



**Centro de Investigaciones Ópticas**  
*Más de 35 Años de Investigación en Ciencia y Tecnología*

CONICET  
LA PLATA



**CIC**  
COMISIÓN DE  
INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

# Mu $\triangleright$ 3D

SISTEMA 3D PARA MUSEOS

**LABORATORIO DE ABLACIÓN, LIMPIEZA Y RESTAURACIÓN CON LÁSER**

**Parte 1:**

**El registro 3D. Aplicaciones y Técnicas**

# IMPACTO DE LAS TECNOLOGÍAS FOTÓNICAS Y LAS TICS EN LOS BIENES CULTURALES



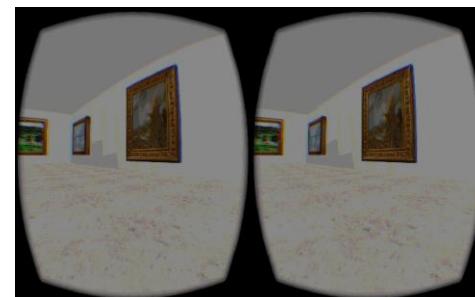
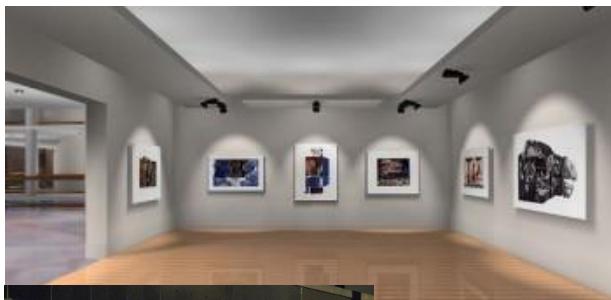
Sistemas informáticos para inventariado, catálogo y difusión



Registro 3D



Investigación y Técnicas de conservación y restauración



Realidad Virtual



Museos virtuales e interactivos



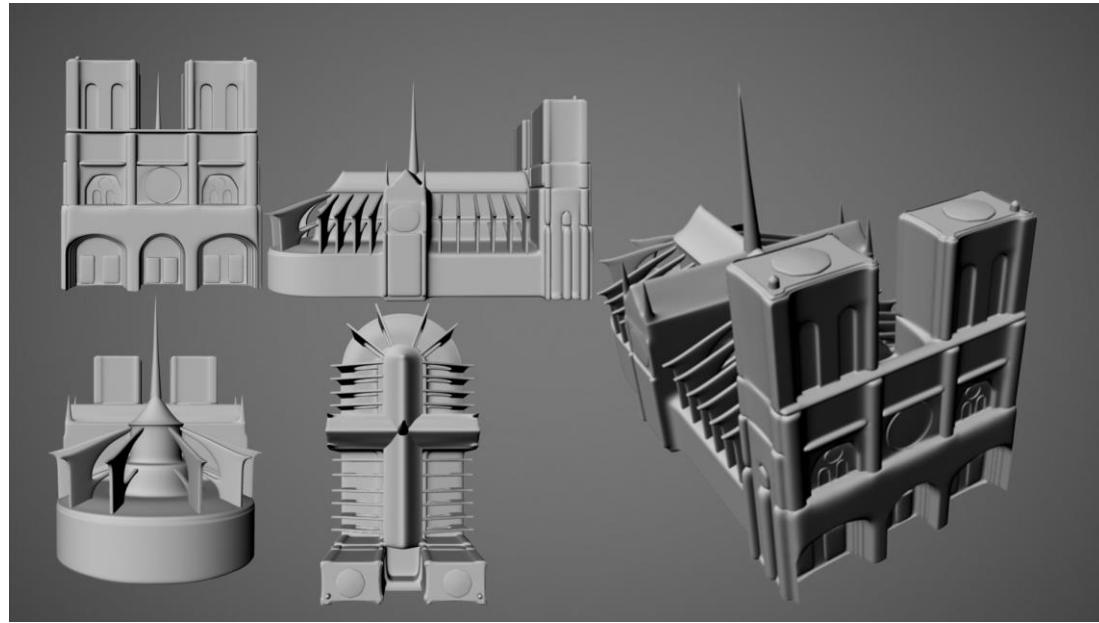
Realidad Aumentada



Creación de la obra de arte



## Modelado 3D



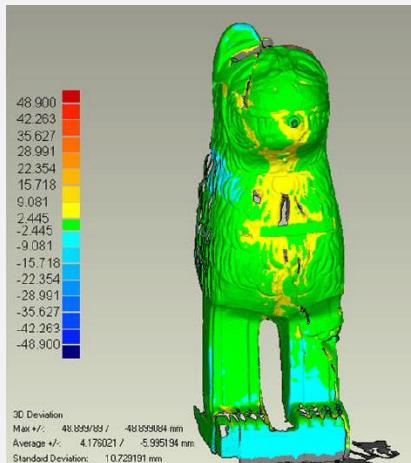
## Registro 3D



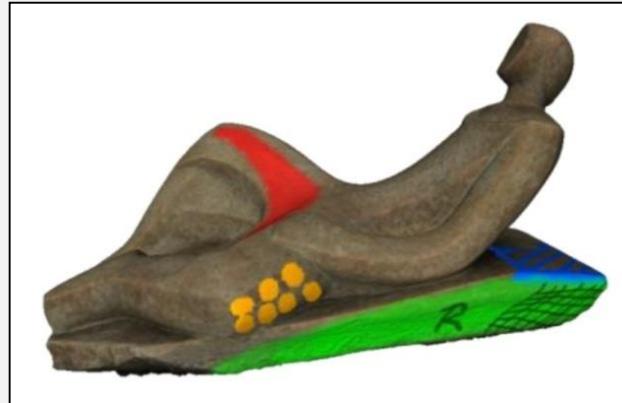
Adquisición de imágenes 3D. Registrar la apariencia del objeto, textura, color, proporciones reales.

# Algunas aplicaciones de los registros 3D

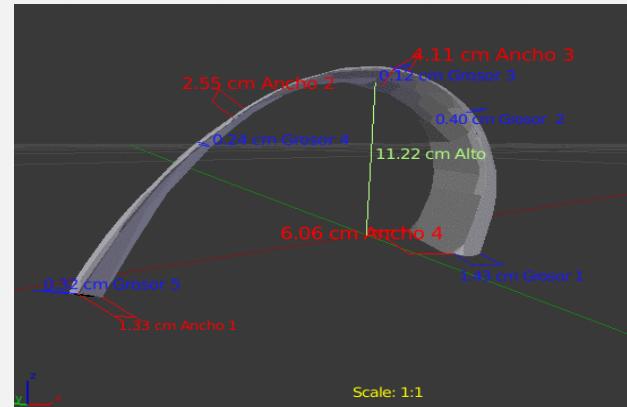
## Investigación, Conservación y Documentación



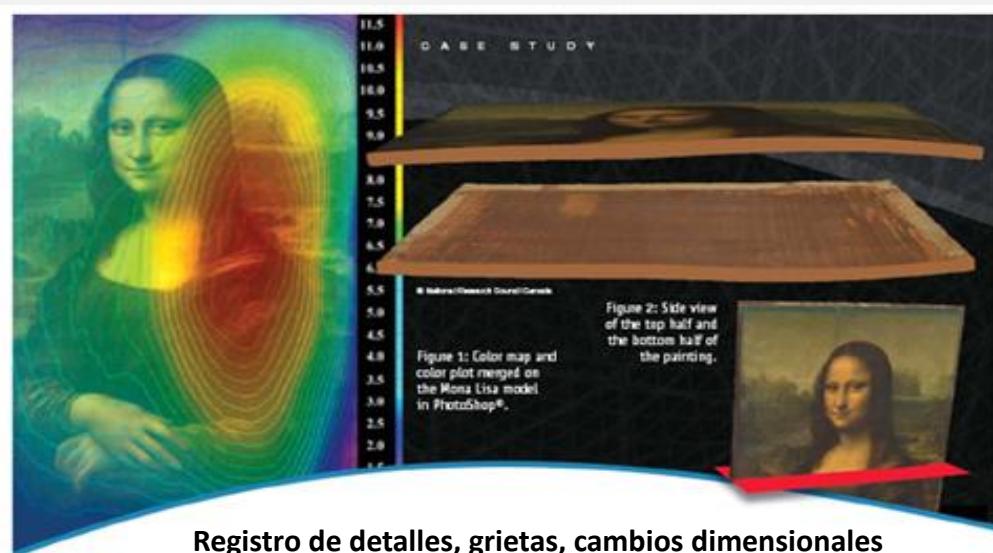
Registro de pérdida o ganancia de volumen



Mapas de deterioro



Obtención de medidas reales sobre el modelo



Registro de detalles, grietas, cambios dimensionales



Arqueología

# Algunas aplicaciones de los registros 3D

## Restauración virtual

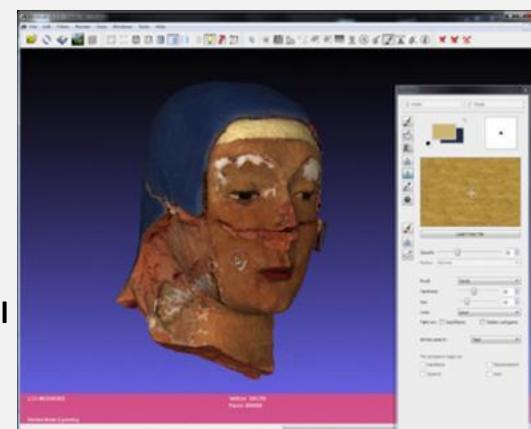


Simulaciones de reconstrucción por fragmentos

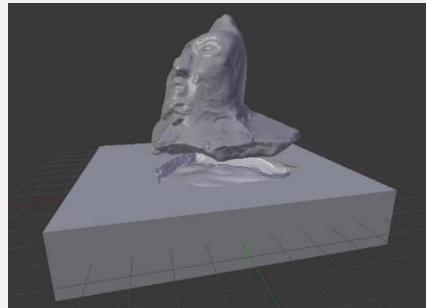


Simulaciones de elementos perdidos o sustituciones de piezas

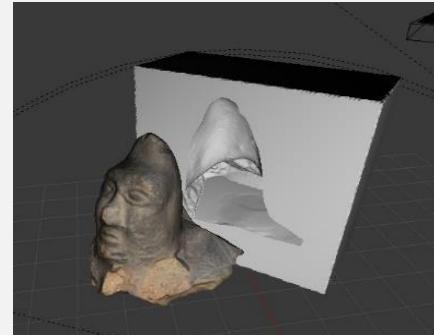
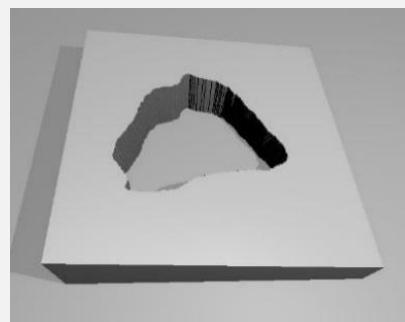
Retoque pictórico virtual



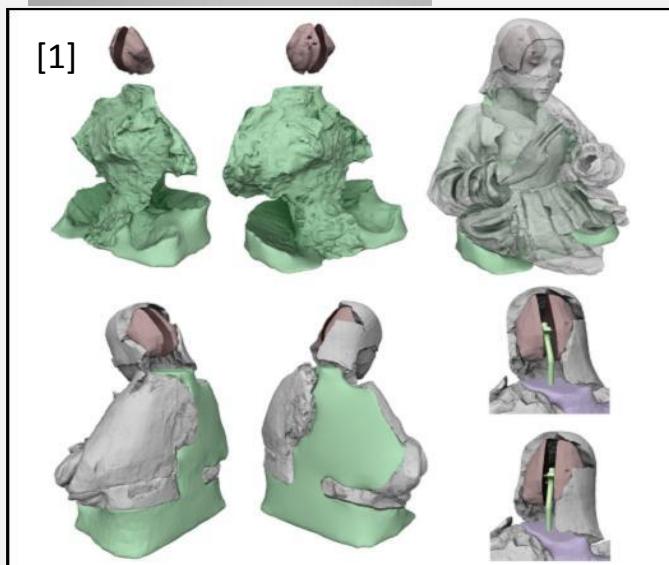
# Embalaje y exhibición



Diseño de soportes y contenedores



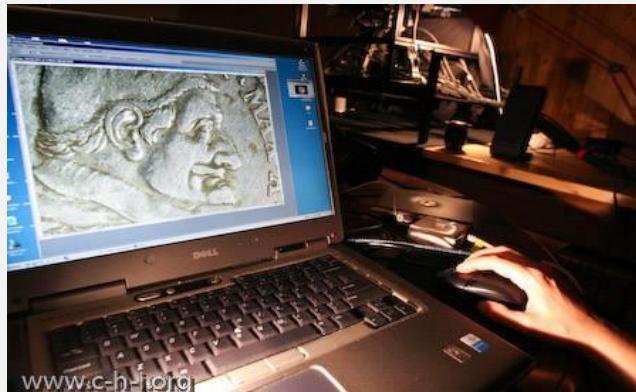
Diseño de réplicas



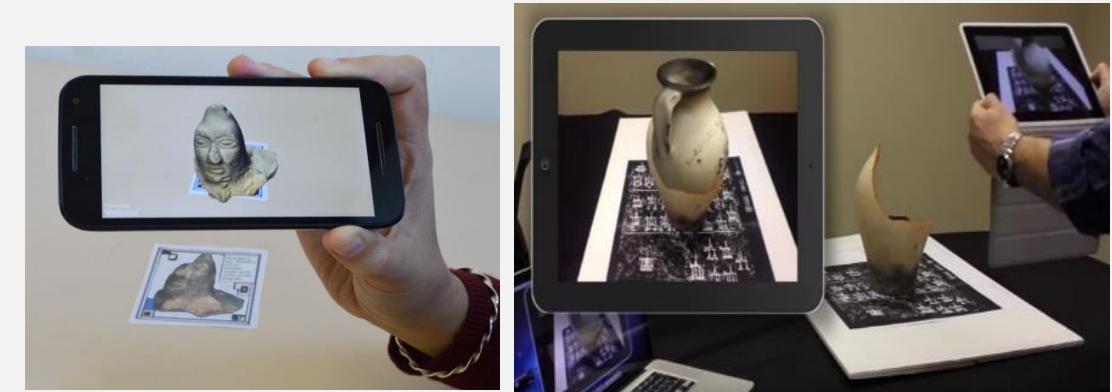
[1] Arbace et al. "Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue," *J. Cult. Herit.*, vol. 14, no. 4, pp. 332–345, 2013.

# Algunas aplicaciones de los registros 3D

## Difusión y Entretenimiento



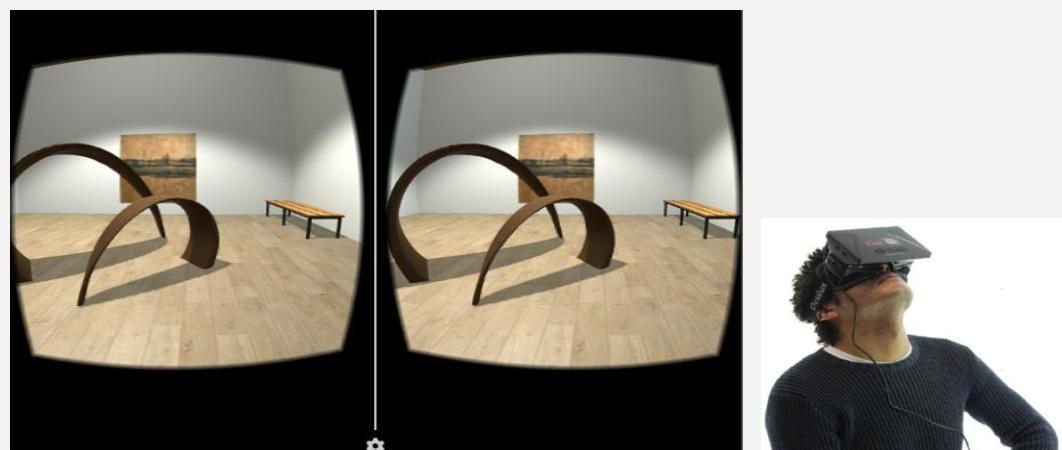
Acceso a las colecciones en formato 3D  
(investigadores, público general, estudiantes)



Incorporación de registros 3D en aplicaciones de Realidad Aumentada y Realidad Virtual



Tours y museos virtuales



# REGISTRO 3D y TICs EN BIENES CULTURALES EN ARGENTINA

## Técnicas tradicionales de documentación

DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA	
Antes	Después
	
<b>FORMA:</b> CANTARO <b>PROCEDENCIA:</b> ICA Sociedad o Estilo: CHINCHA Dimensiones: HM 31 cm DM 31 cm N° de Inventario: Colección Ica-Pajonal Caja 2 Otros Números: <b>DE DESCRIPCIÓN</b> Técnica de Manufactura: Enrollado Acabado: Pulido Tosco Decoración: Franjas Moteadas Diseños: Bandas / Franjas Colores: Rojo-Crema-Blanco-Negro <b>ESTADO DE CONSERVACIÓN</b> Tratamientos Anteriores: Ninguno Fragmentado: si / N° de Fragmentos: / % de Faltantes: /59.45 Despostillado: SALES: si Escarificación: si / Exfoliación: si / Pulverulencia: si / Desconchamiento: / Pérdida de la capa pictórica: si / Desfasamiento: / Fisuras: / Grietas: /no	

Ficha técnica

Registro insuficiente de las dimensiones o del estado de conservación.

No se adaptan a otras áreas del museo.

Museo virtual entendido como página web con fotos y no como interactivo.

SeNIP (Servicio Nacional de Inventarios de Patrimonio)

Pocos museos experimentaron con el registro 3D.  
**Falta de trabajo sistemático.**



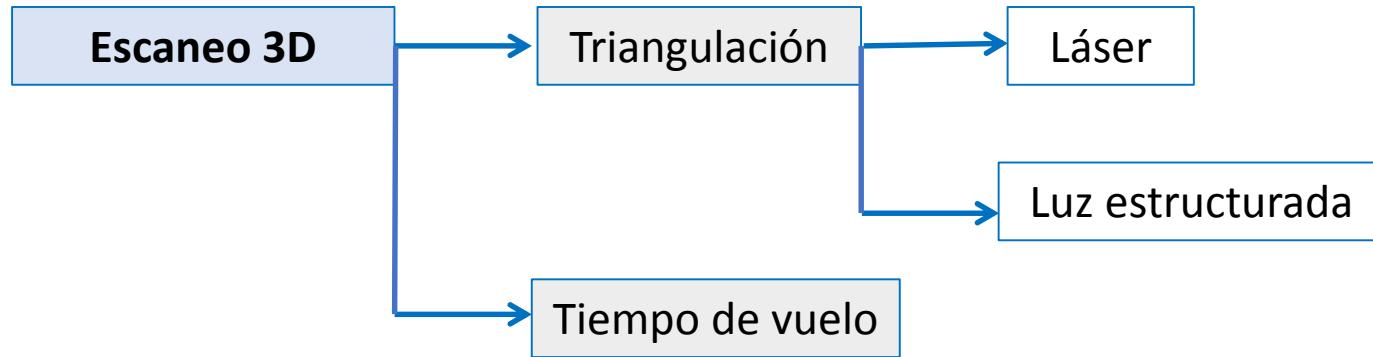
Visualización del recorrido virtual de "Argentina Virtual"

**Falta de recursos tecnológicos**

**Falta de trabajo interdisciplinario**

- Formación tradicional del conservador/restaurador
- Falta de articulación entre el complejo científico-tecnológico argentino y los museos

## TÉCNICAS DE REGISTRO Y PROCESAMIENTO 3D

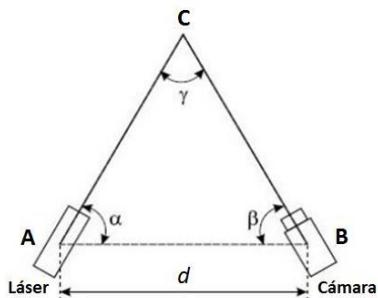


**Reflectance Transformation Imaging  
(RTI)**

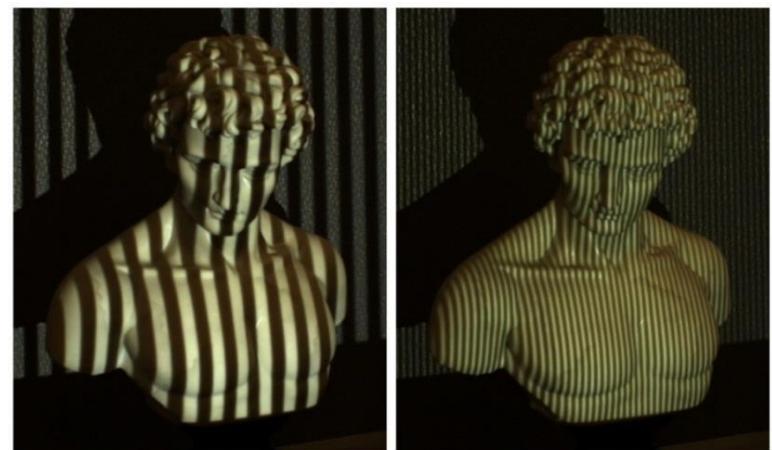
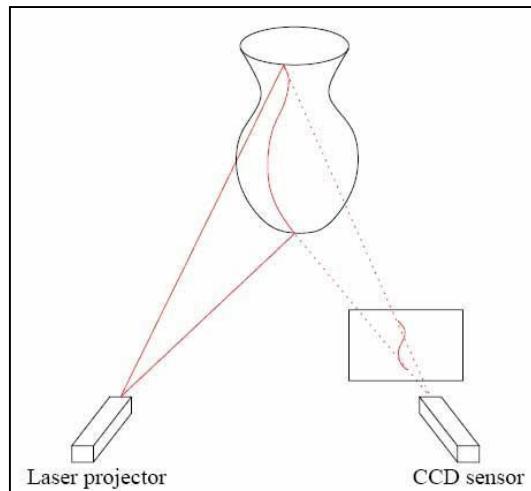
Resultado 2D. Interpretación 3D

## TÉCNICAS DE REGISTRO Y PROCESAMIENTO 3D

### Escáneres 3D



Principio de triangulación del escáner láser



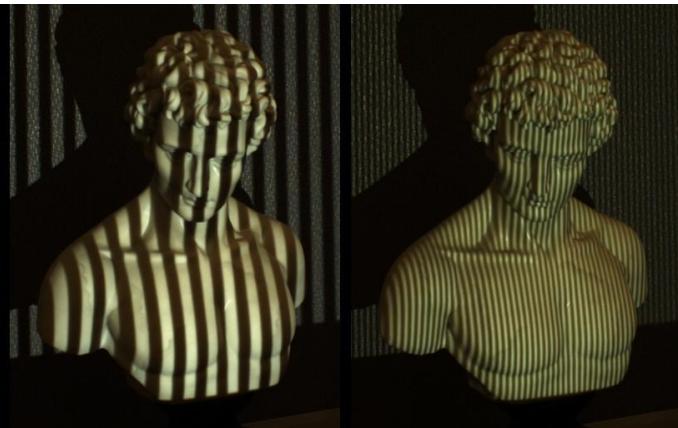
Proyección de patrón bidimensional de luz no coherente.

### Mercado de escáneres 3D para objetos en la escala métrica:

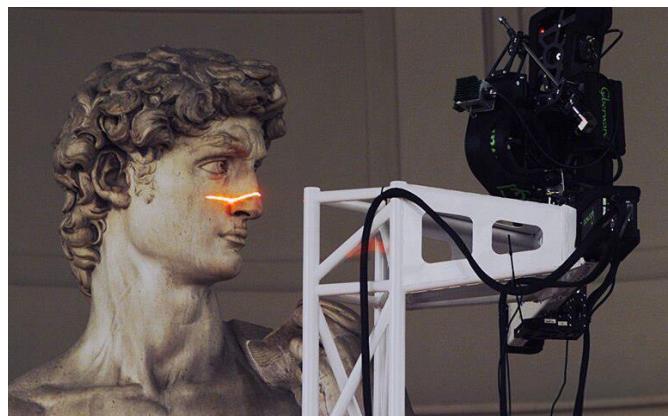
Escáneres de bajo costo: entre USD 200 – USD 500..... Resolución entre 2 mm - 0.5 mm

Escáneres compactos: entre USD 2.000 a USD 15.000..... Resolución entre 500 µm - 100 µm

Escáneres de alta resolución: desde USD 15.000 a USD 140.000..... Resolución entre 100 µm - 15 µm



Escáner de luz estructurada



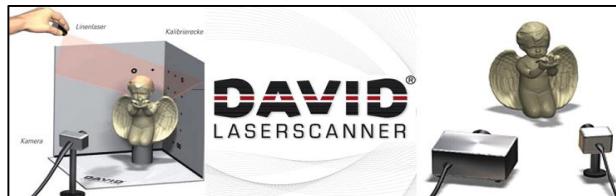
Escáneres láser



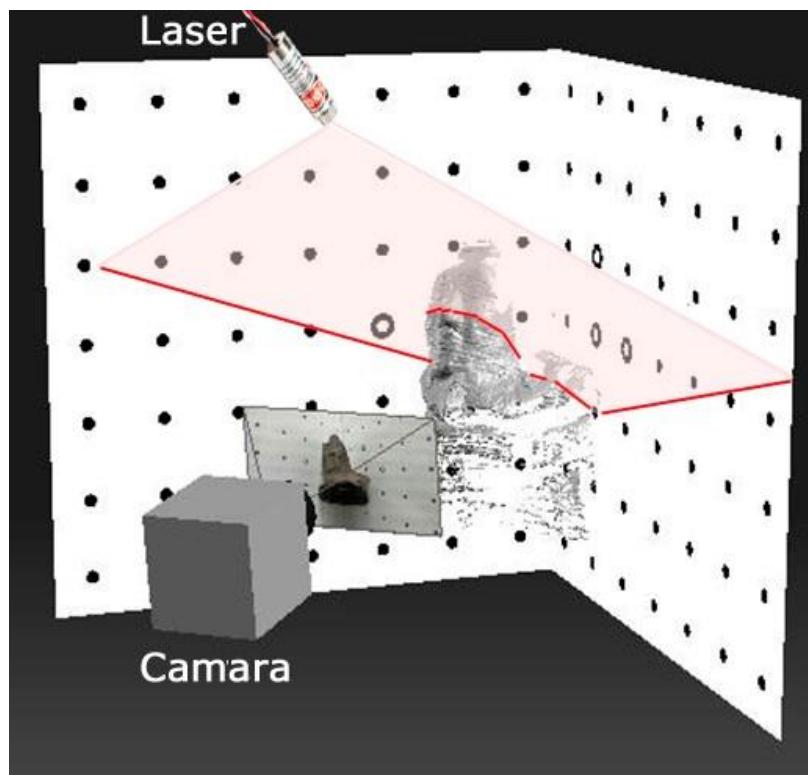
LIDAR (*Light Detection And Ranging*)

Escáneres manuales

# Sistema de escaneo láser



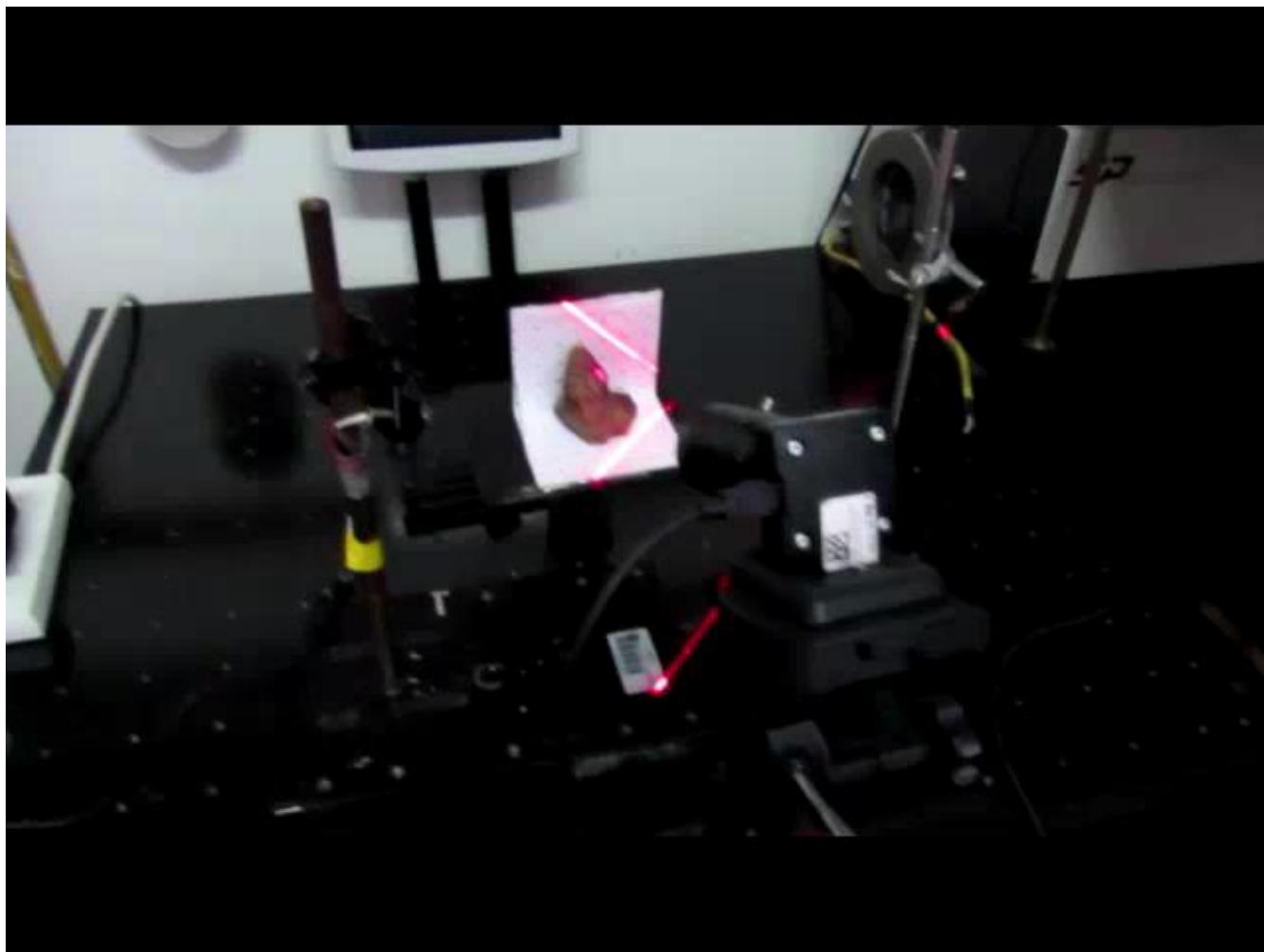
Consiste en proyectar una línea láser sobre un objeto y moverla en una dirección, mientras una cámara va registrando la deformación de esa línea reflejada en el objeto, a medida que se va desplazando. Un software interpreta estas deformaciones en forma de coordenadas 3D y se genera la imagen tridimensional.



## SETUP

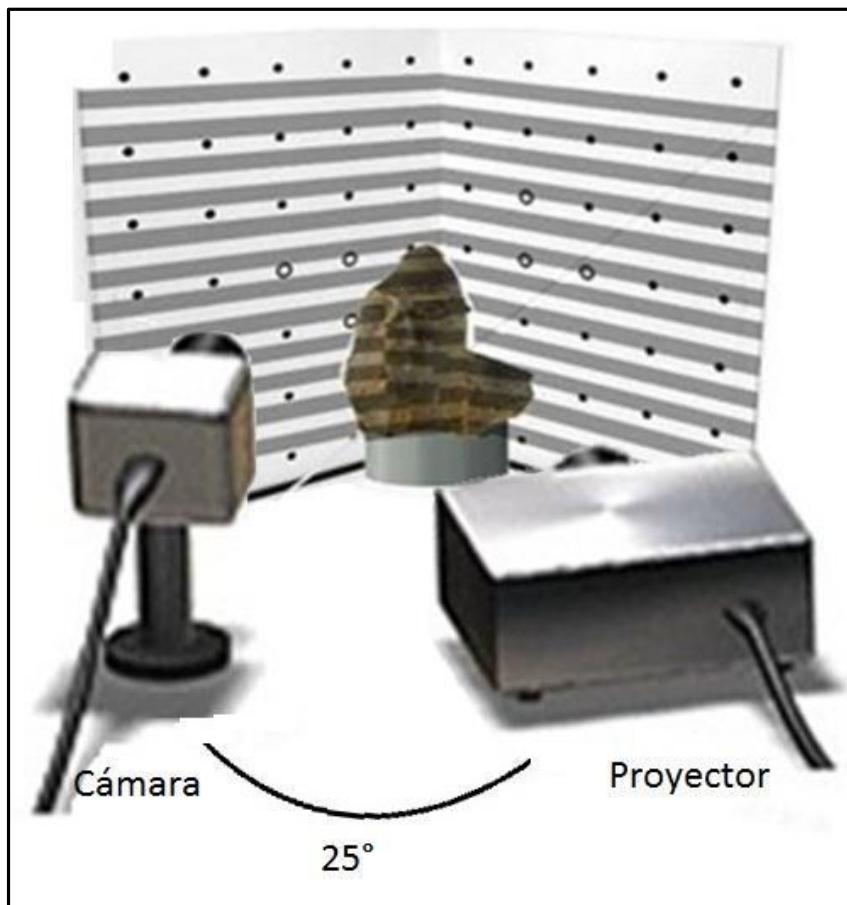
- 32-bit, Intel® Core™2 Duo CPU T5870 @ 2.00GHz y 2Gb RAM.
- Objeto posicionado a 20 cm de distancia de la cámara
- Láser de diodo de 5 mw de emisión continua en 650 nm.
- Línea láser de 0.5 mm, bien definida
- Paneles de calibración a 90°, Método Tsai
- Cámara Thorlabs 1645c, 1280x1024 px
- 10 fps
- Ángulo de intersección entre el haz del láser y el eje de la cámara: 30°.
- Barrido con motor paso a paso de 2,5  $\mu$ m de resolución
- Objeto rotado en pasos de 15° para cada nuevo barrido
- 25 escaneos. 5 min de duración cada uno
- Alineamiento y fusión utilizando correspondencia de puntos en Software David.

(Video)



## Sistema de escaneo de luz estructurada

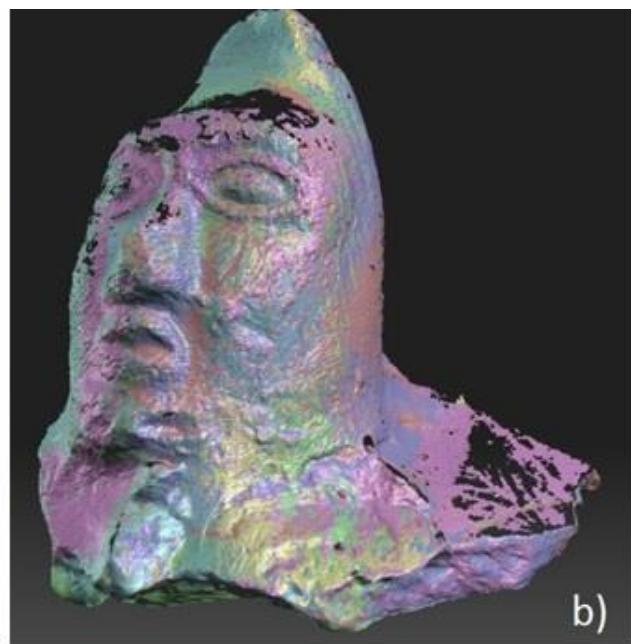
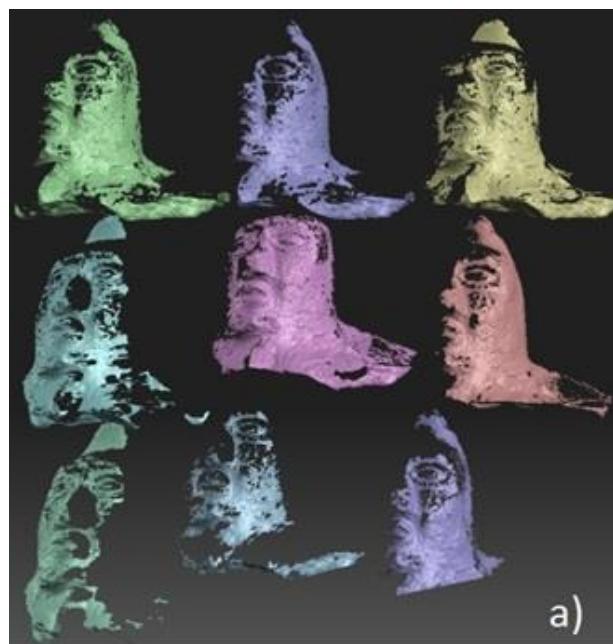
Utiliza un proyector en vez de una fuente láser y se proyecta sobre el objeto un patrón de luz con una secuencia binaria (por ejemplo rayas blancas y negras) que, generalmente se desplaza linealmente. Una cámara captura las imágenes del patrón de franjas, para cada posición sobre el objeto. Un software adecuado procesa los datos y proporciona una imagen 3D del objeto



### SETUP

- Paneles de calibración a 90°, Método Tsai
- Cámara Thorlabs 1645c, 1280x1024 px
- 10 fps
- Proyector Epson PowerLite 52c de 1200 lm.
- Ubicado a la derecha de la cámara. Ángulo de intersección: 25°.
- Objeto posicionado a 20 cm de distancia de la cámara y proyector
- Método de desplazamiento de fase. 58 patrones proyectados, 1 s entre cada proyección.
- Objeto rotado en pasos de 15° para cada nuevo barrido
- 26 escaneos.
- Alineamiento y fusión utilizando correspondencia de puntos en Software David.

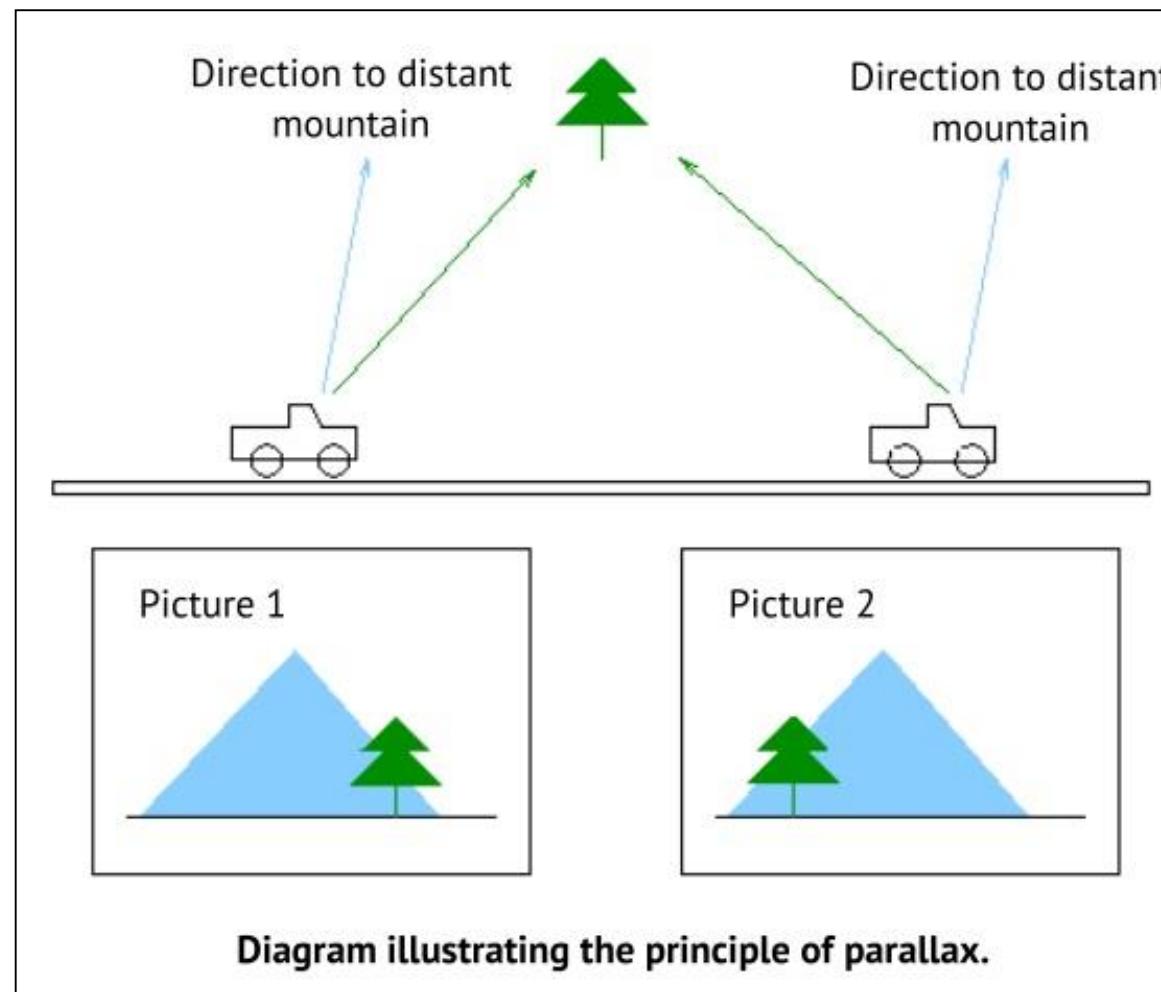
## Resultados con técnica de escaneo



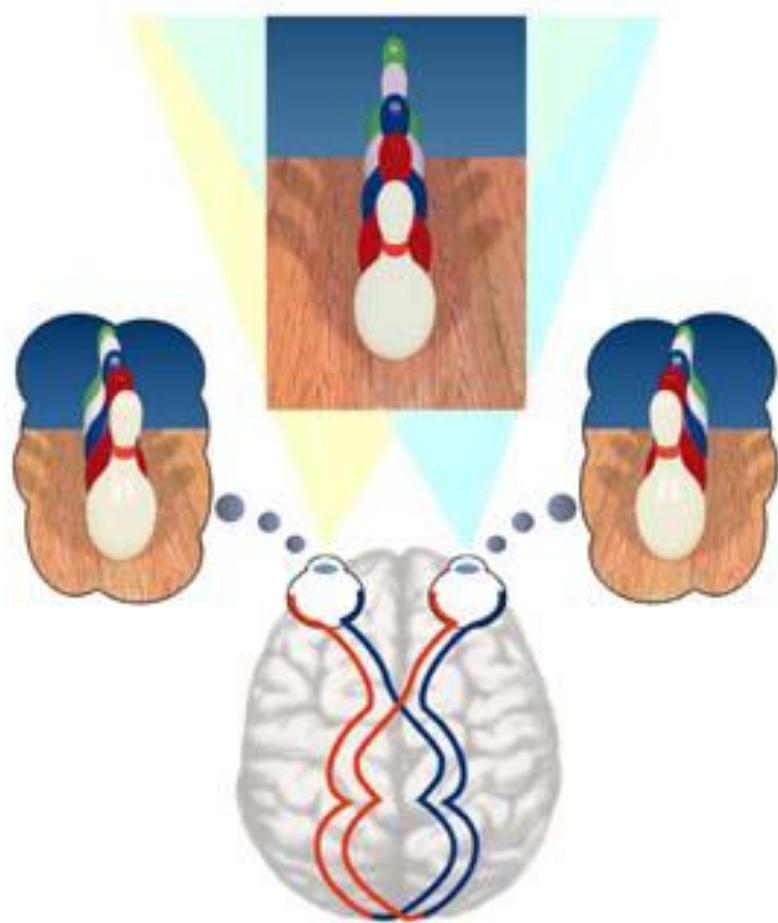
Nubes de puntos o mallas en formatos generalmente OBJ o PLY, dependiendo de la marca del scanner utilizado.

El color puede ser adquirido durante el barrido, generalmente son escáneres costosos que obtienen puntos RGB o que también sacan fotos y las superponen a las mallas. O puede ser colocado después de la adquisición, manualmente, como textura (proyección de la fotografía sobre la malla)

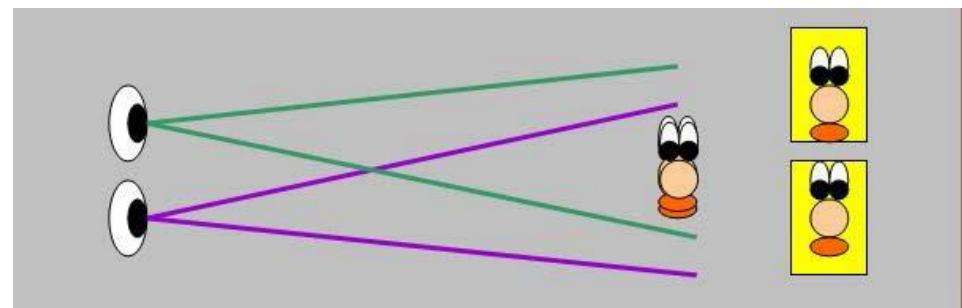
## Paralaje y fotogrametría estéreo



## La Fotogrametría. Fundamentos



Estereoscopio  
de Holmes



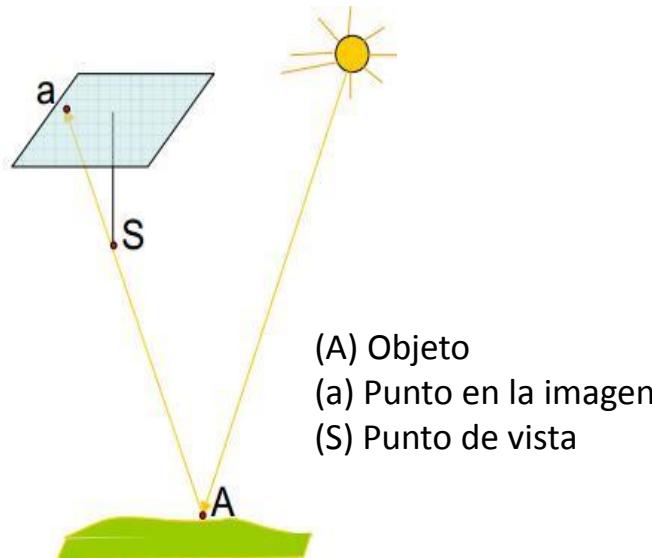
**La fotografía estereoscópica tradicional**  
consiste en el crear una ilusión 3-D a  
partir de un par de imágenes 2D.

# Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica **para obtener información geométrica** de objetos o escenas, (posición, tamaño y forma) **a partir de dos o más fotografías**, tomadas en diferentes posiciones.



## Proceso de un registro fotográfico



## Proceso de reconstrucción de la superficie del objeto

**Se calcula A:**

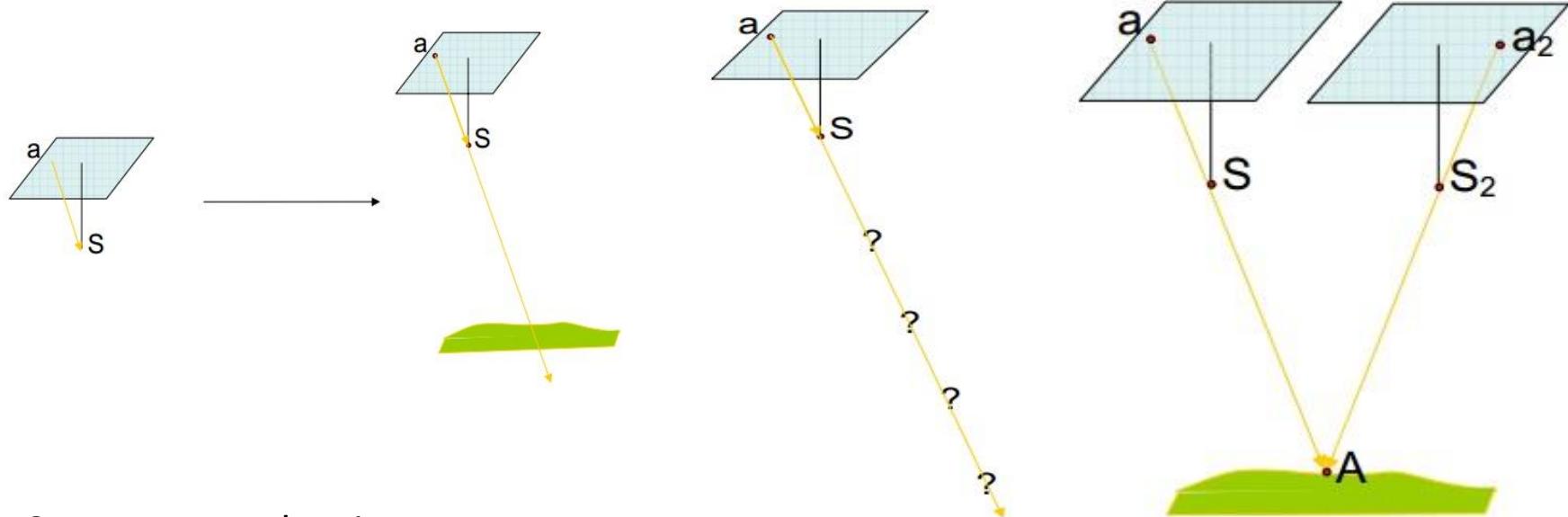
**Se necesita información de los parámetros intrínsecos de la cámara.**  
**(Calibración de la cámara)**

**Se calcula a:**

conocidos

**A**  
**S**  
**geometría y**  
**orientación de la**  
**cámara**

## ¿Por qué se requieren al menos dos fotografías para generar una imagen 3D?



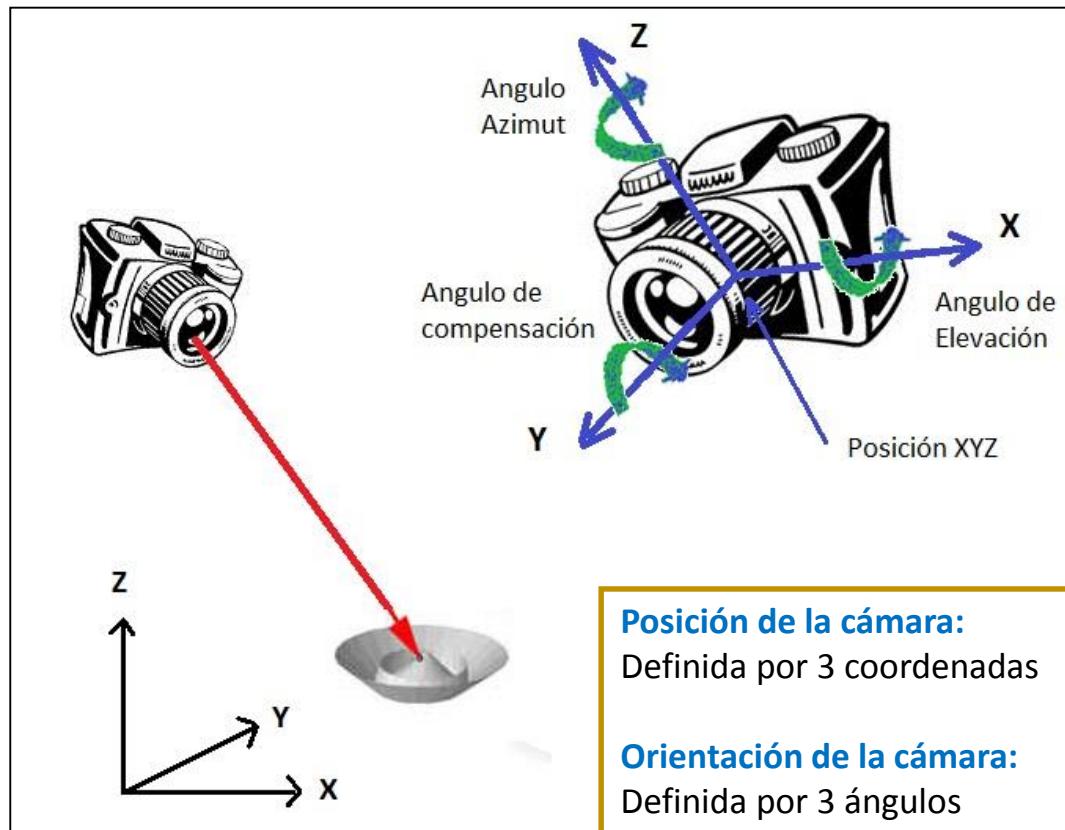
Con una sola imagen no sabemos en qué posición de ese haz se encuentra el punto real del objeto.

**Este procedimiento se denomina:  
TRIANGULACION**

Con dos imágenes la posición de un punto en 3D se puede determinar como la intersección de los dos rayos de proyección. De este modo se recupera la información de profundidad.

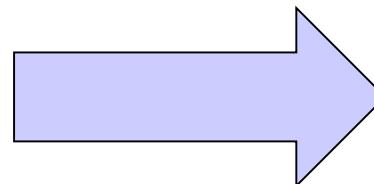
## Orientación externa:

Reconstrucción de la posición y orientación del haz perspectivo respecto del objeto.



**La RESECCIÓN** es el proceso de recuperación de la orientación externa de una fotografía a través de mediciones de imagen de **los puntos de control en tierra**.

- Calibración de la cámara
- Triangulación de los puntos clave
- Resección de las imágenes

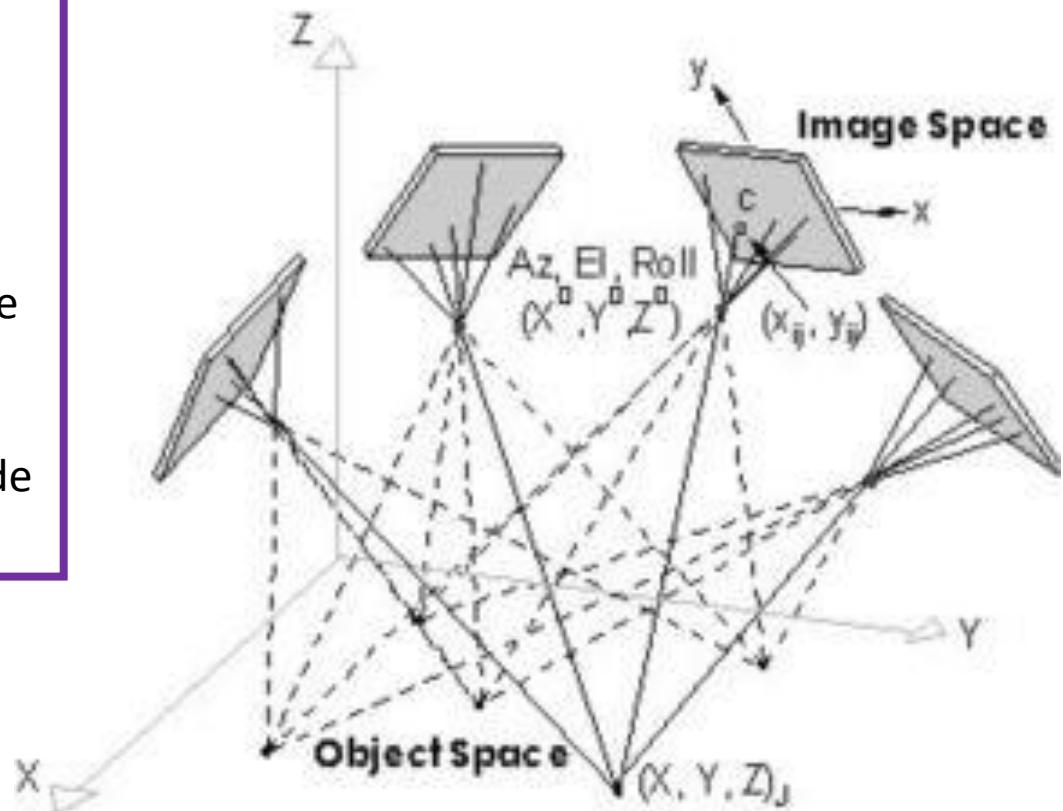


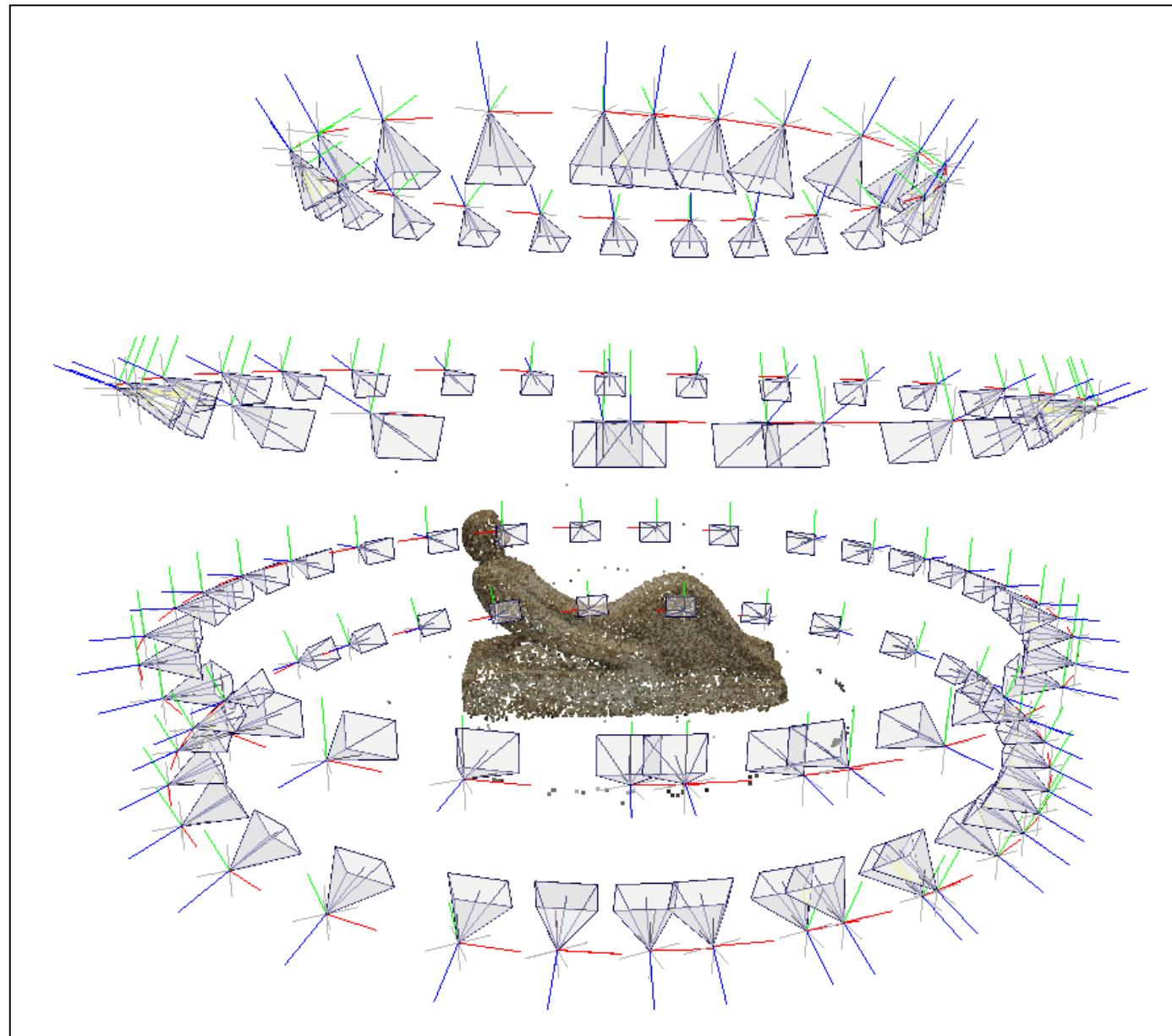
### Ajuste total

*(Bundle adjustment)*  
Produce las coordenadas  
XYZ finales.

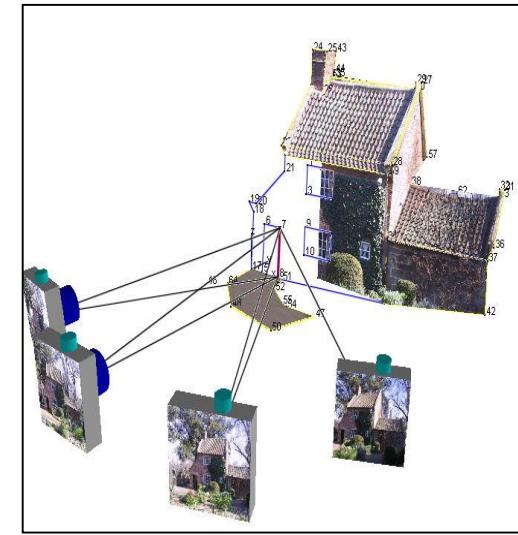
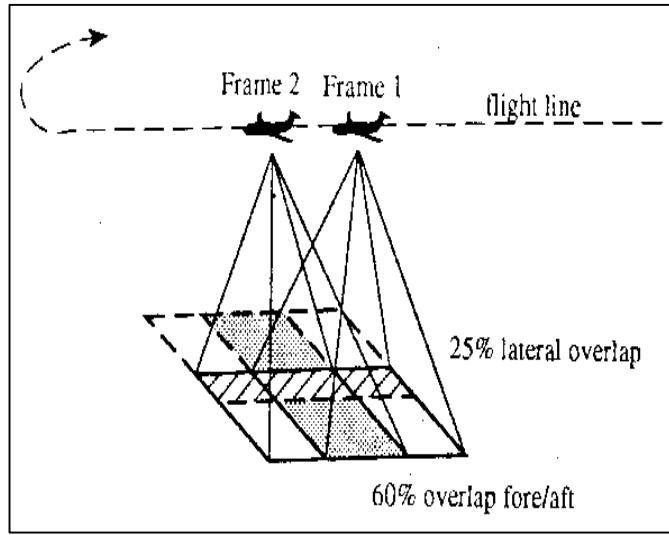
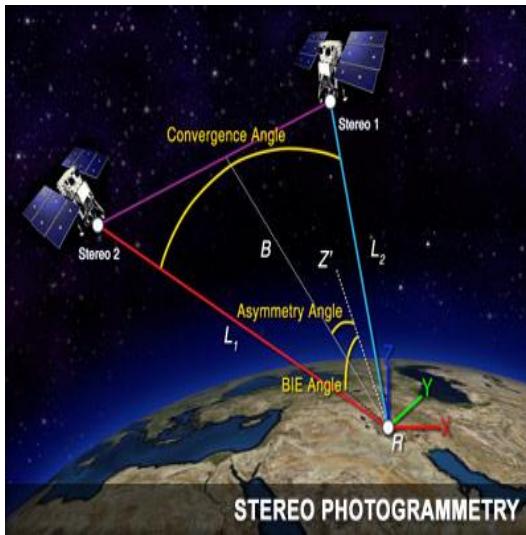
### Resultados:

1. Coordenadas XYZ para cada punto
2. Coordenadas XYZ y 3 ángulos de apuntamiento para cada imagen.
3. Los parámetros de calibración de la cámara.

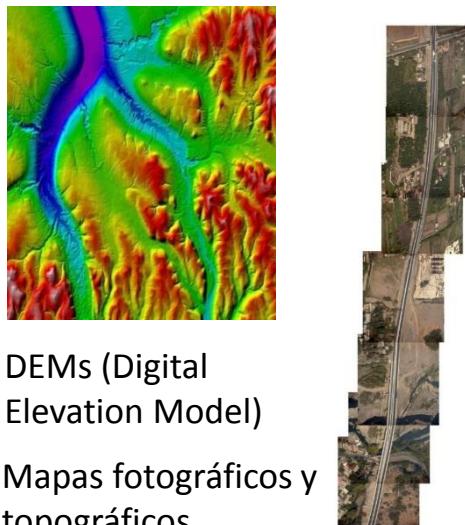
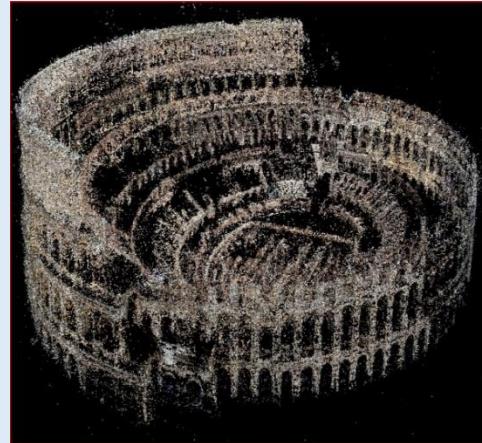




# Tipos y resultados de la Fotogrametría



## Fotogrametría de Visión computacional: Structure from Motion (SfM)



Los puntos están definidos por coordenadas XYZ y por valores RGB que permiten restituir la textura original de las fotografías.

- 1) Scale-invariant feature transform (SIFT)  
(Lowe, 1999)
- 2) Multicore Bundle Adjustment (Wu et al. 2011)
- 3) Multi-View Stereo (CMVS y PMVS2)  
(Furukawa et al., 2010)

Nubes de Puntos 3D

## **Ventajas de Structure from Motion frente a la fotogrametría tradicional**

- Auto-calibración
- Alineamiento de imágenes posicionadas al azar
- Detección de características automáticamente en minutos

## Reflectance Transformation Imaging

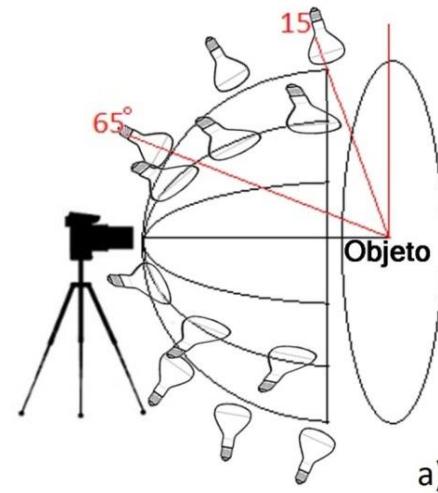
Técnica que brinda imágenes en 2 dimensiones con información sobre relieves, craquelados, fisuras y texturas. Se utiliza principalmente para la documentación de escritos, pinturas, frisos y relieves.

La técnica consiste en tomar imágenes del objeto con una cámara fija, y colocar una fuente de luz en diferentes posiciones para cada toma

### Registro RTI de pieza de hueso precolombina (calota craneana)

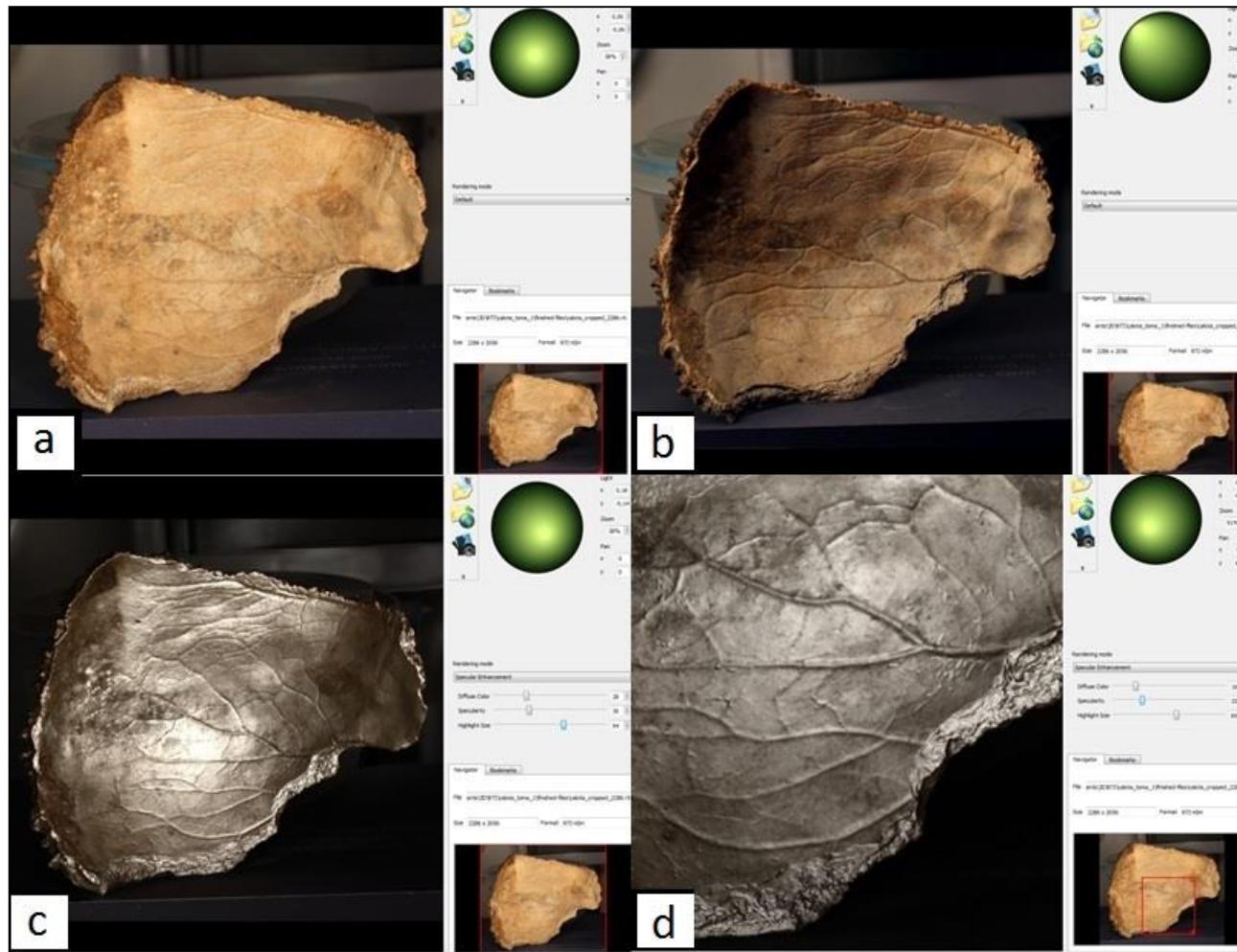
**Materiales:**

- Cámara Canon EOS Rebel T2i, f/5.6, ISO 200, Distancia focal 27mm. Imágenes 5184 x 3456 px RAW
- Lámpara incandescente
- 2 esferas reflectantes negras



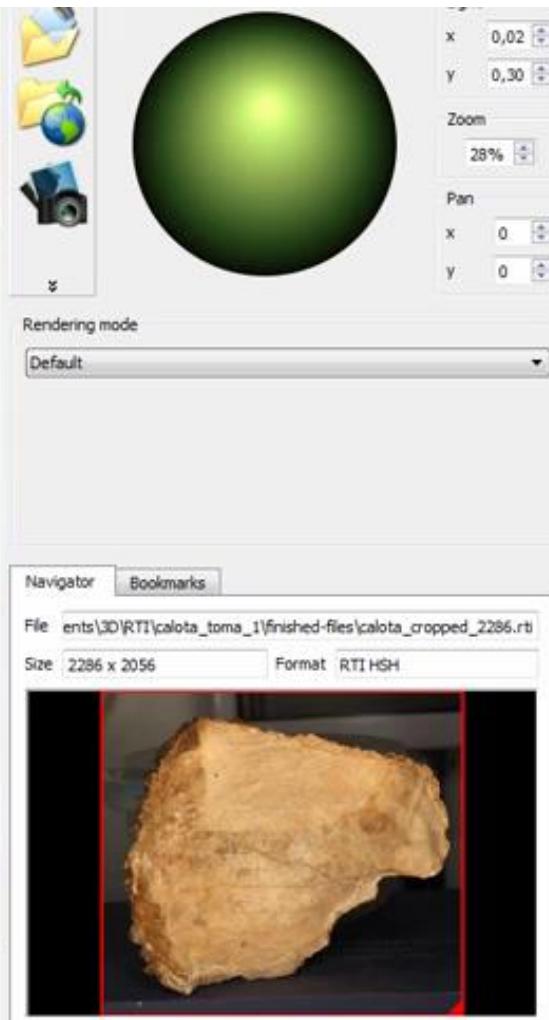
a) Configuración de la posición de la cámara y la fuente de luz respecto al objeto. Los ángulos de inclinación de la luz respecto al centro de la cámara fueron entre 65° y 15° aproximadamente. b): Disposición de las esferas reflectantes respecto al objeto.

# Resultados con Reflectance Transformation Imaging



Visualización de una imagen RTI. La esfera verde indica la dirección de iluminación. a) Calota precolombina iluminada frontalmente. b) Calota iluminada desde izquierda superior. c) Aplicación de filtro especular con iluminación frontal. d) Detalle con zoom. En el recuadro amarillo se indica una zona con marcas de golpes ocasionados por algún elemento punzante.

(Video)





**Parte 2:**

**La fotogrametría digital**

**y el sistema Mu>3D**



SISTEMA 3D PARA MUSEOS

Sistema de registro 3D basado en fotogrametría digital con *Structure from Motion*, utilizando software libre e instrumental de bajo costo.

**Escala de aplicación: objetos de tamaño submétrico**

#### Cámara fotográfica standard

- Tamaño de la imagen: 10 Mpx.
- Mantener distancia focal fija
- Alta profundidad de campo.

#### Software de Structure from Motion y de procesamiento de imágenes 3D

#### Computadora

##### Memoria RAM:

Mínimo: 8 Gb Recomendado: 16 Gb.

##### Placa de video para procesar gráficos 3D:

Mínimo: nVidia modelo de serie GTX 760. Recomendado: nVidia modelo de serie GTX 900 o 1000.

##### Procesador:

Mínimo: Intel® Core™ i5. Recomendado: Intel® Core™ i7

##### Disco rígido:

contar con espacio suficiente. 100 Gb.

1) Adquisición de fotos



2) Structure from Motion (SfM)



3) Creación de malla a color

**CMPMVS**

4) Post-procesamiento.  
(Edición de malla, escala,  
alineamiento, etc.)



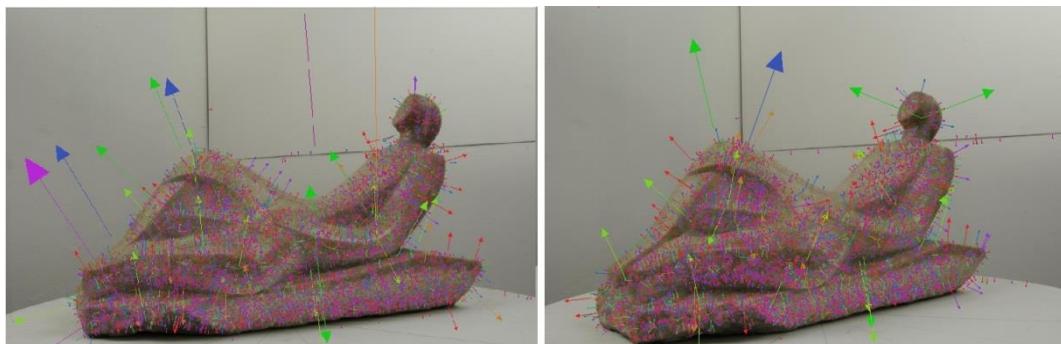
# Registro 3D de la escultura de Naum Knop, colección Palais de Glace



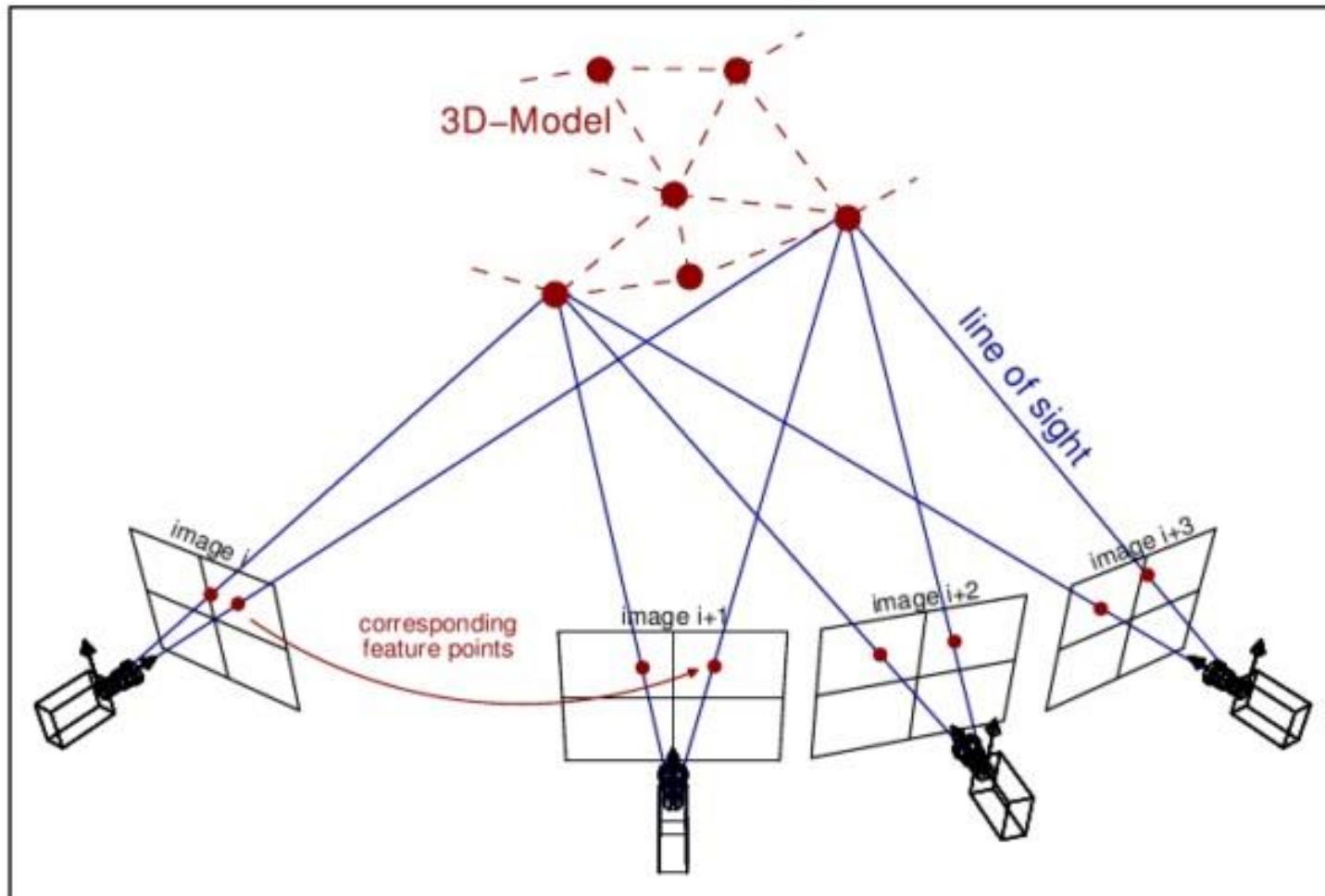
Naum Knop. Figura Reclinada, mármol (54x85x45cm)



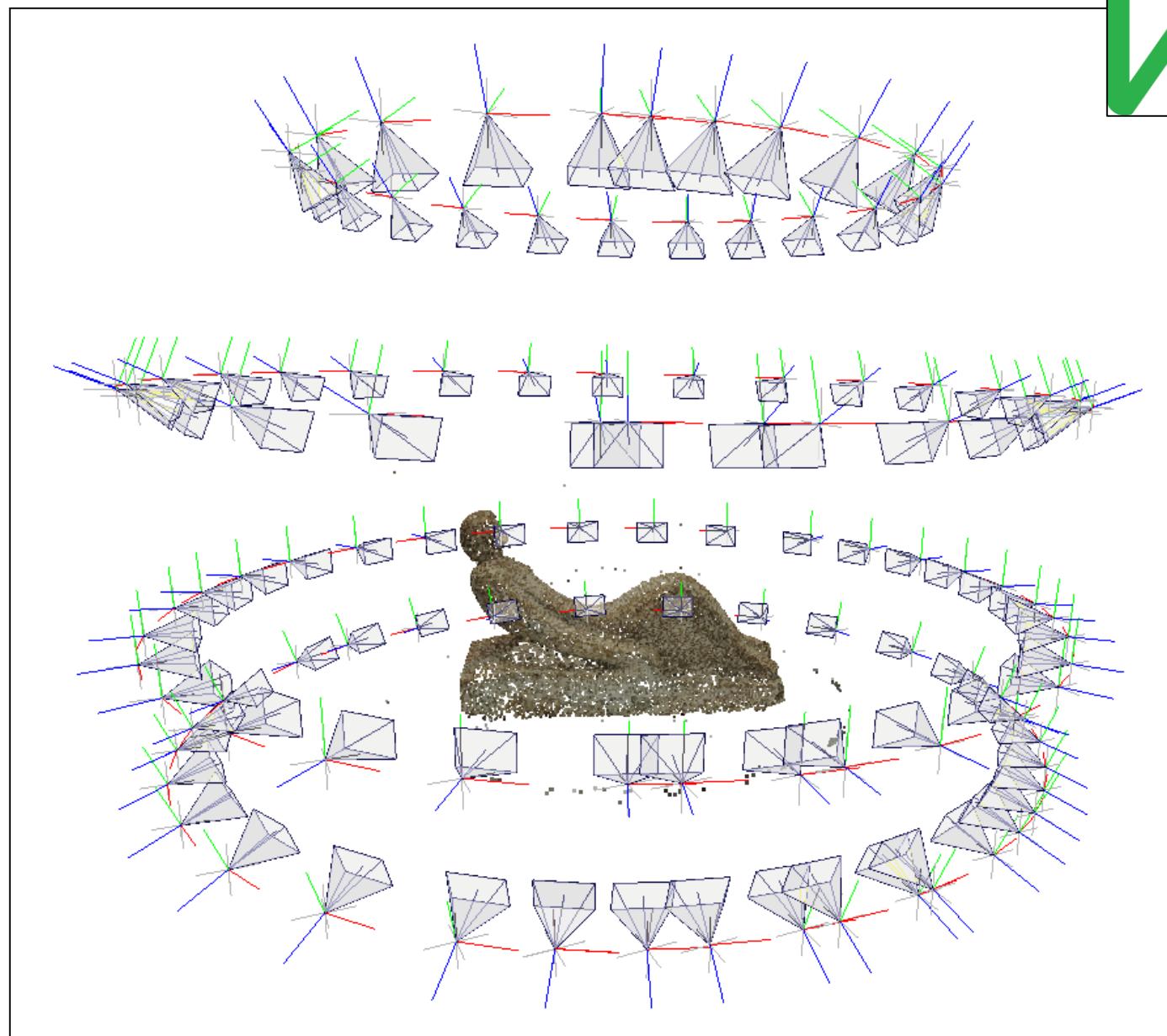
Secuencia de fotografías

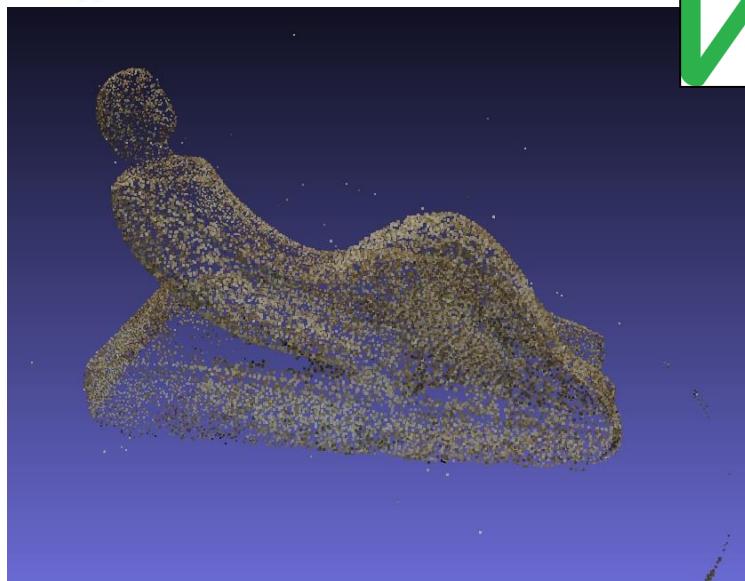


Matching de las características entre dos imágenes mediante el algoritmo **Scale Invariant Feature Transform** (SIFT) (Lowe, 2004) en el software libre VisualSfM (Washington University, Wu et al., 2011)



(T. Van Damme, "Computer Vision Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording," University of Southern Denmark, 2015)



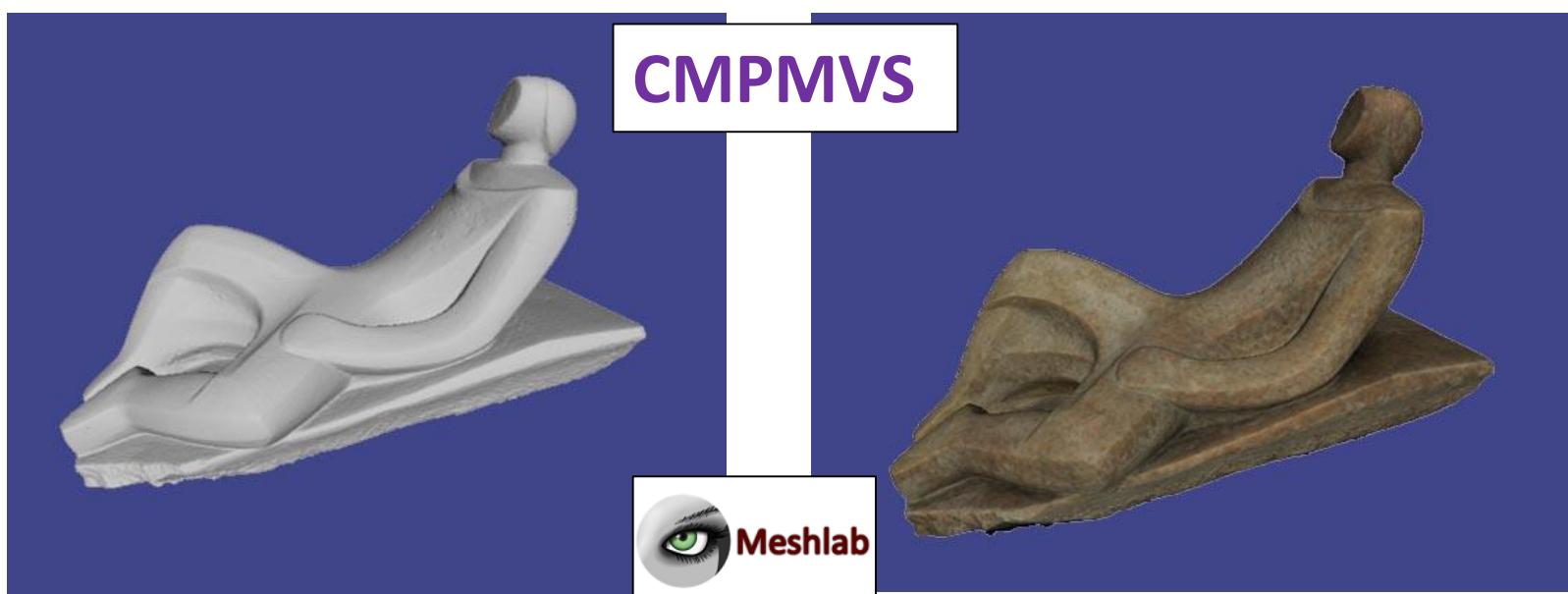


Nube de puntos poco densa



Nube de puntos densa

**CMPMVS**

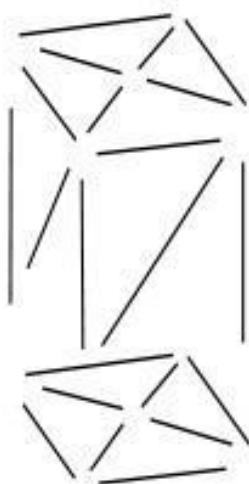


Malla



Malla con textura

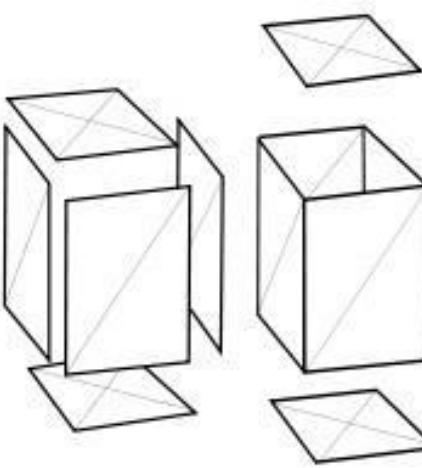
## Elementos de un modelo 3D



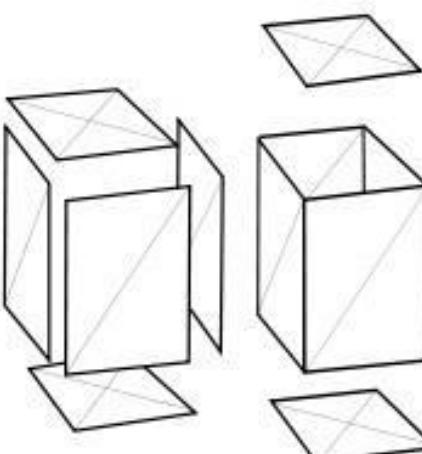
vértices



aristas



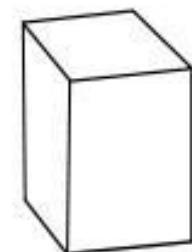
caras



polígonos

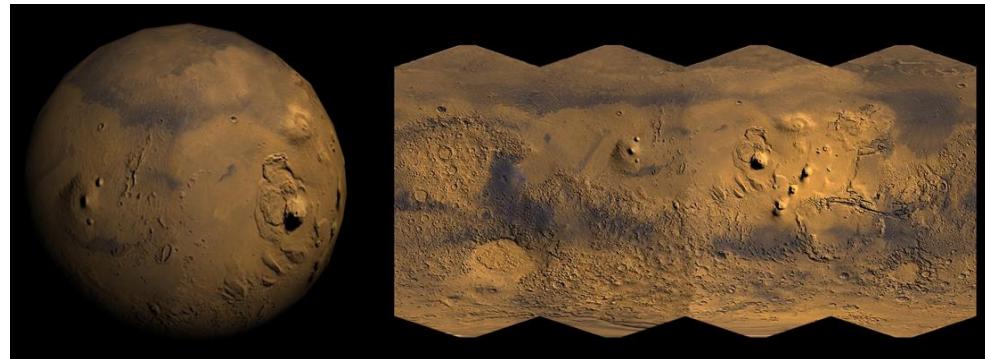
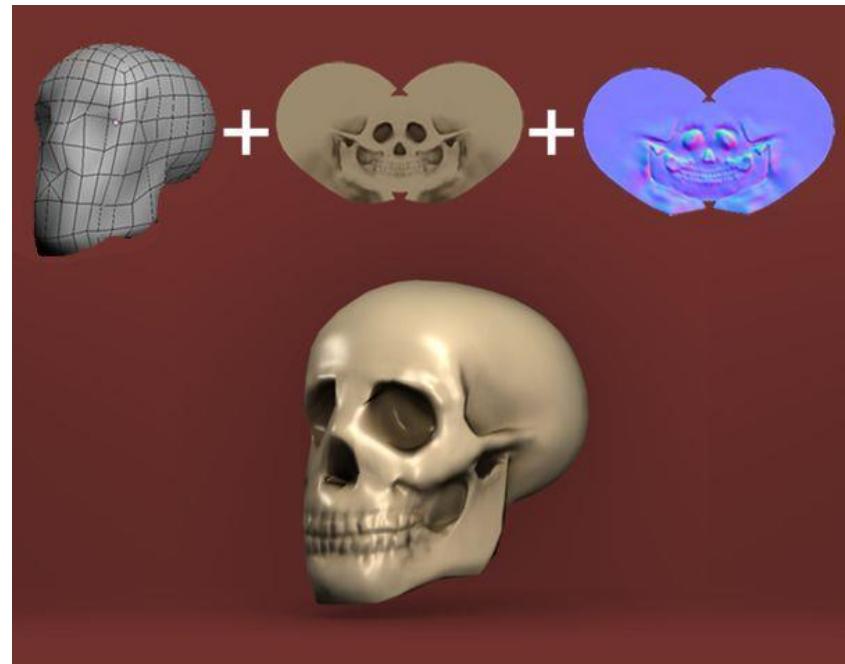
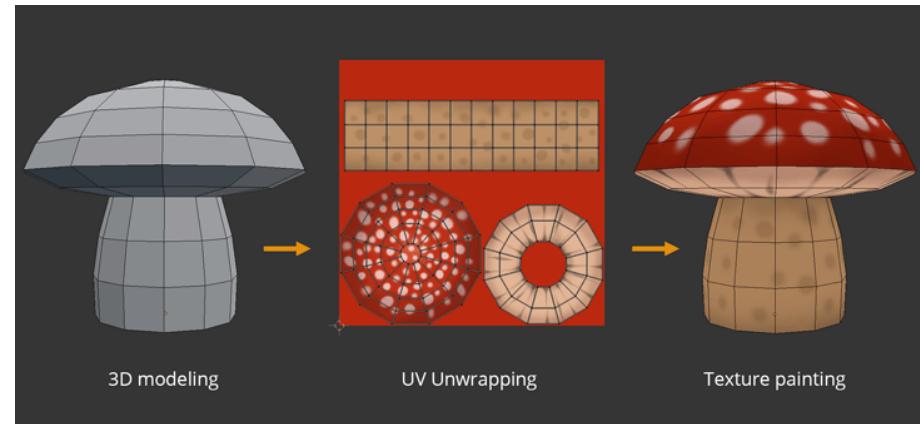
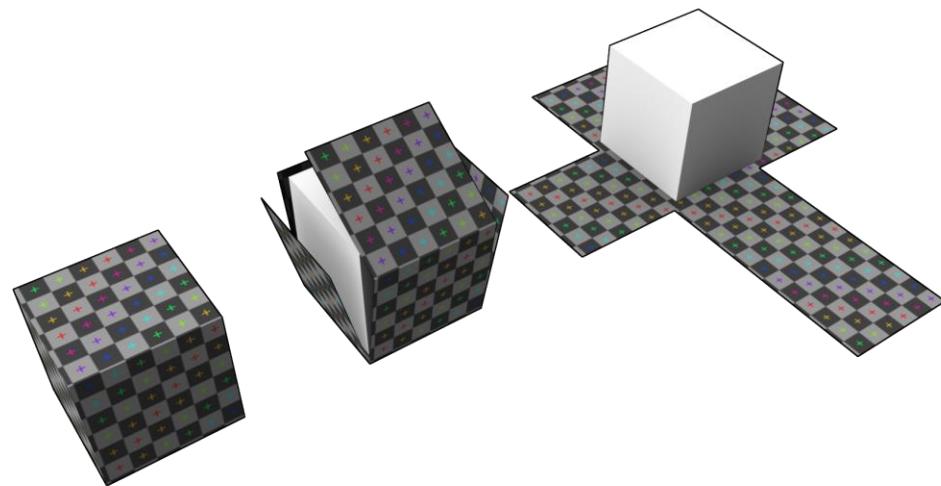


superficies



malla poligonal

# Técnica de UV unwrapping o Mapeo de textura



(Video)



## Resolución

**Depende de:**

- Resolución y calidad de las imágenes que se usan.
- El tamaño del objeto
- El número de fotografías que se toman
- La disposición geométrica de las imágenes en relación con el objeto y entre ellas.

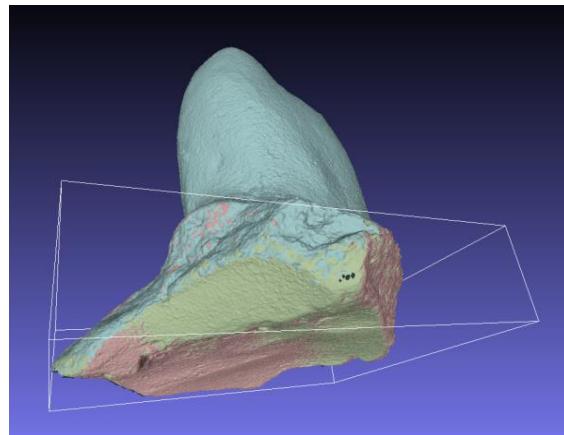
## Procesamiento de Registros 3D



### Alineamiento de mallas



Mallas texturizadas creadas con VisualSfM + CMP-MVS, correspondientes a diferentes partes de la escultura de terracota.



Alineamiento

### Optimización de la Texturización

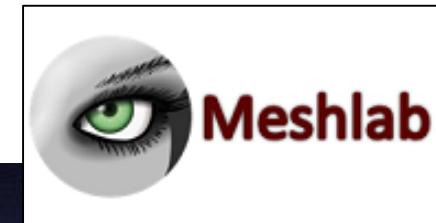


Reverso de la imagen 3D de la escultura, donde se observa una discontinuidad en la textura

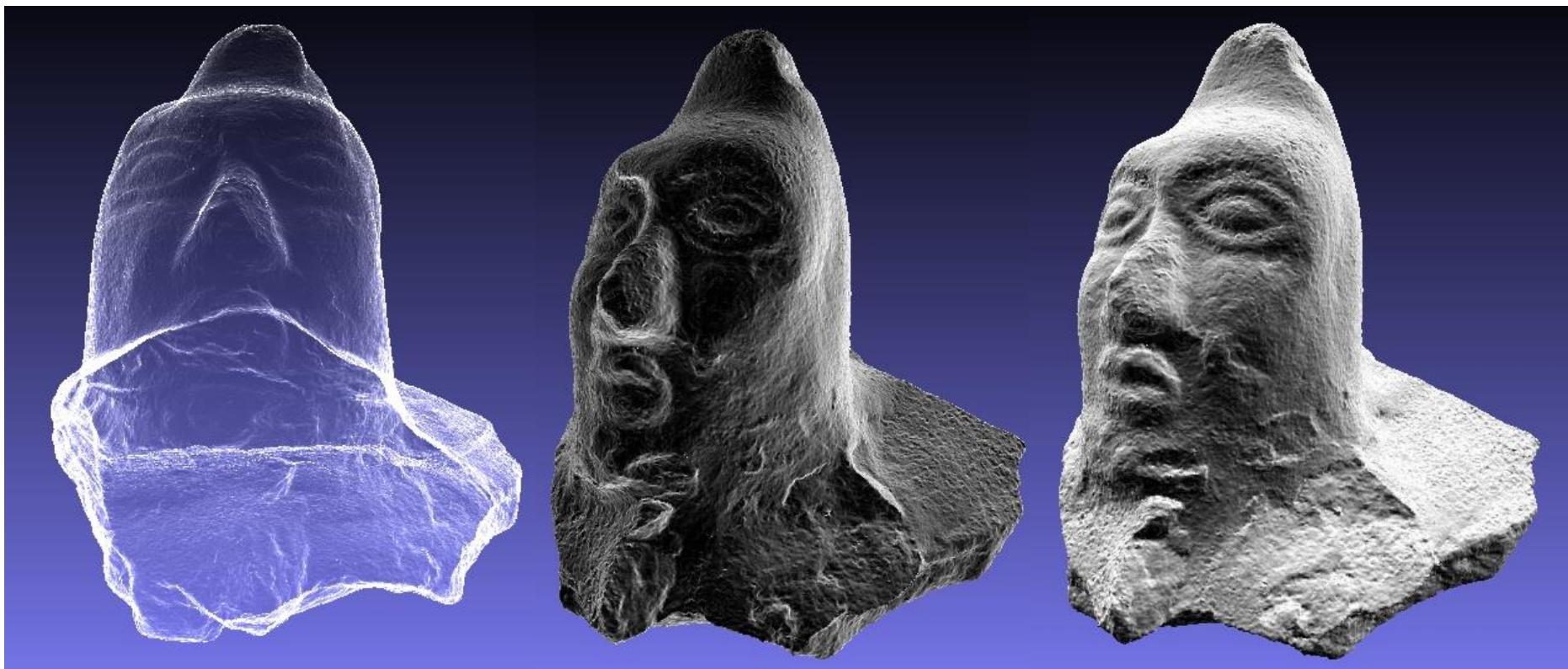
La misma imagen 3D luego de procesarla con Texture Stitcher



(Video)



## Efectos para visualización



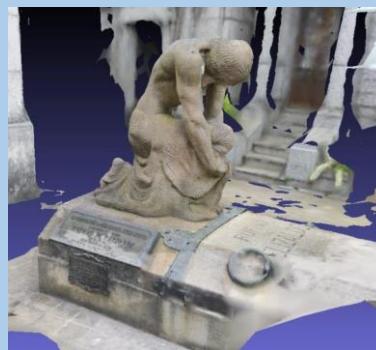
Escultura de terracota. Izquierda: visualización transparente en MeshLab generada con *shader* "x-ray". Derecha: visualización con dos direcciones de luz y utilizando el *shader* "microscopio electrónico" también de MeshLab.

## Superficies aptas para SFM

Objetos reales



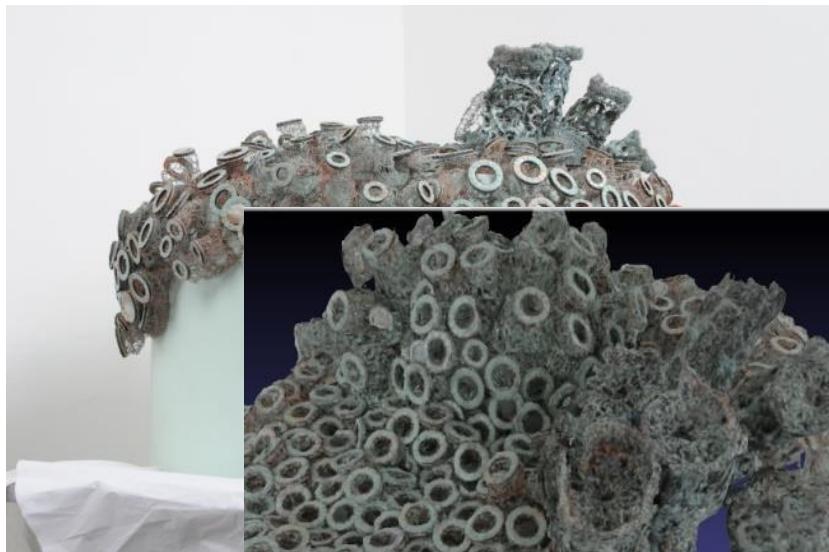
Modelos 3D



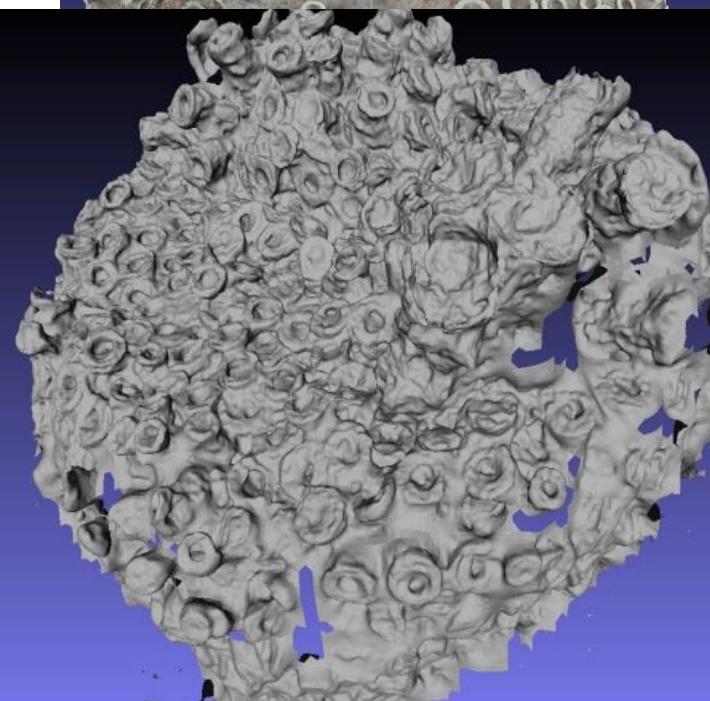
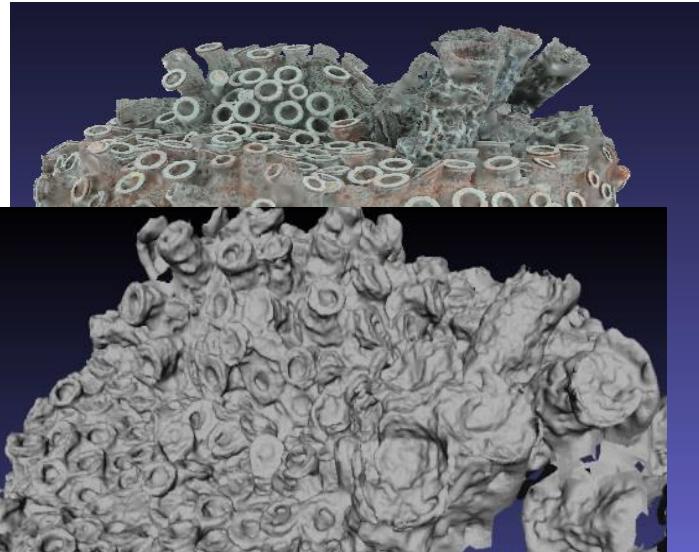
## Superficies problemáticas para SFM

Entramados pequeños

Objeto real



Modelo 3D



## Superficies problemáticas para SFM

Superficies brillantes

Objeto real



Modelo 3D



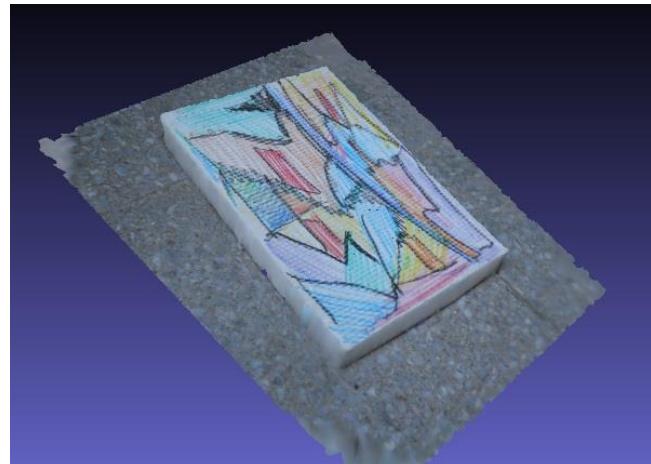
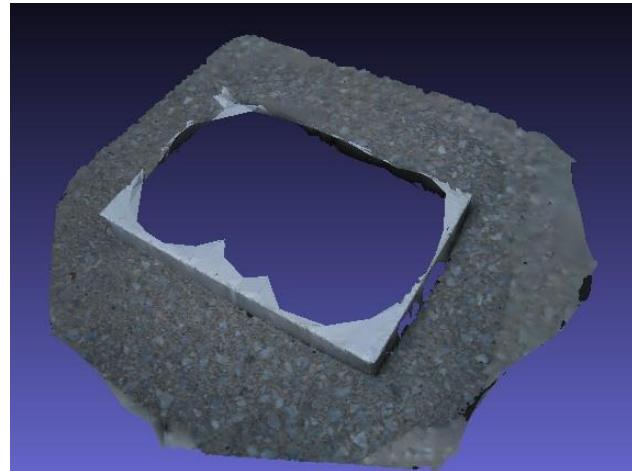
## Superficies problemáticas para SFM

Superficies lisas de un solo color

Objeto real

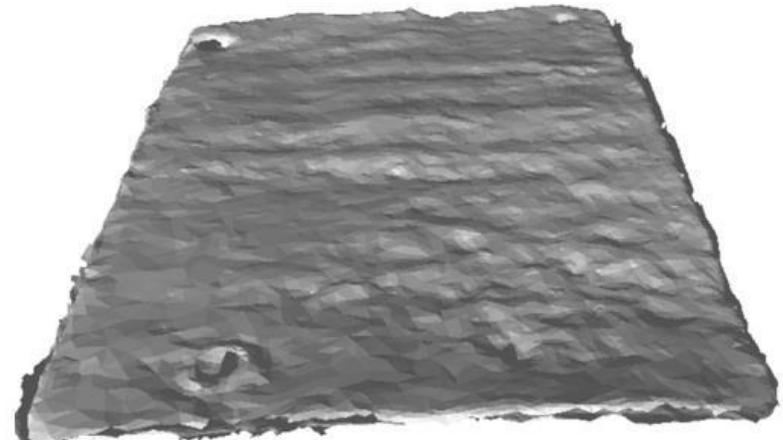
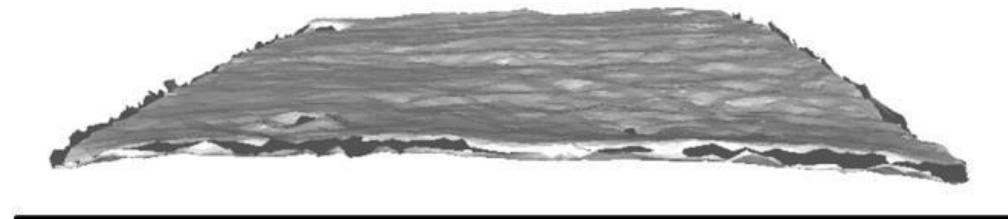


Modelo 3D

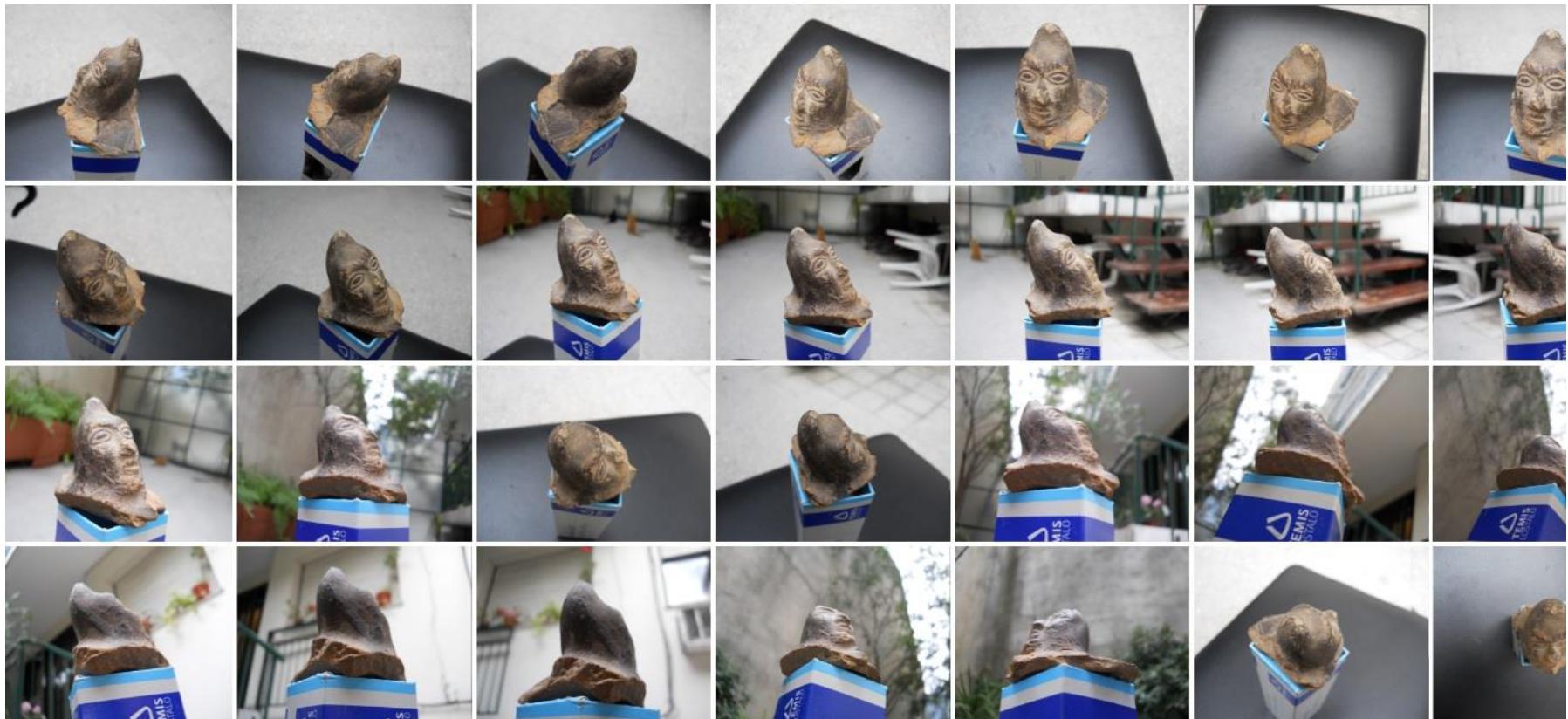


## Superficies problemáticas para SFM

Objetos muy delgados

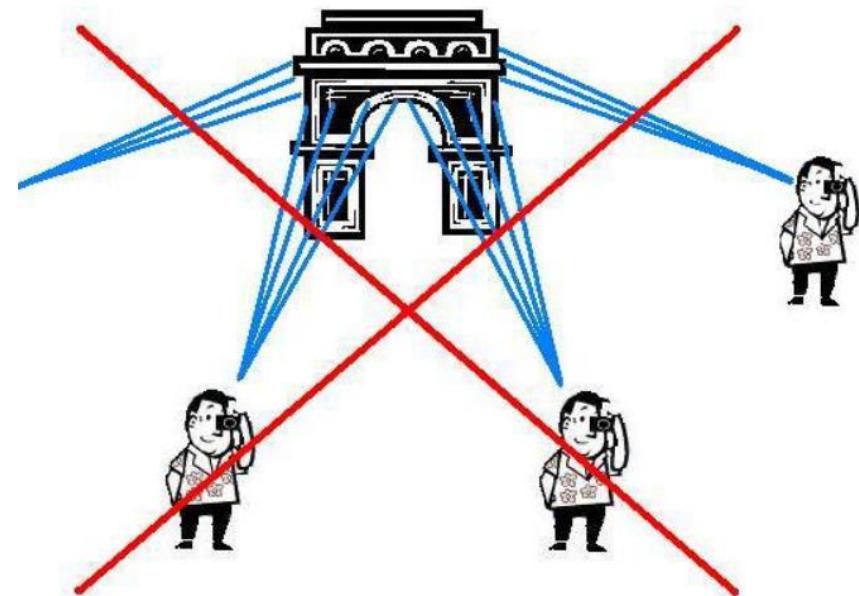
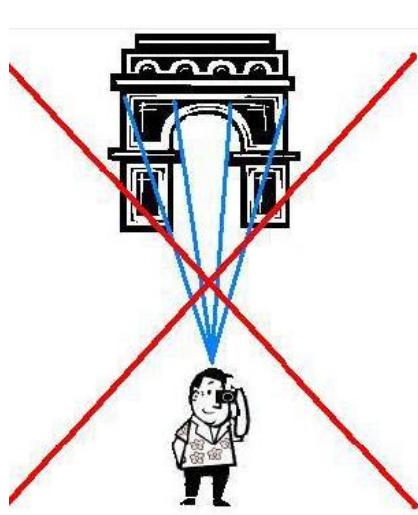
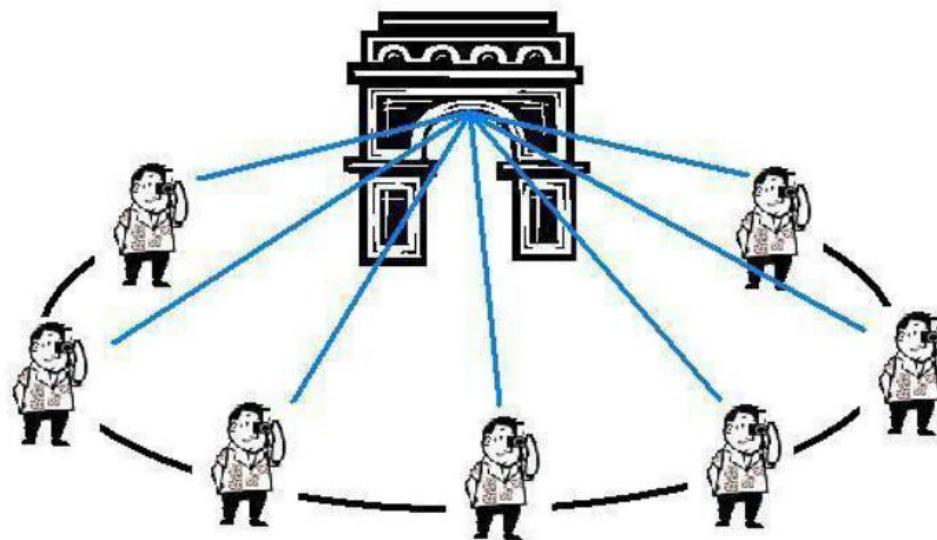


## Formas de adquisición de las fotografías

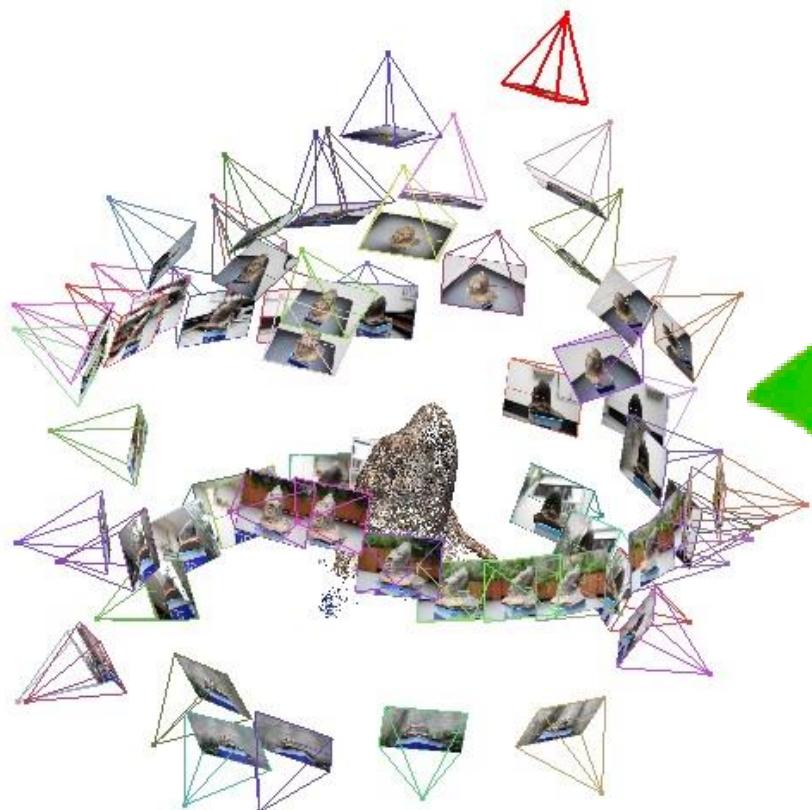


Al menos 70% de superposición y tomadas en diferentes perspectivas.

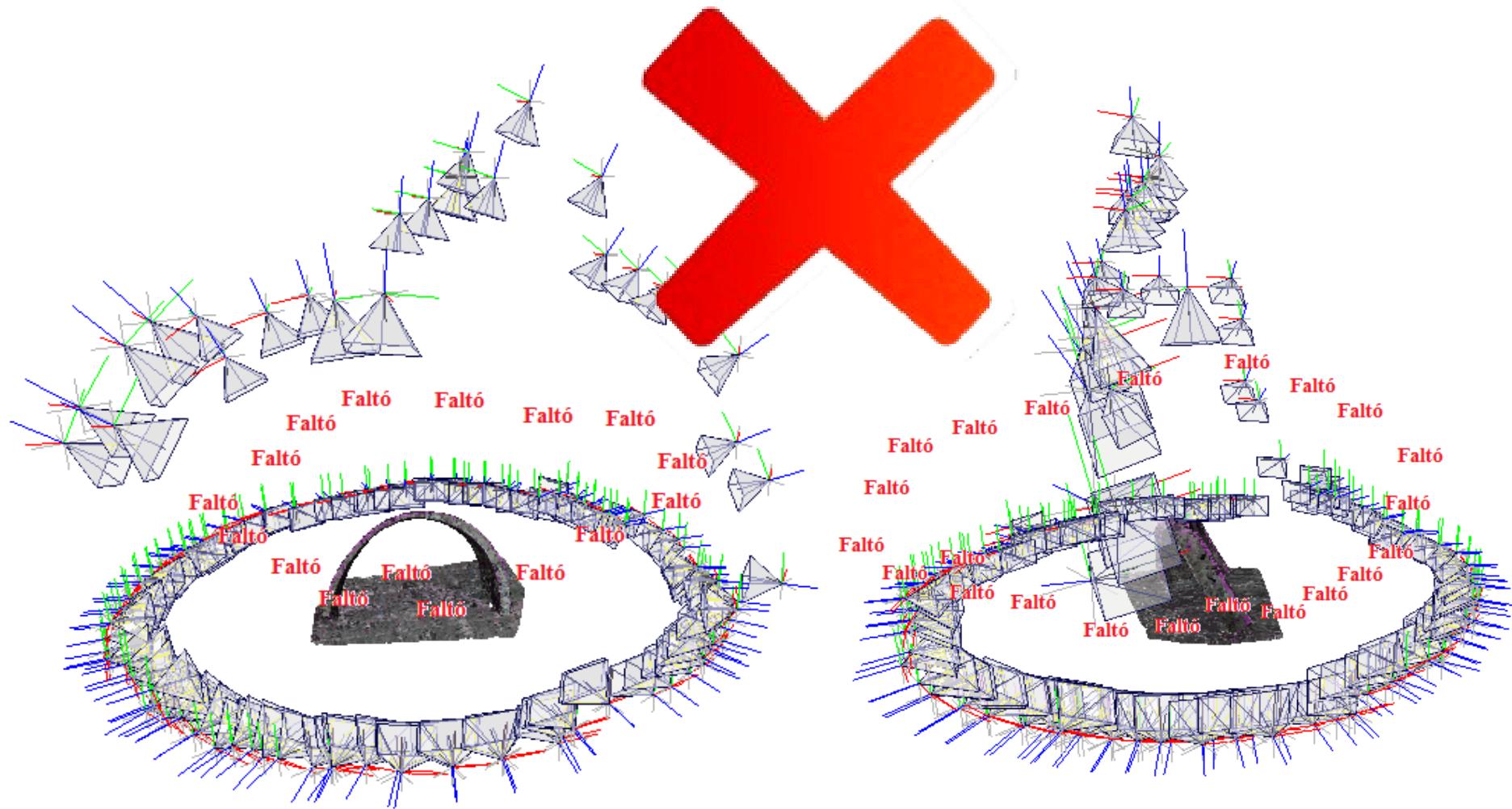
## Formas de adquisición de las fotografías



## Formas de adquisición de las fotografías



## Formas de adquisición de las fotografías



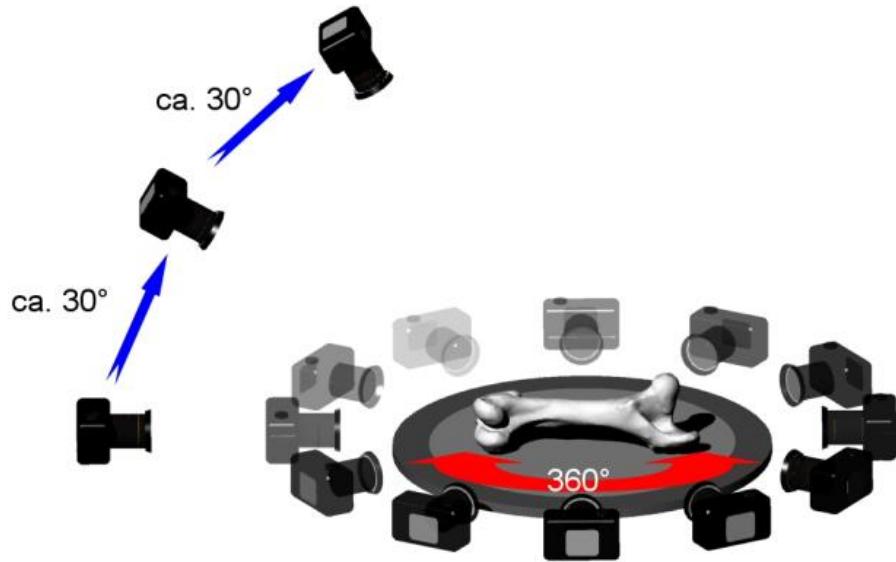
## Formas de adquisición de las fotografías



El papel de diario es una buena opción para colocar debajo de los objetos. Pero una vez colocado debe quedar quieto.

## Formas de adquisición de las fotografías

Si se usa una base giratoria, mantener un fondo liso de color neutro.



## Algunas conclusiones

### Fotogrametría digital:

- ✓ Bajo costo del instrumental requerido (sólo una cámara digital y una computadora).
- ✓ Uso de software libre.
- ✓ Puede ser implementada fácilmente por personal de museos no especializados en técnicas de procesamiento de imágenes ni óptica.
- ✓ Es aplicable a objetos de cualquier tamaño.
- ✓ Registra el color.
- ✓ Resolución versátil (microfotogrametría)
- ✗ No es la técnica adecuada para materiales brillantes, metálicos, pequeños entramados y objetos totalmente planos.

### Escaneo láser y luz estructurada:

- ✓ Puede escanear casi cualquier tipo de material.
- ✗ El instrumental de bajo costo y el software gratuito no permiten escanear objetos de grandes tamaños.
- ✗ Requiere alineación de los scans en una imagen única.
- ✗ Los equipos comerciales son muy costosos.

**Desde el punto de vista de la resolución las tres técnicas permiten obtener resolución micrométrica.**

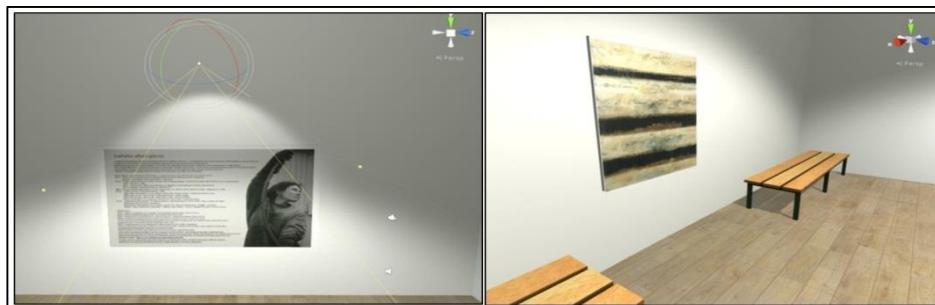
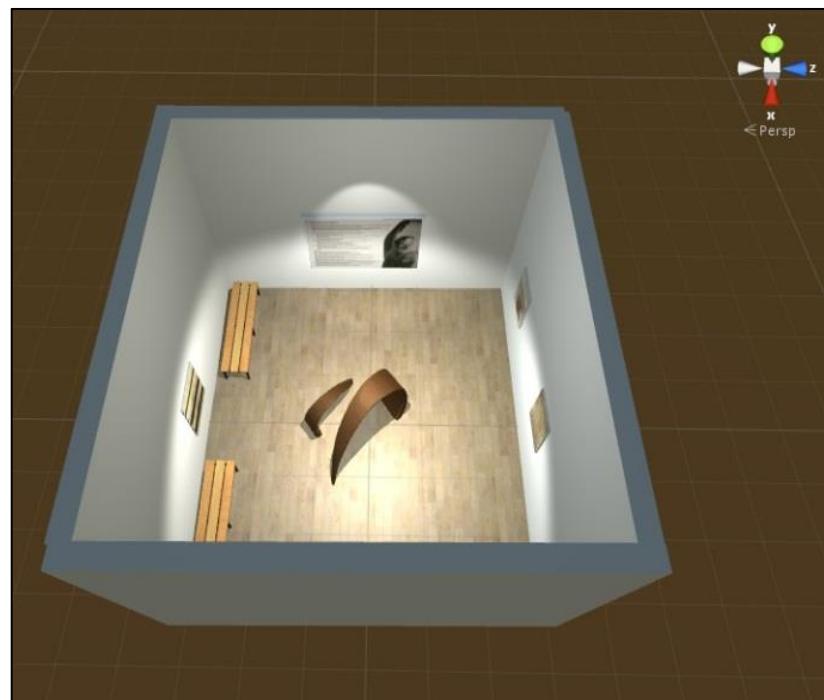
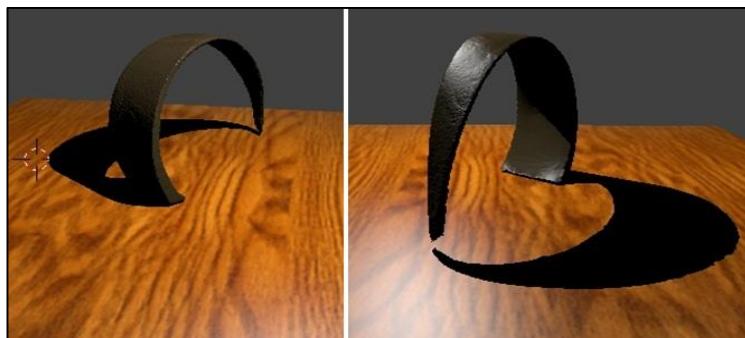
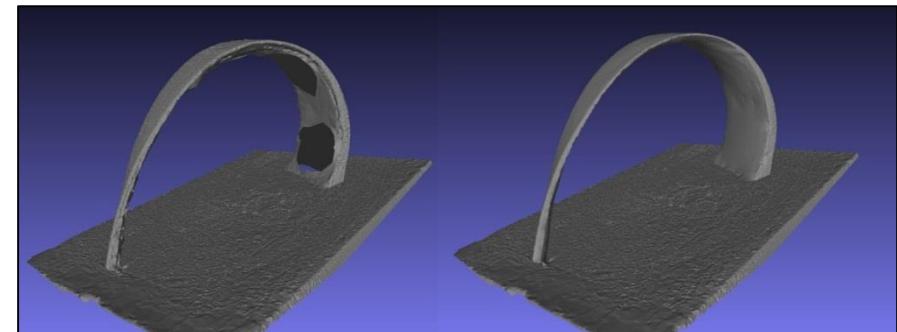
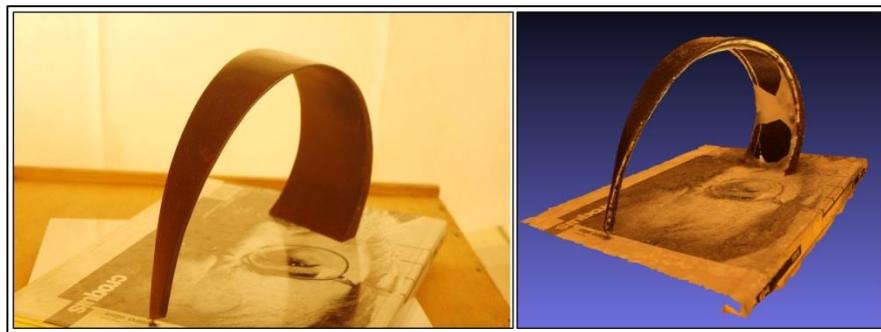
### RTI:

- ✓ Muy buena opción para el registro de superficies de objetos
- ✓ Facilidad, bajo costo y poco tiempo de procesamiento
- ✓ Aplicable a cualquier tamaño
- ✓ Herramienta cómoda e interactiva para cualquier conservador-restaurador.

	Registro del color	Requerimientos adicionales	Costo	Calidad de la malla y Exactitud	Resolución
<b>FOTOGRAFETRÍA</b> (VisualSFM + CMP-MVS)	<b>Inmediata</b> (en el momento de adquisición). Textura homogénea.	Mayor procesamiento de la placa de video	<b>Muy bajo.</b> .	Malla completa. Exactitud: 99.7%	<b>200-400 μm.</b> Versatilidad: <b>Microfotogrametría</b> Resolución < 100 μm.
<b>ESCANEO LÁSER Y DE LUZ ESTRUCTURADA</b> (David)	<b>Requiere procesamiento</b> posterior para homogeneizar la textura entre cada malla alineada.  Requiere técnica de mapeo de textura sin ayuda de rasters.	Setup para escaneo y placa de video apropiada.	Bajo.	Mallas incompletas. Requieren alineamiento y fusión posterior.  Escaneo de luz estructurada: 99.7% Escaneo láser: 96.2%	<b>200-400 μm.</b> Versatilidad: Utilización de microscopio es compleja.

**Algunos trabajos realizados que  
ilustran la solución de estas  
problemáticas**

## Virtualización del grupo escultórico “Puentes de otoño” de la artista Natalia Abot Glenz.





## Una posible solución para digitalizar superficies reflectantes

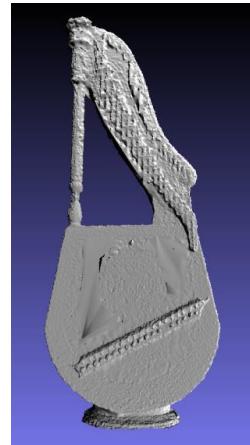
Arpa de madera del Museo de Instrumentos musicales “Emilio Azzarini” UNLP



*Fotogrametría SFM*

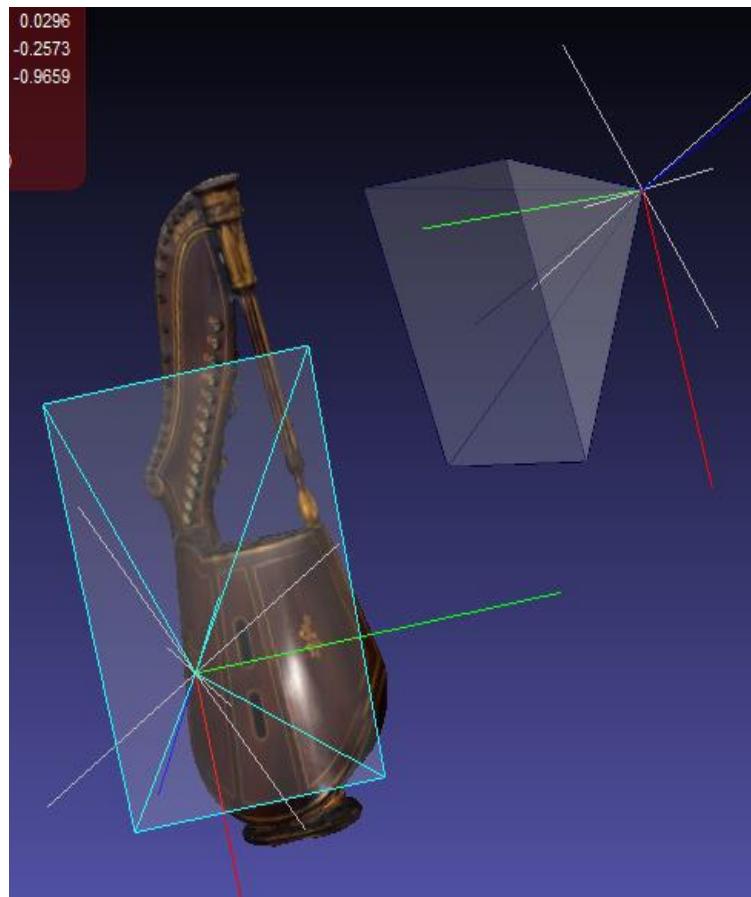


*Edición y suavizado  
de malla*

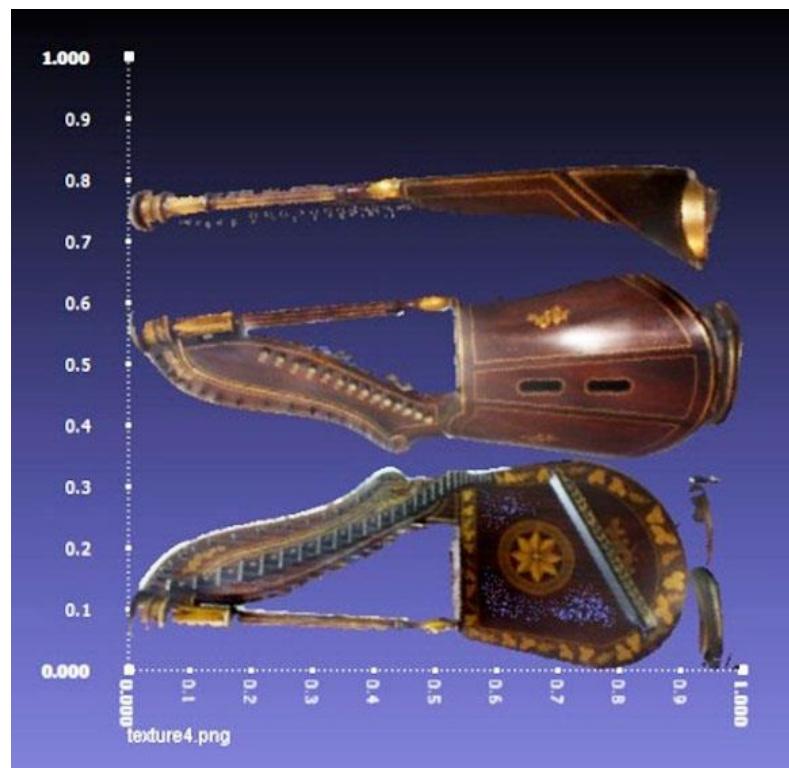




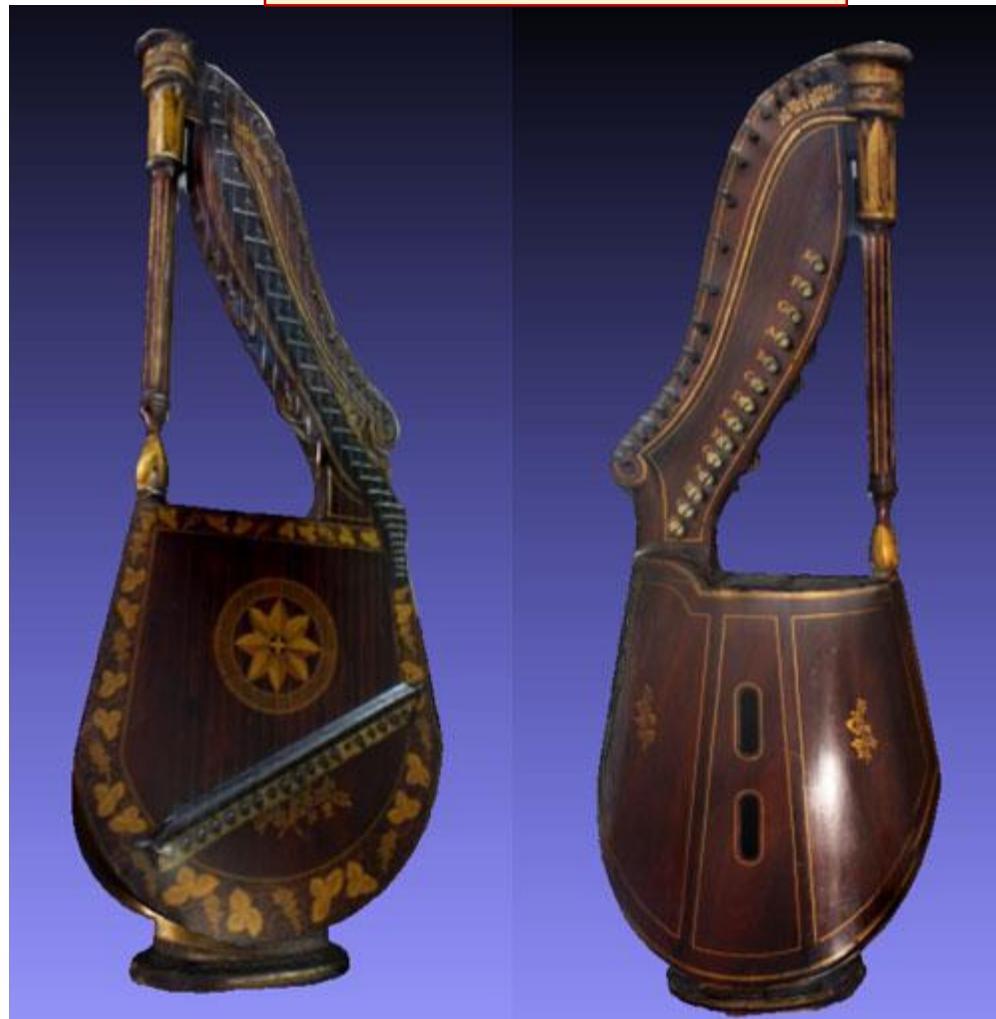
*Alineación de la  
malla con rasters  
seleccionados y  
parametrización*



*Creación de  
textura*



La técnicas de texturización a veces pueden resolver las superficies reflectantes



## Parte 3:

# Práctica de procesamiento 3D

Regla básica de la informática: "*Si no funciona, reinicie*"