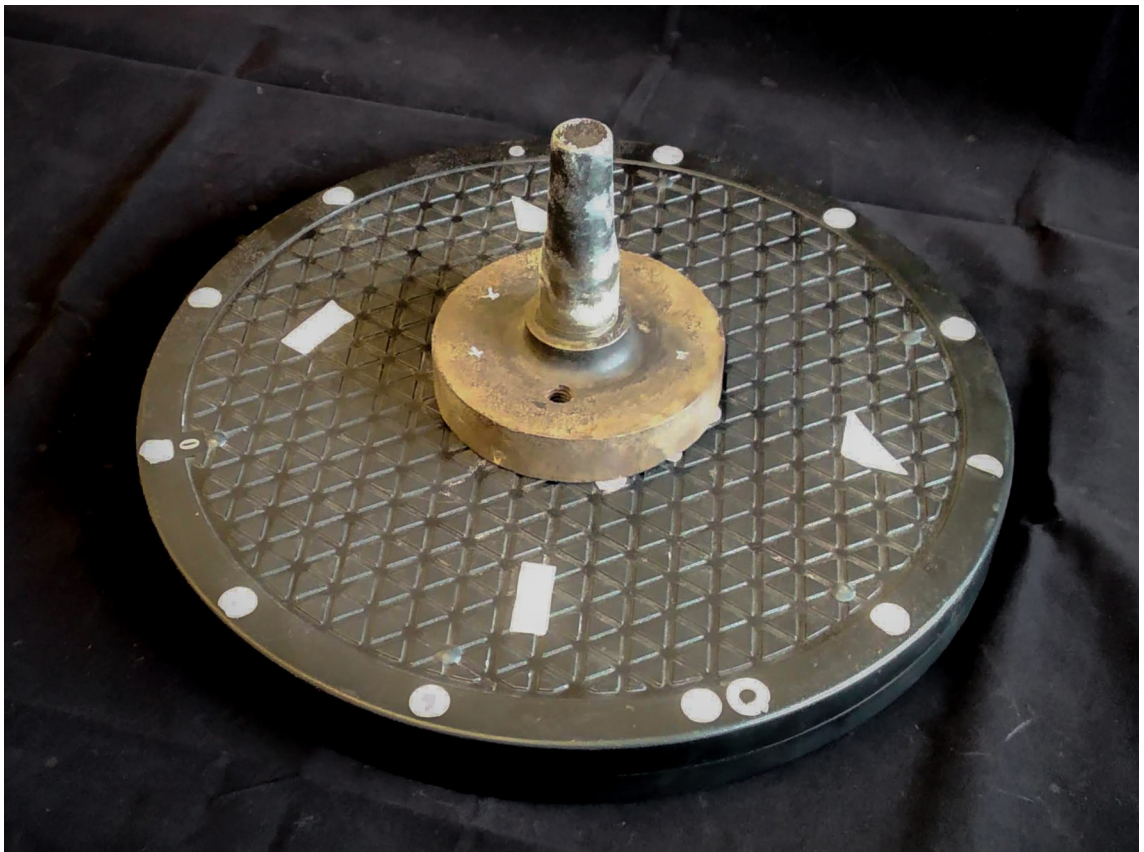


Figura 6: Pieza sobre la plataforma giratoria

6.1.1.1.4 Geometría del objeto

En objetos alargados, es importante tener en cuenta que el escáner ha de estar situado de manera transversal al mismo y el giro del objeto ha de seguir su eje longitudinal. De esta manera, se consiguen dos objetivos:

- No hay partes del objeto fuera de foco.
- La superficie del objeto es lo más perpendicular posible al eje óptico del instrumento

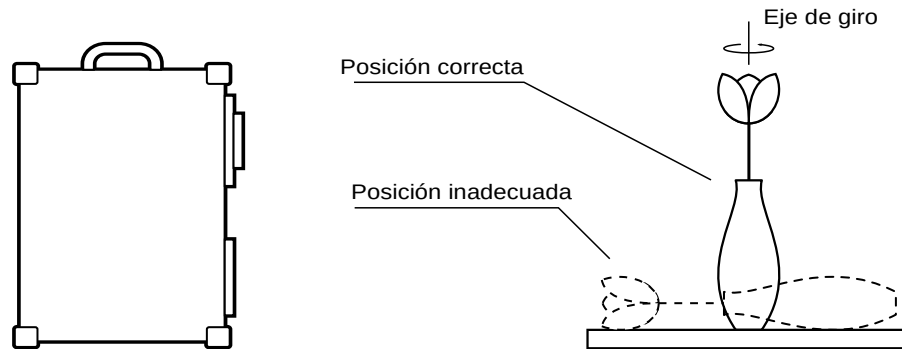


Figura 7: Objetos alargados. Posición más adecuada.

Por otra parte, el sistema de triangulación tiene problemas con objetos con agujeros profundos y estrechos. La única manera de reducir este efecto es alejar el objeto del escáner, sin superar el Rango de distancia de escaneado del instrumento.

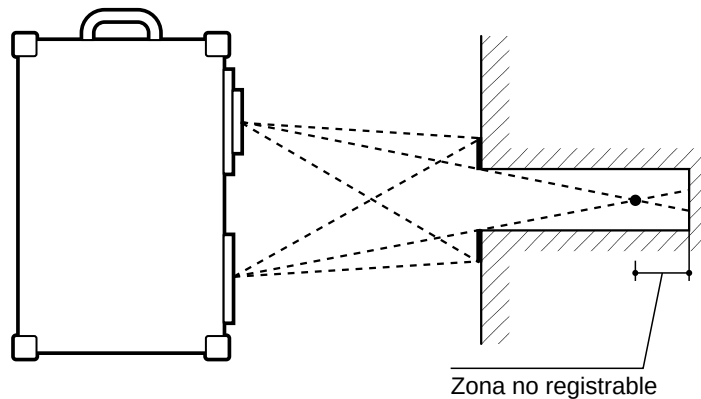


Figura 8: Zonas inaccesibles

Si la pieza consta de varios elementos móviles, es recomendable colocarlos de manera que queden lo más extendidos posible. Si interesa presentarla en otra posición, se podrá hacer posteriormente —de manera virtual— rototrasladando los elementos del modelo digital generado. Así pues, por ejemplo, unas pinzas se escanearán mejor si está abiertas. Si el objeto se puede desmontar en piezas, es una solución óptima para que el barrido acceda a todas las zonas.

6.1.1.1.5 Lente y composición de la escena

Una lente gran angular (*Wide*) permite escanear objetos grandes con menos barridos.

Por otra parte, una lente *Tele*, combinada con una distancia al objeto corta, reducen la profundidad de campo, lo que disminuye la cantidad de puntos no pertenecientes al objeto que quedan registrados.

En el caso del Konica Minolta VI-910, y dado el pequeño tamaño de nuestras piezas, la configuración óptima de escaneado es:

- Objetivo Tele.
- Distancia de escaneado: 0.60 m.

Con estos parámetros, obtenemos tres consecuencias:

- El objeto ocupa más espacio en el rectángulo de encuadre, que —con estos parámetros— tendrá un tamaño de 113.9×85.4 mm. Si el objeto fuese mayor de estas dimensiones, se saldría del encuadre y habría que hacer más barridos.
- Se aprovecha al máximo la resolución del escáner.
- Se reduce al mínimo la profundidad de campo: 40 mm.

Un dato a tener en cuenta en la composición de la escena es que la profundidad de campo se distribuye típicamente $1/3$ por delante de punto de enfoque óptimo y $2/3$, por detrás. En nuestro caso, 13.3 mm por delante y 26.7 mm por detrás. Los puntos fuera de ese rango no quedarán registrados.

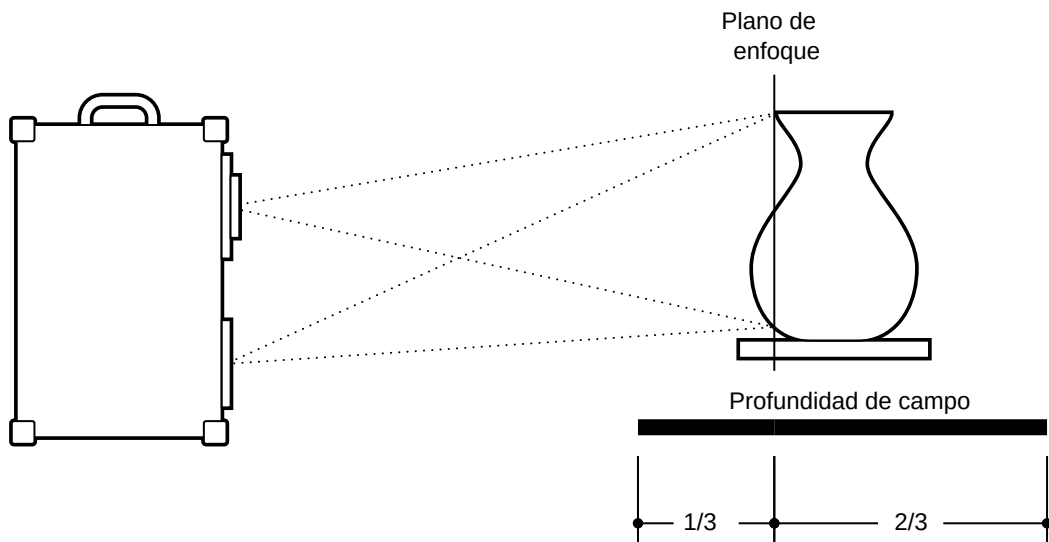


Figura 9: Distribución de la profundidad de campo

El software de escaneado 3D tiende a considerar como objeto la zona más clara de la escena. Conviene, por tanto, que el fondo y la base sobre la que se coloque el objeto sean lo más oscuros y mate posible. Sin embargo, si ese fondo oscuro ocupa la mayoría

de la escena, la textura del objeto puede salir muy quemada porque la cámara del escáner sobreexpone para compensar ese negro. En esos casos, hay que recomponer la escena para que el objeto ocupe la mayor parte del encuadre o aplicar la exposición manual de la que dispone el instrumento.

6.1.1.1.6 Iluminación

A la hora de planificar la iluminación, hay que tener en cuenta que el escáner 3D tiene dos fuentes de información con dos finalidades distintas:

- La medición láser, para la construcción 3D de la nube de puntos.
- La toma fotográfica, para la asignación de color a cada punto de la nube.

Niveles de iluminación

Las especificaciones técnicas del VI-910 exigen un nivel de iluminación ambiental no superior a 500 lx. Por encima de ese valor, aunque la toma fotográfica sea óptima, el retorno de láser no es correctamente detectado.

Por otro lado, durante los trabajos realizados, se ha comprobado que el láser funciona mejor en condiciones de baja iluminación, pero produce una imagen fotográfica pobre, o incluso el instrumento impide la toma.

Por tanto, hay que buscar un equilibrio en la iluminación para que ambas partes de la adquisición de datos produzcan buenos resultados.

Esquemas de iluminación

Para la correcta asignación de color a la nube de puntos, es necesario que el modelo se encuentre iluminado homogéneamente, de manera que todos los puntos del objeto reciban la misma cantidad de luz. De esa manera, el valor RGB que registrará la cámara no dependerá de la iluminación del punto sino de la propia naturaleza del material.

Se evitarán, por ello, las luces duras, que crean contrastes altos entre las zonas más iluminadas y las zonas en sombra. A tal fin, es recomendable emplear difusores junto con el foco o reflectores que suavicen las sombras.

Con caja de luz

Una solución óptima es la utilización de una caja de luz: estructuras difusoras empleadas principalmente en fotografía de producto que, en combinación con un mínimo de dos fuentes de luz de iguales características, aseguran una iluminación suave y homogénea del sujeto, aislándolo además de fondos no deseados o confusos.

En nuestro caso, fue útil en piezas pequeñas, pero no así en las más grandes, que requerirían una caja de luz de mayores dimensiones.

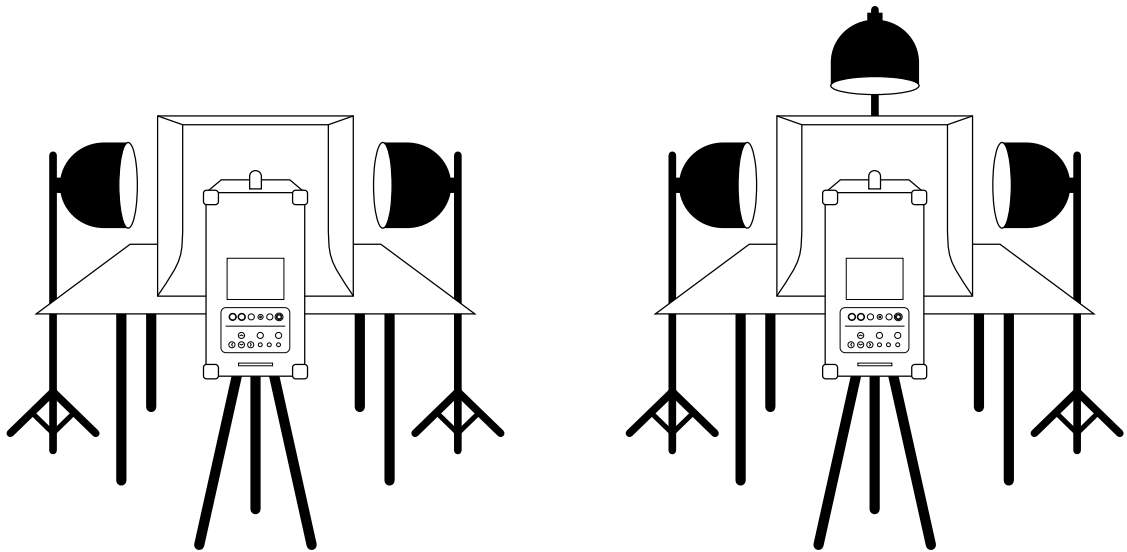


Figura 10: Esquemas de iluminación de caja de luz: con dos o tres luces

Si el fondo de la caja de luz es blanco, la iluminación del objeto es más uniforme; en contrapartida, aparecerá en el escaneo y esos puntos habrá que limpiarlos en la fase de edición. Con un fondo negro, se reducirá el número de puntos externos, pero también se empobrecerá la iluminación.

Sin caja de luz

Es recomendable emplear difusores o reflectores para suavizar las sombras. Puede aprovecharse una pared blanca a modo de reflector, aplicando también un esquema de iluminación de, al menos, dos luces.

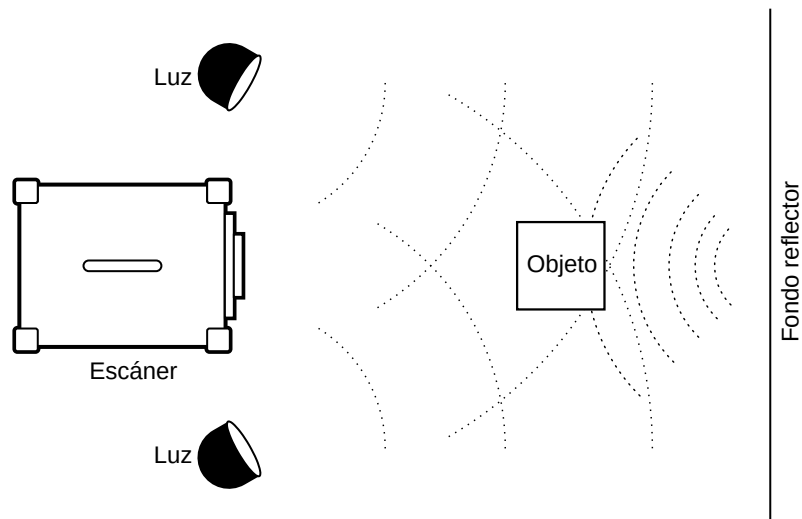


Figura 11: Esquema de iluminación con dos luces sin caja de luz. Vista en planta

Sin iluminación homogénea

En ocasiones, no es posible conseguir una iluminación homogénea, bien porque el contexto de toma de datos no permite implementar un esquema de luces adecuado o

bien porque no se cuenta con los medios necesarios. En consecuencia, va a haber zonas del objeto en las que el color registrado va a estar afectado por ese déficit de luz.

En esos casos, es recomendable mantener estático el objeto y que sea el escáner el que se mueva en torno a él, de manera que las áreas de luz/sombra sean siempre las mismas. De lo contrario, el software tendrá problemas al reconstruir la textura, pues cada punto del objeto tendrá diferentes colores en función de la toma que se use.

En nuestro caso, optamos por situar el objeto cerca de un fondo blanco, fuera de la profundidad de campo pero lo suficientemente cerca para reflejar la mayor cantidad de luz posible.

Temperatura de color

El color reflejado por objeto varía ligeramente según la temperatura de color de la fuente de luz.

Así, si la escena está iluminada con una fuente de luz de alta *temperatura de color*, habrá una predominancia del color azul. Por el contrario, si la luz es de baja temperatura de color, predominará el rojo.

Para que el color registrado sea preciso, es conveniente ajustar el balance de blancos en función de la luz que se empleará en el escaneado.

	Predominancia del rojo ▲
Luz de una vela.....	1900K
Amanecer-anocheecer.....	2400K
Bombillas de tungsteno.....	2800K
Lámparas fotográficas sobrevoltadas 500W.....	3200K
Lámparas de cuarzo.....	3400K
Luz de mediodía (en un día despejado).....	5500K
Flash electrónico.....	5000-6000K
Luz de día nublado.....	7000K
	Predominancia del azul ▼

El escáner Konica Minolta VI-910 viene ajustado por defecto para escanear con una iluminación fluorescente. En caso de que nuestra iluminación sea distinta, permite, mediante un accesorio a modo de filtro, ajustar el balance de blancos al que realizará la toma, de manera que el color de la textura resultante sea lo más natural y fiel a la realidad posible. Los pasos son los siguientes:

- 1 Reproducir las condiciones de iluminación que emplearemos en el escaneado.
- 2 Colocar la lente translúcida de la que dispone el instrumento (sustituyendo la *Tele*, *Middle* o *Wide*).
- 3 Dentro del menú del VI-910, accedemos a **CAMERA SETTINGS** y seleccionamos la opción **W/B**.
- 4 Escogemos la opción **CALIBRATE**.

Tras mostrar el mensaje **CALIBRATING**, el balance de blancos estará ajustado.

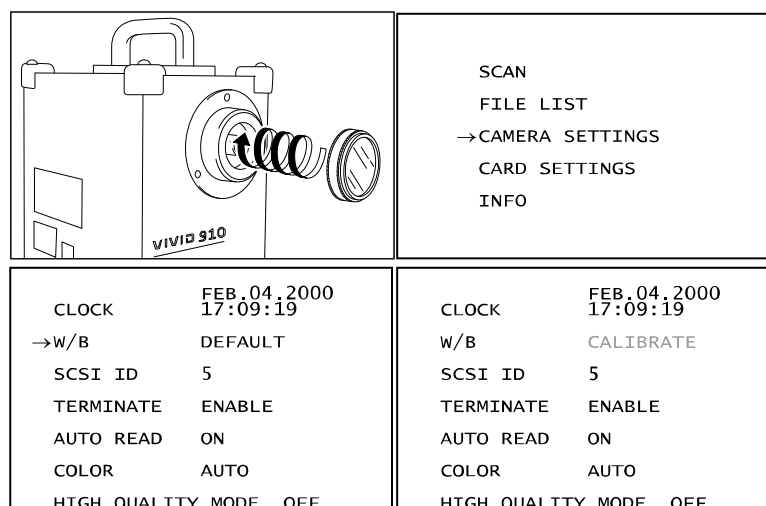


Figura 12: Ajuste de balance de blancos [12].

Polarización cruzada

Los objetos que producen reflejos suponen un reto tanto para el escáner 3D como para la cámara que capta los colores del objeto. Para aminorar esos efectos sobre la calidad de las texturas, se puede aplicar la técnica de *polarización cruzada* [4]: se emplean filtros polarizadores tanto en las luces como en la lente de la cámara, siguiendo el esquema de la Figura 13.

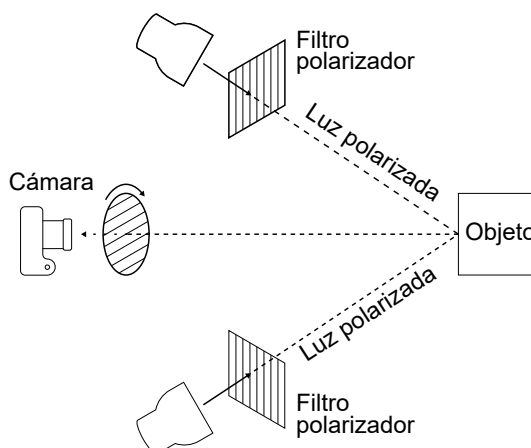


Figura 13: Esquema de polarización cruzada

La orientación de los filtros polarizadores de las luces ha de ser la misma¹. Finalmente, se gira el filtro polarizador de la cámara hasta que se reduzcan al mínimo los reflejos del objeto.

La polarización cruzada reduce la cantidad de luz que incide en el sensor. Ésta técnica no es una solución plena, pero mejora considerablemente los resultados en las texturas.

6.1.1.1.7 Equipo de adquisición

El Konica Minolta VI-910 puede manejarse de dos maneras:

¹ Esto se consigue colocando ambos filtros, uno sobre otro, y con una fuente de luz detrás; se gira uno de ellos hasta que deje pasar la mayor cantidad de luz posible.

- a) A través de un ordenador conectado al puerto SCSI, con software controlador al efecto.
- b) A través de su interfaz incorporada y tarjeta Compact Flash.

Se hicieron unas primeras pruebas usando el puerto SCSI y la aplicación de Konica Minolta, Polygon Editing Tool (PET), que acompaña al VI-910. Posteriormente, con RapidForm 2006, software programado por INUS Technology que presenta varias mejoras frente al Polygon Editing Tool:

- A la misma resolución, los tiempos de escaneo son sensiblemente más cortos.
- Gestiona más ágilmente las nubes de puntos generadas.
- Incorpora herramientas avanzadas para el post-proceso.

Sin embargo, debido a que Konica Minolta ha abandonado la producción, soporte y mantenimiento del VI-910, ambas herramientas exigen una máquina con sistema antiguo.

- Sistema operativo Windows XP 32 bits.
- Drivers de lectura a través de puerto SCSI.

Por ello, y para poder utilizar una máquina actual con software reciente, se optó por utilizar la interfaz incorporada en el escáner, almacenando las observaciones en una tarjeta Compact Flash.

Es de reseñar que este escáner sólo funciona con tarjetas Compact Flash de una capacidad máxima de 64 megabytes formateada en el sistema de archivos FAT32 desde un ordenador con Windows XP o anterior.

6.1.1.1.8 Equipo de procesado

Para esta fase se pudo optar un software reciente como Geomagic Design X, versión 2019.0.2, sobre una máquina con Windows 10 de 64 bits y las siguientes características de hardware:

- Procesador Intel® Core™ i7-6700T CPU @ 2.80GHz
- RAM instalada: 32.0 GB
- GPU: NVIDIA GeForce GTX 1050 2GB

6.1.1.2 Escaneado

Esta es propiamente la fase de adquisición de datos. En ella se aplican todas las consideraciones que se han observado en la fase de planificación.

Tras componer la iluminación, se sitúan las piezas sobre la mesa giratoria. Es importante asegurarse de que la pieza se mantendrá cerca del centro del campo de acción de escáner en todas las posiciones de la plataforma giratoria. Si no es así, habrá

que recomponer la escena, moviendo el objeto o el escáner, alejándolos o reorientándolos.

Al pulsar el botón **SCAN**, si el escáner está configurado en *autofocus*, éste enfoca automáticamente el objeto y realiza un barrido láser. Si el objeto queda correctamente enfocado, nos mostrará el indicador **IN FOCUS**.

El escáner tiene dos modos de escaneo:

- **FAST**: es el modo rápido, pero más impreciso. Tarda 0.5 segundos por barrido.
- **FINE**: es el modo a máxima resolución y exactitud, y tarda 2.5 segundos en realizar cada barrido. Es el empleado en el presente trabajo.

El modo de escaneo no afecta a la resolución fotográfica con la que toma la textura, que siempre es de 640×480 píxeles.

Tras cada escaneo, el resultado obtenido aparecerá en pantalla. Podemos comprobar si ha conseguido registrar los puntos deseados y si la captura fotográfica está correctamente expuesta. Si el resultado no es satisfactorio, pueden intentarse diversas soluciones:

- Corregir la distancia de enfoque: en objetos con poco contraste, el modo *autofocus* puede presentar dificultades. Se pueden solucionar de dos diferentes maneras:
 - Medir la distancia entre el objeto y la lente del escáner e introducirla en el menú de enfoque manual.
 - En modo *autofocus*, situar otro objeto con mayor contraste a la misma distancia de enfoque deseada, forzar el escáner a enfocar y bloquear el enfoque pasando a modo de enfoque manual.
- Ajustar el balance de blancos².
- Ajustar manualmente la potencia del láser: puede ayudar en los tipos de objeto que se mencionan en el capítulo [6.1.1.1.2 Cualidades del objeto](#).
- Ajustar la ganancia del sensor CCD: otra opción para este mismo tipo de objetos, en caso de que el ajuste de potencia del láser no sea suficiente.

Hay que tener en cuenta que una potencia del láser o una ganancia del sensor CCD muy alta hace que el escáner recoja información de puntos no deseados, y que este procedimiento no sirve para reducir los puntos aberrantes que se producen en los objetos brillantes.

En ocasiones, las condiciones de iluminación más adecuadas para el escaneo no favorecen la toma de la textura. Esta circunstancia puede darse en objetos con un

² Se habla de este asunto en el capítulo [Temperatura de color](#)

contraste de color muy alto. En esos casos, el escáner permite separar el proceso de escaneado del de la toma fotográfica, desactivando la función **AUTO READ**, de manera que el proceso para cada posición del objeto sería el siguiente:

- 1 Se configura la iluminación más adecuada para el escaneado láser.
- 2 Se realiza el escaneado láser, pulsando el botón **RELEASE**.
- 3 Se cambia la iluminación para favorecer ella toma fotográfica.
- 4 Se vuelve a pulsar el botón **RELEASE** para que realice la toma fotográfica.

También para piezas con alto contraste, el escáner incorpora una función de expansión de rango dinámico, en la que el aparato toma tres barridos a diferentes intensidades (alta, media y baja) y compone los datos obtenidos en un solo archivo, eliminando los puntos recibidos con menos señal.

Otro de los valores que permite ajustar manualmente el escáner es el nivel de exposición de la toma fotográfica, lo que sería el equivalente al ISO de una cámara. Por defecto, lo calcula automáticamente.

Una vez efectuado cada barrido, se gira la plataforma un ángulo de 30°, de manera que cada punto del objeto aparezca al menos en una de las tomas. Con ese valor de giro, es habitual que cada punto aparezca en cuatro o más barridos.

Tras completar el escaneado de los 360° del objeto, se da la vuelta al objeto, situando la parte superior del mismo sobre la plataforma giratoria para, posteriormente, repetir el proceso.

Cada escaneado genera un fichero CDM con un tamaño de 3.51 MB. Con el sistema que empleamos de almacenaje en tarjetas *Compact Flash* de 64 MB, supone que en cada tarjeta podremos almacenar un máximo de 18 escaneados. Por otra parte, realizando giros de 30°, cada pieza requiere del orden de $\frac{360}{30} \cdot 2 = 24$ escaneados.

6.1.2 Fase de procesado

En la fase de procesado se tratan los datos obtenidos en la fase de adquisición. Está compuesta de varias subfases:

- 1 Importación
- 2 Filtrado
- 3 Alineación
- 4 Fusionado
- 5 Modelado

6.1.2.1 Importación

Los ficheros que contienen cada escaneado están en formato CDM. Es un formato propietario de Konica Minolta, lo que restringe las opciones de programas que puedan

tratarlos. Geomagic Design X sí soporta el formato con todas sus propiedades [5]. Para ello, en el menú de importación, hay que indicarle expresamente que el fichero CDM tiene una textura asociada, activando la casilla **Usar configuración personalizada** y señalando **Incluir textura: Tal cual**. Finalmente, pulsamos **Sólo importar** y dejamos el siguiente diálogo por defecto.

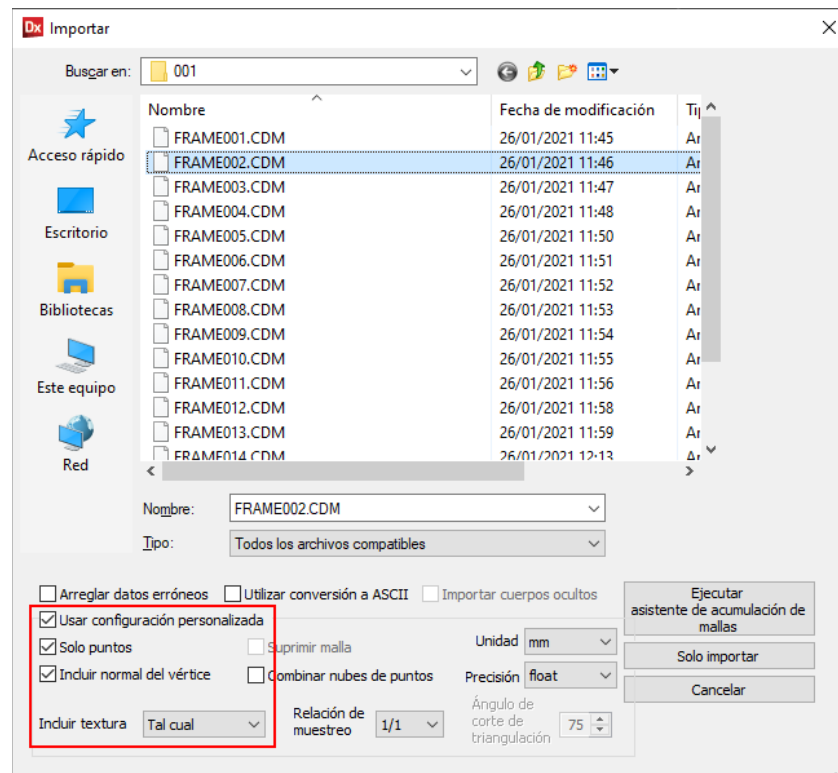


Figura 14: Importación de archivos CDM con textura fotográfica asociada

6.1.2.2 Limpieza

En esta fase se elimina toda la información no deseada adquirida por el escáner, bien sea ruido o puntos de la escena que no pertenecen al objeto.

Para este menester, los programas de tratamiento de nubes de puntos disponen de diversos filtros automáticos. Sin embargo, es conveniente, antes de nada, hacer una limpieza manual, seleccionando los puntos más externos y eliminándolos.

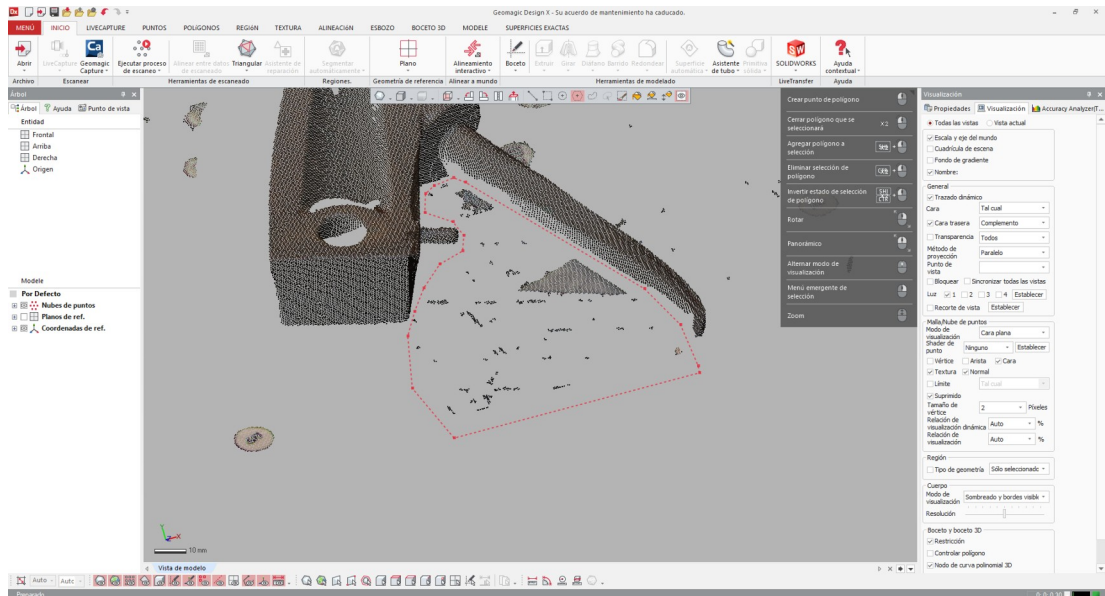


Figura 15: Limpieza manual por selección poligonal

6.1.2.2.1 Herramientas de limpieza automática

Geomagic Design X incorpora las siguientes herramientas al efecto:

Puntos > Filtrar Ruido

Limpia los grupos de puntos ruidosos de las nubes de puntos y elimina grupos de puntos aislados, no conectados con el objeto. Podemos definir el número mínimo de puntos que queremos mantener.

La herramienta permite además definir regiones de interés, seleccionando mediante un prisma o un cilindro. Esta opción sustituye en cierta medida la limpieza manual del paso anterior.

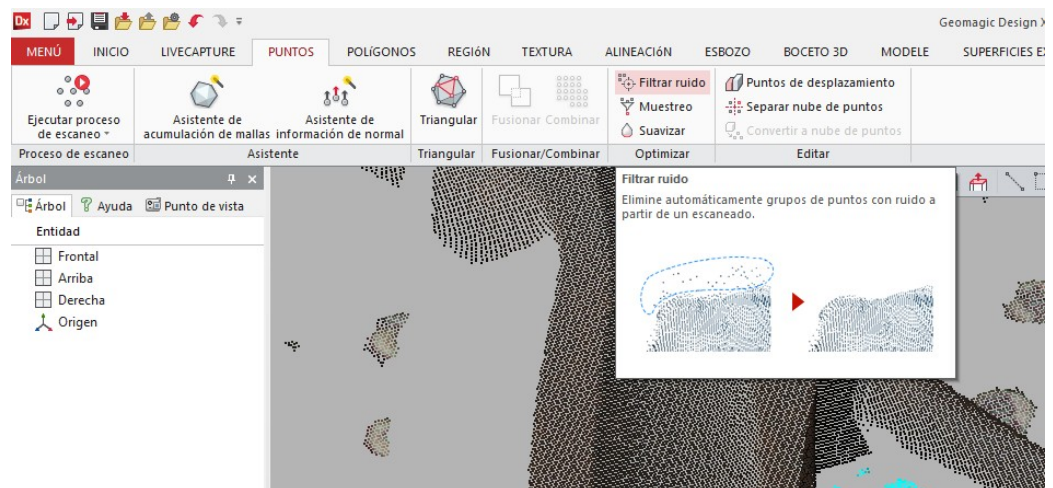


Figura 16: Filtrar ruido

Puntos > Muestreo

Reduce el número de puntos en todo el objeto. Se pueden filtrar los puntos con varios criterios:

- Reducir un porcentaje de los puntos, de manera uniforme en todo el objeto.
- En función de la curvatura de cada zona de la pieza.
- Fijando una distancia mínima entre los puntos.

Puntos > Suavizar

También llamado *Uniformar*. Esta opción reduce la rugosidad de la nube de puntos. Se puede seleccionar la fuerza del suavizado, el nivel de suavizado obtenido y el rango permitido de separación entre puntos.

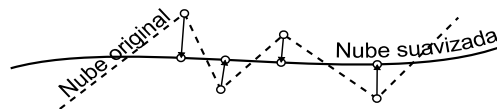


Figura 17: Suavizado de nube de puntos

6.1.2.3 Alineación

En esta fase se sitúa cada nube de puntos en relación a las nubes adyacentes; el efecto es similar al de la orientación relativa en Fotogrametría.

Con la herramienta **Alineación > Alinear entre datos de escaneado** podemos orientar cada nube respecto al resto de nubes individuales, de manera que, finalmente, se encuentren todas en el mismo sistema de coordenadas.

Con el método **Local en base a suposición automática**, el software se ocupa de localizar automáticamente puntos comunes entre escaneados. En ocasiones, tiene dificultades para encontrarlos, por lo que habremos de usar el método **Local en función de punto seleccionado**. Seleccionaremos como **Referencias** el escaneado o escaneados que se mantendrán fijos, y como **En movimiento**, el o los escaneados que queremos ajustar. Después, identificaremos manualmente puntos comunes en ambas nubes. Se necesita un mínimo de tres puntos comunes. La selección de los puntos no requiere demasiada precisión por parte del operador, ya que el software hará posteriormente un ajuste fino si marcamos la casilla **Refinar alineamiento**. Pueden identificarse puntos del objeto, pero también de la plataforma giratoria: las marcas colocadas sobre ella son muy útiles al efecto.

Antes de aceptar el alineamiento, en la ventana **Propiedades**, podemos observar (y exportar en formato plano **.trm**, si es de nuestro interés) la matriz de roto-traslación que se aplicará.

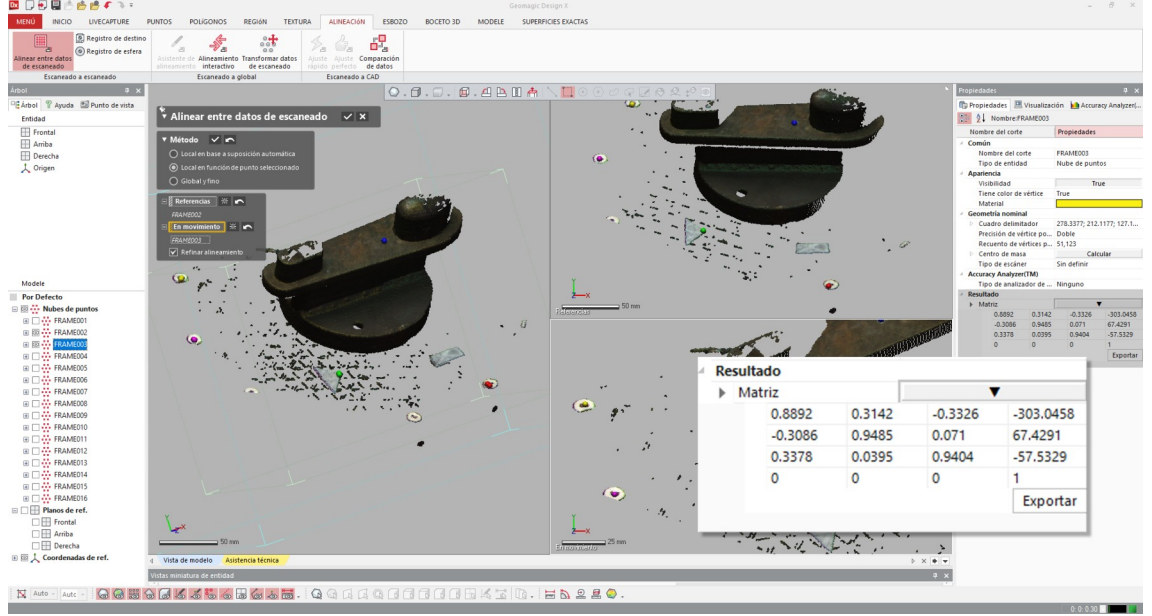


Figura 18: Alineación de nubes de puntos

En el ejemplo de las figuras 18 y 19, podemos ver en que los elementos t_{14} , t_{24} y t_{34} corresponden a la traslación entre orígenes de ambos sistemas (origen y destino de la nube), mientras que los elementos encuadrados entre r_{11} y r_{33} corresponden a los giros:

$$\begin{array}{c}
 R \qquad \qquad \qquad T \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{14} \\
 r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{24} \\
 r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{34} \\
 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figura 19: Estructura general de la matriz de roto-traslación

Aunque no hay una indicación explícita en la documentación de Geomagic Design sobre la parametrización y el convenio de signos empleado para la rotación espacial R , el siguiente desarrollo es compatible con los resultados numéricos obtenidos con el software, donde ω , φ , κ son los giros sobre los ejes X, Y y Z, respectivamente.

$$R = R_Z \cdot R_Y \cdot R_X$$

$$R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_Y = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$R_Z = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & -\cos \omega \sin \psi + \sin \omega \sin \varphi \cos \psi & \sin \omega \sin \psi + \cos \omega \sin \varphi \cos \psi \\ \cos \varphi \sin \psi & \cos \omega \cos \psi + \sin \omega \sin \varphi \sin \psi & -\sin \omega \cos \psi + \cos \omega \sin \varphi \sin \psi \\ -\sin \varphi & \sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Y la parte de la traslación está formada por los desplazamientos sobre cada eje:

$$T = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix}$$

En un solo producto matricial, se pueden aplicar transformaciones sobre multitud de puntos, lo que facilita el manejo de nubes pesadas. Por ello, esta matriz es ampliamente empleada en software 3D.

El programa permite posteriormente hacer un ajuste más preciso mediante la opción **Global y fino**, en la que podemos seleccionar el número de iteraciones que deseamos que aplique, qué cantidad de puntos de cada nube queremos que emplee, la desviación máxima permitida y otras opciones. Es muy conveniente aplicarlo sobre el conjunto de nubes cuando ya hayamos hecho una primera alineación por los métodos anteriores. Podemos, en ese caso, indicarle al software **Aplicar solo transformación pequeña**, con lo que se agilizará el proceso y se evitará que obtenga falsos positivos, algo que puede darse en objetos con patrones repetidos.

En esta opción, para cada nube, el software nos muestra un histograma que indica la desviación promedio de los puntos y nos da idea de cómo de preciso ha sido el ajuste en función de la anchura de la gráfica: a más estrecha la gráfica, más habitual es que el punto esté cerca de la posición teórica.

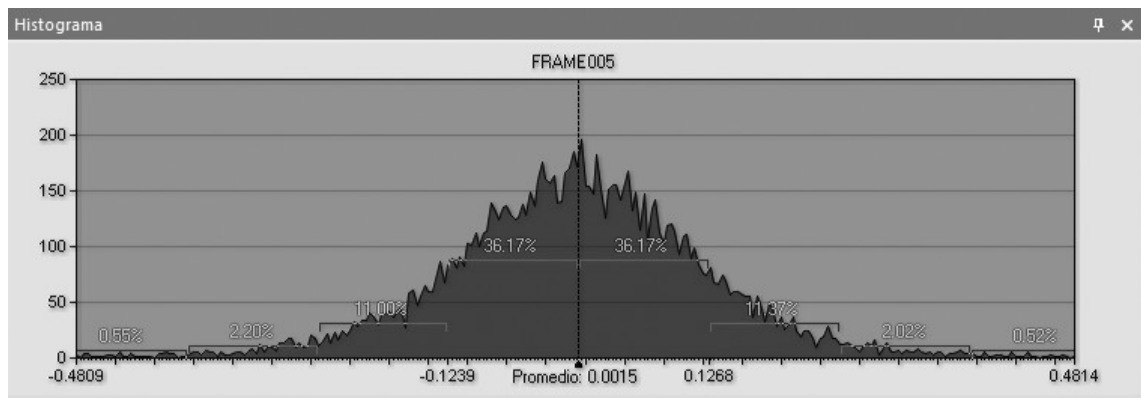


Figura 20: Ejemplo de histograma de ajuste de puntos

También podemos consultar el detalle del ajuste en el panel Consola.

```

Console

Global Register Result : Nube2
=====

Statistics
Min. : -0.4995 mm
Máx. : 0.5 mm
Promedio : 0.0056 mm
RMS : 0.132 mm
Desviación estándar : 0.1318 mm
Variación : 0.0174 mm
Promedio + : 0.1046 mm
Promedio - : -0.0997 mm

6 Sigma
(Sigma / No. Of Poly-Vertices / %)
-6σ / 0 / 0 %
-5σ / 0 / 0 %
-4σ / 584 / 0.3072 %
-3σ / 4218 / 2.2184 %
-2σ / 22720 / 11.9495 %
-1σ / 68192 / 35.8652 %
1σ / 66746 / 35.1047 %
2σ / 22599 / 11.8858 %
3σ / 4242 / 2.2311 %
4σ / 833 / 0.4381 %
5σ / 0 / 0 %
6σ / 0 / 0 %

```

Figura 21: Ejemplo de resultados numéricos de alineado

Una vez alineados todos los escaneados de la pieza en una de las posiciones, y antes de alinear los escaneados del objeto en la posición inversa sobre la plataforma giratoria, eliminaremos todos los puntos ajenos al objeto.

6.1.2.4 Fusionado

Tras el alineado de todas las partes, se fusionan las nubes en una sola. Geomagic Design X permite eliminar puntos de las regiones solapadas de las diferentes nubes, aunque el filtrado que hace puede ser demasiado agresivo. Para tener más control, es conveniente mantener todos los puntos y aplicar un filtrado y suavizado personalizado posteriormente: filtrado de ruido

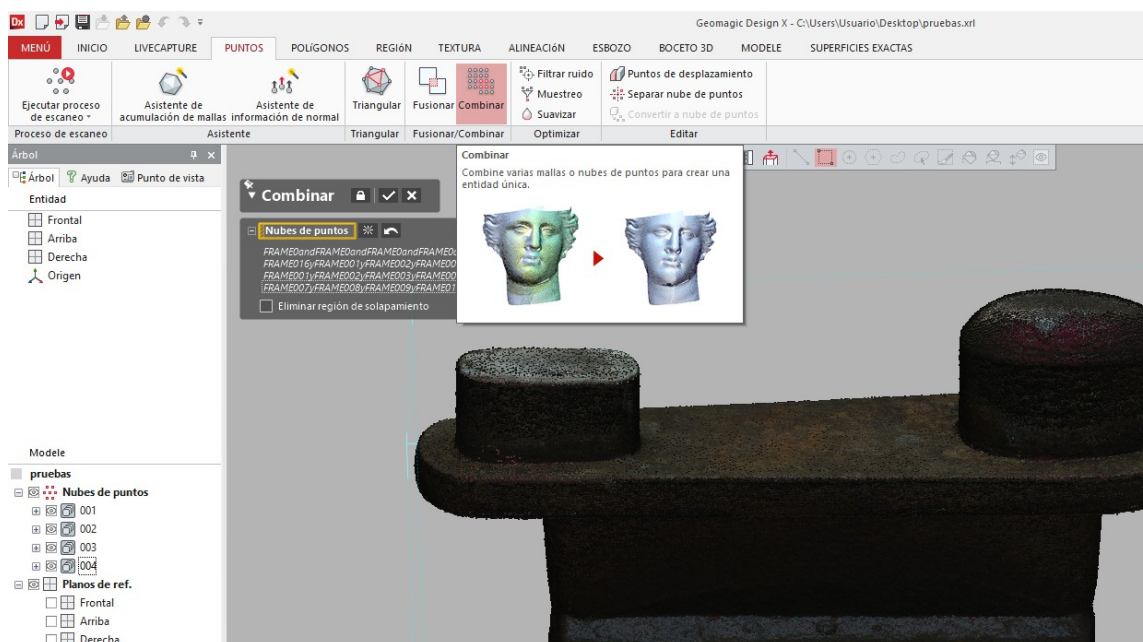


Figura 22: Fusionado de nubes de puntos

6.1.2.5 Modelado

Si bien este paso podría haberse realizado con cada escaneado, para posteriormente alinear los modelos individuales, es conveniente hacerlo en este punto del proceso, con toda la nube de puntos alineada y fusionada, porque de esta manera se obtiene una textura fotográfica final más uniforme.

Las nubes de puntos producidas por los escáneres láser o por fotogrametría se pueden usar directamente en otras herramientas de visualización o medición y tienen la ventajas de eficiencia en ficheros grandes. Sin embargo, tienen carencias en la representación fotorrealista, no contienen toda la información física de los objetos y permiten poco margen de edición.

Con el paso de nube de puntos a modelo, el software crea polícaras que conectan los puntos de la nube y construye con ellas una malla triangular.

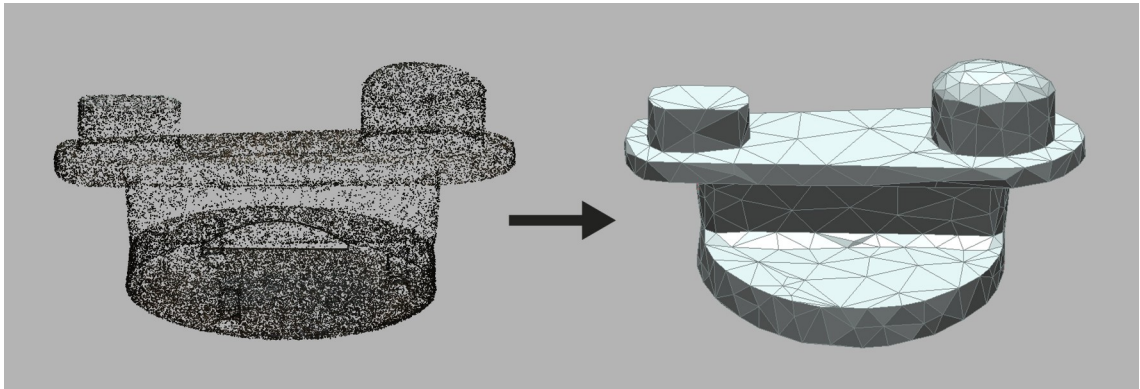


Figura 23: Paso de nube de puntos a modelo 3D

6.1.2.5.1 Terminología

Los modelos o mallas están formados por:

- Polícaras: triángulos definidos por tres aristas.
- Aristas: conectan dos vértices.
- Vértices: cada uno de los puntos de la nube de puntos, que representan una posición 3D y suelen tener asociado un color RGB.
- Bordes: aristas que sólo limitan una polícara.

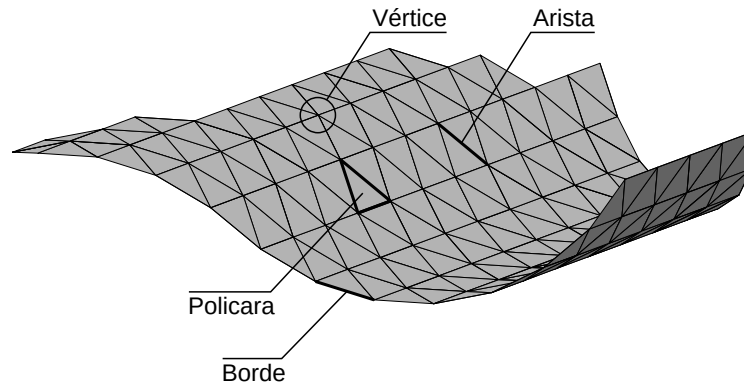


Figura 24: Elementos de una malla

6.1.2.5.2 Características de una malla óptima

Una malla representa una superficie mediante la conexión de policaras contiguas. Sin embargo, al generar la malla a partir de la nube de puntos, pueden producirse errores topológicos en esas conexiones: agujeros, triángulos que se cruzan, estructuras similares a la banda de Möbius o a la botella de Klein, u otros *artefactos* [6].

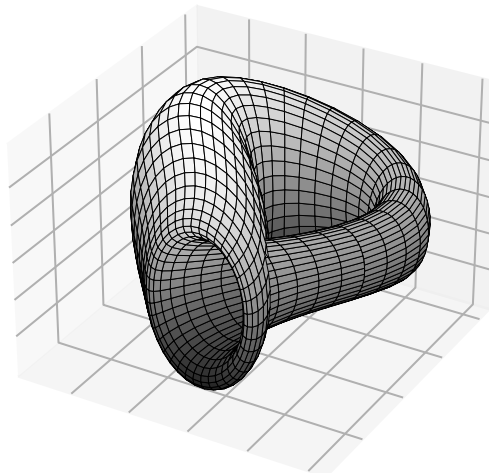
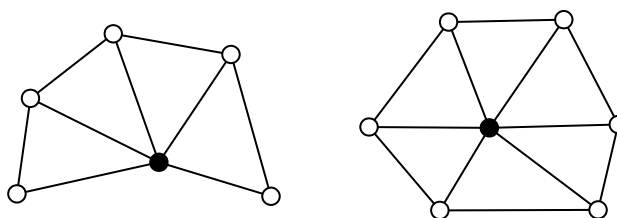


Figura 25: Botella de Klein

Sin triángulos non-manifold (no-múltiples)



Abanico abierto

Abanico cerrado

Figura 26: Policaras en abanico: triángulos manifold

Para que no existan triángulos non-manifold, han de cumplirse las siguientes condiciones:

- Cada arista de la malla está contenido en una o dos polícaras.
- Todas las polícaras que confluyen en un vértice forman un abanico (abierto o cerrado).

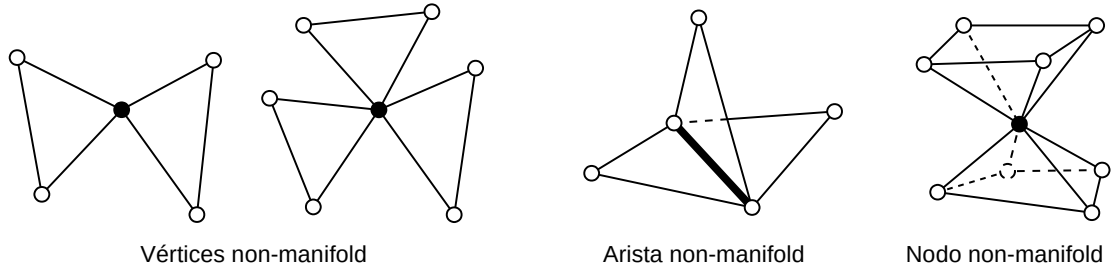


Figura 27: Ejemplos de polícaras non-manifold

Sin triángulos redundantes

Cada vértice debe pertenecer al mismo número de polícaras y de aristas (exceptuando los vértices situados en los bordes de la malla).

Sin triángulos cruzados

En caso de que existan triángulos cruzados, conviene eliminar el que tenga su menor ángulo más agudo; este criterio suele asegurar una triangulación más cercana a la forma original del objeto[6].

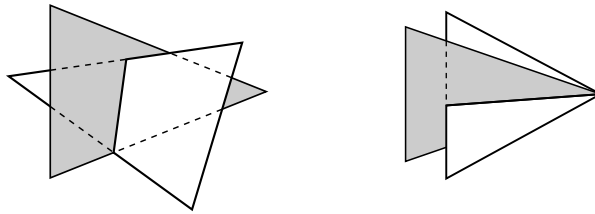


Figura 28: Polícaras cruzadas

Sin triángulos invertidos

Son polícaras cuya normal es opuesta a los triángulos vecinos. La normal es el vector perpendicular a cada polícara que indica desde qué lado de la superficie se ha hecho el escaneado.

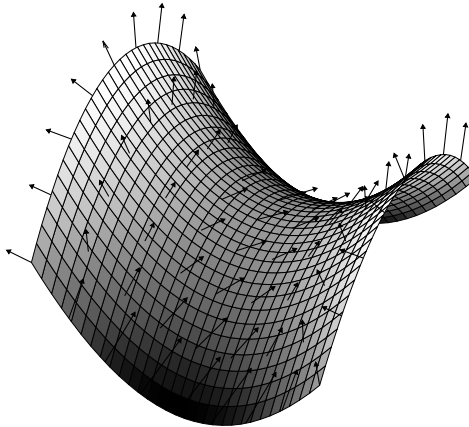


Figura 29: Normales a una superficie

Sin bloques de triángulos aislados

En ocasiones, si la limpieza de la nube de puntos no fue completa, pueden generarse pequeños bloques de polícaras, aisladas del modelo principal, que hay que conectar o eliminar.

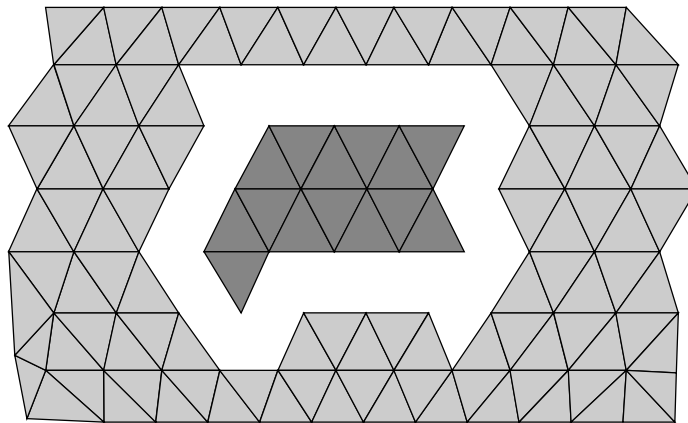


Figura 30: Bloque o clúster de triángulos aislados

6.1.2.5.3 Métodos de modelado

Para convertir la nube en malla, el software, a través de su menú **Herramientas de escaneado > Fusionar**, emplea diferentes estrategias, entre las cuales debemos elegir:

Triangulación 2D: proyecta la nube de puntos sobre un plano o una esfera virtual, genera la triangulación y la recoloca en su posición original.

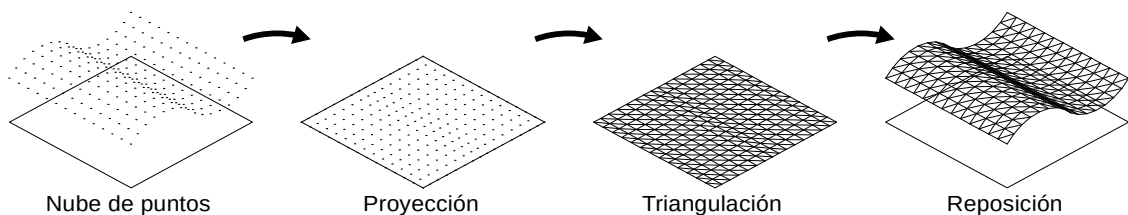


Figura 31: Fases de la triangulación 2D sobre plano virtual

- La triangulación 2D sobre plano virtual se puede utilizar en el caso de que el escaneo se haya hecho desde una sola posición y en una sola dirección. No suele ser el caso cuando modelamos objetos 3D completos.
- La triangulación 2D sobre esfera virtual es similar a la anterior, pero la superficie de proyección es una esfera, que para un correcto funcionamiento del método, ha de estar centrada en el punto de ubicación del escáner. Tiene utilidad, por ejemplo, en escáneres de tiempo de vuelo, que producen barridos en 360° en torno al instrumento.

Triangulación 3D: genera la malla conectando puntos de la nube de puntos en el espacio 3D. Empieza uniendo los vértices más cercanos y va propagando la triangulación hacia los puntos adyacentes. El método es útil para nubes de puntos generadas desde diferentes direcciones, como es el caso de este trabajo.

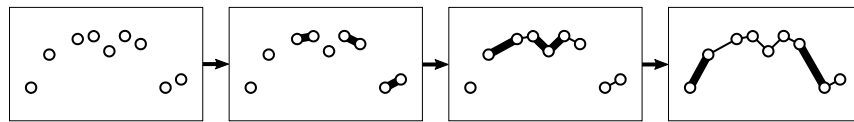


Figura 32: Esquema de fases de triangulación 3D

Sin embargo, en las pruebas realizadas, muestra dificultades para resolver el sentido de las normales. Esto genera resultados problemáticos que incrementan trabajo de edición posterior.

Construcción de malla: genera la malla con una topología optimizada, siguiendo la geometría de la nube de puntos y procurando generar aristas de longitud uniforme. Permite aplicar, en la misma operación, un factor de simplificación para reducir el número de puntos empleados. Como el método anterior, es válido para nubes generadas a partir de escaneados independientes y desde diferentes orientaciones.

Construcción de malla HD: crea una estructura de malla de *vóxeles* a partir de la nube de puntos, para posteriormente generar la malla de triángulos.

La palabra *vóxel* proviene de la expresión *volumetric element*, y da nombre al elemento volumétrico mínimo que forma un objeto 3D. Al igual que los píxeles en una imagen 2D, los vóxeles no se almacenan por sus coordenadas (x, y, z), sino por índices en una matriz, lo cuál tiene ventajas de eficiencia en su gestión, al tratarse de números enteros[7].

En las pruebas realizadas durante la fase de planificación, este método obtuvo los mejores resultados tanto nivel de detalle como en integridad de las mallas, y produjo también unas texturas fotográficas muy superiores. Por ello, fue el adoptado para este trabajo.

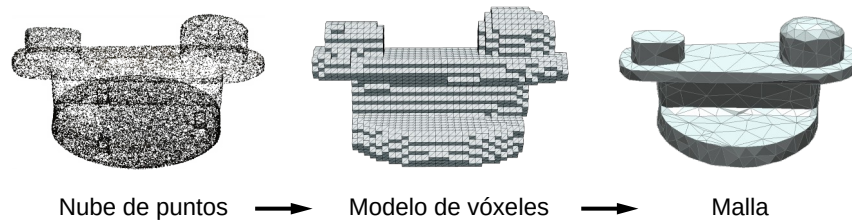


Figura 33: Voxelizado y posterior mallado

6.1.2.6 Revisión de integridad

Al final de la Fase de procesado, tras el Modelado, se revisa la totalidad de la pieza para tener la certeza de que no existen agujeros no deseados en la superficie del objeto.

En caso de localizar alguna zona no cubierta por el mallado, revisaremos las nubes de puntos para asegurarnos de que el objeto está completamente cubierto. Si no fuera así, habrá que escanear esas zonas faltantes, asegurándonos de repetir las condiciones de toma iniciales. En ese sentido, haber empleado iluminación artificial y tener bien documentado el esquema de iluminación nos facilita la tarea.

Si toda la pieza está cubierta por los barridos, habremos de repetir la fase de procesado, poniendo especial atención a la fase de filtrado, en la que emplearemos uno menos agresivo que mantenga una mayor cantidad de puntos en la zona problemática.

Si el agujero o agujeros no son excesivamente grandes, se podrán solucionar en la Fase de postprocesado.

6.1.3 Fase de postprocesado

6.1.3.1 Optimización

En esta fase repararemos los problemas³ que pueda presentar la malla:

- Triángulos *non-manifold*.
- Triángulos redundantes.
- Triángulos cruzados.
- Triángulos invertidos.
- Bloques de triángulos aislados.
- Pequeños túneles no deseados.

Además, procuraremos que la malla resultante sea homogénea, tratando también de que los triángulos sean lo más cercano a equiláteros posible.

³ Estos problemas fueron descritos con detalle en el apartado 6.1.2.5.2 Características de una malla óptima.

Aunque algunas herramientas de optimización que aplicaremos también rellenan orificios, este problema lo abordaremos en detalle en la fase de Edición.

Con objeto de optimizar la malla, Geomagic Design X cuenta con varias herramientas. La primera de ellas que aplicaremos es el **Asistente de reparación**, que aglutina en un solo bloque varias operaciones de optimización.

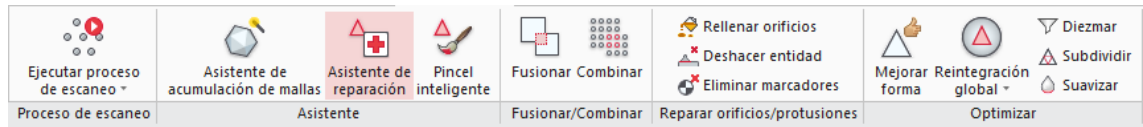


Figura 34: Menú Polígonos, con el Asistente de reparación

Al activar el **Asistente de reparación**, el software, en primer lugar, localiza todos los defectos que existen en la malla poligonal y los señala con un color distinto en función del tipo de problema.

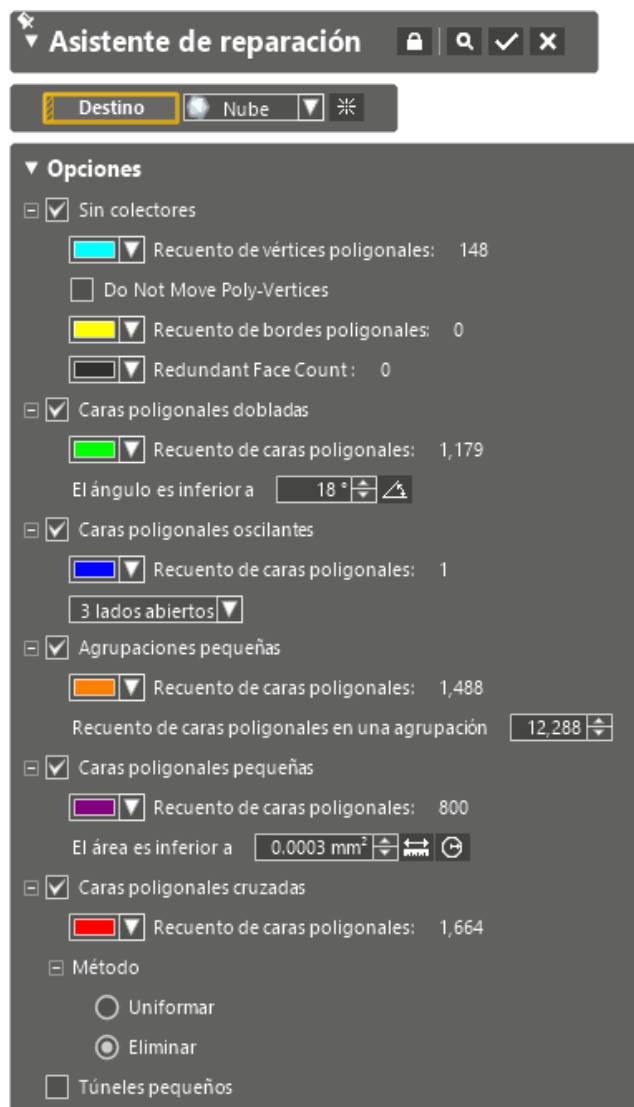


Figura 35: Opciones del asistente de reparación

Antes de aplicar la reparación, podemos ajustar los valores de cada opción y visualizar su futuro efecto. De esta manera, el proceso se aplicará a todos los defectos posibles, pero sin destruir partes de la malla que sí están correctas.

La herramienta no siempre consigue una reparación total en una primera instancia, y recomienda una segunda a continuación. Tras esa segunda iteración, la herramienta nos indica si ha conseguido reparar todos los defectos o si hay alguno pendiente, que habremos de tratar con otras herramientas. Geomagic Design incorpora varias, entre las que se pueden destacar:

- **Reintegración global:** regenera toda la malla, dando un tamaño homogéneo a todos los triángulos. Además, repara algunos agujeros.
- **Volver a envolver:** como el anterior comando, regenera toda la malla, pero además permite que la malla se adapte a las formas, reduciendo el tamaño de las polícaras en las zonas del objeto con más detalles. Permite hacer un suavizado para eliminar ruido. Es adecuado para formas orgánicas y no tanto para las geométricas. También sella algunos huecos.
- **Optimizar malla:** calcula una malla adecuada en función del tipo de objeto que estemos modelando, bien sea con formas orgánicas o más artificiales. Tiene opción de preservar las aristas del objeto, de manera que los triángulos de esas zonas no se modifiquen y conserven sus filos.
- **Diezmado:** reduce el número de polícaras en toda la malla o en parte de ella, aligerando el fichero. En modelos con mucho solape entre barrido y barrido, puede llegar a generarse un número de puntos excesivo que solo aportan información redundante, por lo que el diezmado es muy indicado.

Con esta herramienta podemos indicar qué porcentaje de reducción de número de triángulos o qué número de triángulos total deseamos. Además, podemos señalar si queremos una reducción homogénea o adaptada a las formas del objeto, y la desviación máxima permitida para la nueva malla generada respecto a la malla original.

- **Mejorar forma:** los modelos procedentes de escaneado presentan, por lo general, aristas más redondeadas que el objeto real. Esta herramienta combina afilado de aristas y suavizado en las zonas planas, por lo que es muy útil en objetos no orgánicos.

Los bloques de triángulos aislados que puedan quedar se eliminarán manualmente. Para ello, se selecciona la parte del objeto que queremos conservar con el **Modo de selección de flujos**, de manera que quedan marcados todos los elementos del objeto que estén conectados con la polícaro señalada. A continuación, invertimos la selección con las teclas **Mayúsculas+I** y suprimimos las caras sobrantes con la tecla **Suprimir**.

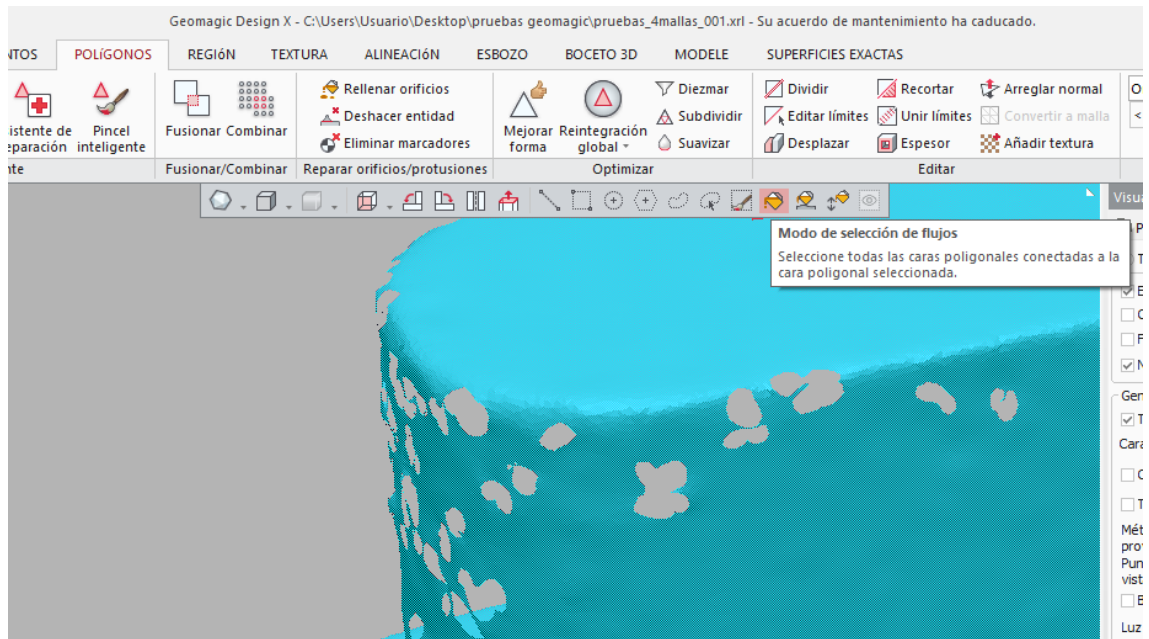


Figura 36: Herramientas de selección

6.1.3.2 Edición

En la fase de edición de malla reparamos los posibles defectos que hayan quedado tras la Fase de Optimización.

6.1.3.2.1 Eliminación de elementos ajenos al objeto

Puntos de control sobre el objeto

En objetos con pocos detalles o con patrones repetitivos, la tarea de Alineación, que implica la identificación de puntos comunes, es complicada y es necesario situar dianas o puntos de control sobre la pieza. Geomagic Design X incorpora la herramienta **Eliminación de marcadores**, que automatiza la tarea.

En nuestro caso, no ha sido necesario implantar puntos de control sobre las piezas, aunque sí los hemos situado sobre la plataforma giratoria y fueron eliminados manualmente al finalizar la fase de Alineación.

Piezas no deseadas

Piezas accesorias, como la plataforma giratoria o cuñas de sujeción de la pieza, también fueron retiradas manualmente al final de la fase de Alineación. Pero pueden quedar otros elementos que no interesan, y que habrán de ser eliminados manualmente con las herramientas de selección.

6.1.3.2.2 Reparación de agujeros en la malla

Si existen orificios en la malla, habrán de rellenarse con caras poligonales. El software permite localizarlos automáticamente y rellenarlos siguiendo, si es necesario, la curvatura de la malla. También permite modificar o eliminar las polícaras de los límites, si éstas presentan algún defecto.

El menú **Rellenar orificios** incluye diversas herramientas de edición, útiles en función del defecto que se quiera solucionar:

- **Agregar puente**
- **Rellenar golfo**
- **Eliminar península**
- **Eliminar isla**
- **Límite uniforme**
- **Eliminar cara poligonal.**

Además, seleccionando agujeros del objeto, podemos aplicar un relleno automático. Si usamos la combinación de teclas **Control+A**, es posible seleccionar todos y aplicar el relleno de orificios simultáneamente a todos ellos.

Otra herramienta para rellenar agujeros está dentro del menú **Editar límites**, aplicando el método **Rellenar**.

Por último, la herramienta **Deshacer entidad** permite también rellenar agujeros, además de eliminar bultos o deformaciones.

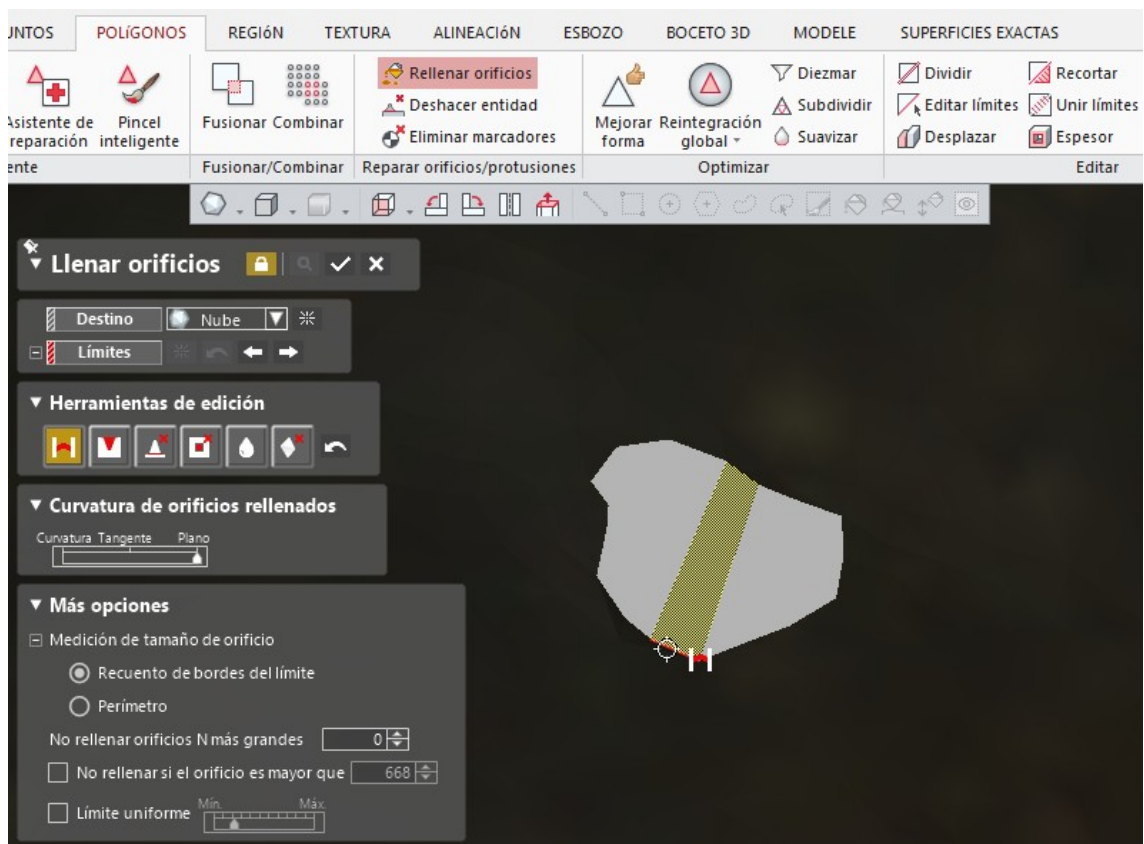


Figura 37: Herramientas para rellenar orificios

6.1.3.2.3 Eliminación de protuberancias

La herramienta **Deshacer entidad**, en un solo paso, elimina formas salientes en el objeto y rellena la zona con malla. Aunque no es su cometido principal, también puede usarse para eliminar orificios.

Si nuestro objeto tiene forma tubular, tiene la opción **Puente**, optimizada para tales características.

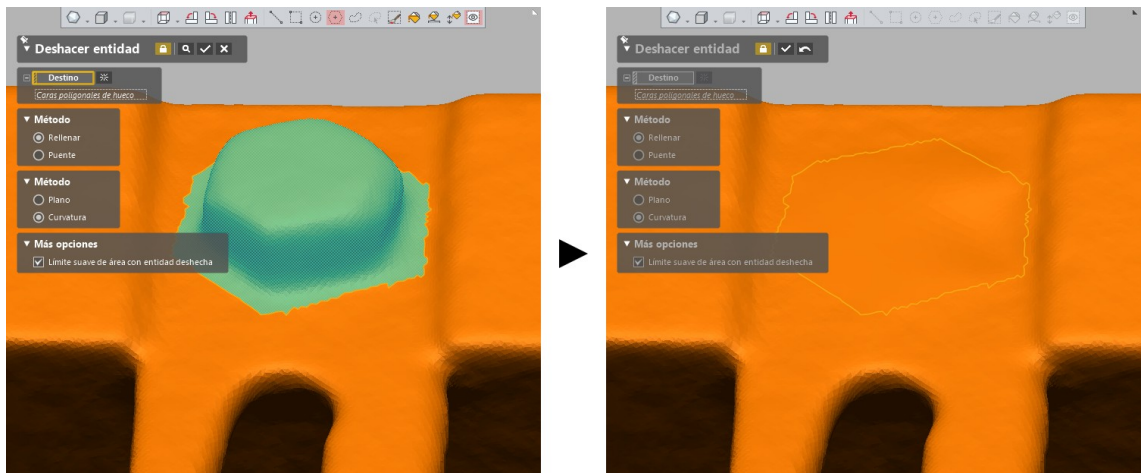


Figura 38: Herramienta para eliminar entidades

6.1.3.2.4 Reparación de solapamientos

Puede ocurrir que, en las zonas de solapamiento entre varios barridos, se formen varias capas de triángulos solapadas. En esos casos hay que eliminar las polícaras de la zona hasta dejar una sola capa, y sellar y reparar los defectos con las herramientas de Reparación de agujeros en la malla.

Este tipo de defectos se dan menos empleando el método de modelado por Construcción de malla HD (ver 6.1.2.5.3 Métodos de modelado).

6.1.3.2.5 Reorientación de piezas móviles

Como se mencionó en la fase de Planificación, en la parte Geometría del objeto, es habitual que los objetos con elementos o piezas móviles se escaneen en una posición distinta a la que deseamos presentarlos en el producto final.

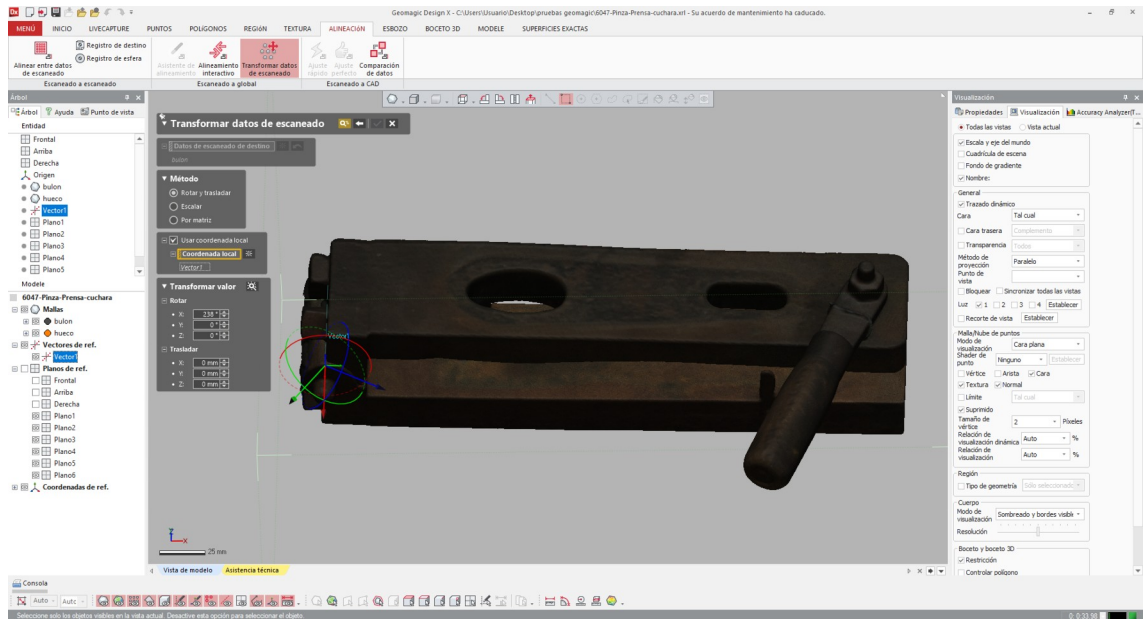


Figura 39: Rotación de pieza mediante Transformar datos de escaneado

En esta fase de reorientación, se separará cada pieza en una malla 3D diferente y se orientarán entre ellas usando las herramientas de Alineación. En concreto, con **Transformar datos de escaneado** y con **Alineamiento interactivo** somos capaces de rotar y trasladar o escalar, o incluso aplicar una matriz de transformación, conocidos sus parámetros.

Los giros se aplican alrededor de ejes que habremos de extraer del propio objeto. Para ello, el software incorpora potentes herramientas para definir geometrías perfectas a partir de mallas o nubes de puntos, eligiendo las primitivas de mejor ajuste minimocuadrático.

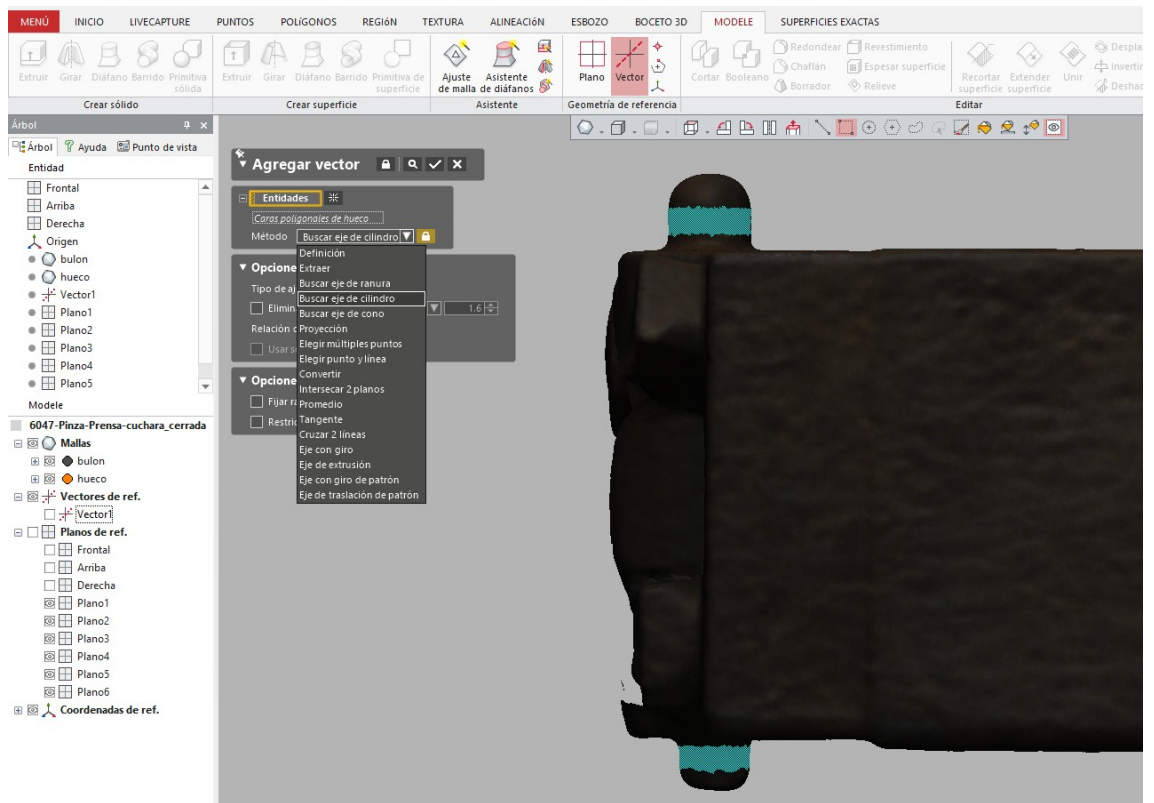


Figura 40: Extracción de eje a partir de puntos de un cilindro

6.1.3.2.6 Extracción de positivos de molde

Dado que las piezas escaneadas en este trabajo eran moldes para la producción de objetos de vidrio, se consideró interesante generar los positivos de algunos de esos moldes, de manera que se pudiera ver cómo funcionarían en su labor final.

El objetivo es quedarnos con la parte interior de la superficie del molde, la que estará en contacto con el vidrio caliente en el proceso de fabricación. El proceso es el descrito en el siguiente diagrama:

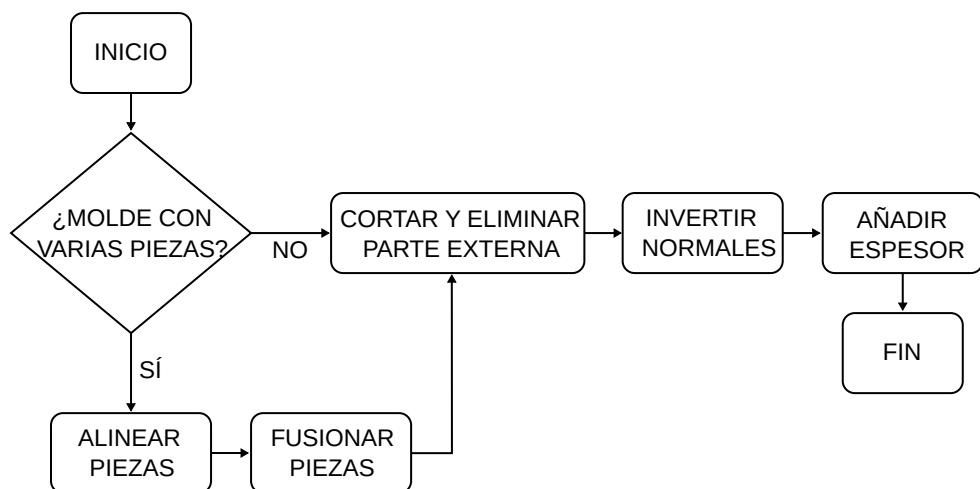


Figura 41: Fases de extracción de positivos

Moldes con varias piezas: alineado y fusionado

El proceso de alineado es el mismo descrito en la sección anterior, Reorientación de piezas móviles. El de fusionado es un proceso directo, con las herramientas **Fusionar/Combinar**.

Corte y limpieza

Para hacer el corte que separe la parte interna del molde, generaremos primero una geometría de referencia, generalmente un plano. Suele ser habitual definir este plano por 3 ó más puntos, con los que el software calculará el de mejor ajuste, y que será tangente a nuestra pieza.

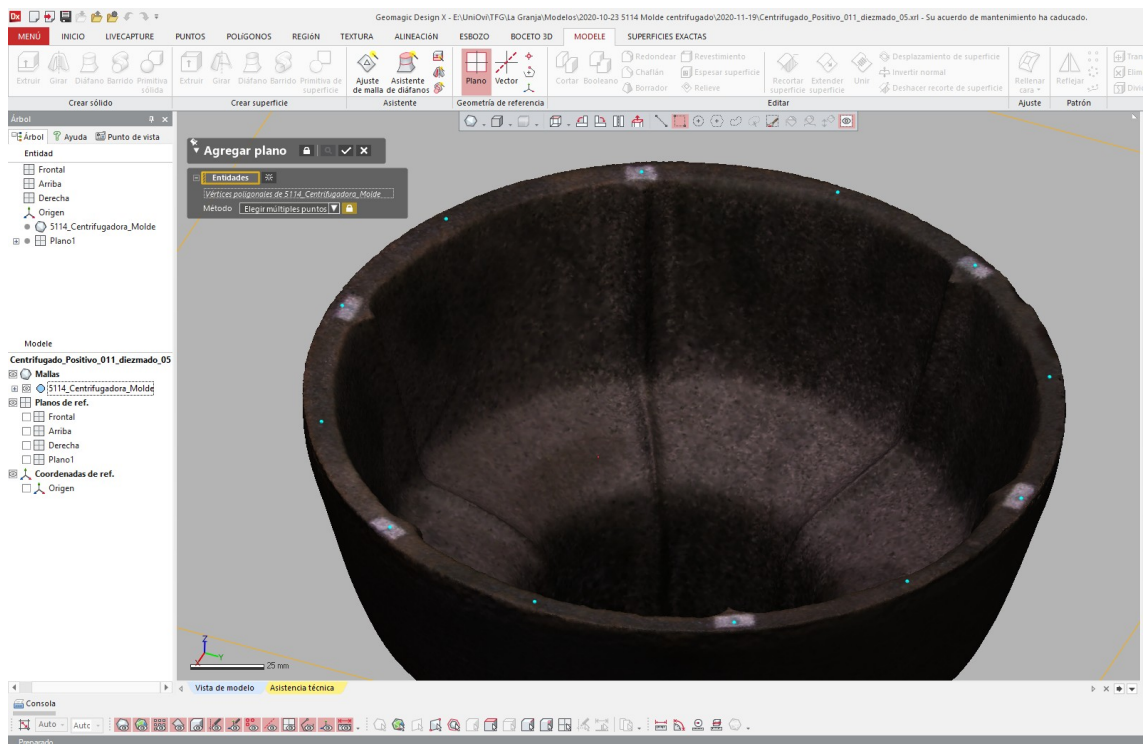


Figura 42: Definir plano de corte

Posteriormente, crearemos otro paralelo al anterior, desplazado en dirección al objeto, de manera que pase de ser tangente a secante a la pieza. Usaremos para ello la herramienta **Agregar plano**, con el método **Desplazar**. Sobre el plano aparecerá una flecha indicando el sentido de desplazamiento.

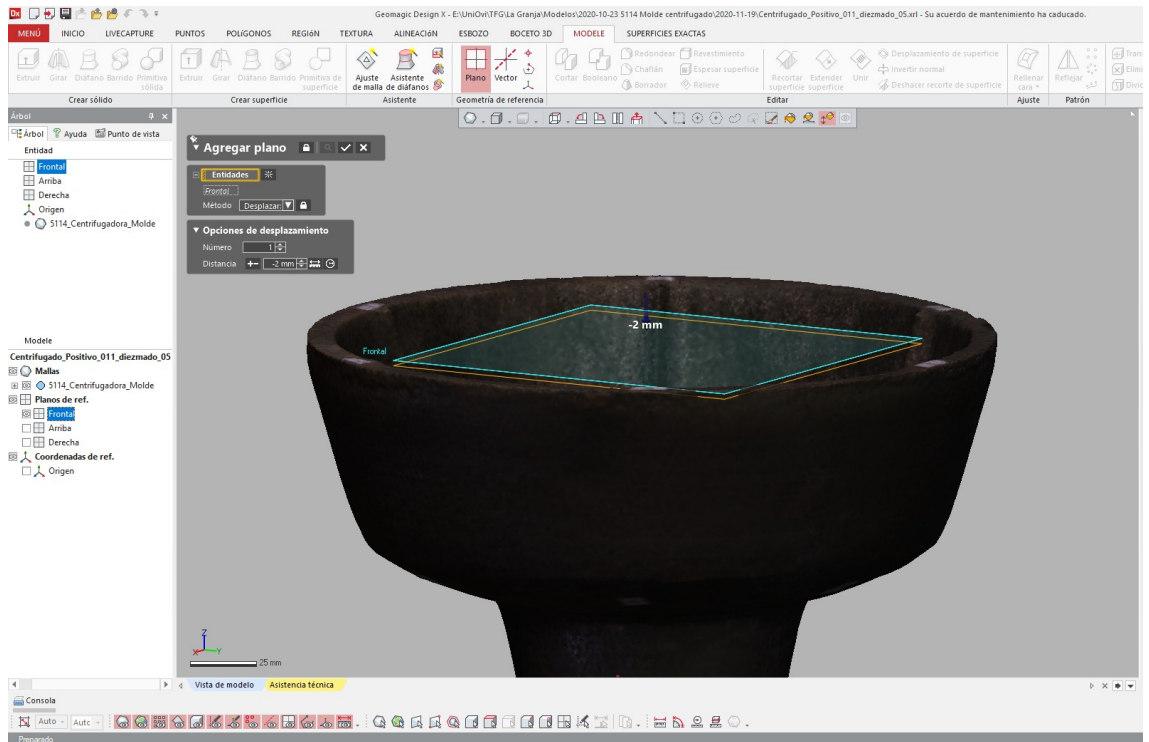


Figura 43: Desplazar plano

Utilizando el nuevo plano, cortaremos la pieza

La herramienta es **Polígonos > Dividir**. Hay que elegir:

- Destino: nuestra malla.
- Método: por entidad.
- Entidad de herramientas: nuestro plano

Para que simplemente haga el corte y no nos cierre nuestro objeto, desmarcamos **Extremos de sección de remate**.

Ahora elegimos qué parte de la malla queremos conservar. El programa selecciona por defecto uno de los lados del plano, pero puede ser que nos interesen los dos, o justamente el contrario al que selecciona por defecto.

Finalmente, eliminamos las partes de la pieza que no nos interesen, seleccionándolas con el **Modo de selección de flujos**.

Invertir normales

Con este paso, elegimos el lado bueno, el haz del modelo. Se hace con la herramienta **Polígonos > Arreglar normal > Toda la malla**.

Añadir espesor

Como varios de los moldes de nuestro trabajo son para producir recipientes, habremos de darle el espesor que tendrá el vidrio. Para ello, aplicamos la herramienta **Espesor**.

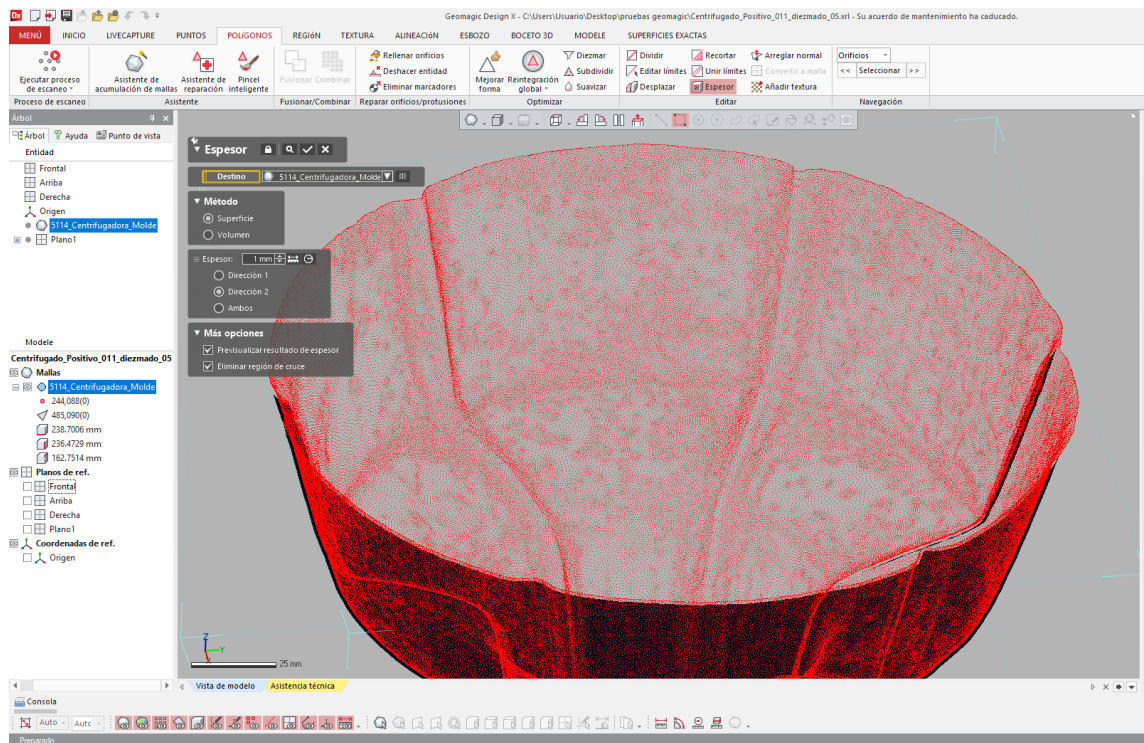


Figura 44: Herramienta espesor



Figura 45: Positivo obtenido

6.1.3.2.7 Texturas

En la experiencia con la versión 2019.0.2 de Geomagic Design X, se ha apreciado que algunos procesos eliminan o dañan la textura fotográfica de la malla.

- El guardado en formato **XRL**, el formato propietario de Geomagic, en ocasiones hace desaparecer por completo la textura. Es recomendable, por ello, exportar siempre a un formato estándar como **PLY** (*Polygon File Format* o formato de triángulo Stanford) una vez entremos en la Fase de postprocesado.
- La herramienta **Rellenar orificios** no aplica textura fotográfica, sino que asigna un color oscuro a las polícaras nuevas. En su lugar se recomiendan otras dos herramientas que sí que aplican la textura fotográfica:
 - **Editar límites** empleando el método **Rellenar**.
 - **Deshacer entidad**.

Un último modo, potente pero que no siempre da buenos resultados, es guardar una copia del fichero sólo con los puntos alineados. Posteriormente, en el archivo de mallas, podemos emplear todas las herramientas, aunque destruyan la textura. Finalmente, cuando el modelo esté completo, se vuelve a importar la nube de puntos y se aplica la textura con la herramienta **Textura > copiar textura/color de vértice**.

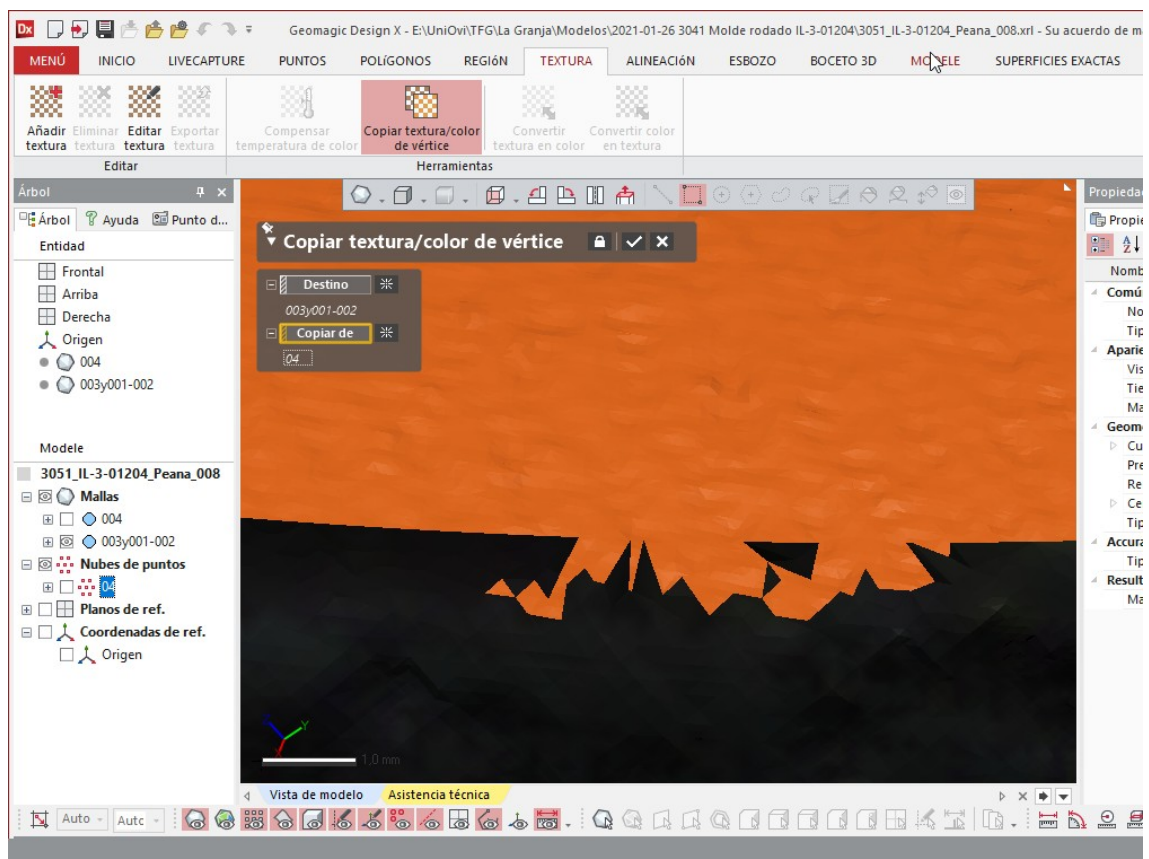


Figura 46: Herramienta copiar textura/color de vértice

6.1.3.3 Orientación absoluta

Una vez construido el modelo, tanto la malla de polícaras como sus texturas, por lo general tendremos la pieza en una posición aleatoria. El siguiente paso es trasladarlo a su posición en el espacio y con la orientación adecuada.

El buen desarrollo de esta fase producirá que el modelo resultante sea sencillamente interpretado desde cualquier software, permitiendo generar con facilidad vistas en planta, alzados o secciones.

Es interesante, además, asignar unas coordenadas cercanas a (0, 0, 0), de manera que evitemos problemas de desbordamiento de memoria o pérdidas de precisión al abrir el modelo en otro software. Estos problemas se dan habitualmente al manejar coordenadas grandes, como las UTM.

En nuestro caso, no buscamos situar los objetos en unas coordenadas concretas; pero si fuese necesario, sería posible empleando las mismas herramientas.

6.1.3.3.1 Extraer geometrías de referencia

El primer paso para orientar el objeto es extraer entidades geométricas a partir de nuestro objeto. Esencialmente, planos y vectores que ayuden a situar el origen de coordenadas y la orientación del objeto.

Disponemos de diversas maneras de extraer estas entidades geométricas en Geomagic Design X. La más potente de ellas es **Segmentar automáticamente**. Con ella, el software detecta lo que denomina *regiones de características*, que son zonas de la malla que se asemejan a superficies matemáticas:

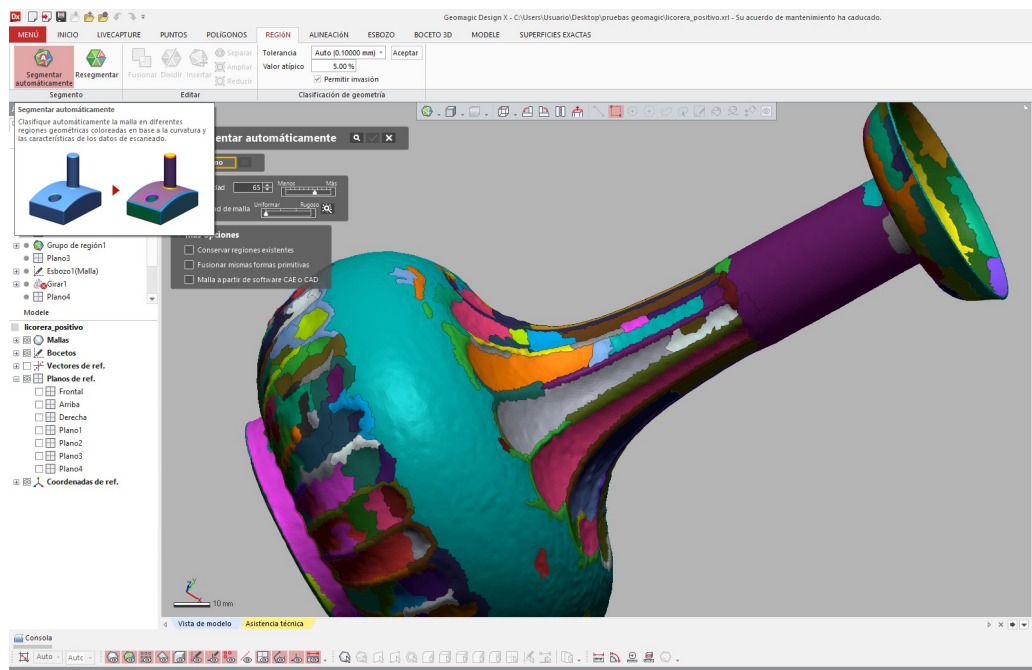


Figura 47: Segmentación automática

A partir de estas regiones, podemos modelar planos y extraer vectores y puntos, utilizando las herramientas al efecto contenidas en el menú **Insertar > Geometría de referencia**.

También es posible extraer geometrías de referencia sin generar previamente regiones, directamente a partir de la malla o de la nube de puntos, con resultados igualmente satisfactorios, un proceso menos automatizado y con más control para elegir los datos de entrada y el tipo de geometría deseada de salida.

6.1.3.3.2 Giro y traslación

A partir de esas geometrías de referencia, usaremos la herramienta **Alineación > Alineamiento Interactivo** para llevar nuestro objeto a la posición y orientación deseada. Al abrir la herramienta, nos muestra una ventana partida:

- En la ventana de la izquierda, haremos los ajustes pertinentes: giros y traslaciones.
- En la ventana derecha podemos ver el progreso de nuestros ajustes.

Conviene, por ello, tener una vista ortogonal en la ventana izquierda, bien sea la planta (seleccionar con **ALT+5**) o un alzado (**ALT+1** a **ALT+4**, según la vista deseada), e ir moviendo la vista en la ventana derecha según necesidades.

Existen dos métodos de alineación:

- **3-2-1**: define el nuevo sistema de coordenadas a partir de un plano, un vector y un punto.
- **X-Y-X**: define la posición del objeto a partir de un punto, que será el nuevo origen, y dos vectores que serán las direcciones de dos de los ejes de coordenadas (X, Y o Z).

Tras el giro y traslación, podemos eliminar las geometrías de referencia, que no se han movido de su posición original.

6.1.3.4 Exportación

El formato en el que trabaja por defecto Geomagic Design X, **XRL**, es propiedad de la empresa 3D Systems y es de tipo privativo. Por ello, no tiene soporte en la mayoría de los softwares 3D y es necesario exportar nuestros modelos definitivos a un formato estándar.

Exportar a otro formato no altera las dimensiones, posición u orientación del modelo en sí, sino la manera en la que se almacena informáticamente. Además, cada formato tiene unas cualidades y entidades soportadas, por lo que hay que elegir con cuidado cuál se ajusta mejor a la finalidad del trabajo. Hay importantes diferencias entre ellos especialmente en la manera de almacenar el color.

Geomagic exporta a varios formatos de archivo 3D [5]:

Fichero		Entidades soportadas					
Formato	Extensión	Nube de puntos	Malla	Puntos con color	Caras con color	Puntos con textura	Caras con textura
STL Binario	stl		✓				
STL Ascii	stl		✓				
Rapidform XO	xdl	✓	✓	✓			
Rapidform 2006	mdl	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Puntos Geomagic	pts	✓	✓	✓			
Polígonos Geomagic	fcs		✓	✓	✓		
Puntos Ascii	asc	✓	✓	✓			
Stanford Binario	ply	✓	✓	✓			
Stanford Ascii	ply	✓	✓	✓			
Alias Wavefront	obj		✓	✓		✓	✓
3D Studio	3ds	✓	✓			✓	
VMRL 1.0	wrl	✓	✓			✓	✓
VMRL 97	wrl	✓	✓			✓	✓
INUS Compress. File	icf	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kubit	ptc	✓	✓	✓			
Leica	ptc	✓	✓	✓			
KeyShot	bip	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AutoCAD DXF	dxf	✓	✓				

Se optó por los formatos OBJ y PLY, abiertos e implementados en la mayoría de programas de modelado 3D.

Si bien el PLY no almacena textura mapeada para la malla, sí que asigna un color a cada vértice, por lo que si la malla es suficientemente densa, la apariencia del modelo es similar al OBJ con textura mapeada. Sin embargo, si la malla contiene triángulos más grandes, es más aconsejable el formato OBJ, que viene acompañado de otro fichero externo MTL (del inglés *Material Template Library*, biblioteca de plantillas de materiales), encargado de almacenar el mapeo de la textura, y un fichero de tipo imagen (JPG o PNG, por ejemplo), que almacena la textura en sí.

Se almacenó también una copia en STL, un formato también estándar ampliamente extendido en el ámbito de la impresión 3D.

Del los formatos PLY y STL, se eligió la versión binaria, después de comprobar que los ficheros ocupaban entre un 25% y un 60% de sus homólogos Ascii.

6.2 Comparativa: Escáner 3D frente a Fotogrametría

En paralelo al escaneado 3D realizado por este equipo de trabajo, otro equipo del Área de Lenguajes y Sistemas Informáticos del Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo procesó las mismas piezas mediante Fotogrametría.

Para esa tarea, se empleó:

- Una cámara Nikon Z5, de formato completo o *full frame*, 24.3 megapíxeles y sin espejo.
- El software 3DF Zephyr, aplicando su flujo de trabajo sin puntos de apoyo.

6.2.1 Cualitativa

Tanto el método de trabajo como las características de la cámara empleada influyen en que los resultados visuales de la Fotogrametría sean mucho mejores a los obtenidos con el escáner 3D: Hay que tener en cuenta que tanto la resolución como el tamaño del sensor de la cámara es muy superior al del escáner. Además, tiene un rango dinámico mucho más amplio, por lo que es capaz de aprovechar imágenes con contraste muy alto.

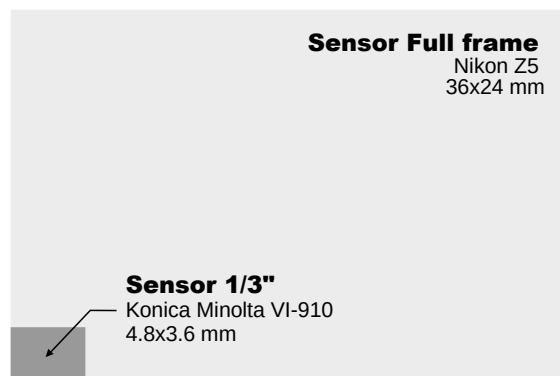


Figura 48: Comparativa de tamaños de sensores

	Nikon Z5	Konica Minolta VI-910
Tamaño del sensor	36x24 mm (full frame)	4.8x3.6 mm (1/3")
Resolución	6016x4016 (24.3 Mp)	640x480 (0.3 Mp)
Profundidad de color	14 bits por canal	8 bits por canal

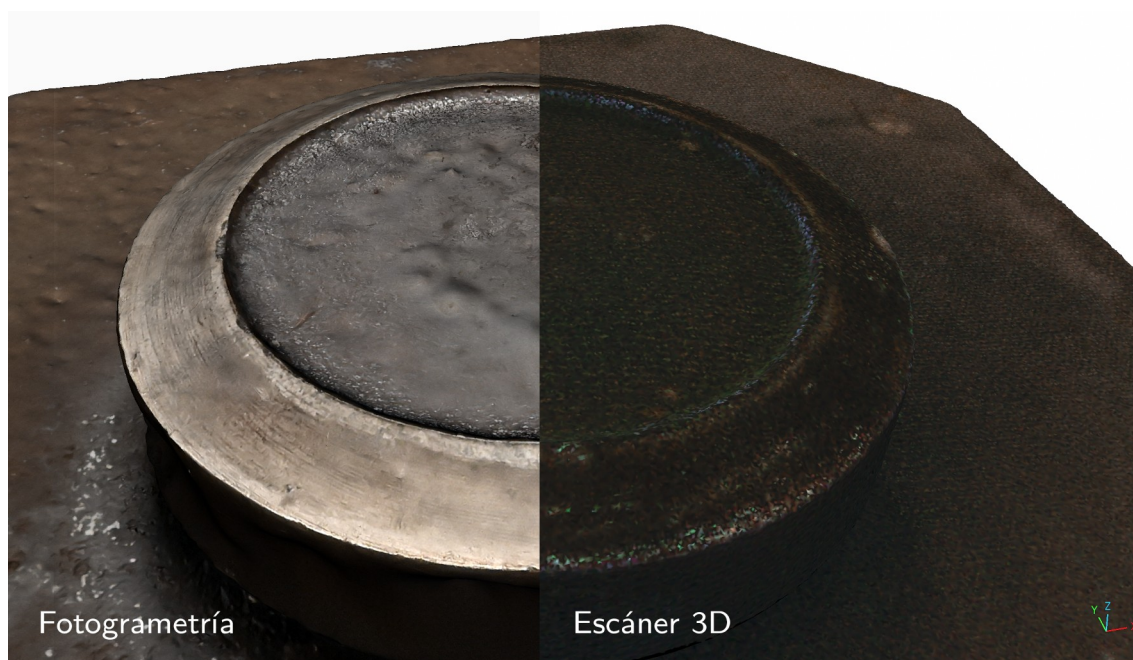


Figura 49: Comparativa de texturas: Fotogrametría frente a Escáner 3D

6.2.2 Cuantitativa

Se aplicó esta comparativa exclusivamente a los modelos sin partes móviles, de manera que los resultados no se viesen afectados por una diferente disposición de estas piezas.

6.2.2.1 Registro de modelos

Como se ha dicho, en el flujo de trabajo aplicado en Fotogrametría no se incluyó la implantación de puntos de apoyo, ni se tomaron medidas de segmentos de los objetos.

Los puntos de apoyo son puntos situados en nuestro modelo de los cuales conocemos sus coordenadas en nuestro sistema de coordenadas objetivo. Nos permiten escalar, rotar y trasladar nuestro modelo al sistema de coordenadas deseado.

En ausencia de puntos de apoyo, ajustaremos los modelos procedentes del trabajo de Fotogrametría a los obtenidos por escaneado 3D, que sí están a escala correcta. Para este proceso de ajuste, denominado registro, se empleó la versión 2.12.0 de CloudCompare, software libre de procesamiento de nubes de puntos y mallas.

El flujo de trabajo en CloudCompare para la tarea de registro se descompone en dos pasos: Registro inicial y Registro fino.

6.2.2.1.1 Registro inicial

En primer lugar, se importan las dos mallas, la procedente del escáner y la de Fotogrametría y, si procede, se limpian las zonas que no interesan.

Con la herramienta **Trasladar/Rotar**, colocamos las mallas en una posición en la que no se solapan, de manera que sea sencillo ver ambas en su totalidad.

Después, seleccionamos ambas mallas en la ventana **Árbol DB** y abrimos la herramienta **Registro > Alinear (selección de pares de puntos)**. Y marcamos la malla que queremos mover.

En la siguiente ventana se irán almacenando los puntos comunes, que iremos marcando sobre las mallas. Es importante marcar la casilla **Ajustar escala**. Cuando hayamos elegido un mínimo de tres puntos, pulsamos **Alinear**. Si el resultado es satisfactorio, confirmamos.

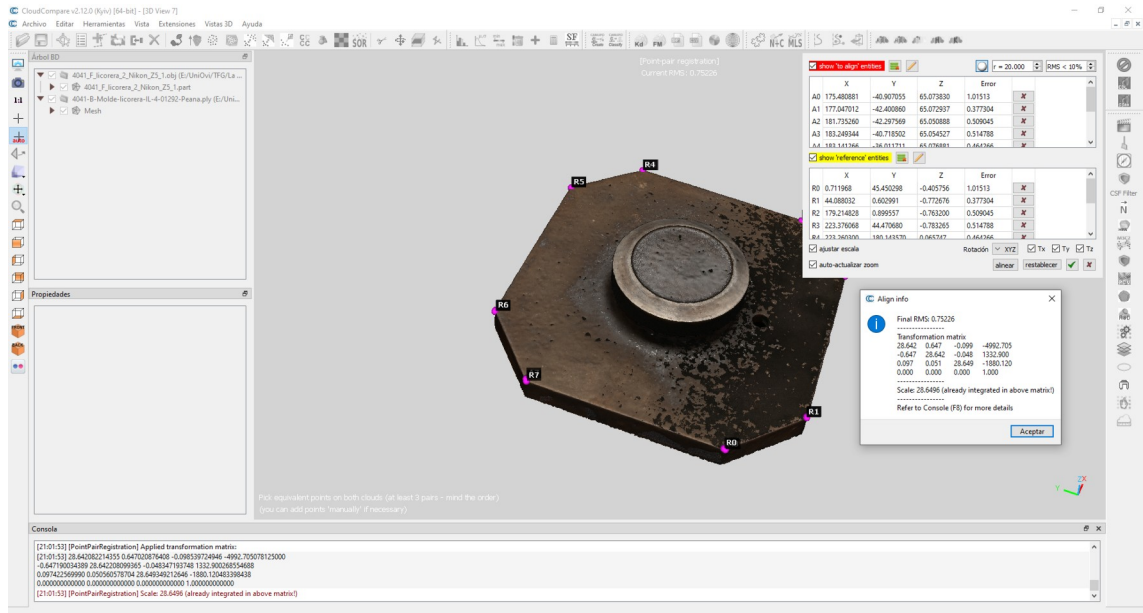


Figura 50: Resultado del alineado/escalado inicial

No es necesario elegir demasiados puntos ya que, en el siguiente paso, el software corregirá las posibles desviaciones.

CloudCompare nos muestra la matriz de transformación, en este caso:

$$M = \begin{bmatrix} 28.642082214355 & 0.647020876408 & -0.098539724946 & -4992.705078125000 \\ -0.647190034389 & 28.642208099365 & -0.048347193748 & 1332.900268554688 \\ 0.097422569990 & 0.050560578704 & 28.649349212646 & -1880.120483398438 \\ 0.000000000000 & 0.000000000000 & 0.000000000000 & 1.000000000000 \end{bmatrix}$$

Vemos que el factor de escala es **28.64** y ya está integrado en la diagonal principal de esta matriz de transformación.

6.2.2.1.2 Registro fino

Seleccionamos de nuevo ambas mallas en la ventana **Árbol DB**, abrimos la herramienta **Registro > Registro fino (ICP)** y marcamos la malla que queremos mover.

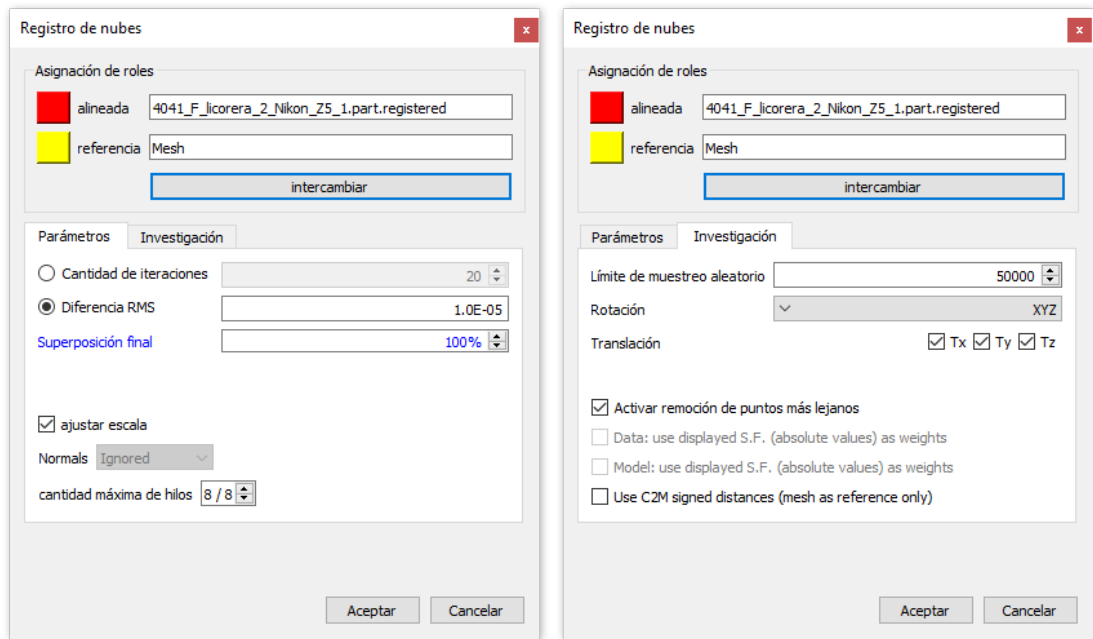


Figura 51: Opciones del registro fino de CloudCompare

CloudCompare emplea el algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*)[8], que minimiza las diferencias entre dos mallas o nubes de puntos. Se compone de tres pasos que se aplican de manera iterativa[9]:

1. Se empareja cada punto de un modelo con el más cercano del otro modelo.
2. Se calcula qué movimiento minimiza el error cuadrático medio entre los puntos emparejados
3. Se aplica el movimiento al primer modelo y se actualiza el error cuadrático medio.

En CloudCompare podemos elegir que el algoritmo se detenga tras un cierto número de iteraciones o al alcanzar un error máximo deseado.

Finalmente, aceptamos y obtenemos el resultado.

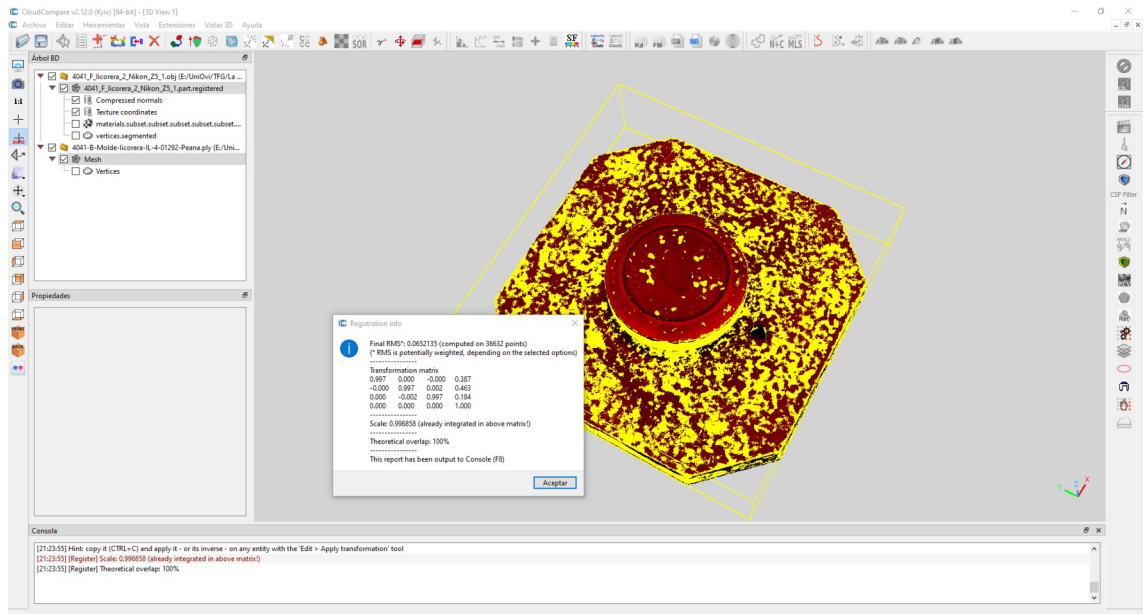


Figura 52: Resultado del ajuste fino ICP

Este ajuste fino también nos muestra una matriz de transformación; en esta ocasión los valores son más pequeños, dado que los movimientos son mínimos:

$$M = \begin{bmatrix} 0.996858298779 & 0.000082150815 & -0.000082858263 & 0.386534869671 \\ -0.000081968836 & 0.996855914593 & 0.002186909551 & 0.462854892015 \\ 0.000083038285 & -0.002186902566 & 0.996855914593 & 0.184448391199 \\ 0.000000000000 & 0.000000000000 & 0.000000000000 & 1.000000000000 \end{bmatrix}$$

Como se ha mencionado, esta operación es iterativa y muy exigente, y puede tardar unos instantes, en función de las características del equipo. Esta versión de CloudCompare realiza la operación con la CPU, no con la GPU.

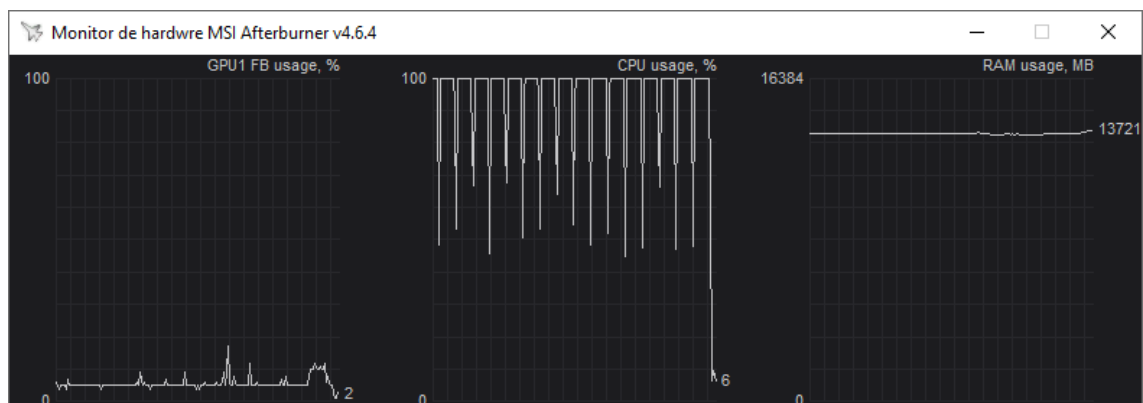


Figura 53: Consumo de recursos en el proceso de registro fino

6.2.2.1.3 Exportación

Antes de guardar la malla, es importante convertir la textura a RGB. De lo contrario, nos alterará su disposición sobre la pieza.

Para ello, seleccionamos nuestra pieza y pulsamos **Editar > Malla > Convierte la textura/material a RGB**.

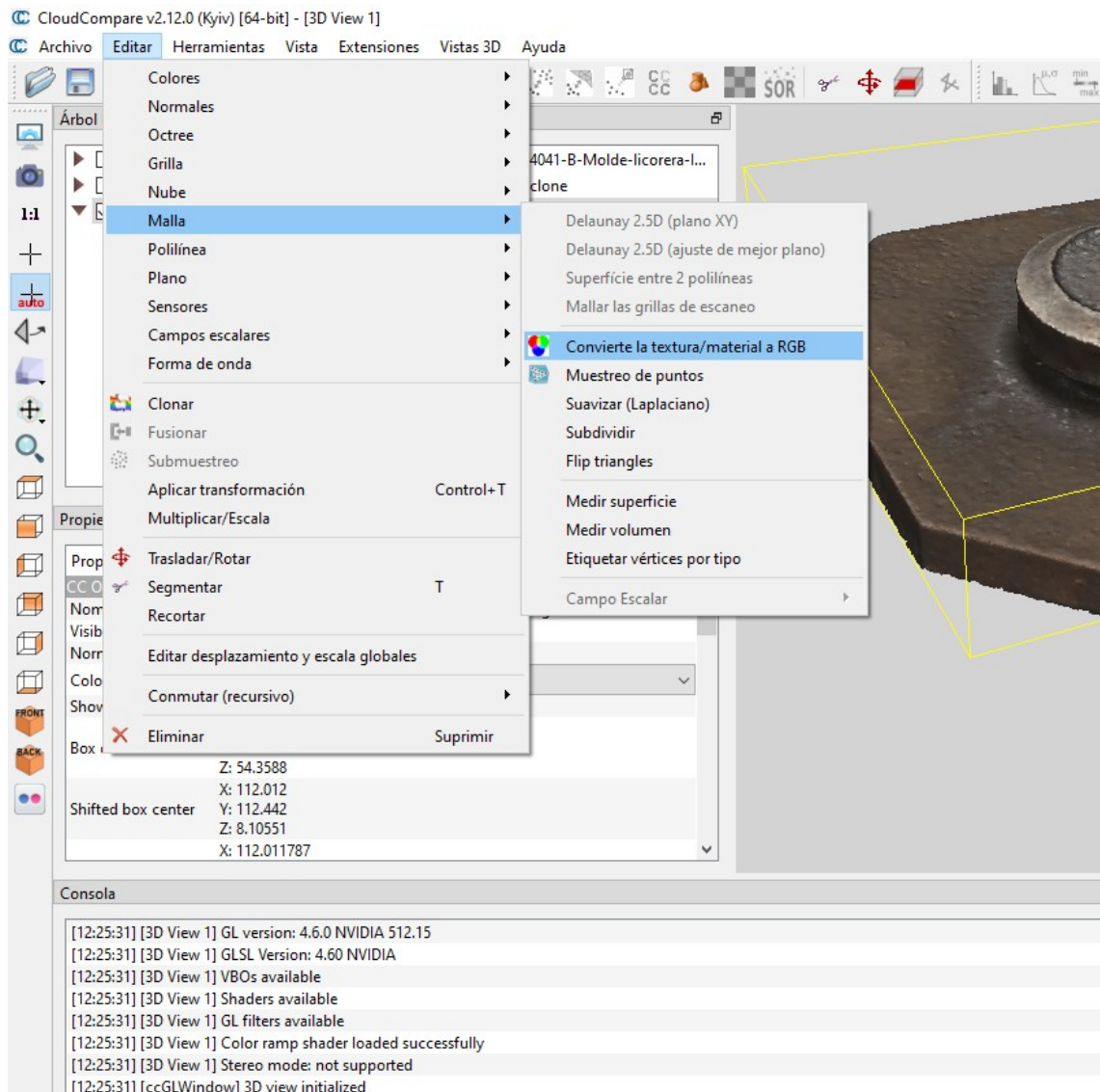


Figura 54: Convertir textura a RGB en CloudCompare

Finalmente, seleccionamos nuestra pieza en la ventana **Árbol DB** y guardamos como OBJ.

6.2.2.2 Cálculo de diferencias entre modelos

Para esta tarea, utilizamos la herramienta **Distancias > Dist. Nube/Malla** de CloudCompare.

Se selecciona en la ventana **Árbol DB** los dos modelos a comparar y, al aplicar la herramienta, nos solicita que elijamos rol que cumplirá cada modelo: **Comparada** y **Referencia**. Como el modelo del que conocíamos sus dimensiones era el procedente del escaneado, elegimos éste como referencia.

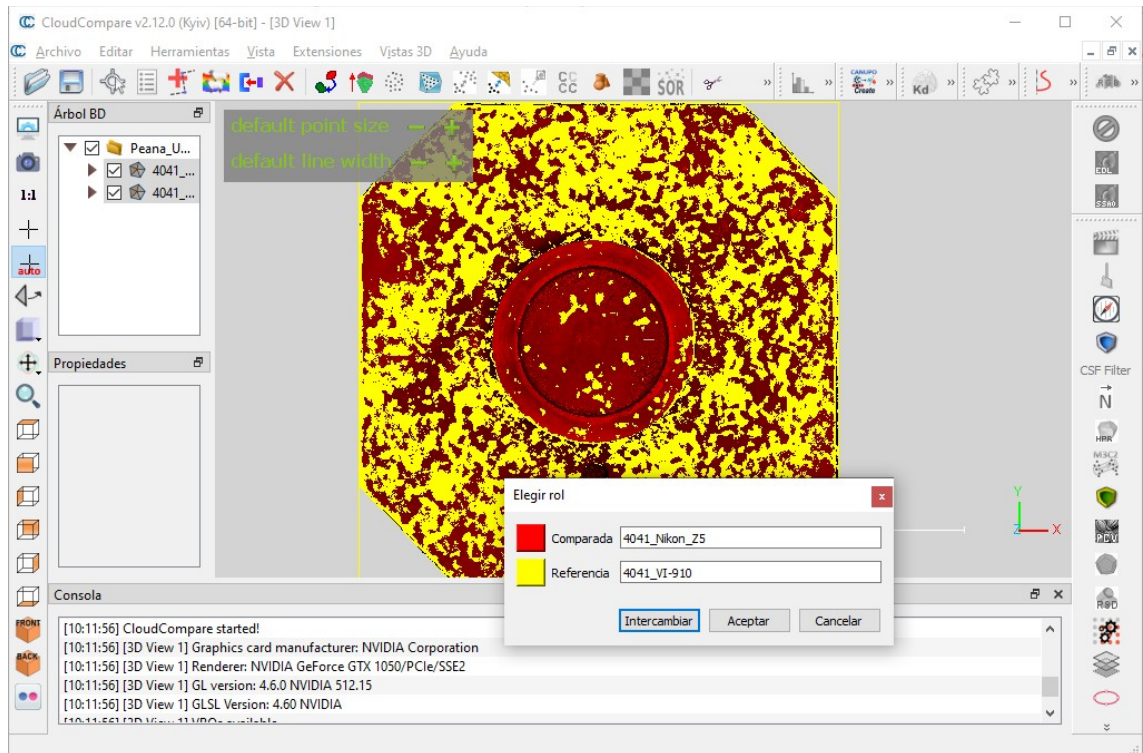


Figura 55: Elección de roles de los modelos

Podemos considerar que todos los puntos con una desviación mayor de $\pm 1\text{mm}$ son errores en el modelado, así que los descartamos del cálculo. En nuestro caso, no es importante el signo del desplazamiento, sino el valor absoluto del mismo, así que descartamos la opción **distancias con signo**.

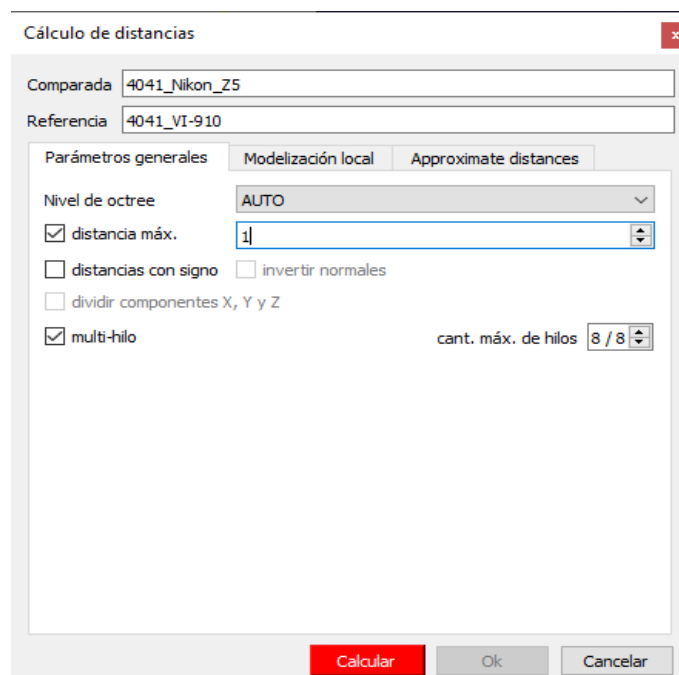


Figura 56: Descarte de puntos con distancia máxima mayor a 1 mm

El software asocia un campo escalar al modelo evaluado, en el que almacena las distancias al modelo de referencia. Podemos entonces obtener una vista coloreada con la distribución de este campo escalar.

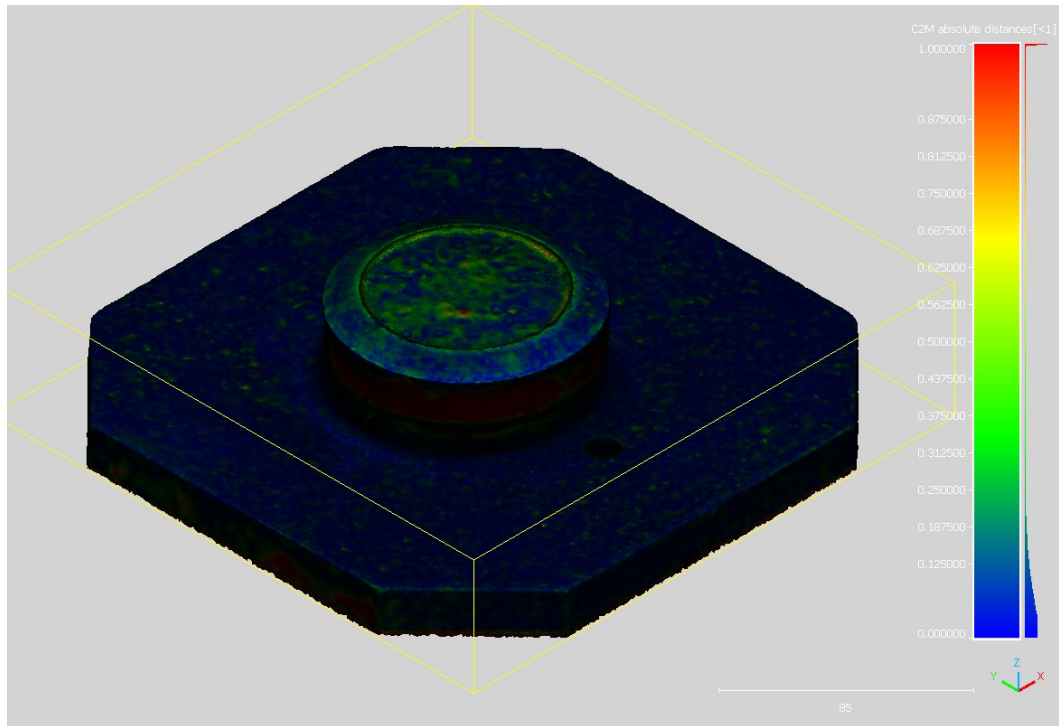


Figura 57: Diferencias entre modelos

Podemos ver también esta misma distribución de diferencias en un histograma.

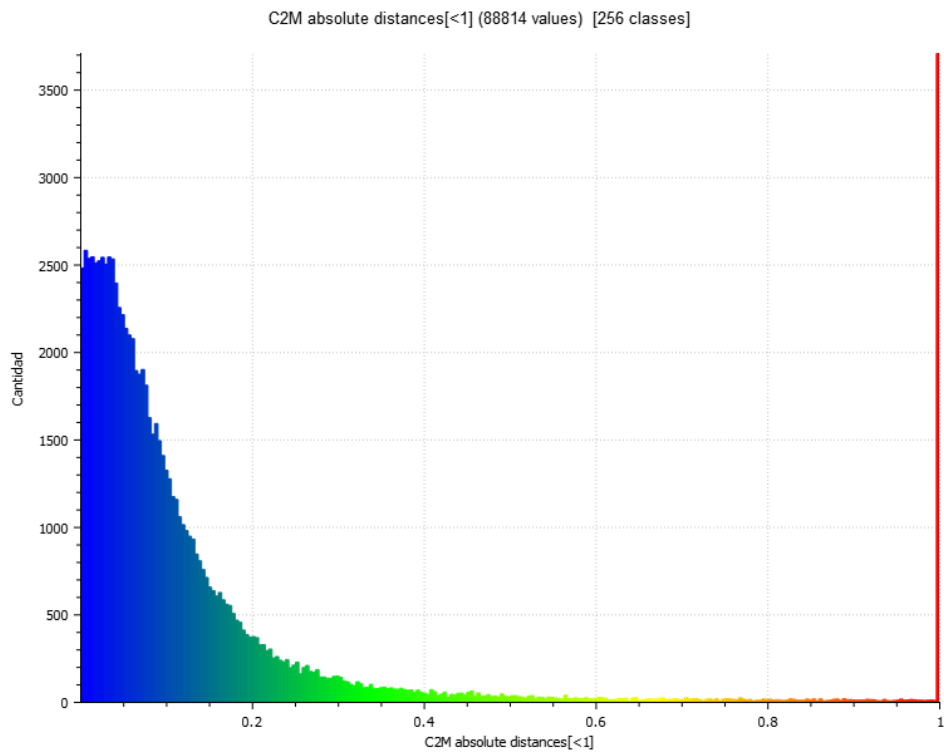


Figura 58: Histograma de distribución de diferencias entre modelos

6.2.2.3 Cálculo de propiedades de los modelos

Un valor que nos puede informar de la calidad de la malla es el tamaño medio de los triángulos que la componen. En CloudCompare se puede extraer desde el menú **Editar** > **Malla** > **Medir Superficie**.

7 Resultados

7.1 Resultados del escaneado 3D

7.1.1 Imágenes de los modelos



Figura 59: 3041-A: Molde rodado (IL-3-01204). Cuerpo



Figura 60: 3041-B: Molde rodado (IL-3-01204). Peana



Figura 61: 4041-A: Molde licorera (IL-4-01292). Cuerpo



Figura 62: 4041-B: Molde licorera (IL-4-01292). Peana

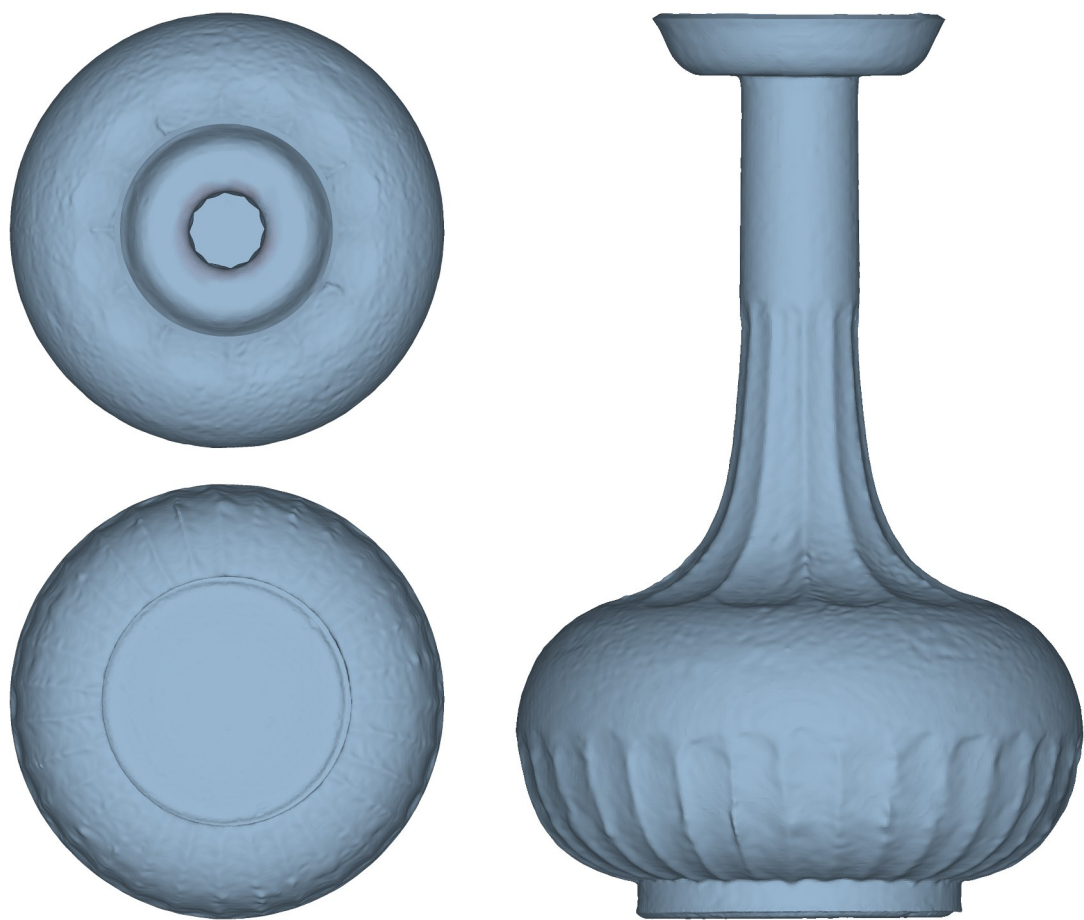


Figura 63: 4041-C: Molde licorera (IL-4-01292). Positivo



Figura 64: 5114-A: Molde centrifugado



Figura 65: 5114-B: Molde centrifugado. Tapón

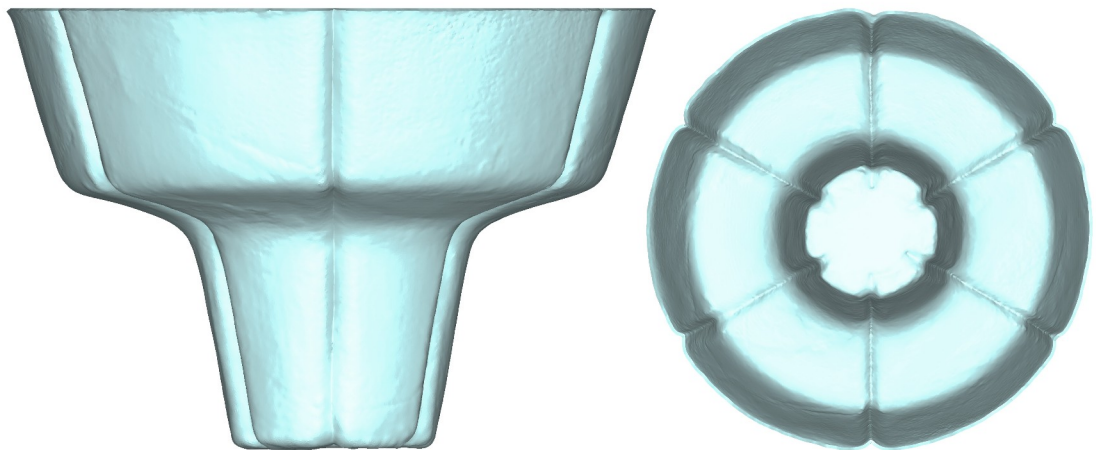


Figura 66: 5114-C: Molde centrifugado. Positivo

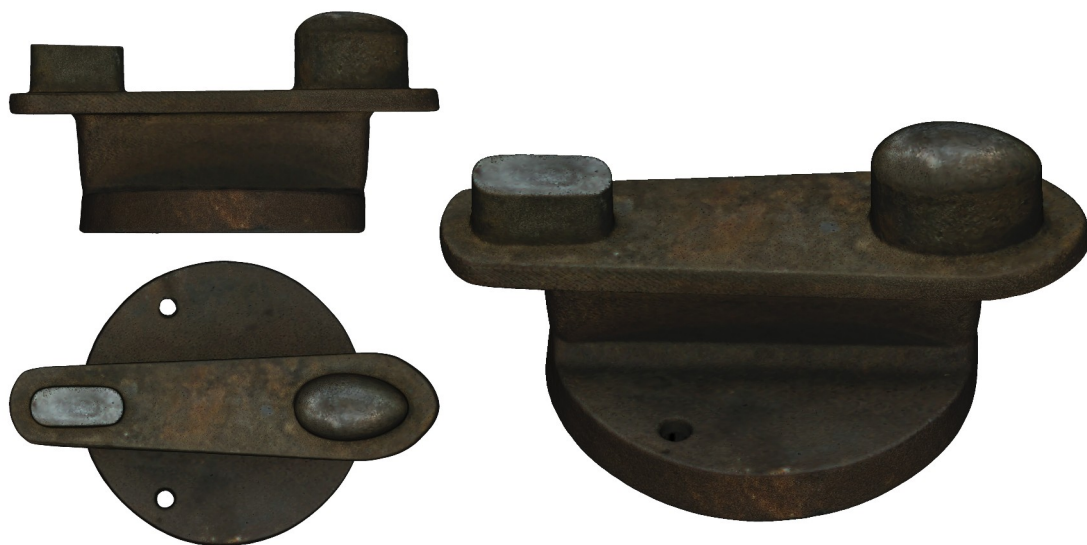


Figura 67: 6047-A: Prensa cuchara. Base



Figura 68: 6047-B: Prensa cuchara. Cuerpo

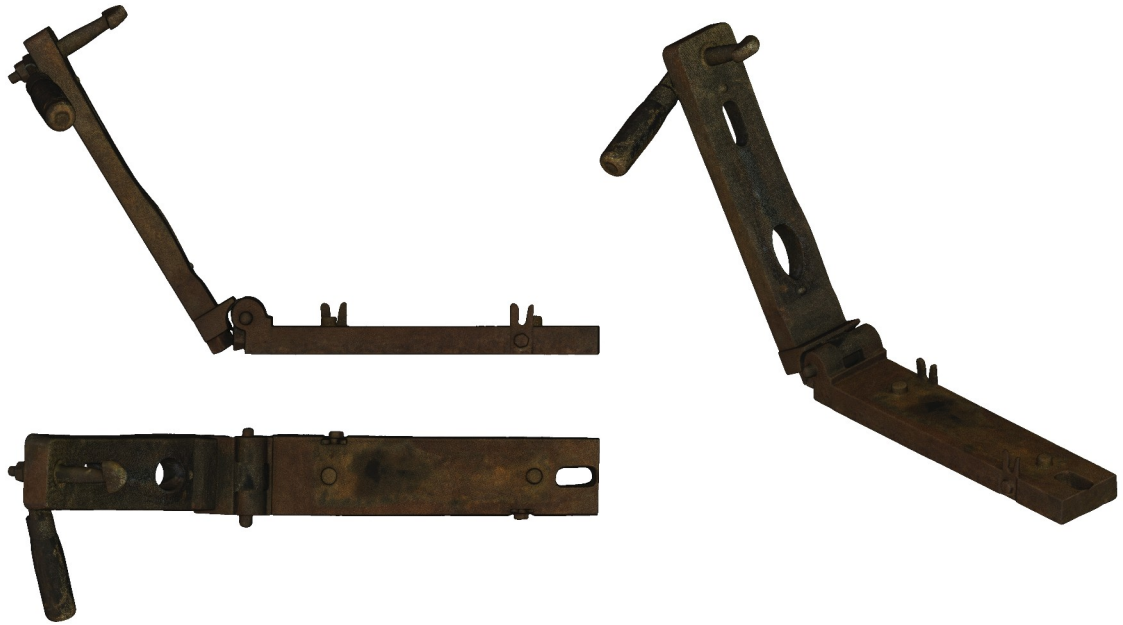


Figura 69: 6047-C: Prensa cuchara. Pinza



Figura 70: 6061-1-A: Molde prensa labrado. Bulón



Figura 71: 6061-1-B: Molde prensa labrado. Tapón

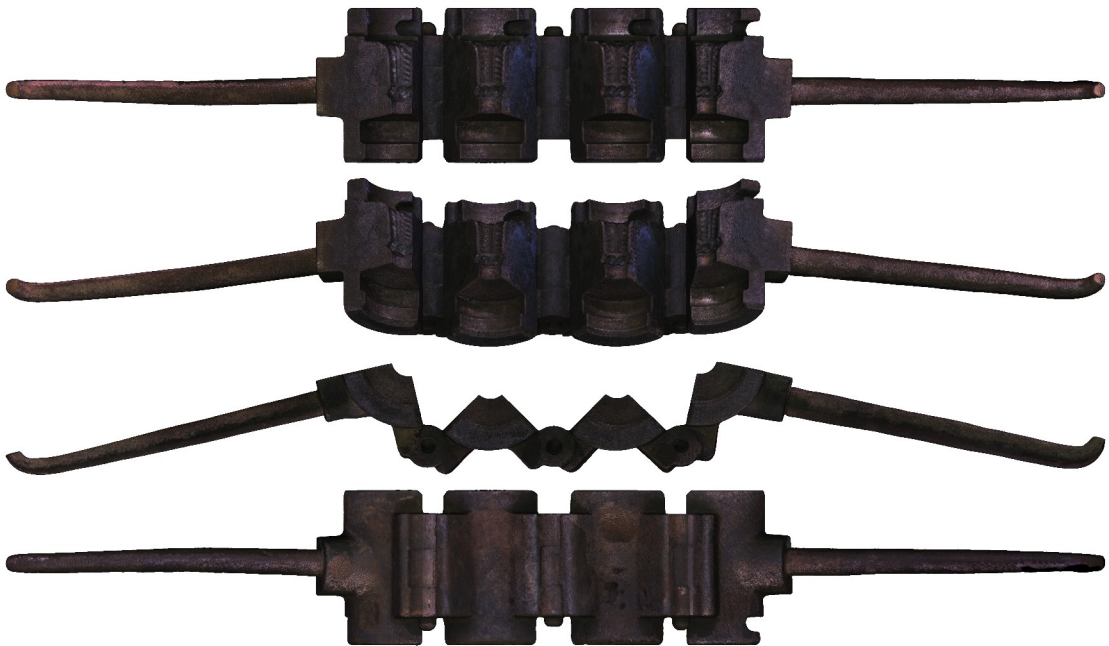


Figura 72: 6061-1-C: Molde prensa labrado. Cuerpo



Figura 73: 6061-1-D: Molde prensa labrado. Tenaza

7.1.2 Tiempos de adquisición y procesado

De cara a facilitar una posible estimación de costes y plazos de ejecución, se anotaron los tiempos de escaneado y procesado de cada pieza, de manera que se pueda extrapolar esos valores a cualquier pieza.

Código	Descripción	Nº de ficheros crudos	Tiempo de escaneado	Tiempo de modelado	Tiempo total
3041-A	Molde rodado IL/3/01204 Cuerpo	119	2:15	6:45	9:00
3041-B	Molde rodado IL/3/01204 Peana	61	1:00	3:30	4:30
4041-A	Molde licorera IL-4-01292 Cuerpo	39	2:45	8:15	11:00
4041-B	Molde licorera IL-4-01292 Peana	45	1:30	5:00	6:30
4041-C	Molde licorera IL-4-01292 positivo	39	0:00	3:00	3:00
5114-A	Molde centrifugado	31	1:15	4:15	5:30
5114-B	Molde centrifugado tapón	24	0:40	3:00	3:40
5114-C	Molde centrifugado positivo	31	0:00	1:15	1:15
6047-A	Prensa cuchara Base	114	1:30	5:00	6:30
6047-B	Prensa cuchara Cuerpo	47	2:00	5:45	7:45
6047-C	Prensa cuchara Pinza	122	2:15	6:45	9:00
6061-1-A	Molde prensa labrado Bulón	60	2:15	6:45	9:00
6061-1-B	Molde prensa labrado Tapón	25	0:45	2:30	3:15
6061-1-C	Molde prensa labrado Cuerpo	94	2:45	8:15	11:00
6061-1-D	Molde prensa labrado Tenaza	51	2:45	8:15	11:00
Totales		902	23:40	84:00	101:55
Promedios		60.1	1:34	5:13	6:47

Los tiempos de escaneado y modelado correlacionan: a mayor tiempo de escaneado, mayor tiempo de modelado se precisará.

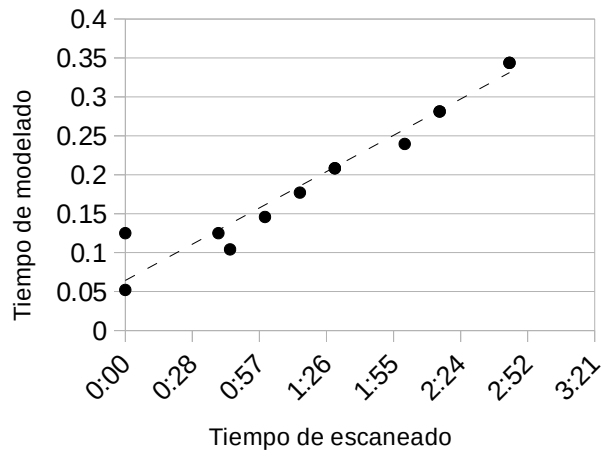


Figura 74: Relación entre tiempos de escaneado y modelado

7.1.3 Almacenamiento y seguridad

También se anotaron las necesidades de almacenamiento para cada pieza, de manera que fuese posible estimar los recursos necesarios en una posible toma posterior a mayor escala.

Los ficheros resultantes de aplicar el flujo de trabajo tienen este volumen:

Código	Descripción	Ficheros crudos CDM		Ficheros de salida		
		Nº de ficheros	Tamaño en MB	Tamaño en MB		
				OBJ ⁴	PLY binario	STL binario
3041-A	Molde rodado IL/3/01204 Cuerpo	119	418.0	181.0	26.9	65.6
3041-B	Molde rodado IL/3/01204 Peana	61	214.0	342.0	51.6	125.0
4041-A	Molde licorera IL/4/01292 Cuerpo	31	109.0	388.0	58.3	142.0
4041-B	Molde licorera IL/4/01292 Peana	24	84.4	321.0	49.2	119.0
4041-C	Molde licorera IL/4/01292 Positivo	31	109.0	99.8	36.0	87.7
5114-A	Molde centrifugado	39	137.0	132.0	21.1	50.1
5114-B	Molde centrifugado tapón	45	158.0	105.0	16.5	40.3
5114-C	Molde centrifugado positivo	39	137.0	50.6	32.6	46.5
6047-A	Prensa cuchara Base	114	401.0	74.4	15.1	27.9
6047-B	Prensa cuchara Cuerpo	47	165.0	59.3	12.3	22.7
6047-C	Prensa cuchara Pinza	122	429.0	274.0	41.7	101.0
6061-1-A	Molde prensa labrado Bulón	60	211.0	172.0	34.7	64.1
6061-1-B	Molde prensa labrado Tapón	25	88.0	46.7	9.5	17.6
6061-1-C	Molde prensa labrado Cuerpo	94	330.0	328.0	65.3	120.0
6061-1-D	Molde prensa labrado Tenaza	51	179.0	76.8	15.7	29.1
Totales		902	3169.4	2650.6	486.5	1058.6
Promedios		60.1	211.3	176.7	32.4	70.6

En cuanto a la seguridad, como ficheros digitales que son, los resultados del trabajo están expuestos a deterioro y copia no autorizada. Es conveniente, por ello, conservarlos cifrados y guardarlos de manera redundante, estando alojados en ubicaciones distintas y geográficamente distantes en previsión de desastres de todo tipo.

7.1.4 Optimización de recursos

En el flujo de trabajo del escaneado 3D, incluso en tareas exigentes como la alineación de nubes densas o la generación de texturas a partir del color de los vértices, no se ha alcanzado el 50% del uso de CPU. Muy por debajo, rondando el 15% de uso, estuvo la GPU en su momento de máximo uso, mientras que la RAM se mantuvo siempre por debajo de los 8GB de uso.

4 Junto con los ficheros de mapeo MTL y de textura JPG

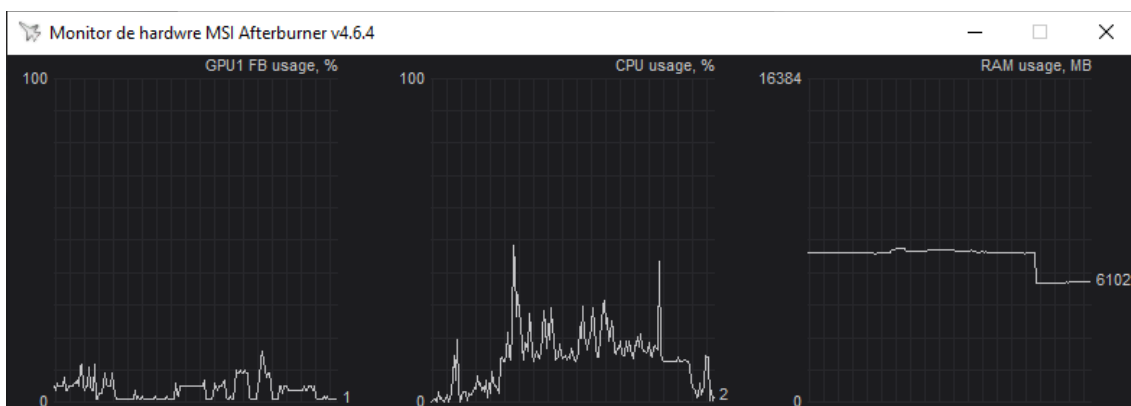


Figura 75: Monitorización de uso del hardware durante operaciones exigentes

Atendiendo a estos resultados, y para este software, vemos que el hardware empleado (ver capítulo 6.1.1.1.8. Equipo de procesado) excede las necesidades del trabajo.

Es de reseñar que las operaciones de escaneado y procesado pueden paralelizarse. El escaneado nos ha requerido una media de 1:34 horas, mientras que las tareas de procesado, una media de 5:13 horas. Por ello, para optimizar el tiempo, mientras una persona escanea una pieza, de una a tres personas podrían estar procesando las piezas anteriores.

7.2 Resultados de la comparativa

Código	Descripción	Nº de caras		Área media de la cara (mm ²)		Distancia (mm)	
		Escáner	Fotogram.	Escáner	Fotogram.	Media	Desv. Típica
3041-B	Molde rodado. Peana	2637998	261871	0.040	0.242	0.214	0.224
4041-B	Molde licorera. Peana	2516392	175590	0.049	0.415	0.148	0.222
5114-A	Molde centrifugado	1052020	206720	0.221	1.122	0.512	0.337
5114-B	Molde centrifugado. Tapón	6527.85	5592	0.008	0.216	0.220	0.248
6047-B	Prensa cuchara. Cuerpo	477213	80642	0.099	0.439	0.143	0.163
6061-1-A	Molde prensa labrado. Bulón	1346012	50848	0.024	0.435	0.143	0.212
6061-1-B	Molde prensa labrado. Tapón	369616	87316	0.043	0.158	0.184	0.284
6061-1-D	Molde prensa labrado. Tenaza	611524	114007	0.067	0.213	0.315	0.292
Promedios		1127162.9	122823.3	0.069	0.405	0.235	0.248

Se puede apreciar que el modelo generado por Fotogrametría está compuesto por triángulos con un área media casi seis veces mayor que en el caso del modelo generado por escáner 3D. Eso se traduce en modelos menos detallados, pero más ligeros para manejar y transmitir por la red.

Por otro lado, las diferencias entre las mallas son de una media de 0.235 mm. Teniendo en cuenta que la exactitud del escáner es de 0.22 mm (ver 6.1.1.1.1 Elección de la instrumentación), podemos decir que los resultados en la geometría obtenida por el método fotogramétrico son muy satisfactorios.

8 Presupuesto

Se estiman en este apartado los costes del trabajo realizado por este equipo, esto es, la digitalización de las piezas por el método de escaneado 3D.

8.1 Mano de obra

Los costes de mano de obra se calculan a partir de la revisión salarial de 2020 del Convenio Colectivo de Oficinas y Despachos de Asturias[10] y el propio Convenio del año 1997[11].

Para un graduado en Ingeniería Geomática, como titulado superior, asigna un salario mensual de 1779.85 € y 15 pagas. Aplicando la tasa de variación por el aumento del IPC del 6.6% correspondiente año 2022, obtenemos un salario mensual del 1897.32 €.

El sueldo bruto anual se calcularía del siguiente modo:

$$\text{Salario bruto} = 1897.32 \text{ €} \times 15 \text{ pagas} = 28459.80 \text{ €/año}$$

El coste de empresa podemos calcularlo incrementando el salario bruto en un 40% en concepto de pagos a la Seguridad Social:

$$\text{Coste de empresa} = 28459.80 \text{ €/año} + 28459.80 \times 40\% = 39843.72 \text{ €/año}$$

El coste diario lo calculamos dividiendo el coste de empresa entre el número de días laborables. En el año 2022 son 249.

$$\text{Coste diario} = \frac{39843.72}{249} = 160.01 \text{ €/día}$$

El coste por horas saldría de dividir este coste diario entre 8h:

$$\text{Coste por horas} = \frac{160.01}{8} = 20 \text{ €/h}$$

Así pues, conocido el tiempo de trabajo empleado para cada pieza, podemos estimar un coste global:

Código	Descripción	Tiempo total	Coste
3041-A	Molde rodado IL/3/01204 Cuerpo	9:00	180.00 €
3041-B	Molde rodado IL/3/01204 Peana	4:30	90.00 €
4041-A	Molde licorera IL-4-01292 Cuerpo	11:00	220.00 €
4041-B	Molde licorera IL-4-01292 Peana	6:30	130.00 €
4041-C	Molde licorera IL-4-01292 positivo	3:00	60.00 €
5114-A	Molde centrifugado	5:30	110.00 €
5114-B	Molde centrifugado tapón	3:40	73.33 €
5114-C	Molde centrifugado positivo	1:15	25.00 €
6047-A	Prensa cuchara Base	6:30	130.00 €
6047-B	Prensa cuchara Cuerpo	7:45	155.00 €
6047-C	Prensa cuchara Pinza	9:00	180.00 €
6061-1-A	Molde prensa labrado Bulón	9:00	180.00 €
6061-1-B	Molde prensa labrado Tapón	3:15	65.00 €
6061-1-C	Molde prensa labrado Cuerpo	11:00	220.00 €
6061-1-D	Molde prensa labrado Tenaza	11:00	220.00 €
Totales escaneado		101:55	2038.33 €

8.2 Materiales

En el apartado de hardware, hemos empleado el mencionado escáner Konica Minolta VI-910. Actualmente se encuentra descatalogado, por lo que se toma como referencia un instrumento con una exactitud similar, como puede ser el EviXscan Optima+ M, un escáner de luz estructurada con un valor de mercado de 25770 €.

Se aplica un periodo de amortización de 5 años y se calcula la cuota de amortización de la siguiente manera:

$$C_A = \frac{P_{compra}}{t_{amort}} \cdot t_{uso}$$

Siendo:

- C_A : Cuota de amortización
- P_{equipo} : Precio de compra del equipo
- t_{amort} : período de amortización.
- t_{uso} : tiempo de uso del equipo en el proyecto.

Además del escáner, se empleó un Equipo de procesamiento compuesto por ordenador y software, un sistema de Iluminación, compuesto por caja de luz y anillo de luz, y una plataforma giratoria. A todo ello se le aplica el mismo tratamiento, obteniendo los siguientes resultados:

	P_{compra} (€)	t_{amort} (años)	t_{uso} (jornadas)	C_A (€)
Escáner	25770.00 €	5	3	42.36
Ordenador	1184.25 €	5	13	7.14
Caja de luz	102.99 €	3	3	0.28
Anillo de luz	96.99 €	3	3	0.27
Conjunto focos	69.99 €	5	3	0.12
Plataforma giratoria	16.99 €	3	3	0.05
Geomagic Design X	2850.00 €	1	11	85.89
Coste total materiales				136.10 €

8.3 Otros gastos

Concepto	Precio mes	Unidades	Importe
Alquiler oficina + agua + luz	300.00 €	1	300.00 €

8.4 Resumen presupuesto

Concepto	Importe
Mano de obra	2038.33 €
Materiales	136.10 €
Alquiler de oficina + agua + luz	300.00 €
Beneficio industrial (16%)	395.91 €
Total Base imponible	2870.34 €
IVA (21%)	602.77 €
TOTAL	3473.11 €

9 Conclusiones

En ingeniería se aplican principios científicos para encontrar soluciones técnicas a problemas, siempre teniendo en cuenta el aspecto económico. Si bien el escaneado 3D asegura unas altas precisiones y una densidad de puntos superior, ciertos trabajos se pueden resolver por Fotogrametría sin la inversión económica que supone un escáner 3D y con una mejor calidad en las texturas.

Por otro lado, las dos técnicas no son excluyentes: es posible combinar la texturas resultantes de la Fotogrametría con los modelos del escáner 3D mediante el llamado *texture baking*.

El uso de software libre y, sobre todo, formatos abiertos reduce problemas de compatibilidad, permite el empleo de hardware no reciente y, en muchos casos, reduce costes.

9.1 Adquisición de datos

Tanto Fotogrametría como escaneado 3D tienen dificultades con objetos transparentes, especulares, emisores de luz, o de color negro o azul oscuro. En estos casos, hay soluciones parciales, que pasan por cubrir las superficies con una película opaca y de color claro. No son soluciones plenas porque alteran el color de las piezas. Si el objeto produce reflejos no especulares, también puede aplicarse iluminación con polarización cruzada, mejorando sustancialmente las texturas conseguidas.

Si la finalidad de los modelos es la impresión 3D, ingeniería inversa o la simple toma de medidas, pueden relajarse las exigencias en iluminación. Pero si el fin es la visualización, este campo es capital porque afecta directamente a la calidad de las texturas, especialmente en objetos con mucho contraste de color. Merece la pena invertir recursos y tiempo en cuidar el esquema de iluminación.

Además de las características de la superficie del objeto, hay que estudiar también la forma de las piezas. Así, con objetos alargados, procuraremos colocarlos de manera transversal al escáner y hacer coincidir el eje de giro con su eje longitudinal. Y siempre que sea posible, es recomendable desmontar los objetos en piezas para que el escáner acceda a todas sus partes.

El escáner de triangulación y la Fotogrametría tienen problemas con objetos con agujeros profundos y estrechos. En estos casos, hay que alejar en la medida de lo posible el objeto.

La configuración del escáner que más aprovecha sus características es con lente tele y distancias de toma cortas.

Es recomendable visualizar in situ la calidad de los datos obtenidos y cerciorarnos de que la totalidad de la pieza haya sido registrada.

9.2 Procesado y postprocesado

Se han obtenido texturas más homogéneas haciendo el trabajo de limpieza, alineación y fusionado con la nube de puntos y dejando el mallado como paso final.

El método de mallado que ha dado mejores resultados es el de voxelizado y posterior mallado triangular.

Conocer a fondo el software es una parte central del trabajo de digitalización. Por ello, sobre todo si éste es de alquiler, hay que tener en cuenta y presupuestar un tiempo destinado a la formación. Las alternativas en software libre nos permiten tiempo ilimitado de estudio.

Es aconsejable estudiar los recursos que consume cada fase, de manera que podamos ajustar el hardware a las necesidades. Así, es mejor invertir en tres máquinas que puedan trabajar en paralelo que en una que supere las necesidades del método.

10 Futuras líneas de investigación

- NeRF: aplicación de las redes neuronales a la reconstrucción tridimensional de objetos.
- Combinación de escaneado 3D y Fotogrametría: *texture baking*.
- Retopologización de mallas para optimizar la visualización.

11 Bibliografía

- [1] B. Curless, «From range scans to 3D models», *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 33, n.º 4, pp. 38-41, nov. 1999, doi: 10.1145/345370.345399.
- [2] J. C. Rico, G. Valiño, P. Fernández, P. Zapico, D. Blanco, y S. Mateos, «Adjustment recommendations of a conoscopic holography sensor for a reliable scanning of surfaces with roughness grades obtained by different processes», *Precis. Eng.*, vol. 42, pp. 335-345, oct. 2015, doi: 10.1016/j.precisioneng.2015.04.011.
- [3] M. Ebrahim, «3D laser scanners: History, applications, and future», *Assiut Univ.*, oct. 2014, doi: 10.13140/2.1.3331.3284.
- [4] Department of Geology, Faculty of Geography and Geology, Alexandru Ioan Cuza University of Iași, 20A Carol I Blv., 700505 Iași, Romania, A.-I. Apopei, N. Buzgar, A. Buzatu, A.-E. Maftai, y L. Apostoae, «Digital 3d models of minerals and rocks in a nutshell: enhancing scientific, learning, and cultural heritage environments in geosciences by using cross-polarized light Photogrammetry», *Carpathian J. Earth Environ. Sci.*, vol. 16, n.º 1, pp. 237-249, 2021, doi: 10.26471/cjees/2021/016/170.
- [5] 3D Systems, Inc, «Geomagic Design X User Guide». 30 de noviembre de 2013.
- [6] M. Wagner, U. Labsik, y G. Greiner, «Repairing non-manifold triangle meshes using simulated annealing», *Int. J. Shape Model.*, vol. 09, n.º 02, pp. 137-153, dic. 2003, doi: 10.1142/S0218654303000085.
- [7] C. I. Shchurova, «A methodology to design a 3D graphic editor for micro-modeling of fiber-reinforced composite parts», *Adv. Eng. Softw.*, vol. 90, pp. 76-82, dic. 2015, doi: 10.1016/j.advengsoft.2015.07.001.
- [8] P. J. Besl y N. D. McKay, «Method for registration of 3-D shapes», Boston, MA, abr. 1992, pp. 586-606. doi: 10.1117/12.57955.
- [9] D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, y P. Krsek, «The Trimmed Iterative Closest Point algorithm», en *Object recognition supported by user interaction for service robots*, Quebec City, Que., Canada, 2002, vol. 3, pp. 545-548. doi: 10.1109/ICPR.2002.1047997.
- [10] Consejería de Industria, Empleo y Promoción Económica del Principado de Asturias, *Actualización de las tablas salariales para el año 2020 del Convenio Colectivo del sector de Oficinas y Despachos*. p. 3. Accedido: 24 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://sede.asturias.es/bopa/2020/03/12/2020-02048.pdf>
- [11] Dirección Provincial de Trabajo, Seguridad Social y Asuntos Sociales del Principado de Asturias, *Convenio Colectivo de Oficinas y Despachos de Asturias de ámbito Autonómico*. pp. 15-20. Accedido: 24 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://sede.asturias.es/bopa/1997/08/12/19970812.pdf>
- [12] Konica Minolta, «Non-contact 3D digitizer VIVID 910/VI-910 Instruction Manual». 2001. Accedido: 9 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/3d/pdf/vivid-910_vi-910_instruction_eng.pdf