



**UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA**  
Unidad Xochimilco

División de Ciencias y Artes para el Diseño  
Maestría en Ciencias y Artes para el Diseño  
Área de Conservación de Patrimonio Cultural

# **Detección de cambios para la conservación del patrimonio material**

Evaluación de la técnica *Deviation Analysis*  
en el monitoreo de relieves escultóricos

## **Idónea Comunicación de Resultados**

que para obtener el grado de Maestría presenta:

**María Fernanda López Armenta**

Tutor: Dr. Luis Fernando Guerrero Baca

Ciudad de México, 13 de noviembre 2020



**UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA**  
Unidad Xochimilco

División de Ciencias y Artes para el Diseño  
Maestría en Ciencias y Artes para el Diseño  
Área de Conservación de Patrimonio Cultural

# **Detección de cambios para la conservación del patrimonio material**

Evaluación de la técnica *Deviation Analysis*  
en el monitoreo de relieves escultóricos

## **Idónea Comunicación de Resultados**

que para obtener el grado de Maestría presenta:

**María Fernanda López Armenta**

Tutor: Dr. Luis Fernando Guerrero Baca

Lector: Dr. Jorge González Aragón

Lectora: Mtra. Magdalena Rojas Vences

Ciudad de México, 13 de noviembre 2020



▲ Relieve 7 de la Tumba de Pakal, modelo 3D. Fuente: Laboratorio 3D CNCPC-INAH, 2017.

## AGRADECIMIENTO

A Gil, a mi familia y a mis amigos, les agradezco su apoyo durante esta etapa que concluye, y la confianza y los ánimos para lo que sigue.

A Luis, mi tutor, por apoyarme en este proyecto, por guiarme, pero a la vez dejarme la libertad para desarrollarlo, pero, principalmente, por recomendarme esta maestría que ha sido para mi una de las experiencias más enriquecedoras.

A Romina, por su interés en este proyecto, su asesoría y, sobretodo, por haberme hecho sentir en casa en Ancona.

A Male, a mis profesores y a mis queridos compañeros de generación, gracias por sus valiosos comentarios, por motivarme y por permitirme aprender de ustedes.

Al Laboratorio de Documentación y Análisis Tridimensional de la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural (CNCPC) del INAH y al Distori Heritage de la Università Politecnica delle Marche por su apoyo en la realización de los levantamientos, por facilitarme el uso de sus equipos y de los modelos 3D, así como su asesoría.

A todos los expertos, en México y en Italia, que me aportaron sus conocimientos y su experiencia para el desarrollo de este proyecto.

Al Instituto Nacional de Antropología e Historia, a la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural y al proyecto de Conservación de los Relieves de la Tumba de Pakal por permitirme trabajar con este caso de estudio y por proporcionarme los permisos para la reproducción de este material.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Autónoma Metropolitana por otorgarme las becas para el desarrollo esta investigación.

# CONTENIDO

RESUMEN .....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO 1 DOCUMENTACIÓN DEL PATRIMONIO MATERIAL.....	8
1.1 Antecedentes históricos en la documentación del patrimonio .....	8
1.2 Documentación del patrimonio en las cartas y convenciones de restauración .	17
CAPÍTULO 2 TECNOLOGÍA EN EL MONITOREO DE CONSERVACIÓN.....	21
2.1 Problemática del monitoreo de conservación .....	21
2.1.1 Monitoreo de conservación en el contexto social y político .....	24
2.2 Detección de cambios superficiales en bienes culturales.....	26
CAPÍTULO 3 TÉCNICA <i>DEVIATION ANALYSIS</i> Y SUS APLICACIONES .....	31
3.1 Aplicaciones en la Inspección dimensional.....	31
3.2 Aplicaciones en el ámbito de la Conservación .....	35
CAPÍTULO 4 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS EN RELIEVES ESCULTÓRICOS.....	38
4.1 Adquisición de datos.....	39
4.1.1 Fotogrametría digital .....	39
4.1.2 Escaneo de luz estructurada.....	40
4.2 Procesamiento y edición.....	41
4.3 Comparación y análisis.....	42
4.4 Casos de estudio .....	48
4.4.1 Relieves escultóricos de la Tumba de Pakal.....	49
4.4.2 Relieves escultóricos de las Grutas de Osimo.....	52
4.5 Discusión de los resultados .....	55

4.6 Evaluación de la propuesta.....	59
CONCLUSIONES .....	62
REFERENCIAS.....	66
ANEXOS.....	73
Anexo 1. Reportes de calidad de modelos fotogramétricos Osimo .....	74
Reporte G1d12_2018.....	74
Reporte G1d12_2019.....	81
Anexo 2. Reportes de inspección relieves de la Tumba de Pakal .....	88
Reporte C1_Estuco 4.....	88
Reporte C1_Estuco 5.....	93
Reporte C1_Estuco 7.....	98
Reporte C1_Estuco 8.....	103
Anexo 3. Reportes de inspección relieves de las Grutas de Osimo .....	108
Reporte C1_G1d12a.....	108
Reporte C1_G1d12b.....	113
Anexo 4. Formulario de evaluación.....	118
Formulario de evaluación.....	118
Respuestas al formulario de evaluación .....	135
Sumario de respuestas .....	143

# RESUMEN

La conservación de los sitios y los bienes culturales que conforman el patrimonio material precisa primero de su conocimiento, del reconocimiento de su unicidad y de la comprensión de su significación cultural. Para ello, la documentación juega un papel fundamental, ya que consiste precisamente en la recopilación de toda la información referente a un bien, desde su conformación física, su historia de vida, hasta las condiciones en las que se encuentra. A lo largo de la historia, se han desarrollado distintas técnicas y artefactos que han servido consciente o inconscientemente para documentar el patrimonio cultural y los cambios que ha sufrido a lo largo del tiempo. El uso de técnicas de digitalización 3D ha beneficiado en gran medida a esta labor, debido a la precisión que alcanzan y la diversidad de análisis que permiten. La presente investigación se basa en el potencial que tienen los modelos tridimensionales para el monitoreo de conservación, en específico de los relieves escultóricos, cuya condición de objetos tridimensionales dificulta a veces su registro y la detección efectiva de cambios superficiales, que pueden o no ser indicadores de deterioros. Y, ya que parte del valor que se le otorga a los bienes culturales radica en el discurso que transmiten, la oportuna detección de cambios, podría ser la diferencia entre la lectura de ese discurso o la pérdida irremediable del mismo. De modo que, se propone una técnica de detección de cambios a partir de la digitalización 3D multitemporal y su comparación mediante una técnica conocida como *Deviation Analysis*, desarrollada en la industria de manufactura para los procesos de control de calidad. La detección de cambios aportará información, tanto cualitativa como cuantitativa, que después debe ser discutida e interpretada por los especialistas en conservación, pues a final de cuentas son ellos los usuarios finales de este tipo de técnicas.

**Palabras clave:** Digitalización 3D, Monitoreo de conservación, Relieves escultóricos

# INTRODUCCIÓN

El patrimonio cultural es un concepto amplio y complejo, sus definiciones han variado a lo largo de la historia y es probable que sigan evolucionando a la par de nuestras cambiantes sociedades y culturas. Para fines de esta investigación, se entenderá al patrimonio cultural material<sup>1</sup> como aquellos artefactos, monumentos, edificios, sitios, a los que la sociedad les otorga valor (Historic England, 2018), ya sea por sus características intrínsecas o extrínsecas.

Al igual, las labores de estudio y conservación del patrimonio material han evolucionado sus fundamentos teóricos y sus prácticas. Y, ya que el patrimonio material se compone por una gran variedad de bienes culturales, las actividades para su conservación involucran la participación de diversos actores y se valen del campo de conocimientos de diversas disciplinas. Por consiguiente, la conservación del patrimonio cultural constituye una labor interdisciplinaria en constante actualización.

La presente investigación se centra en una categoría específica del patrimonio material: el relieve escultórico que es una técnica de representación tridimensional sobre

---

<sup>1</sup> A partir de la *Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial* (UNESCO, 2003), se hace la distinción entre patrimonio Inmaterial y Material, en consecuencia, se usará el término de patrimonio cultural material o, simplemente, patrimonio material.

un soporte bidimensional<sup>2</sup>. Del mismo modo, nos enfocaremos en una particular actividad de la conservación del patrimonio cultural, conocida como monitoreo de conservación, específicamente en la Detección de Cambios o *change detection*, que es como se le denomina al proceso de identificar las variaciones ocurridas en una superficie en un lapso tiempo (Abate, 2019).

El monitoreo de conservación es una de las actividades de conservación más relevantes, puesto que a partir de ella es posible conocer el avance de los deterioros, evaluar las intervenciones realizadas y prever los riesgos que amenazan los bienes culturales. Por otro lado, las acciones y técnicas empleadas en el monitoreo están directamente ligadas a otra actividad fundamental de la conservación: el registro documental, es decir la recopilación de todo tipo de información referente al bien cultural.

En la revisión de la literatura, distintas publicaciones hacen referencia a las dificultades que representa el monitoreo: por una parte, las técnicas más frecuentes de registro son la fotografía y el dibujo, al respecto se menciona que para el registro a cabalidad de los rasgos tridimensionales del patrimonio material, la primera ofrece fidelidad en el registro aunque poco nivel de interpretación, mientras que la segunda permite mejor interpretación, a costa del nivel de fidelidad (Medina-González *et al.*, 2016).

Por otra parte, cuando lo que se busca es identificar y cuantificar los deterioros a fin de determinar su evolución, el problema es la falta de uniformidad en los diferentes registros documentales a lo largo del tiempo, que entorpece su comparación (Coronado Guajardo *et al.*, 2017; Tapia González y García Reyes, 2017).

Finalmente, la búsqueda por desarrollar nuevas técnicas enfocadas específicamente a la detección y cuantificación de cambios —que pueden o no corresponder a deterioros—, refuerzan la idea de que existen deficiencias en las principales técnicas de documentación para el monitoreo de conservación (Abate, 2019; Lercari, 2019; Malinverni *et al.*, 2017; Manfredi *et al.*, 2014).

Hay que tener en cuenta que, parte del valor atribuido al patrimonio material, radica en el discurso que busca transmitir por medio de las imágenes que evocan, ya sea en forma de relieves o en las capas de pintura, independientemente de su soporte. Muchas veces esos discursos están depositados en soportes que, el paso del tiempo y las condiciones ambientales, han vuelto frágiles. Una capa milimétrica de material puede ser la diferencia entre la lectura del discurso o la pérdida de éste. De modo que, la detección eficiente de

---

2 Definición del Glosario del *Museu Nacional d'Art de Catalunya*, consultable en <https://www.museunacional.cat/es/relieve-escultorico>

los cambios cobra importancia, pues pueden ser indicadores de deterioros, mismos que pueden o no representar un riesgo para el patrimonio material.

Llegados a este punto, las primeras dos interrogantes que surgen son ¿qué tipo de recursos se han utilizado históricamente y hasta el momento para el registro del patrimonio cultural? y así mismo, ¿qué uso han tenido las tecnologías de digitalización en las actuales técnicas de detección de cambios superficiales en el patrimonio material?

A pesar de los esfuerzos por desarrollar nuevas técnicas de detección de cambios, se encontró que persiste en ellas la falta de información tridimensional. Esto se debe en parte a que los objetos que analizan son, en su mayoría, pinturas de caballete, por tanto, bidimensionales<sup>3</sup>. En cuanto a las obras tridimensionales, como son las esculturas exentas y los relieves escultóricos, las técnicas que se analizaron no presentan datos concluyentes dirigidos a diagnóstico y monitoreo.

Actualmente, las tecnologías de digitalización tridimensional constituyen una herramienta de registro que ha facilitado gran cantidad de análisis en los objetos patrimoniales. En otros sectores, como el industrial, se utilizan los modelos 3D digitalizados de las piezas fabricadas y se comparan con sus correspondientes modelos de diseño mediante una técnica conocida como *Deviation Analysis* (DA o Análisis de desviaciones). De este antecedente, surge la tercera interrogante, si se aplica la técnica DA para comparar modelos 3D de relieves escultóricos, generados en un intervalo de tiempo, ¿se pueden obtener datos cuantificables y reproducibles que posibiliten la detección de cambios superficiales? Y, en tal caso, ¿qué tan confiable es la técnica DA, según sus características y el tipo de resultados que aporta? Al respecto, cabe mencionar que la confiabilidad de una técnica radica en la disminución de los errores intrínsecos, ya que eso genera confianza en la comunidad a quien va dirigida (Michalski, 2015).

Es así como se desprende el objetivo general de la presente investigación, que consiste en evaluar la propuesta metodológica de detección de cambios superficiales en relieves escultóricos por medio de la técnica DA, como herramienta para el monitoreo de conservación del patrimonio material. Se tiene la hipótesis de que la aplicación de la técnica DA es una alternativa confiable para la detección y cuantificación de cambios

---

3 Para fines de análisis, se hace una distinción entre las obras bidimensionales y las tridimensionales, pues se considera que en las primeras la imagen está plasmada en un soporte que correspondería a un plano de dos dimensiones y la tercera dimensión es despreciable en relación a las dos primeras. En cambio, en las segundas las tres dimensiones mantienen relaciones semejantes, por tanto, excluir una de ellas como sucede en los registros bidimensionales, puede ocasionar un vacío de información considerable.

tridimensionales en el monitoreo de conservación puesto que permite la reproductibilidad, garantiza la uniformidad de los datos, además de tener una destacada efectividad al momento de comunicar los resultados.

La metodología empleada para el desarrollo de este estudio consta de dos fases; la primera consiste en la investigación documental, que permitió cumplir los primeros dos objetivos particulares de identificar los recursos utilizados para la documentación y el monitoreo de conservación y, a partir de ahí, analizar el uso de tecnologías de digitalización en técnicas de detección de cambios del patrimonio material.

En la segunda fase, se desarrolló una propuesta metodológica para la detección de cambios superficiales en relieves escultóricos por medio de la técnica DA, tomando como punto de partida el proceso de trabajo de esta técnica en la industria de manufactura. Posteriormente, se llevó a cabo el ejercicio de aplicación de la propuesta metodológica en dos casos de estudio: los relieves escultóricos de Los Nueve Señores del Inframundo de la Tumba de Pakal, en Palenque, Chiapas; y los relieves escultóricos de las Grutas de Osimo, en la provincia de Ancona, Italia. Por último, se evaluó la propuesta por medio de la aplicación de un formulario, previamente diseñado para caracterizar aspectos de requerimientos de operación, precisión, efectividad comunicativa, comparabilidad de resultados, y reproducibilidad de la técnica.

La presente investigación se divide en cuatro partes, los primeros dos capítulos corresponden a la fase documental y los siguientes dos a la fase experimental. Se comienza por exponer, en el primer capítulo, los antecedentes de documentación y monitoreo del patrimonio material, se determina cuáles han sido los detalles anteriormente resueltos con las herramientas aquí descritas y cuáles han quedado pendientes. Mientras que, en el segundo capítulo, se expone el enfoque científico en la conservación patrimonial, y se analiza el papel que han jugado las tecnologías de digitalización del patrimonio, en las actuales técnicas de detección de cambios.

En el tercer capítulo, se describen las características de la técnica DA, sus antecedentes, sus actuales aplicaciones industriales y algunas aplicaciones dentro del ámbito del patrimonio cultural. Para continuar, en el cuarto capítulo se desarrolla a detalle, la adaptación de la mencionada técnica al caso de la conservación para los fines que nos competen, a saber, el monitoreo de conservación. Aquí se detallan las dos variantes de su aplicación correspondientes a cada uno de los casos de estudio. Finalmente, se discuten los resultados y se lleva a cabo la evaluación de ambas variantes.

# CAPÍTULO 1

## DOCUMENTACIÓN DEL PATRIMONIO MATERIAL

A diferencia de las definiciones referentes al patrimonio cultural, que tienen apenas un par de siglos, los bienes que lo componen son tan remotos como las civilizaciones que los produjeron. Los conceptos con los que han sido reconocidos han variado a lo largo de la historia, y continúan actualizándose hasta la fecha. Así mismo, han cambiado los criterios que les confieren el calificativo de “valiosos”, y, con ello, el tratamiento y la consideración que se les ha dado (González-Varas, 2000).

En ese sentido, esta primera parte de la investigación se centra en los recursos utilizados históricamente para documentar el patrimonio cultural material, a veces inferidos por los documentos y biografías de sus autores materiales, otras veces, deducidos a partir de la historia de los artefactos y técnicas.

### 1.1 Antecedentes históricos en la documentación del patrimonio

En la historia occidental<sup>4</sup>, las primeras colecciones de arte tienen como punto de partida la cultura helénica. Los atálidas de Pérgamo, son considerados pioneros en buscar,

4 Es oportuno advertir que existe un sesgo muy marcado en la llamada “historia universal”, nombrado por algunos autores como “eurocentrismo”, se trata de una visión historiográfica que tiende a considerar a Europa como cuna de la “cultura occidental”, que por tanto se vuelve el referente histórico obligado en cualquier análisis (Nuñez Sánchez, 1994). Este sesgo se refleja también en el recuento histórico y

coleccionar y clasificar objetos de arte griego, y es de sobra conocida la admiración de la cultura griega por parte de los romanos, quienes, además de coleccionar objetos, los tomaron como modelo de perfección. En estos dos casos —ubicados temporalmente en el siglo I a. C.—, el criterio de valor se basaba en el mérito de haber sido creados por una cultura considerada superior y no en su carácter histórico (González-Varas, 2000).

El siguiente referente en el registro documental del patrimonio material es Ciriaco de Ancona (1391-1455), un viajero, estudioso, coleccionista de antigüedades. Se dedicó a documentar monumentos y objetos que encontró durante sus viajes, su metodología de registro detallado por medio de dibujos y descripciones fue retomada por muchos estudiosos después de él, por eso ha sido considerado como padre de la arqueología (Macarrón Miguel, 2014).

Durante la época del Renacimiento, varios autores siguieron con el estudio de las ruinas de la Antigüedad Clásica (grecorromana) y de los textos clásicos. Hubo una incesante búsqueda por representar la realidad de la manera más precisa posible, de modo que se desarrollaron diversos tratados de pintura, escultura, dibujo y arquitectura. En este periodo, fueron varios los autores que realizaron viajes de estudio a las ruinas romanas (González-Varas, 2000).

El dibujo y los levantamientos arquitectónicos son, hasta la fecha, las formas de documentación más utilizadas y, si bien han evolucionado en cuanto a los instrumentos con que se realizan, conservan, como entonces, su esencia. La época de los anticuarios coincide además con el repunte de la imagen; es en este periodo que la gráfica y el dibujo toman un rol predominante, superando a la escritura. La ilustración científica tiene también su semejanza en el ámbito patrimonial: gracias a ello, los registros de la época han llegado hasta nosotros en forma de grabados y libros (Choay, 1992).

La de los anticuarios era una visión analítica de los monumentos y los registros que llevaban a cabo llevaban un fuerte componente intelectual. Esto no quiere decir que toda la sociedad del momento compartiera esa visión, en algunos casos, la conservación iconográfica es lo que nos queda del patrimonio material a falta de una conservación material, ya que mientras unos se dedicaban a su estudio y admiración, muchos más

---

tecnológico que sustenta esta investigación, ya que, al momento, la historiografía de la tecnología se centra en los considerados mundos dominantes y no en los desarrollos locales (Edgerton, 2010). Aunado a que, en materia de conservación de patrimonio cultural, la tradición europea llevó la batuta en México por mucho tiempo: teorías, técnicas y materiales han sido importados, aunque no siempre con buenos resultados (García Solís, 2009).

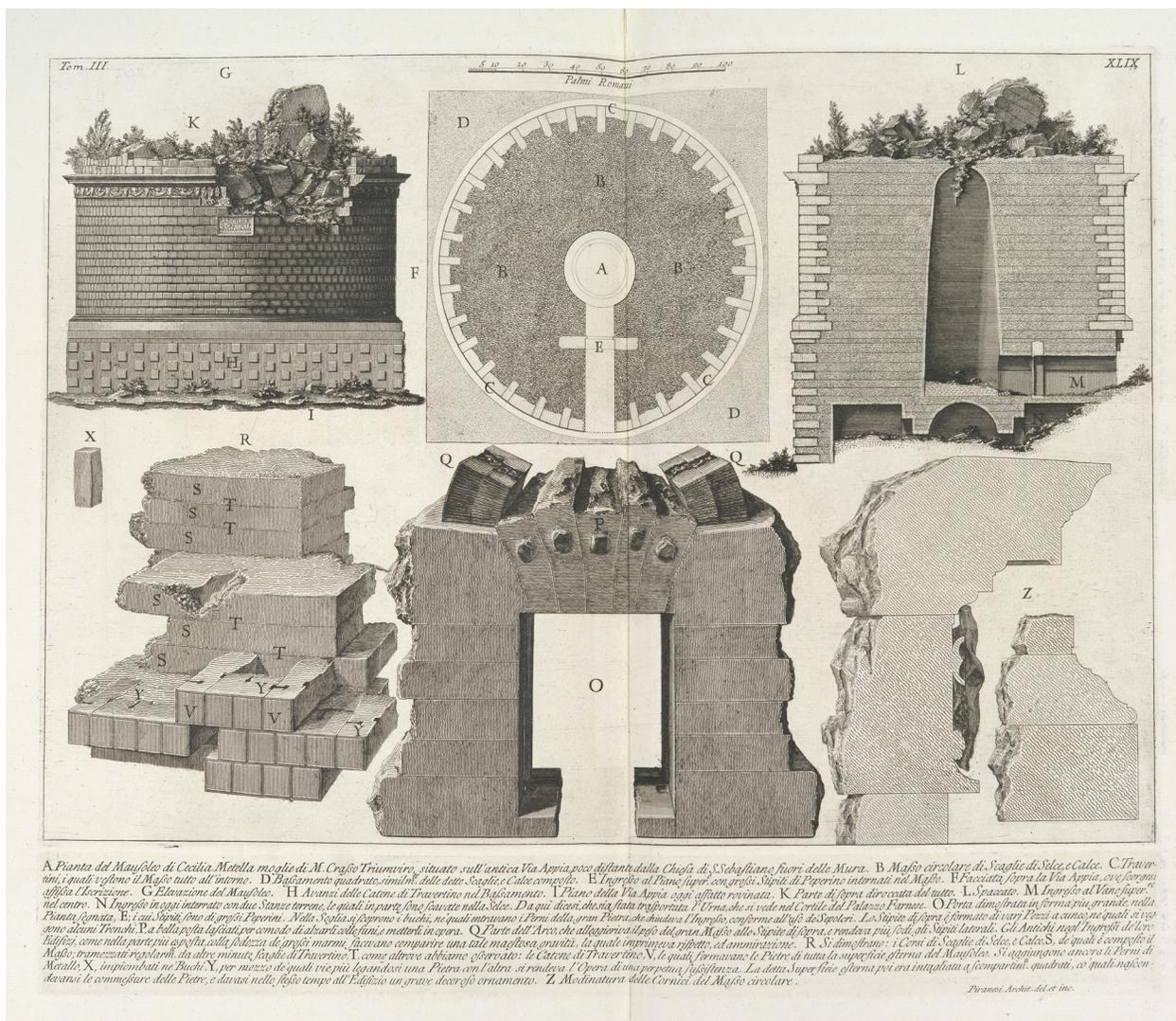


Figura 1. Análisis arquitectónico del Mausoleo de Caecilia Metella en Le Antichità Romane tomo 3, tavola 49. Autor: Giovanni Battista Piranesi, 1756-57. Fuente: Rogers Fund, consultado en <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/360363>

explotaron los antiguos edificios como canteras, de donde extrajeron material para las nuevas construcciones (Choay, 1992).

En el siglo XIX, como consecuencia de las llamadas Revoluciones Liberales que ocurrieron tanto en Europa como en América, se generalizó un sentimiento nacionalista entre los recién creados Estados Liberales que propició el surgimiento de las primeras Comisiones de Monumentos y sus respectivos instrumentos normativos. Su función era la salvaguarda de los monumentos nacionales, y, en primera instancia, se ocupaban del registro documental y la catalogación (González-Varas, 2000).

Durante este periodo, surge la Historia del Arte como disciplina científica y conforme a la metodología positivista se empiezan a catalogar los monumentos por estilos y épocas (González-Varas, 2000). En este contexto, arquitectos como Prosper Mérimée y Eugène

Viollet-le-Duc se embarcan en la tarea de realizar una amplia campaña de registro y catalogación de los monumentos franceses. Para ello, escriben manuales donde explican cómo deben llevarse a cabo las previsiones de conservación (Magar, 2017).

Así mismo, hacen énfasis en la necesidad de describir y dibujar detalladamente los edificios y los trabajos que se realicen en ellos. Sugieren también realizar calcas de los elementos, sobre todo éstos si no pueden conservarse (Viollet-le-Duc y Mérimée, [1849] 2017). Para realizarlas, se extendía y fijaba papel translucido sobre el objeto de interés —por ejemplo, relieves, grabados, pintura mural, vitrales— y se marcaban los trazos. Luego, esas calcas se reinterpretaban y se dibujaban a mano. Esta técnica fue muy común en las exploraciones arqueológicas en México entre las décadas de 1930 y 1960; en los archivos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)<sup>5</sup>, se conservan varias calcas de relieves y pintura mural mesoamericanos.

Ahora bien, el dibujo es una forma práctica de representar la realidad, sin embargo, requiere de cierta habilidad por parte del dibujante para lograr una comunicación efectiva, de modo que, junto con los tratados de dibujo renacentistas aparecieron a partir del siglo XVI algunos artefactos para sustituir la habilidad artística. Entre ellos, los dos que destacan por su impacto en la documentación de patrimonio cultural son la *camera lucida* y la *camera obscura*<sup>6</sup> (Newhall, [1937] 2002).

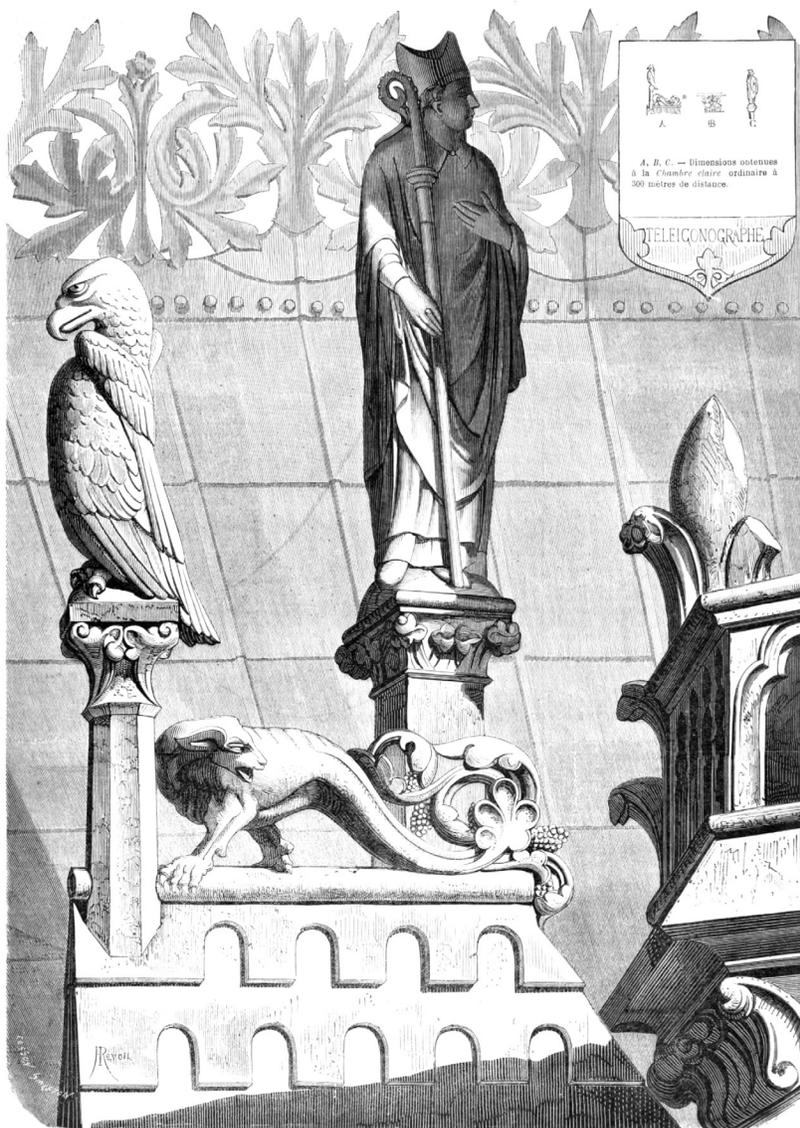
La cámara lúcida es un dispositivo óptico que tuvo mucho éxito entre los viajeros y exploradores. Fue diseñada por Hyde Wollaston en 1807 y consistía en un prisma colocado sobre un soporte que permitía ver imágenes proyectadas sobre el papel, mismas que después se calcaban (Newhall, [1937] 2002). Se produjeron diversos modelos de cámaras lúcidas, el mismo Viollet-le-Duc escribió en un artículo sobre el *Téléiconographe*, un modelo de cámara lúcida telescópica diseñado por Henri Revoil, que permitía dibujar reproducciones precisas de detalles lejanos (García, s. f.; «Lines in the air», 2015).

Con cámara lúcida, se documentaron monumentos en todo el mundo, y se lograron dibujos tan detallados y precisos que actualmente siguen siendo fuente de información para los investigadores, y, en casos menos afortunados, el único registro existente. John Stephens (1805-1852) escribe, en su libro *Incidents of travel in Yucatan*, sobre los

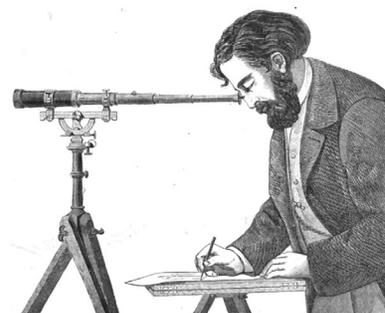
---

5 Algunos de estos pueden consultarse en: [https://mediateca.inah.gob.mx/islandora\\_74/islandora/search/catch\\_all\\_fields\\_mt%3A%28Calca%29?sort=score%20desc&limit=100](https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/search/catch_all_fields_mt%3A%28Calca%29?sort=score%20desc&limit=100)

6 En adelante, se utilizarán los términos castellanizados cámara lúcida y cámara oscura.



Dimensions de dessins originaux au TÉLÉICONOGRAPHE, à une distance de 300 mètres; motif de Notre Dame de Paris.



Le Téléicongraphe, chambre claire pour dessiner à toute distance

Figuras 2 y 3. Le Téléicongraphe, camera lucida para dibujar a cualquier distancia y un dibujo de Revoil, realizado a una distancia de 300 m 1869. Fuente: L'illustration: journal universel, v.54, 1869. Cortesía de HathiTrust.

dibujos que realizó el ilustrador Frederick Catherwood, con ayuda de la cámara lúcida para obtener la mayor exactitud (Mark, 2012; Stephens et. al, 1843).

Del mismo modo, la cámara oscura —cuyo principio óptico de funcionamiento era conocido en distintas culturas desde tiempos más remotos—, se comenzó a utilizar desde el siglo XVI como dispositivo de ayuda para el dibujo y la pintura. En un inicio, se trataba de una habitación cerrada y oscura, en la que sólo un pequeño orificio dejaba entrar la luz. Al interior, la imagen del exterior se reflejaba invertida en el muro opuesto y era posible calcarla o usarla como guía.

También se realizaron distintas variantes, algunas que incluían el uso de lentes para mejorar la calidad de la imagen y espejos para facilitar la calca, pero no fue hasta que se volvieron portátiles en los siglos XVII y XVIII, que se tornaron realmente útiles (Newhall, [1937] 2002). Pero la utilidad de la cámara oscura para el registro del patrimonio cultural material fue sobre todo indirecta, ya que la ésta es el antecedente más cercano de una herramienta fundamental en la documentación patrimonial: la fotografía.

La fotografía, inventada a principios del siglo XIX, se volvió rápidamente una forma de documentación del patrimonio cultural bastante aceptada. En seguida, se comenzaron a utilizar las fotografías con fines de investigación arqueológica (Newhall, [1937] 2002). Una vez más, Viollet-le-Duc escribe sobre la relevancia de la fotografía en los estudios científicos, para documentar los trabajos de restauración de los edificios antiguos (Viollet-le-Duc, [1875] 2017). Desde su creación hasta la fecha, se han implementado mejoras tanto en la técnica como en los artefactos fotográficos, y, además, se ha innovado en la forma de utilizar la fotografía (Newhall, [1937] 2002).



Figura 4. Par estereoscópico: Coatlícue en los patios del Antiguo Museo, ca. 1880. Fuente: D.R. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México. Consultado en <http://www.mediатеca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/fotografia%3A367526>

La estereoscopia es el fenómeno óptico con el que funciona la visión humana: consiste en apreciar el relieve de las cosas a partir de las sutiles diferencias de cada una de las imágenes que se generan en cada ojo (Almagro, 2004). Con este principio, comienzan a desarrollarse instrumentos que provocan un salto de la segunda a la tercera dimensión en

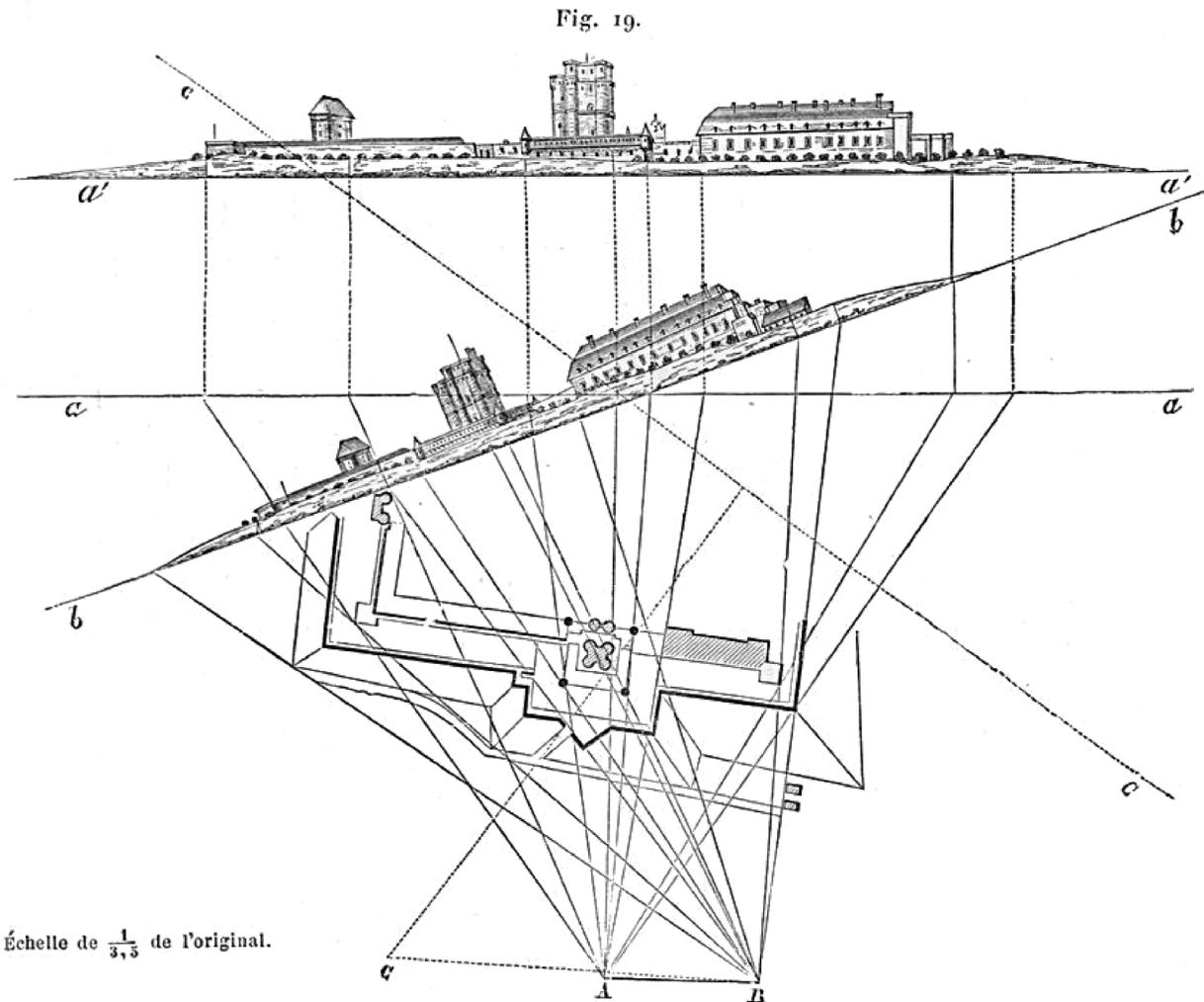


Figura 5. Levantamiento arquitectónico por medio de la técnica metrofotografía de Laussedat, 1898-1903. Fuente: Bibliothèque nationale de France, consultado en gallica.bnf.fr

la forma de capturar y ver las imágenes: surgen las cámaras de doble lente que generan dos imágenes ligeramente diferentes, que vistas a través de un dispositivo diseñado *ex profeso* llamado estereoscopio, creaban la ilusión de ver imágenes tridimensionales. Este tipo de imágenes conocidas como pares estereoscópicos fueron muy populares (Newhall, [1937] 2002) y aún constituyen una fuente de información tridimensional. Actualmente la estereoscopía vuelve a estar en boga con la realidad virtual, que funciona bajo los mismos principios ópticos pero que incorpora las nuevas tecnologías de información y comunicación.

Apartir de la invención de la fotografía, es posible observar cómo las diferentes técnicas e instrumentos se entrecruzan para desarrollar nuevos sistemas de documentación. Por un lado, Aimé Laussedat (1819-1907), director del Conservatorio Nacional de Artes

y Oficios francés, desarrolla una técnica para medir edificios a partir de perspectivas realizadas con cámara lúcida. Luego, el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer (1834-1921), la retoma usando fotografías en lugar de dibujos. De este modo, logra realizar el levantamiento de la catedral de Wetzlar, Alemania, y bautiza la técnica con el nombre de fotogrametría («Lines in the air», 2015). En 1885, se funda el Real Instituto Fotogramétrico Prusiano, dirigido por Meydenbauer, considerado el primer organismo encargado de la documentación de monumentos históricos por medio la fotogrametría (Almagro, 2004; «Lines in the air», 2015).

La fotogrametría también tiene una amplia trayectoria de desarrollo: en 1901, Pulfrich construye el primer estereocomparador, que era un aparato de precisión para medición fotogramétrica a partir de pares estereoscópicos; éste fue la base para todos los posteriores aparatos de restitución<sup>7</sup> como el estereoautógrafo de Von Orel, que además permitía el dibujo semiautomático de los puntos medidos (Almagro, 2004).



Figura 6. Friso del Partenón, molde de yeso, ca. 1890-1900. Fuente: Cornell University Library

7 Término que se refiere a la medición tridimensional.

También, debe hacerse un reconocimiento al desarrollo de conocimientos teóricos que, con el aporte de ecuaciones y fórmulas analíticas, fueron mejorando la técnica y los artefactos usados en ella, hasta llegar a la fotogrametría digital que es la que se usa en la actualidad (Carrillo-Garza, 2019). A partir de esos mismos principios, se han podido desarrollar otro tipo de instrumentos de registro tridimensional como los escáneres de luz estructurada.

Otra técnica popular entre los exploradores del siglo XIX para documentar sus hallazgos fue la producción de réplicas por medio de moldes de yeso realizados *in situ* directamente sobre los relieves. Así, se reprodujeron las esculturas griegas del Partenón en Atenas, Grecia (Payne, 2016). De igual modo, el explorador Alfred Maudslay replicó numerosas estelas mayas en México y Guatemala (Crasborn y Orrego, 2007). Algunos de estos yesos son el único registro que queda de los objetos que les dieron forma, pues, lamentablemente, algunos se han desgastado y resultan ahora ilegibles, mientras que otros se encuentran en paradero desconocido.



Figura 7. Modelo tridimensional generado con escáner de luz estructurada. Fuente: Laboratorio 3D CNCPC-INAH, 2017.

Como se puede observar en este breve recuento histórico, la documentación del patrimonio cultural comienza siendo bidimensional y logra a partir del siglo XIX alcanzar la tridimensionalidad. Sin embargo, las técnicas tridimensionales decimonónicas tienen aún muchas limitantes: la fotogrametría analítica es una técnica que requiere de cálculos complejos, y por ello, no es muy accesible. Para la realización de yesos, es necesario cargar con una gran cantidad de materiales, además de que esta técnica, en ocasiones

puede comprometer la integridad física de los originales, motivo por el cual, en la actualidad, no es muy recomendada.

Fue hasta finales del siglo XX que el registro tridimensional alcanza su verdadero auge. Esto tiene como antecedente la invención de las computadoras y el Diseño Asistido por Computadora (CAD) —desarrollados en las décadas de 1950 y 1960, respectivamente— que se integran a los aparatos de restitución analíticos y permiten automatizar el cálculo y el dibujo de coordenadas (Carrillo-Garza, 2019).

También en los años 50, se empieza a desarrollar la Visión Artificial o Visión por Computadora, disciplina científica que busca dar a las computadoras la capacidad de emular la visión humana. La visión 3D artificial es el elemento clave para la generación de modelos tridimensionales a partir de imágenes bidimensionales; por medio de ella se desarrollan técnicas y sistemas que permiten captar la profundidad de los objetos, sistemas mediante los cuales funcionan los escáneres tridimensionales y la fotogrametría digital (Vidolab, 2018; «Visión artificial», 2019).

Actualmente, se conoce como digitalización 3D a los procesos de reconstrucción digital de un objeto o una escena que da como resultado un modelo tridimensional digital. El uso de técnicas de digitalización 3D como son la fotogrametría digital y los diversos tipos de escaneo tridimensional han beneficiado la documentación de los bienes culturales debido a la precisión que alcanzan, la diversidad de análisis que permiten y, sobre todo, a que se trata de técnicas no intrusivas que permiten el registro tridimensional sin comprometer la integridad del patrimonio material (Jáidar Benavides *et al.*, 2017).

Con lo dicho hasta ahora, es posible notar cómo las técnicas de documentación del patrimonio cultural han evolucionado gracias a los avances en el conocimiento y en la capacidad tecnológica. Es así como concluye esta breve revisión tecnológica, pues son las técnicas de digitalización 3D las que competen a este estudio y las retomaremos más adelante al profundizar en las especificidades técnicas de nuestra propuesta.

## **1.2 Documentación del patrimonio en las cartas y convenciones de restauración**

En el siglo XIX, comienza el desarrollo de la conservación como disciplina, pero es en el XX en el que se consolida como una labor que compete a la colectividad. La *Carta de Atenas* de 1931 —en cuya creación participaron muy pocos países, y todos europeos— fue el primer instrumento normativo de compromiso internacional para la protección de los monumentos. La carta se da en un contexto de entreguerras, en un momento en que

el pensamiento socialista empieza a difundirse por toda Europa, de ahí que la carta en cierta forma privilegia el derecho de la colectividad al patrimonio sobre el interés privado.

En esta carta se hace la recomendación de hacer levantamientos precisos que acompañen las excavaciones arqueológicas. Además, sugiere la realización de inventarios de los monumentos acompañados con fotografía y notas, así como la creación de archivos donde se conserve la documentación de los monumentos y la publicación de artículos referentes a procedimientos y métodos de conservación (*Carta de Atenas*, 1931).

Tres décadas después, en 1964, se redacta la *Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios*, mejor conocida como *Carta de Venecia*, que es más amplia que la de Atenas, tanto en sus alcances y como en la convocatoria de sus participantes, a pesar de que en su mayoría siguen siendo europeos, en este caso de da también la participación de México.

La *Carta de Venecia* es la que sigue siendo el referente para las cartas y convenciones que se han hecho desde entonces. Además de que, en la actualidad, son muchos más los países que se han adherido a ella y se han comprometido a seguir sus recomendaciones. En ese documento, se establece que la conservación preventiva a largo plazo debe preferirse a las restauraciones, y que, cuando éstas sean necesarias, deben estar precedidas por estudios arqueológicos y científicos. Menciona que los trabajos de conservación, restauración y excavación deberán documentarse de manera precisa en cada una de sus fases mediante informes analíticos ilustrados con fotografías y dibujos (ICOMOS, 1964).

Diversas cartas y convenciones se han adoptado desde la *Carta de Venecia*, pero fue hasta 1996 que se redactaron los *Principios para la Creación de Archivos Documentales de Monumentos, Conjuntos Arquitectónicos y Sitios Históricos y Artísticos*. Este instrumento fue ratificado en la 11a Asamblea General del ICOMOS<sup>8</sup> en Sofía, Bulgaria. En él, se detallan las motivaciones y características que deben tener los registros documentales del patrimonio cultural. Se menciona la importancia de la documentación para entender mejor al patrimonio, sus valores y su evolución, así como para promoverlo y asegurar su conservación. Prioriza la documentación en caso de bienes que se encuentren en riesgo o requieran ser intervenidos. La planificación del registro documental debe contemplar

---

8 Consejo Internacional de Monumentos y Sitios, es una organización dependiente de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

los objetivos y la naturaleza de los bienes, para elegir las técnicas adecuadas según las necesidades específicas (ICOMOS, 1996).

Entre las técnicas que menciona para el registro se encuentran descripciones y análisis escritos, fotografías, fotogrametría, estudios geológicos, cartografía, levantamientos, dibujos, croquis, reproducciones de piezas, y abre la posibilidad al uso de otras tecnologías tradicionales o modernas. Recomienda, en la medida de lo posible, el uso de tecnologías no intrusivas. Finalmente, en ese documento también se detalla el contenido deseable de los registros: cómo identificarlos, resguardarlos y difundirlos (ICOMOS, 1996).

Las convenciones subsecuentes, cuando hablan de documentación, hacen referencia tanto a la *Carta de Venecia* como a los *Principios* de 1996. El *Informe Mundial 2000 de ICOMOS sobre Monumentos y Sitios en Peligro* menciona además la importancia de documentar y monitorear las condiciones, niveles de conservación y de riesgo del patrimonio. Así mismo, hace referencia a la conservación no sólo de los bienes sino también de sus registros documentales, archivos e informes sobre tratamientos e investigaciones, ya que constituyen fuentes valiosas para el conocimiento del patrimonio y de su estado de conservación (ICOMOS, 2000).

Este mismo informe, señala la importancia de desarrollar técnicas y métodos de detección temprana, monitoreo, previsión y seguimiento de los daños, como una forma de respuesta a los riesgos que pesan sobre el patrimonio cultural a causa de procesos naturales. Lo anterior es un tema que nos compete, pues como se abordará en el siguiente capítulo, el monitoreo de conservación busca analizar esos factores de riesgo, proponer acciones de mitigación o prevención, y evaluar su impacto (ICOMOS, 2000).

Para concluir, se considera relevante mencionar la *Carta para la Preservación del Patrimonio Digital*, puesto que el tipo de registros que se utilizan en nuestra propuesta entran en esa categoría. En esta iniciativa de la UNESCO, se definen como patrimonio digital, los recursos que se generan directamente en formato digital, y que no existen en otro formato, o los que se convierten a éste a partir de material analógico existente. Como se indica en la sección anterior, los modelos tridimensionales son representaciones digitales de los objetos reales, por tanto, pueden considerarse como patrimonio digital. La carta busca proteger este tipo de documentación digital, ya que la considera como fuentes de información, que provienen del saber y la expresión de la humanidad, de forma equiparable al patrimonio documental (UNESCO, 2003).

Con lo dicho hasta ahora, es posible comprender cuál ha sido el papel de la documentación en el conocimiento, la valoración y la conservación del patrimonio

material. Las técnicas han variado a lo largo de la historia, y se han modificado los modos de hacer, hasta llegar a cierta unificación de criterios como se observa en las cartas analizadas en esta sección. Al igual que todos los aspectos de la vida, las actividades de conservación están en continuo movimiento, de la mano de los desarrollos tecnológicos y de los cambios culturales.

La documentación del patrimonio cultural es parte del proceso de conservación y la tecnología ya está siendo reconocida como una pieza integral dentro de ese proceso. En este breve recuento histórico, se pudo observar que la documentación se encuentra estrechamente ligada con el monitoreo de conservación, pues varias técnicas de documentación se utilizan para llevar a cabo esa crítica labor. Por último, reconocemos que el mundo se ha hecho cada vez más consciente del constante riesgo en el que se encuentra el patrimonio cultural, como se puede entrever en las cartas y convenciones de restauración. Por esta razón, se plantea la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para la evaluación y monitoreo de bienes culturales, que es precisamente el tema que se desarrolla en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 2

## TECNOLOGÍA EN EL MONITOREO DE CONSERVACIÓN

A partir del análisis reportado en el capítulo anterior, hemos visto que la tecnología se ha ido incorporando cada vez más a la conservación del patrimonio cultural, en este capítulo se hará una revisión de la literatura para conocer la problemática general del monitoreo de conservación, y se abordará específicamente el papel que ha jugado la tecnología para el desarrollo de herramientas de monitoreo más eficientes y completas.

Diversos autores (Doehne y Price, 2010; Jáidar *et al.*, 2017, Manfredi *et al.*, 2014; Rives y Garcia-Talegon, 2006) aplauden la integración de la ciencia y la tecnología en la conservación, ya que consideran que esa apropiación ha mejorado el conocimiento de comportamientos estructurales y materiales, así como de los procesos de deterioro, lo cual repercute en acciones más acertadas y en anticipar los posibles problemas que pueden implicar. En particular, el desarrollo de este capítulo se enfocará en aquellas técnicas dedicadas a la detección de cambios en el patrimonio cultural, puesto que es en esta categoría que cae la propuesta que desarrollaremos más adelante.

### 2.1 Problemática del monitoreo de conservación

Como se mencionó anteriormente, el monitoreo de conservación consiste en una serie de actividades destinadas a la revisión del estado de un bien cultural y a la evaluación de

los riesgos a los que está sometido (Iturralde, 2018); entre las tareas más comunes se encuentran la observación, el dibujo, la fotografía, el registro de temperatura y humedad relativa, el registro de color, el registro gráfico de los deterioros y la detección de vibraciones. En la arquitectura, es posible utilizar puntos de control para vigilar los movimientos de los edificios, medir grietas y fisuras, hacer secciones para ver deformaciones en las superficies, calcular los desplomos de los elementos verticales. Lo anterior se realiza mediante técnicas analíticas que se apoyan en dibujo, mediciones puntuales y cálculos.

En la revisión de la literatura, podemos identificar principalmente cuatro tipos de problemas en el monitoreo de conservación: las limitaciones en instrumentos y métodos, la falta de uniformidad de los registros multitemporales<sup>9</sup>, la subjetividad de las evaluaciones por la carencia de datos cuantificables y la falta de constancia a causa de fallas sistemáticas en los proyectos de monitoreo.

Como ya se mencionó, las principales técnicas de documentación y monitoreo son el dibujo y la fotografía, y aunque son herramientas muy versátiles, también tienen ciertas limitaciones con algunos tipos de objetos. Para dar un ejemplo, veamos el caso de los relieves escultóricos: si bien la fotografía logra registrar los detalles de manera fidedigna, y permite un registro rápido, algunas veces limita la distinción de ciertas características volumétricas. Por otro lado, el dibujo, al ser más selectivo, es capaz de ofrecer mayor grado de interpretación, con la desventaja de ser una técnica más tardada, que requiere de habilidad y brinda menor fidelidad. Por estos motivos, siempre se busca utilizar ambas estrategias de modo que se complementen para obtener registros lo más completos posible (Medina-González *et al.*, 2016).

Con respecto a la falta de uniformidad en los registros, cabe señalar que esto puede ocurrir por diversas razones. En algunos casos, los registros se hacen en diferentes momentos y no se usan los mismos instrumentos —lo cual no necesariamente es algo malo, puede ser que se utilicen dos cámaras fotográficas diferentes porque la tecnología mejora constantemente— o las condiciones ambientales simplemente no lo permiten, por ejemplo, cuando los registros se hacen en distintas temporadas, o distintos momentos del día y las condiciones lumínicas cambian (Coronado *et al.*, 2017, Doehne y Price, 2010; Malinverni *et al.*, 2017; Peteler *et al.*, 2015).

---

9 Registro o documentación multitemporal es cuando se registra la misma cosa, sea un objeto o un tipo de medición, en diferentes momentos. Los intervalos de tiempo suelen definirse de acuerdo a las necesidades de lo que se está midiendo, a las técnicas de medición o a otros factores.

Sin embargo, la falta de uniformidad en el registro puede evitarse fácilmente sin requerir de equipos complejos o costosos, a partir de la implementación de buenas prácticas de registro, como son: realizar siempre una planeación de los levantamientos fotográficos para cubrir a totalidad el objeto que se quiere registrar, tomar las fotografías con un correcto balance de blancos, cuidando siempre el enfoque y exposición, o al menos pueden tomarse acciones correctivas para compensarlo como es el pos-proceso de las fotografías (Malinverni *et al.*, 2017; Peteler *et al.*, 2015). Hay que tener presente que, para alcanzar una comparación confiable entre los datos, es necesario un adecuado registro multitemporal (Doehne y Price, 2010).

Otro problema recurrente es la subjetividad de las evaluaciones a causa de la carencia de datos cuantificables: diversos autores coinciden en que muchas veces la detección de cambios se estima a partir de la inspección visual, de los informes gráficos y escritos, es decir, de valoraciones subjetivas que dependen del observador, aunado a la posibilidad de que quien haga las visitas de inspección no siempre sea la misma persona (Doehne y Price, 2010; Manfredi *et al.*, 2014; Tapia y García, 2017).

La observación es muy útil para hacer un rápido examen del estado de conservación de un bien cultural, sin embargo, conviene complementarla con otras técnicas analíticas que brinden un respaldo con datos duros, y, sobre todo, que proporcionen un medio confiable de detectar de manera oportuna las afectaciones del patrimonio material (Doehne y Price, 2010; Manfredi *et al.*, 2014; Tapia y García, 2017).

Por poner un ejemplo, no es posible obtener tasas de deterioro solo con la observación y los informes gráficos, para conseguirlas es necesario un proceso de inspección que permita cuantificar los cambios durante un amplio lapso de tiempo. Algunos conceptos que un tiempo habían sido cualitativos como la intemperización ya se han logrado cuantificar y replicar en el laboratorio. Esto ha favorecido la realización de modelos de daños acertados y tratamientos más eficaces. Por este motivo, también existen cada vez más proyectos enfocados a llenar ese vacío en materia de mediciones cuantitativas y reproducibles (Doehne y Price, 2010).

Finalmente, se reportan también fallas en cuanto a la constancia en los programas de monitoreo, debido principalmente a problemas sistemáticos de gestión. Muchas veces los registros no se llevan a cabo con la frecuencia debida, eso trae como consecuencia que no haya datos suficientes para realizar las comparaciones (Coronado *et al.*, 2017). Este problema es, quizás, el más complicado de resolver, pues involucra dinámicas

mucho más amplias que implican a diversos actores sociales. En el siguiente apartado, profundizaremos un poco más en este tema enfocándolo al caso de México.

### 2.1.1 Monitoreo de conservación en el contexto social y político

Las cuestiones referentes al patrimonio cultural mexicano están normadas por la *Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas*, promulgada en 1972. En ella, se definen los monumentos como arqueológicos, artísticos e históricos, además se especifican los requisitos para su declaratoria, y se establecen las competencias de los organismos encargados de su investigación, conservación y, en su caso, restauración.

En la revisión de esta Ley —que, cabe mencionar, ha tenido muy pocas y no muy sustanciales modificaciones desde su promulgación—, y la revisión de otros documentos del momento, como las *Normas de Quito* de 1967, y la *Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural* también de 1972, se puede observar que en ellas se pone la responsabilidad de la conservación patrimonial en manos del Estado, a través de dependencias especializadas (*Ley Federal Sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas*, 1972; *Normas de Quito*, 1967; UNESCO, 1972). Idealmente, eso sería beneficioso para el patrimonio cultural, pues al considerarlo como un bien común de la Nación se debería garantizar su protección y su atención por parte de personal capacitado, lamentablemente, esa no es la realidad de México.

Si bien existen los organismos especializados<sup>10</sup>, que conducen una amplia labor, que abarca investigación, estudio, formación de recursos humanos, conservación, restauración, supervisión y difusión del patrimonio cultural, es también cierto que estas dependencias del Estado no cuentan con recursos suficientes para llevar a cabo las acciones necesarias para la conservación del patrimonio nacional. Esto se traduce, entre otras cosas, en las mencionadas fallas sistemáticas en los planes de conservación y monitoreo que muchas veces no se pueden llevar a cabo debido a los recursos limitados.

Paralelamente, hay que considerar que en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural intervienen distintos actores; por un lado, se encuentran los profesionales de la conservación. Éstos pueden ser equipos compuestos por representantes de distintas disciplinas como la restauración de monumentos y de bienes materiales, la arqueología, la arquitectura, la química, la biología, entre otros; con formación, experiencia,

<sup>10</sup> Actualmente, dependientes de la Secretaría de Cultura, se encuentran el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural (DGSMPC) y el Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura (INBAL).

habilidades, destrezas distintas, que abordarán el objeto de estudio y las problemáticas, cada uno, desde una óptica particular. Este grupo también incluye a las dependencias especializadas.

Por otro lado, están las comunidades, las instituciones, las autoridades, las organizaciones civiles, las empresas privadas —y la lista puede seguir creciendo— ya que es común que las actividades de conservación involucren autoridades gubernamentales a distintos niveles, así como organismos públicos y privados locales, nacionales e internacionales, que cumplen, en algunos casos, la función de brindar apoyo económico (INAH, 2009, 2017, 2018; Notimex, 2018; U.S. Mission to Mexico, 2017).

Algunas veces, tener tantas personas involucradas en la toma de decisiones resulta contraproducente, pues es frecuente encontrarse con opiniones encontradas sobre la criticidad de la intervención y sin datos duros con los cuales respaldarse. La toma de decisiones en conservación se complica porque, además, están en juego bienes de valor inestimable. Por este motivo, los conservadores se han apoyado en la ciencia y la tecnología para buscar respaldar sus acciones y mejorar sus resultados, ya que, del diagnóstico, se derivan acciones que repercuten en el éxito o el fracaso de las intervenciones (Guerrero, 2009).

Desde otro punto de vista, se encuentra siempre el dilema de la explotación turística del patrimonio cultural como detonador económico y social. Aquí, es posible ampliar el panorama, pues este caso aplica otras partes de América Latina. Con las *Normas de Quito*, se trató de promover la explotación del patrimonio material en aras del desarrollo de Latinoamérica (*Normas de Quito*, 1967). Y, aunque el patrimonio cultural sí es un importante motor de desarrollo porque estimula la economía local, su usufructo también puede tener implicaciones negativas si no se llevan a cabo programas de monitoreo y conservación permanente.

La apertura al público de una zona arqueológica implica: un aumento del flujo turístico, un impacto en el paisaje y en las expectativas de la comunidad, pero también en los monumentos, en sus planes y en sus acciones de monitoreo. La implementación de programas de monitoreo confiables y constantes posibilita llevar a cabo medidas de prevención y conservación de manera oportuna (Morales, 2007).

Para cerrar, este análisis del contexto actual de la conservación nos confirma la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de monitoreo, en específico de detección de cambios, que aporten datos cuantificables para apoyar la toma de decisiones. Siempre en el entendido de que estas técnicas son herramientas que no sustituyen el análisis crítico,

sino que lo complementan. Desde luego, habrán de considerar el panorama nacional, ya que la restricción de recursos para las actividades de conservación es una realidad, por tanto, las metodologías propuestas deben de poder adaptarse a las condiciones particulares. Esto puede lograrse mediante el uso de técnicas de registro de bajo costo como la fotogrametría, y el uso de software libre para la generación, edición y análisis de modelos tridimensionales<sup>11</sup>.

## 2.2 Detección de cambios superficiales en bienes culturales

En la literatura, podemos encontrar que varias disciplinas han utilizado técnicas de detección de cambios desde hace al menos tres décadas. Por ejemplo, en las disciplinas geoespaciales, la identificación de cambios en la superficie de la Tierra ha sido bastante frecuente (Abate, 2019; Malinverni *et al.*, 2017); incluso, esa es una forma rápida para calcular los daños provocados por desastres naturales (ARIA, 2017). El ámbito de la conservación no ha sido la excepción, ya que se han probado también algunas técnicas que involucran el uso de tecnologías de digitalización en dos y tres dimensiones. A continuación, analizaremos las características principales de algunas de ellas.

En la primera técnica analizada, que llamaremos DC1, el caso de estudio fue un muro de adobe con relieves policromados, localizado en el sitio Huaca de la Luna en Perú, y lo que se buscó fue detectar cambios de color en las policromías. La técnica consiste en el levantamiento fotogramétrico de los relieves, a partir del cual se obtuvieron ortoimágenes, que son imágenes bidimensionales corregidas para que no existan deformaciones perspectivas en ellas, es decir, representan la proyección ortogonal del objeto. Mediante el uso de algoritmos, estas imágenes se confrontan para identificar en ellas los píxeles que han cambiado de color. El resultado es un mapa de diferencias, en el que se muestran las áreas con cambios y áreas sin cambios (Malinverni *et al.*, 2017).

En la técnica DC2, se buscó detectar la deformación de una pintura sobre tabla. En este proyecto, se usaron como técnicas de digitalización 3D tanto la fotogrametría como el escaneo de luz estructurada, ya que se hicieron además otros tipos de análisis. Para

---

11 Cabe mencionar que, en las instituciones especializadas en conservación de patrimonio de México, existen laboratorios con varios años de experiencia que se dedican a la investigación y el uso de tecnologías de digitalización y análisis de imagen para la conservación del patrimonio, que cuentan con la infraestructura y que podrían implementar técnicas de detección de cambios como la que se propone en esta investigación. Los levantamientos de uno los casos de estudio en esta investigación fueron realizados por el Laboratorio de Documentación y Análisis Tridimensional de la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural (Laboratorio 3D-CNCPC) del INAH.

la detección de deformación, se parte de la hipótesis de que la tabla, originalmente, era plana, de modo que, con base en el modelo 3D, se generó un plano hipotético y se compararon las diferencias por medio de la técnica DA. Como resultado, se obtuvo un mapa que muestra deformación de la tabla respecto a su supuesto estado original (Abate *et al.*, 2014).

En tercer lugar, tenemos la técnica DC3, cuyo objetivo fue detectar distintos tipos de daños provocados en un muro de concreto construido aposta. Se realizó levantamiento fotogramétrico y se tomaron puntos de control mediante escaneo láser. En este experimento, se realizaron cuatro adquisiciones, y en cada una de ellas se alteraron las condiciones de iluminación. En el primer registro, el muro estaba intacto, a continuación, para simular los deterioros más comunes, se le infligieron diversos tipos de alteraciones, intensificándolas tras cada adquisición. A partir de ortoimágenes, se generaron mapas de profundidad, y se compararon mediante un algoritmo de “diferencia de imagen”. El resultado fue una serie de mapas de diferencias, en los que se observan los cambios a través de una graduación de color (Peteler *et al.*, 2015).

Finalmente, en la técnica DC4, se buscó detectar y cuantificar los daños ocasionados a una pintura sobre tela elaborada para el experimento. Para el registro multitemporal, se utilizó la técnica *Reflectance Transformation Imaging* (RTI), que consiste en registrar, a través de múltiples fotografías, la información de reflectancia de una superficie. Las fotografías se toman desde un punto fijo, iluminando el objeto desde distintas direcciones. La información de la iluminación de las imágenes se usa para generar un modelo matemático interactivo de la superficie que permite visualizar algunos detalles del objeto que son resaltados gracias al juego de luces y sombras. Con este tipo de registro, se pueden obtener las “normales” de los puntos medidos en la superficie del objeto (Manfredi *et al.*, 2014). La “normal” es un tipo de dato geométrico representado como un vector perpendicular a la superficie en un punto determinado, en la figura 8 podemos ver las normales de una superficie representadas como flechas.

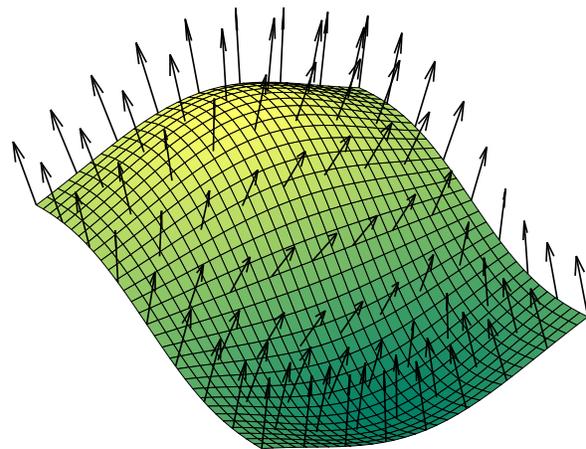


Figura 8. Normales de una superficie. Autor: Nicoguaro, Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46926592#file>

Los cambios producidos en la superficie alteran los valores de sus normales y, por tanto, se ven reflejados en las imágenes que produce la RTI. Éstas se alinean y comparan para producir mapas de diferencias que distinguen las áreas con cambios de aquellas sin cambios. Por otro lado, al cambiar la normal de la superficie varía también la forma en que refleja la luz, es decir, su reflectancia, por lo que la técnica permite generar mapas de intensidad, que determinan la dimensión de los cambios.

Para la caracterización de la técnica, se definieron como criterios de análisis, primero, el tipo de patrimonio o en su caso el objeto de estudio y la finalidad de la detección, es decir qué tipo de cambios se esperaba detectar; luego, la técnica de documentación y, por consiguiente, el tipo de datos que se usaron para la comparación. Por último, los métodos o técnicas de detección y su correspondiente comunicación de resultados, o bien, el producto final del análisis. La tabla 1 sintetiza la caracterización de las técnicas de detección de cambios analizadas.

Como podemos ver, existen dos componentes esenciales en la detección de cambios: la documentación multitemporal —se manejará de esta forma también el caso del plano hipotético, pues busca simular un momento histórico de la pieza— y la comparación. En las técnicas antes descritas, se pudo constatar que uno de los aspectos que varía es la definición de los indicadores de medición de los cambios; las razones de esto tienen que ver principalmente con los objetivos perseguidos con el monitoreo, y el tipo de datos comparados, y, por tanto, con la técnica de documentación. También, se encontró que una de las interrogantes que tienen en común los autores es la decisión de cuáles cambios detectados son considerados significativos, y cuáles no, una situación que se resuelve de manera diferente según la técnica.

Entre las técnicas analizadas, las primeras diferencias que encontramos son en el tipo de objeto, pues se trata de dos pinturas, una sobre tabla y una sobre tela, y dos muros, uno liso de concreto y uno de adobe cubierto con relieves policromados. Dos de las técnicas utilizan casos de estudio reales, mientras que las otras dos, usan probetas realizadas específicamente para ese fin.

Las cuatro técnicas usan tecnologías de digitalización basadas en fotografías, y una utiliza además escaneo de luz estructurada. A pesar de que la fotogrametría es la técnica más usada, podemos observar que sólo una de las técnicas hace la comparación entre modelos tridimensionales, mientras que, en las otras, los análisis se hacen a partir de la información bidimensional registrada en ortoimágenes. Lo anterior no quiere decir que

<b>Caracterización de técnicas de detección de cambios</b>				
	<b>Técnica DC1</b>	<b>Técnica DC2</b>	<b>Técnica DC3</b>	<b>Técnica DC4</b>
<b>Tipo de patrimonio</b>	Muro de adobe con relieves policromados	Pintura sobre tabla	Muro de concreto (probeta)	Pintura sobre tela (probeta)
<b>Objetivos</b>	Detectar cambios de color	Detectar deformación	Detectar daños	Medir cuantitativamente los daños
<b>Técnica de documentación</b>	Fotogrametría	Fotogrametría y escaneo de luz estructurada	Fotogrametría con puntos de control de escaneo láser	Reflectance Transformation Imaging (RTI)
<b>Tipo de datos comparados</b>	Ortoimágenes (Modelo Digital de Elevación o DEM)	Modelo 3D en malla triangulada	Mapas de profundidad a partir de ortoimágenes	Normales (dato geométrico)
<b>Método</b>	Identificación de píxeles que cambian de color entre las dos imágenes.	Comparación de modelos 3D contra plano hipotético (se presume que la tabla originalmente estaba plana)	Comparación de mapas de profundidad con un algoritmo de “diferencia de imagen”	Identificación de cambios en las normales de los puntos medidos sobre la superficie
<b>Comunicación de resultados</b>	Mapas de diferencias (áreas con cambios/ áreas sin cambios)	Mapas de desviación (distancia entre los modelos)	Mapa de diferencias (graduación de cambios)	Mapas de diferencias, mapas de intensidad (variaciones en la reflectancia)
<b>Autores</b>	(Malinverni et al., 2017)	(Abate et al., 2014)	(Peteler et al., 2015)	(Manfredi et al., 2014)

Tabla 1. Caracterización de técnicas de detección de cambios. Fuente: Autoría propia, 2020.

las técnicas analizadas no puedan medir cambios tridimensionales, sólo que lo hacen a través del análisis de normales o de la profundidad de la imagen.

Aquí, conviene señalar algo que caracteriza a todos los objetos estudiados con las técnicas analizadas: se trata de obras bidimensionales, incluso en el caso de los relieves policromados, las diferencias con el plano de soporte son mínimas. De modo que, se concluye que estos procedimientos no serían igual de eficaces si se aplicaran en obras tridimensionales.

Otra cosa que se observó es que, si bien se obtuvieron mediante procesos diversos y el tipo de cambios también varía, todas las técnicas tienen una forma similar de comunicar los resultados, a saber, por medio de mapas de colores que representan las diferencias. Es decir, como producto final, se obtienen imágenes bidimensionales

codificadas con colores, que indican en dónde se presentaron los cambios y, en algunos casos, la cuantificación del cambio identificado.

A partir de este análisis, se pudo determinar que, para desarrollar una herramienta de detección de cambios, es necesario considerar los siguientes aspectos: en primer lugar, es deseable la estandarización de los procesos, así como contar con protocolos de adquisición de datos que sean óptimos o, que por lo menos, se conozcan sus carencias. En la práctica, se sabe que en ocasiones para el monitoreo no queda otra opción más que recurrir a registros realizados con diferentes propósitos que no siempre cumplen con la calidad deseable. Por eso, es oportuno referir que la tecnología incluye recursos que nos pueden ayudar a compensar esas deficiencias: en el caso de la técnica DC1, al contar con dos levantamientos realizados en diferentes condiciones y con diferentes equipos, se usaron algoritmos de edición de imagen para tratar de igualar las fotografías de los dos levantamientos antes de construir los modelos.

Lo anterior nos lleva a la segunda reflexión, que tiene que ver con la reproducibilidad de las técnicas. Para garantizar un mejor aprovechamiento de la técnica, todo el procedimiento, desde la adquisición de datos hasta el análisis, debe poder ser reproducido en diferentes momentos, con equipos distintos y siendo operados por otras personas.

Por último, es necesario reconocer la sensibilidad a los cambios de la técnica que vamos a utilizar. Esto se define a partir de la reproducibilidad y de la exactitud de las mediciones. Es importante, ya que si desconocemos la sensibilidad a los cambios es posible confundir un cambio real en el objeto con la incertidumbre esperada en la medición (Manfredi *et al.*, 2014).

La caracterización de las técnicas que utilizan tecnología de digitalización y análisis de imagen para detectar cambios en el patrimonio material resultó muy útil para la investigación pues algunas de las consideraciones que tomaron los autores de esas técnicas fueron referentes en el diseño de nuestra propuesta metodológica. Así mismo, se trató de conservar algunos de sus aciertos y corregir algunas de sus deficiencias, sobre todo considerando la diferencia que tienen los relieves escultóricos con las obras bidimensionales.

# CAPÍTULO 3

## TÉCNICA *DEVIATION ANALYSIS*

### Y SUS APLICACIONES

En el siguiente capítulo, se abordará la herramienta de detección de cambios que se seleccionó para el desarrollo de nuestra propuesta metodológica, a saber, la técnica *Deviation Analysis* (DA o Análisis de Desviaciones). En la primera sección, se describirán los antecedentes históricos de la técnica que surge en la industria de manufactura como una solución para evaluar piezas con geometrías complejas. Se expondrán algunos ejemplos de aplicaciones de esta técnica en sectores industriales para el control de calidad y la evaluación de daños. Luego, analizaremos algunos casos en los que se ha utilizado la misma técnica en el ámbito del patrimonio cultural y el tipo de resultados que se han obtenido.

#### 3.1 Aplicaciones en la Inspección dimensional

En la industria de manufactura, los modelos tridimensionales se comenzaron a usar en los procesos de inspección automatizada. Éstos consisten en evaluar los modelos por medio de software refiriendo como parámetro un método de inspección que se conoce como Dimensionamiento Geométrico y Tolerancia (GD&T). El GD&T evalúa una serie de rasgos: rectitud, planitud, circularidad y cilindricidad, que son errores de forma; angulosidad, paralelismo y perpendicularidad, que son errores de orientación;

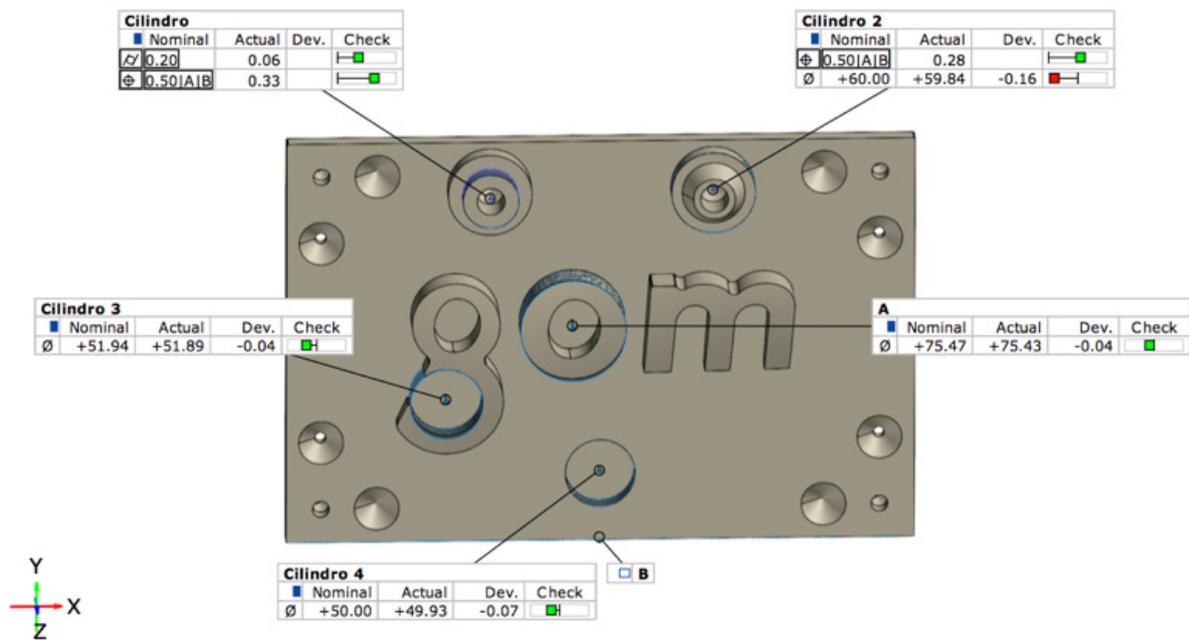


Figura 9. Inspección dimensional de una pieza. Los rasgos evaluados son diámetro, cilindricidad, posición respecto a plano. Fuente: Autoría propia, modelos de GOM Inspect, 2020.

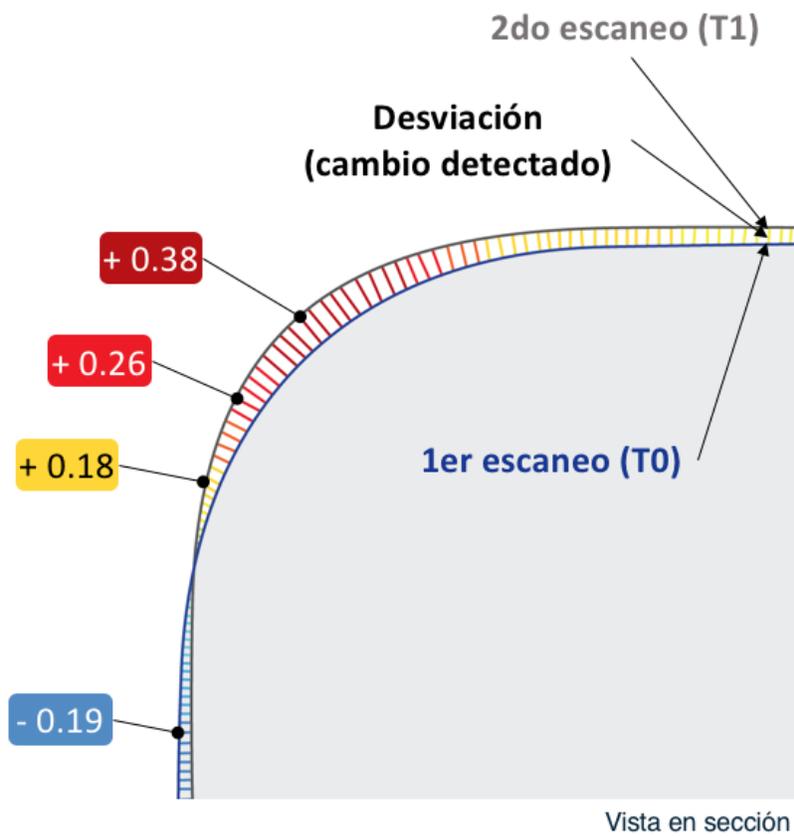


Figura 10. Sección que muestra la comparación de superficies. Fuente: Autoría propia, 2020.

concentricidad y simetría con la posición, que son atributos de ubicación (Pathak *et al.*, 2015).

El enfoque tradicional para la evaluación antes del GD&T implicaba el uso de una Máquina de Medición por Coordenadas (CMM) la cual computaba puntos individuales por medio de un “palpador” que iba tocando la superficie del objeto. Era un procedimiento tardado, que no proporcionaba información detallada de los rasgos mencionados. Indicaba la presencia de errores en el objeto, sin embargo, no especificaba qué tipo de errores (Pathak *et al.*, 2015).

Los escáneres 3D hicieron posible el desarrollo de una disciplina de Inspección dimensional, de la cual forma parte la técnica DA: ésta última consiste en digitalizar el objeto, preparar el modelo tridimensional y compararlo contra un modelo de referencia, que suele ser el modelo CAD o modelo de diseño (Pathak *et al.*, 2015). El proceso se realiza por medio de un software de Inspección, en el cual se cargan dos modelos tridimensionales y se alinean de modo que ambos modelos se superponen.

Posteriormente, se configuran los parámetros de inspección y el programa genera un mapa de desviaciones que indica en una escala gradual de color las diferencias entre los dos modelos. Indica en un primer tono cuando ambas superficies se asemejan, en un segundo cuando la superficie comparada (2do escaneo o T1) sobresale a la de referencia (1er escaneo o T0), y en un tercero cuando la superficie comparada se encuentra por debajo de la de referencia. Como se puede ver en la figura 10, la línea azul corresponde a la superficie de referencia (T0), mientras que la gris representa la superficie comparada (T1), por tanto, en rojo se ven los aumentos o diferencias positivas y en azul las disminuciones o diferencias negativas.

Algunos de los sectores y las aplicaciones de los procedimientos con DA son:

- ▶ Industria de manufactura: control de calidad, evaluación de piezas fabricadas comparadas con los originales, control y ajuste de herramientas de producción
- ▶ Maquinaria pesada y minería: control y cuantificación de desgaste en piezas y tuberías
- ▶ Generación energética: monitoreo de corrosión y niveles de deterioro, control y cuantificación de desgaste en piezas
- ▶ Investigación: validación de métodos de producción y/o documentación
- ▶ Transportación aeronáutica y naval: evaluación de daños por impactos, control y cuantificación de desgaste en piezas, cuantificación de reparaciones

La técnica DA ha sido aplicada con éxito en la industria aeroespacial para la evaluación de daños por granizo; un caso que se considera análogo al problema de investigación por su aplicación en la evaluación de daños, como por los alcances que tiene, además de las deficiencias que presenta la alternativa, es decir los métodos tradicionales de evaluación. En un estudio realizado por Reyno *et al.* (2018), se explica que por medio de la comparación digital de superficies se pudieron definir las dimensiones de las abolladuras provocadas por granizo en las aeronaves. También, menciona que los tiempos de inspección mejoraron respecto a las técnicas tradicionales, además, que la técnica proporcionó una uniformidad en el levantamiento de la información para la evaluación.

Por otro lado, la cuantificación de daños, resultado de la prueba, obtuvo una mejor aproximación a la realidad que el método tradicional, reduciendo considerablemente dicha cuantificación. En la industria aeronáutica, las piezas que no cumplen con las tolerancias de área dañada deben remplazarse, lo que implica que la aeronave no puede volar hasta que eso suceda. En el estudio realizado por Reyno *et al.*, se usaron piezas que ya habían sido reemplazadas y el análisis arrojó que la cuantificación de daño efectuada con la técnica tradicional había sobreestimado el daño en un 452% comparada con el método de escaneo (Reyno *et al.*, 2018).

Otra aplicación que se da en la geología es el monitoreo del deslizamiento de taludes en paredes rocosas y la predicción de caída de rocas. En un estudio realizado por Abellán *et al.* (2010), se realizaron cuatro levantamientos con escáner láser terrestre en la ladera de Puigcercós —Pallars Jussà, Cataluña, España— en un intervalo de diez meses. El primero de los levantamientos se estableció como modelo de referencia. La metodología utilizada se resume en los siguientes pasos: Adquisición de datos, construcción de la superficie de referencia a partir de los primeros datos tomados, adquisición de un nuevo conjunto de datos después de un determinado tiempo, alineación de los nuevos conjuntos de datos con la superficie de referencia, comparación de la superficie de referencia y los sucesivos conjuntos de datos, cálculo de las diferencias para cada periodo de comparación (Abellán *et al.*, 2010).

Como resultado, pudieron identificar y cuantificar 42 deslizamientos de rocas, además de detectar una deformación previa a una de las fallas que permitió la predicción de uno de los eventos de deslizamientos medidos. También, identificaron que al momento del último levantamiento estaba ocurriendo un desplazamiento, lo cual les permitió anticipar un derrumbe (Abellán *et al.*, 2010).

Con base en lo expuesto hasta aquí, la técnica DA ha sido usada de manera exitosa para detectar, cuantificar e incluso predecir daños provocados por impactos o por movimientos naturales de la tierra. Si pensamos en el patrimonio material, podemos considerar que también éste se encuentra sujeto a riesgos por impactos, por movimientos, o sencillamente por fallas en sus materiales constitutivos, por tanto, podemos considerar ambos casos como problemáticas análogas que, en consecuencia, pueden atenderse de manera similar. Este razonamiento sustenta la propuesta metodológica que describiremos a detalle en el capítulo 4.

### 3.2 Aplicaciones en el ámbito de la Conservación

La DA ya se ha utilizado en algunos proyectos relacionados con el patrimonio material. En esta sección, haremos una revisión de algunos de ellos para identificar qué aplicaciones han tenido y cómo se diferencian de la propuesta que se desarrolla en la presente investigación. Los primeros dos ejemplos que abordaremos tienen miras al análisis cualitativo más que cuantitativo, dejaremos al final los que se aproximan a este último que corresponde también nuestro enfoque de investigación.

Martínez y Guzmán (2017), presentaron una investigación en la que usan procesos de comparación morfológica para la investigación histórica de técnicas de manufactura de los lingotes de plomo del pecio Don Pancho. Para este proyecto, se compararon los modelos tridimensionales de dos lingotes de plomo que se presumía habían sido realizados con el mismo molde. Al hacer la comparación se encontraron similitudes en la forma y en los defectos presentes en ambos lingotes consistentes con la hipótesis.

Sin embargo, se encontraron también deformaciones generales que llevaron a los investigadores a pensar que, si bien se había utilizado el mismo molde para la elaboración de ambos lingotes, no se trataba de un molde rígido como ellos pensaban en un principio, ya que se había deformado entre la primera y la segunda fabricación. Éste es un ejemplo en el que el Análisis de Desviaciones se utilizó para bienes culturales, pero en este caso se realizó un examen visual ya que los objetivos de investigación buscaban datos cualitativos (Martínez y Guzmán, 2017).

En otro caso de estudio, Payne (2016) documenta la comparación entre los modelos escaneados de los moldes de yeso pertenecientes al *British Museum*, realizados en el siglo XIX a partir de las esculturas del Partenón en Atenas, Grecia, con los escaneos de las esculturas originales. Los resultados mostraron que los moldes sí preservaron elementos que actualmente se han perdido, información que fue posible recuperar a partir

de dichos escaneos. Pero lo curioso fue que la comparación también mostró evidencias de modificaciones en el molde que no se encuentran en los originales, lo cual sugiere que los artesanos que realizaron los moldes los modificaron para que una escultura dañada pareciera completa. El análisis comparativo y los mapas de desviación que se obtuvieron permitieron clasificar tanto los datos de información modificada como los de información perdida (Payne, 2016).

Por otro lado, el Análisis de Desviaciones se ha utilizado para evaluar las diferentes técnicas de digitalización 3D del patrimonio cultural. Algunos ejemplos de ello son los descritos por Bianconi *et al.* (2017) en el caso del *Doccione di fontana de la Galleria Nazionale dell'Umbria* en Perugia, Italia; Lerma *et al.* (2013) en el abrigo X del Cingle de la Mola Remígia, Ares del Maestre, Castellón, España; Nespeca y De Luca (2016) en *Eglise collégiale Saint-Maurice* también conocida como *Notre Dame des Grâces*, en Caromb, Francia.

Otros son los casos donde se han comparado escaneos tridimensionales con planos u otras geometrías hipotéticas, lo cual da información sobre la deformación general de superficies como lo exponen Sitnik *et al.* (2010) y Abate *et al.* (2014); o información sobre el grado de desplomo, como en el minarete de Aksaray, Turquía, descrito por Tucci *et al.* (2018).

De igual manera, la comparación de modelos 3D se ha realizado enfocada a la identificación de deformaciones en soportes y cambios sufridos debido a restauraciones en pintura de caballete, es el caso de la *Adorazione dei Magi* de Leonardo Da Vinci descrito por Palma *et al.* (2019), y el del icono bizantino del apóstol San Pedro expuesto en el *Byzantine Museum Archbishop Makarios III Foundation* de Nicosia, Chipre presentado por Abate (2019).

Por último, en el caso de escultura, Kersten *et al.* (2009) presentaron su proyecto de monitoreo de los Moai de la Isla de Pascua, Chile, en el cual, realizaron la comparación de superficies con el objetivo de detectar los deterioros sufridos por la erosión a causa de la intemperie; caso similar reportan Jáidar *et al.* (2017) con su seguimiento de deterioros de los relieves de Tula en Hidalgo, México.

Como se puede observar, algunas de las propuestas ya abordan el uso de la técnica DA en el monitoreo de conservación. La principal diferencia que encontramos está en el tipo de bienes, pues en su mayoría se trata de obras bidimensionales, como también lo notamos en el primer análisis de técnicas de detección de cambios, reportado en el capítulo anterior.

En los últimos dos ejemplos, si bien tenemos casos que utilizan la técnica DA para relieves escultóricos y esculturas exentas, los resultados reportados no son concluyentes, pues se trata de propuestas de planes de monitoreo. En el caso de los Moai, además, se cuenta con modelos georreferenciados, para llevar a cabo la comparación, y como veremos en el siguiente capítulo, en nuestros casos de estudio no fue posible contar con ese tipo de datos, por tanto, ese fue uno de los detalles que se tuvo que resolver al momento de desarrollar nuestra propuesta, descrita en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 4

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS EN RELIEVES ESCULTÓRICOS

En este punto, se describirá a detalle la propuesta metodológica desarrollada en la presente investigación para detectar cambios superficiales en relieves escultóricos utilizando la técnica DA. Para este propósito, se definió un flujo de trabajo que se divide en tres etapas: Adquisición de datos, Procesamiento y edición de modelos 3D, Comparación y análisis de los datos. Cabe mencionar que la etapa de Adquisición de datos corresponde a la documentación multitemporal y está directamente ligada a la segunda etapa de Procesamiento y edición, ya que, según la técnica de digitalización 3D pueden variar las actividades de la etapa sucesiva. La tercera etapa, que corresponde a la detección de cambios *per se*, no se modifica independientemente de la técnica de digitalización que se utilice.

Hay que recordar que para la aplicación de la técnica se requieren por lo menos dos levantamientos realizados en diferentes momentos, la distancia de tiempo entre los mismos dependerá de las condiciones del objeto que se pretende analizar, los objetivos del monitoreo, entre otros factores. Debido a la limitante de tiempo en que se realizó este proyecto de investigación, se seleccionaron dos casos de estudio que ya tenían uno o los dos levantamientos realizados. De cualquier forma, se describirá el procedimiento completo, desde la adquisición de los datos, de modo que quede asentado todo el flujo

de trabajo y sea fácilmente reproducible por otros investigadores en el campo de la digitalización y análisis 3D del patrimonio material.

## 4.1 Adquisición de datos

La primera etapa de Adquisición de datos es, quizás, la más importante de todas, pues como se mencionó con anterioridad los levantamientos multitemporales son la clave de la detección de cambios. Idealmente, al inicio de esta etapa ya se tiene una intención de llevar a cabo el monitoreo y por tanto se conoce el caso de estudio, se ha hecho un diagnóstico preliminar y se ha percibido la necesidad de implementar un sistema de detección de cambios.

Planear el levantamiento consiste en establecer objetivos, seleccionar la técnica de digitalización 3D, esto incluye los instrumentos necesarios para poner en práctica la técnica, y definir la resolución que se desea para los modelos. En el caso de esta propuesta, también se debe definir el intervalo de tiempo entre los levantamientos y sería conveniente llevar un registro metódico de modo que sea más sencillo reproducir el levantamiento en las visitas sucesivas.

La planeación también implica otras cuestiones prácticas como son: tramitar los permisos correspondientes para llevar a cabo el levantamiento —muchas veces los bienes culturales tienen políticas estrictas para su resguardo—, conocer las características del espacio que se dispone para llevar a cabo el levantamiento, verificar que se cuente con iluminación o con disponibilidad de energía eléctrica, si es que los instrumentos lo requieren. Si no se cuenta con ello en el sitio, se deberá prever llevar las herramientas adecuadas el día del levantamiento.

En esta propuesta, se presentan dos variantes de la metodología con diferentes técnicas de digitalización 3D, en la primera se usará la fotogrametría digital o *Structure From Motion* (SFM), mientras que, en la segunda, se usará un escáner de luz estructurada. A continuación, se describe el proceso de Adquisición de datos con cada una.

### 4.1.1 Fotogrametría digital

Como se mencionó en el primer capítulo, la fotogrametría digital consiste en la generación de modelos tridimensionales a partir de fotografías, para ello, se realizan tomas del objeto de interés desde diferentes puntos de vista hasta cubrir la totalidad de su superficie. La toma de las fotografías debe tener particular cuidado en la iluminación

del objeto, se debe procurar que la iluminación sea uniforme pues las sombras muy marcadas pueden provocar cálculos imprecisos.

Es indispensable la captura de puntos de control, que servirán para dar una escala al modelo tridimensional producido. Una manera de hacerlo es colocando testigos métricos u otro tipo de referencias físicas cuya distancia de separación sea conocida. Otra forma es que esas referencias físicas se registren también con un levantamiento complementario con instrumentos como una estación total o un escáner láser terrestre.

Para construir el modelo tridimensional, las fotografías se procesan en un software de fotogrametría, que calcula la geometría basándose en puntos de amarre identificados en varias fotografías. El software calcula primero la posición de las fotografías y construye una nube de puntos escasa; si la alineación es correcta, se procede a construir una nube de puntos densa con toda la información que se puede recabar de las fotografías.

La nube de puntos es el primer producto y está conformada, como su nombre lo dice, por miles de puntos en el espacio. A partir de ella, se lleva a cabo otro proceso conocido como triangulación, que une los puntos en triángulos que conforman lo que se conoce como malla triangulada. El tamaño de esos triángulos determina la resolución de la malla, esto dependerá de la resolución de las fotografías, la distancia focal de la cámara y la distancia de la cámara al objeto. Paso siguiente es construir la textura del objeto; en el lenguaje técnico, se le llama textura al color original del objeto, y se conoce como mapear a la acción de aplicar la textura al modelo digital.

Hay que recordar que el modelo debe escalarse, para ello, se identifican los puntos de control medidos y se asignan las coordenadas o las distancias, según sea el caso. De esta forma el modelo queda a una escala real, a partir de este momento es posible editarlo o exportarlo a otro software de edición o de análisis tridimensional.

#### **4.1.2 Escaneo de luz estructurada**

El escáner de luz estructurada es un instrumento de medición que funciona con el mismo principio de la fotogrametría; el dispositivo, conectado a una computadora, proyecta un patrón de luz sobre la superficie de interés, mientras dos cámaras toman fotografías y, en tiempo real, se construye el modelo 3D en la computadora. Lo que sucede es que el software nativo del escáner analiza, desde las fotografías, la deformación del patrón de luz sobre el objeto y calcula la geometría del objeto. Al conocer la distancia de escaneo, el mismo software calcula la escala, por lo que no requiere de puntos de control. Algunos

escáneres tienen una tercera cámara que, a la par, toma fotografías para mapear el modelo construido.

El resultado del escaneo es una malla triangulada que, al igual que en la fotogrametría, puede visualizarse con o sin textura (figura 11); la ventaja de visualizar los modelos sin textura es que permite ver algunos detalles de la geometría que difícilmente se aprecian en el modelo texturizado, o incluso en el objeto real. Para los fines que nos ocupan en este proyecto, la textura no es indispensable puesto que la comparación es meramente geométrica, sin embargo, si el escáner lo permite siempre es conveniente hacer el registro completo, ya que la textura puede ser útil para otras funciones de análisis o de difusión.



Figuras 11. Modelo tridimensional del relieve 6 de la Tumba de Pakal con textura y sin textura. Fuente: Laboratorio 3D CNCPC-INAH, 2017.

Los modelos tridimensionales construidos se guardan en archivos del software nativo, que almacena todas las fotografías con las que se construyó el modelo. Algunos programas incluyen herramientas de edición y todos permiten la salida de los modelos en distintos formatos de intercambio que el usuario puede elegir.

## 4.2 Procesamiento y edición

Esta segunda etapa de Procesamiento y edición también puede variar según la técnica de digitalización 3D. Para este ejercicio, los modelos tridimensionales se exportan en formato .STL, u .OBJ si se quiere conservar la textura, a continuación se importan al software *CloudCompare* u a otro software de edición de modelos 3D. La edición de los modelos consiste primero en la limpieza de las mallas, o sea, eliminar los triángulos que no sean útiles para el análisis (figura 11). Por ejemplo, en los extremos de las

áreas registradas las mallas se vuelven irregulares por falta de información, y se vuelve necesario retirar de los bordes esos datos incompletos hasta que queda la misma área en ambos modelos (T0 y T1)<sup>12</sup>.

En los modelos fotogramétricos, es frecuente que existan leves diferencias de escala, debido a la forma en que se registran los puntos de control, para corregirlo, en el software *CloudCompare* es posible realizar un ajuste de escala al modelo T1 mediante un algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) modificado. Para reducir errores, es conveniente recortar los modelos a las áreas que tengan un empalme óptimo en ambos levantamientos (T0 y T1). Los escáneres 3D tienen sus propios métodos para escalar los modelos que construyen, por tanto, sus escalas no deben ser modificadas.

Normalmente, los modelos se generan en un sistema de coordenadas aleatorio, para fines prácticos, se puede modificar esa alineación en los modelos de modo que coincidan con las típicas vistas ortogonales (planta, frontal, lateral...). Por último, los modelos limpios se exportan en formato .STL para usarlos en la etapa de Comparación y análisis.

### 4.3 Comparación y análisis

Antes de comenzar el flujo de trabajo de esta tercera etapa, se considera oportuno discutir algunos puntos relevantes en el diseño de esta propuesta metodológica. Una primera preocupación fue la alineación de los modelos 3D, ésta es fundamental en el desarrollo del procedimiento, ya que es la clave para llevar a cabo las comparaciones. Para resolver el problema de alineación se revisó la literatura existente a fin de conocer cómo se resolvió en otros casos la alineación de modelos tridimensionales.

En los modelos a una escala arquitectónica y territorial, la solución más recurrente fue la georreferenciación, esto es insertar los modelos tridimensionales en un sistema de coordenadas conocido, normalmente proporcionado por un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés).

Las principales formas de georreferenciar un modelo tridimensional son a través de la adquisición de puntos con una antena de recepción GNSS y por medio de un Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés). Sin embargo, no siempre es posible georreferenciar un modelo, algunas veces los objetos a analizar se encuentran en lugares cerrados e incluso subterráneos que no tienen una vista directa con las redes satelitales, cosa que ambos métodos requieren. De modo que esos sitios se pueden

---

<sup>12</sup> Para identificar los registros multitemporales se indicará con la clave T0 al primer levantamiento, que será el de referencia, y T1 al segundo levantamiento, que será el comparado.

georreferenciar únicamente a través de un levantamiento arquitectónico más completo, hasta el exterior, que logre unir los datos internos con aquellos externos, que es donde sí pueden recolectarse datos geográficos.

Este tipo de levantamientos requieren más tiempo y otro tipo de instrumentos. Aunado a ello, hay que considerar que la incertidumbre en la adquisición de datos de georreferencia es muy superior a la necesaria para este proyecto, que va en el orden de milímetros. De modo que se descartó la georreferenciación de los modelos como método de alineación.

Otras soluciones corresponden a las alineaciones por puntos de referencia o *targets*, pero aquí conviene explicar que su aplicación es un problema frecuente en los bienes culturales ya que no es viable marcar las superficies ni colocar elementos fijos como se haría usualmente en topografía. El mismo conflicto sucede con los elementos exentos como las esculturas, sobre todo si son muebles, ya que esa característica dificulta mantenerlas en un sistema de referencias fijo.

A la par de la revisión de la literatura, se probaron distintos tipos de software y las herramientas para alineación con que contaban. Tras las diversas pruebas, la revisión de literatura y la discusión con distintos expertos en digitalización de patrimonio cultural se determinó que la alineación mediante el algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) era la más adecuada. Un factor decisivo en la selección de ese algoritmo fue también el hecho de que es el que se usa en los flujos de trabajo de la técnica DA para control de calidad y para la evaluación de daños en sectores que requieren de mucha precisión por cuestiones de seguridad o de funcionalidad.

La segunda cuestión importante fue la elección del software para la detección de cambios. Entre la variedad de software que ofrecen herramientas de comparación de modelos por medio de DA, se realizaron pruebas con dos de ellos que son de uso gratuito: *CloudCompare* y *GOM Inspect*. El *CloudCompare* es un software de edición y análisis de nubes de puntos en general, mientras que el *GOM Inspect* es especializado en inspección dimensional.

Se observó lo siguiente: en cuanto al flujo de trabajo, a grandes rasgos el proceso es el mismo en ambos programas: se parte de la alineación de dos modelos, se ejecuta la comparación, y se generan los mapas de desviaciones con la opción de personalizar tanto la escala o como la paleta de representación. La principal diferencia se centra en el tipo de modelos que acepta cada uno de los programas, y en las herramientas de análisis con las que cuentan.

En el caso de *CloudCompare*, es posible realizar la comparación *Cloud to Cloud*<sup>13</sup>, o sea entre dos nubes de puntos; *Cloud to Mesh*, una nube de puntos y una malla —en este caso el software no permite elegir la nube de puntos como objeto de referencia, cosa que debe tenerse en consideración al momento de analizar los resultados de la comparación<sup>14</sup>—; y *Mesh to Mesh*, dos mallas, que, sin embargo, considera a una de ellas como nube de puntos.

En cuanto al GOM Inspect, en inspección dimensional no es muy frecuente el uso de nubes de puntos, más bien suelen usarse los modelos de CAD, por lo que el programa admite únicamente la comparación entre dos mallas, considerando a una de ellas como un objeto CAD. A continuación, se presentan en la tabla 2 las principales características que se observaron.

	CloudCompare	GOM Inspect
Alineación ICP	✓	✓
Comparación Cloud to Cloud	✓	×
Comparación Cloud to Mesh	✓	×
Comparación Mesh to Mesh	✓	✓
Edición de Escala Color	✓	✓
Información estadística	✓ (detallada)	✓ (básica)
Mapa de tolerancias	×	✓
Etiquetas de desviación	×	✓
Secciones de desviación	×	✓

Tabla 2. Comparación de las funciones de *CloudCompare* y *GOM Inspect*.

Fuente: Autoría propia, 2020.

Finalmente, se eligió el software *GOM Inspect* porque se consideró que el flujo de trabajo en él era más sencillo de reproducir ya que tiene procesos más automatizados.

13 Se refieren los nombres en inglés porque es la forma en que generalmente se conoce a las herramientas y los algoritmos en este tipo de software.

14 Si fuera el caso que la nube de puntos correspondiera al T0, sería necesario activar la opción “invertir normales” para que los cambios detectados puedan interpretarse adecuadamente, es decir, que los cambios positivos correspondan al aumento de volumen y los negativos a la disminución.

Además, permite otras posibilidades de análisis que pueden ser complementarias al mapeo de las desviaciones, como son las secciones de desviación, el mapeo de tolerancias con su correspondiente cálculo porcentual, la medición puntual de las desviaciones y su señalización mediante etiquetas.

Volvamos ahora al flujo de trabajo: a partir de aquí, el procedimiento es el mismo sin importar la técnica de digitalización. En primer lugar, se importan en el software *GOM Inspect* los modelos 3D formato .STL preparados en la etapa anterior: al modelo T0 se le asigna el rol de *CAD Body* (objeto CAD), mientras que al modelo T1 se le asigna el de *Mesh* (malla). A partir de este momento, el software considera los objetos CAD como Nominal y las mallas como Actual.

El siguiente paso es la alineación de los objetos, como se mencionó, la herramienta seleccionada fue el algoritmo ICP, que en *GOM Inspect* se encuentra como *Prealignment* (figura 12). Si bien existen diferentes opciones de alineación en *GOM Inspect* el punto de partida siempre será el *Prealignment* y la ventaja que tiene el software es que las alineaciones se guardan como elementos independientes, lo que permite cambiar de una alineación a otra, mientras las comparaciones y análisis se actualizan automáticamente según la alineación seleccionada.

Una vez alineados los modelos, se procede a la creación de una superficie de comparación en CAD, esto es que el modelo CAD (T0) será la referencia y sobre él se mapearán los cambios detectados. Para la comparación, se estableció una distancia máxima de 20.00 mm, es decir que los puntos que superen esa distancia no se calcularán ni se mostrarán en el resultado, y una tolerancia de 1.00 mm, este dato sirve para visualizar y contabilizar las áreas que entran dentro de la tolerancia establecida, las que se acercan al límite de esa tolerancia y las que la rebasan. Estos valores se definieron de este modo después de realizar diversas pruebas, pero deberán establecerse según sea el caso. Cabe mencionar que para el análisis de tolerancias el valor puede cambiarse cuantas veces sea necesario, sin tener que crear otra superficie de comparación.



Figura 12. Alineación de modelos T0 (azul) y T1 (gris) en *GOM Inspect*, relieve 7 de la Tumba de Pakal. Fuente: Autoría propia, 2020.

La superficie de comparación generada se presenta como un mapa que muestra las desviaciones, es decir, las distancias entre la T0 y la T1 en cada uno de los puntos medidos, representadas con una escala de colores que tiene en su extremo negativo el azul, al centro el verde y en el extremo positivo el rojo (figura 13). Esto indica que los puntos T1 que se encuentran por debajo de la superficie de referencia T0 tienden al azul, mientras que los que quedan arriba de la superficie de referencia T0 tienden al rojo. Los puntos que más se aproximan a la superficie de referencia, ya sea que queden por arriba o por debajo de ella, tienden al verde. Se podría interpretar como pérdidas o hundimientos, las áreas coloreadas en tonalidades azules, y como depósitos o abundamientos, aquellas en tonalidades del amarillo al rojo.

Como complemento a la lectura del mapa, se muestra un histograma a lado de la escala de color que permite conocer la distribución de los puntos medidos. Esto nos indica el panorama general del análisis, podemos comprender de manera veloz si se tienen más pérdidas o ganancias, por ejemplo. El *GOM Inspect* proporciona además los datos estadísticos como la desviación estándar, la media, las distancias máxima y mínima, a la vez que permite la colocación de etiquetas para realizar mediciones puntuales.

Un paso adicional es el análisis de tolerancias, mediante el cual se puede hacer una evaluación del modelo T1 a partir de las desviaciones que presenta. Consiste en la definición de un criterio que es el valor de tolerancia, en este caso sería una dimensión de cambio que se considere aceptable, y las áreas que queden dentro de ese valor se consideran aprobadas (*Pass*), las que se encuentren en un valor cercano al punto de tolerancia se mostrarán en alerta (*Warn*) y las que resulten mayores al valor de tolerancia se marcarán como no aprobadas (*Fail*). En los mapas de tolerancias, el programa muestra en color verde las áreas aprobadas, en color amarillo las áreas de alerta, y en rojo las áreas no aprobadas (figura 14). Cabe señalar que la definición del valor de cambio aceptable deberá establecerse en cada caso. Pues dependerá del tipo de objeto de estudio, su escala, la incertidumbre de medición, y otros aspectos que se podrán definir en conjunto con quienes vayan a hacer uso de estos análisis.

Queda así definido el flujo de trabajo propuesto para la comparación de modelos tridimensionales con objeto de detectar cambios superficiales en relieves escultóricos. Es prudente advertir que, a este punto, se obtienen resultados que requieren de ulterior interpretación, ya que el mejoramiento de las técnicas de detección de cambios no sustituye el análisis crítico de los especialistas, más bien, brindan un punto de apoyo y, en medida que se complementan con otras herramientas, permiten llegar a una visión

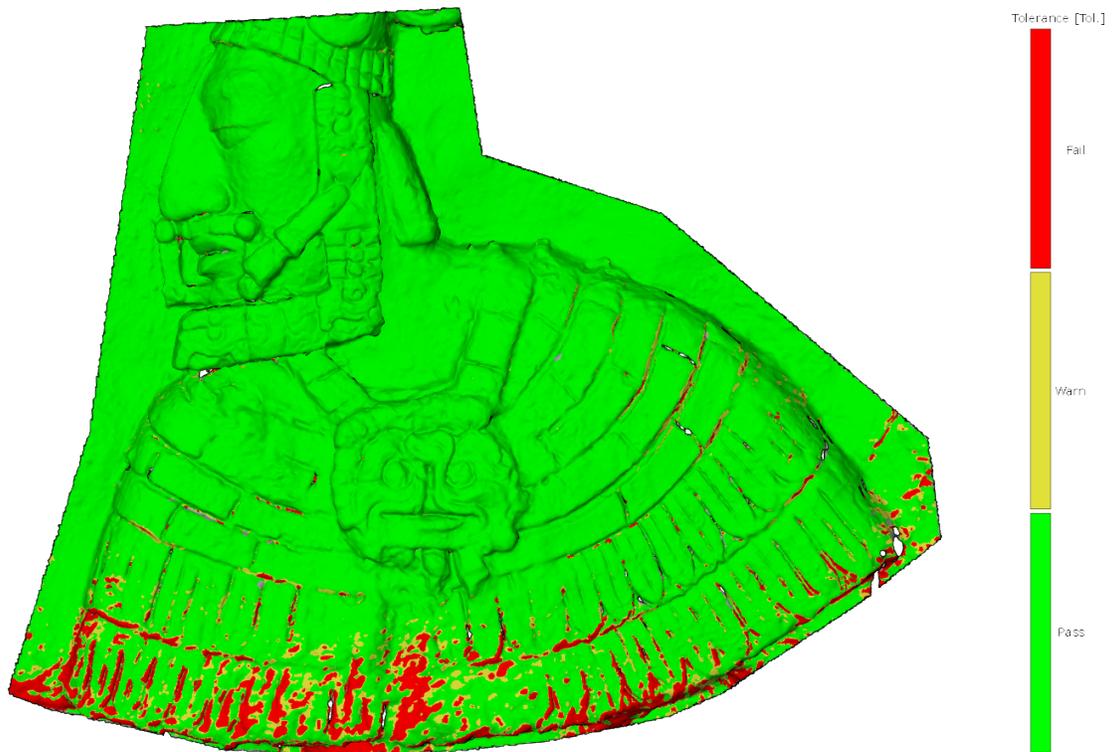
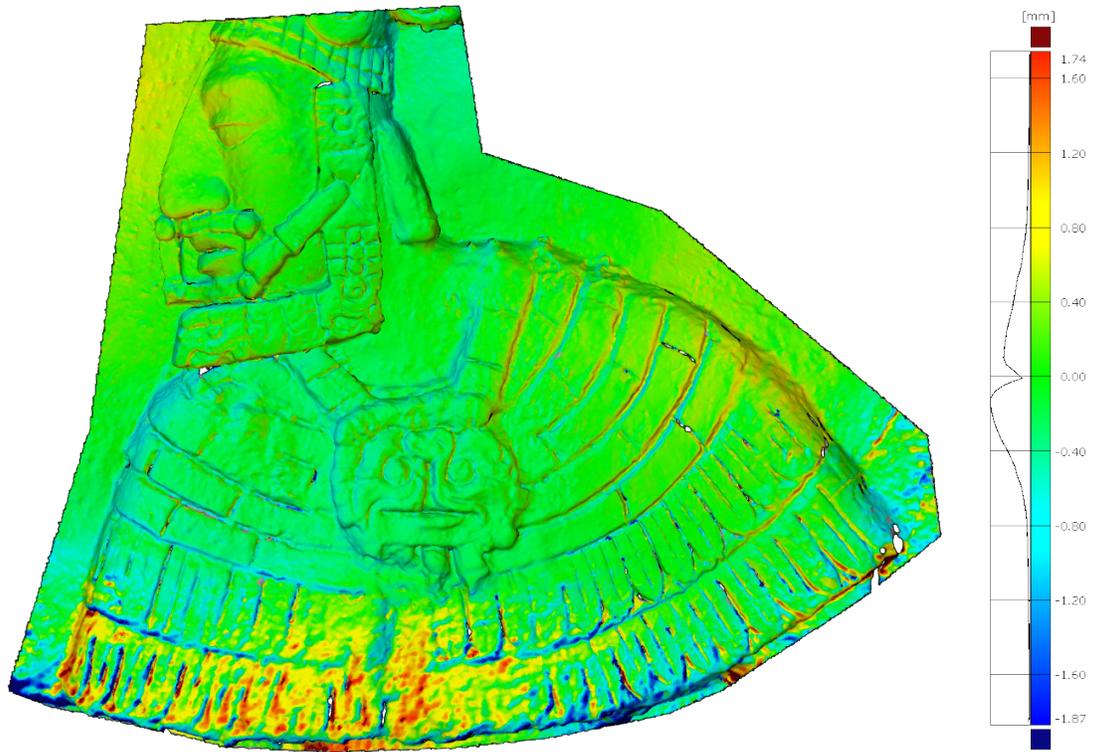


Figura 13 y 14. Mapa de desviaciones (arriba) y mapa de tolerancias (abajo) de un detalle del relieve 7 de la tumba de Pakal. Fuente: Autoría propia, 2020.

mucho más completa del problema de conservación. En las siguientes secciones se hablará de la implementación de la propuesta metodológica en dos casos de estudio, se discutirán los resultados obtenidos, así como la evaluación de esta herramienta de detección de cambios.

#### 4.4 Casos de estudio

Es ahora oportuno presentar los dos casos de estudio que se seleccionaron para poner a prueba la metodología propuesta, así como mencionar las consideraciones que motivaron su elección. Por una parte, se trata de dos casos reales, en los que se ha identificado la dificultad de medir los cambios que, presumiblemente, están ocurriendo en los relieves; por otro lado, se pudieron poner a prueba las dos variantes de la técnica con las diferentes técnicas de digitalización 3D, y finalmente, los propietarios de los modelos nos brindaron las facilidades para su uso en este proyecto.

El primer caso se encuentra en la Zona Arqueológica de Palenque, en el estado de Chiapas, México. La conservación de los estucos de la Tumba de Pakal, es parte del “Proyecto de conservación de los elementos decorativos de la Tumba de Pakal en Palenque” de la CNCPC-INAH, con el cual se colaboró de 2017 a 2018. El segundo caso se ubica en la ciudad de Osimo, en la provincia de Ancona, Italia. La selección de este último responde a la colaboración con el grupo de investigación *Distori Heritage* de la *Università Politecnica delle Marche* en Ancona, Italia, en la cual se tuvo la oportunidad de realizar una estancia de investigación en 2019.

Cabe mencionar que se eligió el caso de Osimo ya que presenta algunas similitudes con el de Palenque: en primer lugar, en cuanto a sus características formales, se trata en ambos casos de bajorrelieves de dimensiones similares, es decir, figuras ligeramente más grandes que la escala humana; en segundo lugar, en cuanto a sus condiciones ambientales, ambos se encuentran en contextos subterráneos<sup>15</sup> con una humedad relativa que alcanza el 100%; y por último, las condiciones en que se encuentran los dos casos de estudio han propiciado alteraciones semejantes en los relieves (figuras 18-20 y 22-24), a saber, disgregación del material, eflorescencias, costras salinas y colonización biológica, por mencionar algunas.

Entre las diferencias, están, por un lado, el material y la técnica de factura, que en el caso de Palenque los relieves son de estuco de cal modelado y mientras que en las

---

15 La Tumba de Pakal se encuentra al interior de una estructura piramidal, en condiciones de encierro y poca ventilación, por lo que se considera una cámara subterránea.

grutas de Osimo están labrados en piedra arenisca; y, por otro lado, la temperatura, ya que al interior de la Tumba de Pakal se mantiene en promedio alrededor de los 30°C, mientras que en las grutas se mantiene entre 15.92 y 16.18°C (Gregorini *et al.* , 2020).

	Relieves de la tumba de Pakal	Grutas del Palacio Campana
Localización	Palenque, Chiapas, México	Osimo, Provincia de Ancona, Italia
Material	Estuco de cal	Piedra arenisca
Técnica de factura	Modelado	Labrado
Técnica de digitalización	Escaneo de luz estructurada	Fotogrametría digital
Relieves digitalizados	9	2
Detalles analizados	4	2
Levantamiento T0	Diciembre 2017	Noviembre 2018
Levantamiento T1	Agosto 2018	Noviembre 2019

Tabla 3. Datos generales de los casos de estudio. Fuente: Autoría propia, 2020.

En los apartados siguientes, se dará una breve reseña sobre los casos de estudio, y se describirán, para cada caso, las primeras dos etapas de Adquisición de datos y de Procesamiento-edición. Puesto que los levantamientos no se realizaron con la misma técnica, el procesamiento y la edición también varían en cada caso. En lo que respecta a la tercera etapa de Comparación y análisis, el flujo de trabajo es igual para ambos casos.

#### 4.4.1 Relieves escultóricos de la Tumba de Pakal

Los relieves conocidos como *Bolon Et Naah* o Los Nueve Señores del Inframundo de la Tumba de Pakal son figuras elaboradas en bajorrelieve de estuco adosadas a los muros de la cripta. Cada personaje, de escala ligeramente más grande que la natural, está representado ricamente ataviado con cetro, escudo y tocado de ave cormorán<sup>16</sup> (Parrilla *et al.*, 2015; Ruz Lhuillier, 1955).

16 En las figuras 16 y 17, se muestran dos de los personajes que decoran los muros de la Tumba de Pakal, la primera es una fotografía, mientras que la segunda es una imagen de la nube de puntos adquirida durante el segundo levantamiento de la Tumba de Pakal, nótese los detalles que se logran apreciar a partir de la visualización ortorectificada de los modelos 3D.

La tumba se encuentra al interior del Templo de las Inscripciones en la Zona Arqueológica de Palenque; fue descubierta en 1952, y ya en ese entonces, el arqueólogo Ruz, a cargo de la excavación, menciona en sus informes la falta de adhesión del estuco al muro, debido a la humedad y su deficiencia constructiva (Ruz Lhuillier, 1955).

A lo largo de los años, diversos factores han propiciado variaciones en el microclima al interior de la tumba, lo cual compromete la estabilidad de los relieves al provocar que el estuco que los conforma se reseque y se disgregue (Irlanda Fragoso CNCPC-INAH, 2017, comunicación verbal), alteraciones que pueden observarse en las figuras 18, 19 y 20. Por estos motivos, se tomó la decisión de iniciar este ejercicio de monitoreo.

Se cree que las esculturas no terminaron de fraguar, por lo que tienen una consistencia suave que se daña fácilmente al tacto. Además, el ambiente húmedo y las continuas filtraciones de soluciones acuosas han propiciado que se forme sobre las esculturas una costra dura a raíz de la cristalización de nuevos minerales provenientes del núcleo de la pirámide. También, en una serie de estudios realizados para analizar la composición química de los estucos, se detectó que al secarse el material se contrae, provocando la aparición de fisuras, por lo que la pérdida de humedad también representa un riesgo en las esculturas (Villaseñor y Price, 2008).

Los levantamientos fueron realizados con la técnica de escaneo de luz estructurada (ver tabla 3) por el Laboratorio 3D de la CNCPC, como se muestra en la figura 15. El INAH, a través de la CNCPC, facilitó el uso de los modelos tridimensionales para la presente investigación.

Para hacer el levantamiento, se utilizó un escáner de luz estructurada modelo *Go!Scan 20* de la marca Creaform que alcanza una precisión<sup>17</sup> de 0.10 mm y una



Figura 15. Levantamiento con escáner de luz estructurada en la Tumba de Pakal. Fuente: Laboratorio 3D CNCPC-INAH, 2017.

17 Téngase en cuenta que los fabricantes suelen referir como “precisión” un valor obtenido a partir de diversas mediciones en condiciones controladas que indica que tan cercana es la medición realizada con el instrumento, respecto al valor real, y como “resolución” al espaciado entre los puntos medidos, o sea



Figura 16 y 17: Relieves antropomorfos en la Tumba de Pakal. Fuente: Laboratorio 3D CNCPC-INAH, 2017.



Figuras 18, 19 y 20. Algunos de los deterioros visibles en los relieves de la Tumba de Pakal. Fuente: Laboratorio 3D CNCPC-INAH, 2017.

que los detalles de dimensiones menores a ese valor no se registran. En ese sentido se utilizarán dichos conceptos en este documento. Los valores aquí señalados son proporcionados por el fabricante en la ficha técnica del instrumento, consultable en: <https://docplayer.es/19940764-La-experiencia-de-digitalizacion-en-3d-mas-rapida-y-sencilla.html>

resolución de hasta 0.20 mm. La limitante de esta tecnología de escaneo es que los modelos se componen de cientos de fotografías —que aumentan proporcionalmente con la resolución y con el tamaño del área registrada—, por lo que pueden conformar archivos que requieren de computadoras potentes para manipularlos, por tanto, no está recomendado el registro objetos de grandes dimensiones<sup>18</sup>. Por eso, se decidió escanear sólo algunas zonas de los relieves, seleccionadas por los encargados del proyecto de conservación al considerarlas de interés para el monitoreo. Así que la etapa de Adquisición de los Datos consistió en dos temporadas de escaneo, que se llevaron a cabo en diciembre 2017 (T0) y agosto 2018 (T1); en cada una, se realizó el escaneo de once detalles en los nueve relieves y para ello se dedicaron dos jornadas de trabajo. Para las actividades de limpieza de malla y alineación se usaron el software nativo del escáner *VxElements* y el software *Geomagic Wrap*.

La implementación de esta variante se realizó en 26 horas aproximadamente, de las que corresponden 8 a cada Adquisición de datos, 6 al Procesamiento y 4 a la Comparación y análisis. Este cálculo se refiere únicamente a los tiempos operativos para el análisis de los cuatro detalles seleccionados.

#### 4.4.2 Relieves escultóricos de las Grutas de Osimo

Las Grutas de Osimo, son una serie de pasajes subterráneos datados del siglo XVII excavados en piedra arenisca bajo el Palacio Campana, en la ciudad de Osimo. Las galerías subterráneas tienen grabados, en sus muros y sus bóvedas, bajorrelieves que representan a distintos personajes y escenas (Clini *et al.*, 2019).



Figuras 22, 23 y 24. Algunos de los deterioros visibles en los relieves de las grutas de Osimo. Fuente: Distori Heritage, 2019.

---

18 El fabricante recomienda el uso de este escáner en objetos de 0.05 a 0.50 m.

Las condiciones de humedad de las grutas, así como las características materiales de la piedra arenisca han propiciado una condición de inestabilidad tanto en los relieves como en las superficies de muros y bóvedas. El material se disgrega continuamente y provoca faltantes en los relieves (figuras 22, 23 y 24), que hasta ahora no habían sido cuantificados.



Figura 21: Levantamiento fotogramétrico de los relieves de Osimo. Fuente: Distori Heritage, 2019, fotografía de R. Angeloni.

Los levantamientos 3D de los relieves se realizaron con la técnica de fotogrametría digital, el primero en 2018 y el segundo, en el que se tuvo oportunidad de participar, en 2019 (figura 21). Por cuestiones de tiempo, en la segunda temporada no fue posible realizar el levantamiento de todos los relieves, por ello, se seleccionaron dos relieves para realizar las pruebas de comparación en ellos. El laboratorio Distori Heritage facilitó el uso de los modelos tridimensionales para los propósitos de esta investigación.

El proceso de levantamiento consistió, primero, en optimizar la iluminación de los relieves con dos reflectores Broncolor Siros 800 L sobre tripie, uno equipado con *softbox* y otro con sombrilla reflectora plateada, a fin de eliminar en lo posible las sombras y conseguir una iluminación lo más uniforme posible.

Posteriormente, se realizaron las tomas fotográficas con una cámara Sony Alpha9 con 24mm de distancia focal y una resolución de 6000x4000 píxeles a una distancia del objeto de aproximadamente 1.20 m (Clini *et al.*, 2019). Se repitió el mismo proceso de levantamiento en ambas temporadas, se utilizaron los mismos instrumentos y se procuró cubrir las mismas características. Sólo en la primera temporada (T0), se realizó, además, el levantamiento de las grutas con escáner láser terrestre y, mismo que se georreferenció con una antena GNSS-RTK (Clini *et al.*, 2019).

La generación de los modelos fotogramétricos inició con el revelado digital de las fotografías, que se efectuó empleando para las fotos del T1 el mismo perfil de ajuste usado en el T0. A continuación, se usó el software Agisoft Photoscan para la construcción de los modelos tridimensionales. Ambos modelos cuentan con un empalme de imágenes

similar y una resolución<sup>19</sup> de 0.279 mm/pix en el modelo T0, y de 0.288 mm/pix en el modelo T1 (ver Anexo 1), con lo que confirman la reproducibilidad del levantamiento.

Una de las principales dificultades de la construcción de modelos fotogramétricos de este caso de estudio, fue la definición de puntos de control. En el modelo fotogramétrico original T0 —que, es importante aclarar, no fue hecho con el objetivo de usarse para la detección de cambios—, se localizaron cinco puntos característicos, o sea, puntos localizados manualmente identificando rasgos específicos en el objeto y en el modelo, que fungieron como puntos de control. A éstos, se les asignaron las coordenadas de sus correspondientes en la nube de puntos georreferenciada. Se tomó la decisión de tomar puntos característicos por la fragilidad de las superficies que imposibilita la colocación de *targets* fijos (Clini *et al.*, 2019). Así mismo, en el modelo fotogramétrico T1, se buscó tomar los mismos puntos de control, sin embargo, no fue posible en todos los casos por lo que se tomaron diferentes puntos de control como complemento.

A continuación, en la etapa de Procesamiento y edición, se realizó la limpieza de los modelos tridimensionales para dejar únicamente el área de interés. En este caso, esa área se definió en función del análisis de calidad del empalme en los modelos fotogramétricos<sup>20</sup>, como se muestra en la figura 22. Conviene aquí recalcar la importancia de este paso, pues al mantener en ambos modelos una misma superficie más aproximada, disminuyen considerablemente los errores de alineación y se avgilizan los tiempos de procesamiento.

El siguiente paso fue la corrección de escala de los modelos tridimensionales; mediante el algoritmo ICP modificado del software *CloudCompare*, se pudo ajustar el modelo fotogramétrico T1 al modelo de referencia T0. Las diferencias en la escala dependen de diversos factores, entre los cuales está la definición de puntos de control confiables, lo que se dificultó en este caso debido a la fragilidad material de la gruta.

Para comprobar que los cambios aplicados por el ajuste de escala al modelo T1 no comprometieran la detección de cambios, se realizaron, a su vez, comparaciones de cotejo en las cuales se revisó la calidad de la alineación de los modelos y la desviación estándar entre los dos modelos comparados. Por otro lado, se realizaron las comparaciones conforme al flujo de trabajo propuesto en la siguiente sección y se percibió que la mayoría

---

19 *Ground Sampling Distance* o GSD es un valor calculado por el software tomando en cuenta la resolución de las fotografías, la distancia focal de la cámara y la distancia de la cámara al objeto. En este caso, un GSD de 0.28 mm/pix significa que cada píxel de la imagen representa 0.28 mm en la superficie del objeto. GSD debe ser como mínimo el doble del tamaño del detalle más pequeño que nos interesa medir, por tanto, en el presente ejercicio no se considerarán detalles menores a 0.576 mm.

20 Este dato es proporcionado por el mismo software y puede consultarse en el Anexo 1.

de los cambios detectados se mantienen en ambas comparaciones, en especial aquellos que son menores al error de alineación.

Con lo dicho hasta ahora, concluimos que, efectivamente, el ajuste de escala al modelo T1 no compromete la detección de cambios, al contrario, la beneficia al eliminar las incertidumbres ocasionadas por la diferencia de escala. Por último, una vez ajustada la escala, se procedió a exportar los modelos en formato .STL para usarlos en la etapa de Comparación y análisis, en ésta los procedimientos coinciden para ambos casos de estudio. La comparación se llevó a cabo conforme al procedimiento descrito en la sección 4.1.3, y la información obtenida se analizará en la siguiente sección.

El tiempo total de necesario para la implementación de esta variante fue de aproximadamente 40 horas, de ellas se dedicaron 6 a cada Adquisición de datos, 24 horas al Procesamiento y edición que incluye la construcción de los modelos fotogramétricos y 4 a la Comparación y análisis. Es importante señalar que el tiempo de levantamiento y procesamiento puede variar en otros casos dependiendo de las condiciones particulares del objeto y de los recursos de la computadora usada para procesar los modelos fotogramétricos.

## 4.5 Discusión de los resultados

En esta sección se analizarán algunas consideraciones que resultan relevantes con respecto al procedimiento aplicado y a la información obtenida: algunas tienen que ver con cuestiones fundamentales de medición, mientras que otras responden a la forma de adquisición de los datos de los modelos, algunas más se refieren a los productos obtenidos siguiendo la metodología propuesta en las secciones anteriores y las posibilidades que hasta este punto quedan por explorar.

La primera consideración deriva de la diferencia entre las técnicas de digitalización que usamos, y tiene que ver con la reproducibilidad<sup>21</sup> de los levantamientos. En la presente investigación se usaron dos técnicas de medición: el escaneo de luz estructurada, y la fotogrametría digital. Todo dato de medición debe estar asociado a un valor que dé idea de su calidad, ese valor se conoce como incertidumbre. La incertidumbre de la medida puede ser evaluada ya sea por métodos estadísticos o por otros medios como son mediciones previas, experiencia (Ruiz, et al., 2010) o información de fábrica, como en el

---

21 Hay que distinguir la “repetibilidad” de la “reproducibilidad” de la medición, ya que en la primera las condiciones —el instrumento o técnica de medición, el periodo de tiempo, el operador, entre otras— en que se realiza la medición que no varían, mientras que en la segunda las condiciones pueden variar.

caso del escáner de luz estructurada, que el fabricante hace una serie de mediciones y determina el dato que proporciona a sus usuarios.

La dificultad de las técnicas como la fotogrametría es que influyen en ellas varios factores, lo que dificulta el cálculo de su incertidumbre y su reproducibilidad. Ejemplo de ello fue el proceso adicional que tuvo que realizarse de ajuste de escala y sus respectivas comprobaciones analíticas, por lo que deben tenerse en cuenta estos aspectos al momento de planificar futuros monitoreos.

Por otra parte, una de las diferencias que se observaron, fue que en los modelos del escaneo de luz estructurada los puntos de desviación máxima y mínima correspondían a huecos de información en la malla por lo que se determinó su exclusión del análisis. Hay que reconocer que ese tipo de huecos por lo general no están presentes en los modelos de fotogrametría digital, y no es porque no existan vacíos de información, sino que el software de fotogrametría rellena automáticamente los huecos, a menos que se le indique lo contrario.

Ahora bien, si reconocemos que esas mediciones extremas de máximo y mínimo que no corresponden a cambios reales sino a defectos del modelo, también debemos asumir que habrá otras mediciones erróneas por el mismo motivo. Para contrarrestar, tuvieron que establecerse criterios que definieran cuándo realmente hubo un cambio. Para ello se siguió un “proceso de control estadístico”, usado frecuentemente en los procesos industriales para excluir la incertidumbre de las mediciones. Se considera que ocurrió un cambio si la medición se encuentra dentro de la “región de control estadístico”. Esta función estadística permite realizar el análisis omitiendo los puntos aislados. *GOM Inspect* tiene una función que de manera automática considera y muestra sólo el rango deseado de las mediciones en el mapa de desviaciones. Para nuestro análisis se utilizó el rango de  $3\sigma$ , definida como tres veces la desviación estándar ( $\sigma$ ) y que corresponde al 99.7% de los datos.

Como resultado de la metodología propuesta, se obtuvieron mapas de desviaciones, en los cuales fue posible visualizar los cambios sufridos por los relieves en el periodo de tiempo entre los levantamientos T0 y T1. A manera de comprobación, en uno de los relieves de Osimo, se hizo una inspección visual de los mapas de desviaciones, las mallas trianguladas individuales y las fotografías. Se observaron dos tipos de cambios, en primer lugar, aquellos que identificaremos como significativos que son los que podemos relacionar con efectos de deterioro visibles en las fotografías, o que coinciden con

dinámicas naturales por ejemplo la pérdida de material en una saliente que coincide con el aumento de material en la parte que corresponde a la proyección de dicha saliente.

En segundo lugar, se observaron cambios que calificamos como errores de la malla. Respecto a éstos se comprobó que se localizaban en áreas del modelo T0 que según el informe de análisis de *Photoscan* aparecían con una baja calidad de empalme (ver Anexo 1). Por consiguiente, resolvimos repetir el análisis comparativo, manteniendo únicamente las áreas que tuvieron una óptima calidad de empalme en ambos levantamientos. Con lo que, en lugar de analizar el relieve completo, se recortaron dos detalles de este (figura 22), que nuevamente se alinearon y ajustaron en escala.

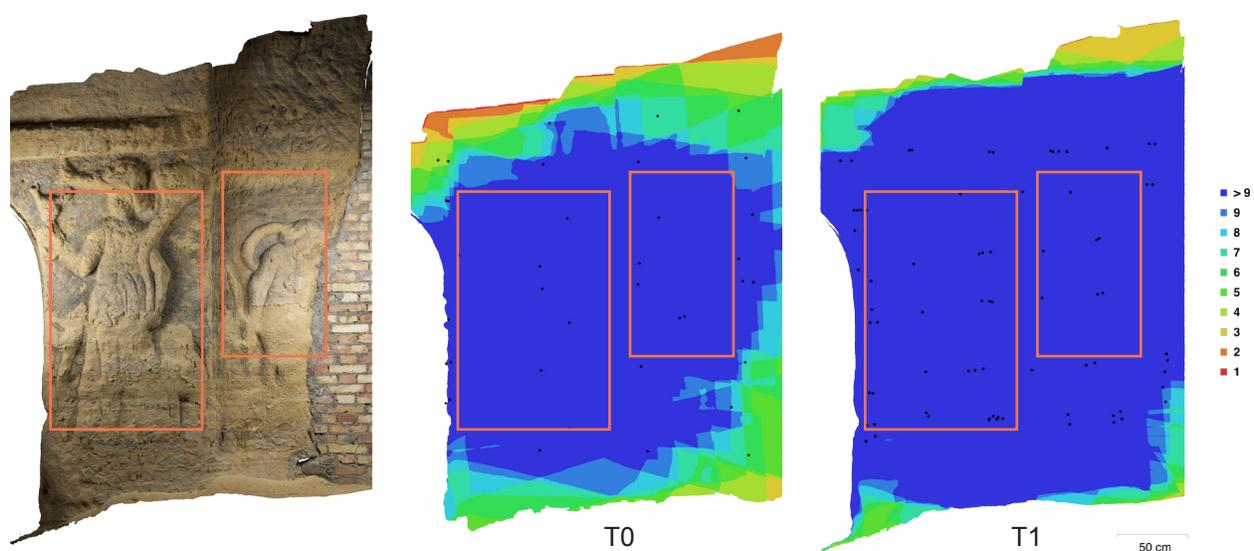


Figura 22: Modelo fotogramétrico del relieve G1d12 de Osimo (izquierda), aquí se muestra la calidad del empalme de imágenes en la construcción del modelo, en la escala de color el 1 corresponde a menor calidad y el >9 a mayor calidad. Fuente: Autoría propia, 2019.

Con eso se confirma que se debe asegurar la reproducibilidad de los levantamientos y que una forma de evaluarla es a través de la revisión de los informes de calidad que proporciona el software. Otra cosa aconsejable es la inspección visual de las mallas trianguladas, pues en algunos casos los errores de la malla resultan evidentes y pueden detectarse antes de realizar el análisis de desviaciones.

Entre otros resultados se obtuvieron mapas de tolerancias; como se mencionó en la sección anterior, el software clasifica las desviaciones según su relación con el valor de tolerancia establecido. En nuestros casos de estudio se probó con una tolerancia de 1.00 mm, con lo que las áreas aprobadas comprendían las diferencias entre 0.00 y 0.75 mm,

Mapa de tolerancias 1.0 mm			
	Tolerancias	Área (mm2)	Porcentaje
	Más del 100%	127401.31	10.1%
	75% a 100%	94791.15	7.5%
	Entre 75%	1041634.20	82.4%
	Total	1263826.66	100.0%

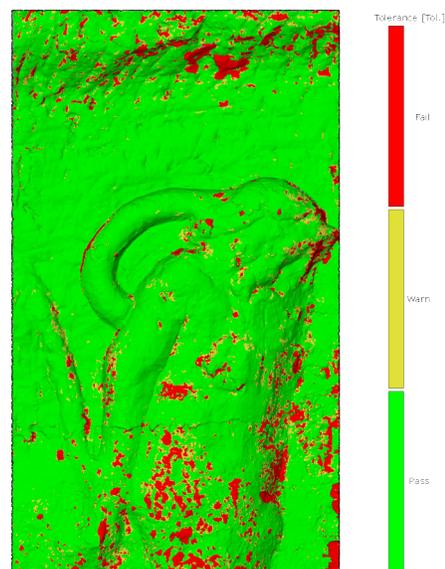


Figura 23. Detalle G1d12b de las grutas de Osimo: cálculo de áreas y porcentajes según la tolerancia. Fuente: Autoría propia, 2020.

las áreas en alerta las diferencias entre 0.75 y 1.00 mm y las áreas no aprobadas las diferencias por arriba de 1.00 mm. En los Anexos 2 y 3 pueden consultarse los reportes de inspección de los seis relieves analizados analizados.

La ventaja de este tipo de análisis es que permite la cuantificación automática de las áreas evaluadas, por lo que resulta una herramienta práctica para conocer la superficie y el porcentaje que ha sufrido cambios (figura 22). Sin embargo, la definición del valor de tolerancia depende del objeto que se analiza y las condiciones en que se encuentra, pues no se puede definir un valor estandarizado que valga para todos los casos. Lo que no hay que perder de vista es que el valor de tolerancia no deberá ser menor a la incertidumbre de los modelos 3D.

Cabe mencionar, que tanto los mapas de desviaciones como los mapas de tolerancia, pueden visualizarse en imágenes 2D o en informes 3D interactivos —en formato .PDF que se puede abrir en cualquier computadora—, que se pueden manipular (girar, acercar, alejar, seccionar) para tener una visión más completa del objeto que se está analizando.

Entre otras posibilidades que ofrece esta propuesta metodológica, pero que no se incluyeron en los alcances de este ejercicio, está la generación de secciones de comparación, a saber, una forma de análisis 2D que consiste en mostrar las comparaciones de un corte longitudinal o transversal del modelo. Desde luego, para realizarlas entran en juego otro tipo de consideraciones como es la posición de la sección y su orientación

por mencionar algunas. Se considera que este tipo de secciones podrían complementar la lectura de los mapas de desviaciones que en un momento dado podrían dar una mayor claridad de lo que sucede en el relieve. Finalmente, en la siguiente sección, se presentará el proceso de evaluación de la propuesta metodológica puesta a prueba a partir de su implementación en los casos de estudio.

## 4.6 Evaluación de la propuesta

Una de las cosas más importantes en el diseño de una herramienta es que sea confiable, es decir que disminuya los errores, ya que eso genera seguridad en su uso por parte de la comunidad a quien va dirigida. De modo que, llegados a este punto, conviene preguntarse qué tan confiable es nuestra técnica. Para tratar de responder esta interrogante, se diseñó un formulario para su caracterización y evaluación.

Los procesos de diseño de herramientas de evaluación pueden contemplar la revisión de técnicas similares de otras disciplinas, la identificación del grupo a quien están dirigidas y la consideración de que las herramientas sirvan no solo para el análisis, sino también para la comunicación (Michalski, 2015). Se pensó el diseño del formulario de modo que pueda utilizarse ulteriormente para evaluar otras técnicas de detección de cambios y posiblemente realizar un ejercicio comparativo.

El primer paso fue la definición de la finalidad del formulario, o sea, caracterizar y evaluar una técnica para la detección de cambios en relieves escultóricos. Una técnica de detección de cambios es una herramienta de evaluación en sí, y se considera que este tipo de herramientas son importantes porque permiten la identificación y medición de variaciones que pueden indicar algún tipo de deterioro que puede o no representar un riesgo para el patrimonio material.

Para evaluar la técnica, se consideraron los siguientes criterios<sup>22</sup>:

- ▶ Experiencia del operador y tiempo de operación
- ▶ Precisión y dependencia (de algoritmos, de datos crudos...)
- ▶ Efectividad comunicativa
- ▶ Comparabilidad de resultados
- ▶ Reproducibilidad de la técnica

---

22 En el Foro ICCROM 2013 sobre Ciencias de la Conservación, se realizó un grupo de trabajo sobre “Herramientas para evaluar necesidades e impactos”; en él, se definieron los principios y criterios que retomamos para el diseño del formulario, ya que se los consideramos representativos de la disciplina de Conservación (Michalski, 2015).

Después de realizar una primera propuesta de formulario, se llevó a cabo una prueba piloto, durante la cual se detectaron algunas fallas en el formulario original y se hicieron los ajustes correspondientes. La versión definitiva del formulario diseñado para caracterizar y evaluar la propuesta metodológica antes descrita se conforma de siete secciones que se precisan a continuación<sup>23</sup>:

- ▶ Sección 1 Presentación de la técnica: se definen los objetivos del cuestionario y se recolectan datos generales sobre la técnica a analizar
- ▶ Sección 2 Requerimientos instrumentales de la técnica: en esta sección, se pretende conocer los requerimientos instrumentales necesarios para poner en práctica la técnica, se busca determinar que tan accesibles son los métodos, los instrumentos y el software para instituciones o profesionales que se especializan en la conservación de bienes culturales.
- ▶ Sección 3 Nivel de experiencia para la operación y uso de la técnica: aquí, se busca conocer la experiencia requerida tanto en quienes operan la técnica como a quien vaya dirigida la información que a raíz de ella se obtenga. El criterio para evaluar nivel de experiencia es en cuanto al uso de las tecnologías para la conservación de la cual se vale la técnica, por ejemplo, un usuario con poca experiencia en tecnología de digitalización 3D podría tener mucha experiencia en conservación o vice.
- ▶ Sección 4 Tiempos de operación: en esta sección, se solicita una estimación del tiempo requerido para poner en práctica la técnica considerando la evaluación de una superficie de 1.00 m<sup>2</sup>.
- ▶ Sección 5 Precisión: esta sección busca reconocer de qué depende la precisión de la técnica, se solicita especificar qué factores, y en qué medida, influyen en la precisión de la técnica.
- ▶ Sección 6 Efectividad comunicativa: si se considera que las herramientas de detección de cambios sirven no sólo para el análisis, sino también para la comunicación, en esta sección se busca evaluar qué tipo de los productos (ej. imágenes, cuantificación de área y/o volumen...) que se pueden obtener con la técnica y el grado de efectividad que tienen en la comunicación a quienes harán uso de ellos.
- ▶ Sección 7 Comparabilidad de los resultados y reproducibilidad de las mediciones: en este apartado, se busca determinar la consistencia de la herramienta de

---

23 Es posible consultar el formulario completo en el Anexo 4.

detección de cambios. La comparabilidad de los resultados radica en si los resultados conseguidos en un primer monitoreo será posible analizarlos en relación con anteriores o posteriores monitoreos. La reproducibilidad se refiere a si es posible realizar la misma medición en condiciones distintas, ya sea realizada en otro momento, por medio de otra técnica o por otra persona.

Se analizaron las respuestas obtenidas en la aplicación del formulario a las dos variantes de la propuesta metodológica, y se concluyó que la diferencia sustancial entre las dos radica en la accesibilidad de la técnica y en el costo temporal y operativo de su implementación. La variante con fotogrametría resultó ser la más accesible, sin embargo, el tiempo total de operación y el número de personas que realizaron el levantamiento fueron mayores, que en la variante con escaneo de luz estructurada.

En cuanto al nivel de experiencia, se determinó que, para la implementación de las dos variantes, se requiere de personal con un alto nivel de experiencia en la digitalización 3D. Sin embargo, dicha experiencia no es necesaria para la interpretación de los resultados que las dos variantes ofrecen. Con respecto al tipo de resultados, ambas variantes proporcionan información de tipo cualitativa y cuantitativa, a saber, mapas 2D y 3D que permiten conocer la posición y la dimensión de los cambios detectados, cálculo de áreas y porcentajes. Cabe mencionar que, en ambos casos la comunicación de los resultados se calificó como “muy efectiva”.

Por último, en cuanto a la comparabilidad de los resultados, ambas variantes estimaron que los resultados pueden ser comparados con futuras mediciones, y posiblemente también con resultados obtenidos mediante otras técnicas. Al igual, ambas determinaron que el proceso de detección puede ser reproducido en otro momento y por personal diferente. Las respuestas al formulario de evaluación se pueden consultar en el Anexo 4.

Esta evaluación nos permitió comprobar que la propuesta metodológica sí responde a inquietudes manifestadas en la disciplina de conservación. Esto nos resulta significativo debido a que la técnica que se propone busca ser una herramienta complementaria a los procedimientos usuales en el monitoreo. Sin dejar de lado que, los resultados que se brindan requieren de la eventual discusión con los demás actores involucrados en la conservación de bienes culturales. En este sentido, cobra mayor relevancia la evaluación de estas propuestas como una efectiva forma de detección y comunicación de los cambios para el monitoreo de conservación.

## CONCLUSIONES

Para hacer un balance final de esta investigación, podemos decir que, en primer lugar, se identificaron los recursos de documentación de patrimonio cultural, se pudo analizar su evolución a lo largo del tiempo hasta llegar a las técnicas usadas actualmente. Vimos a través de este recuento cómo las técnicas de documentación fueron incorporando los desarrollos tanto intelectuales como tecnológicos. Además, son resultado de necesidades prácticas específicas, acordes con la visión relativa a la valoración de los bienes culturales imperante en cada momento.

Sin embargo, estos recursos no se sustituyen unos a otros, sino que a veces evolucionan, mejoran o se complementan entre sí. Es así que continúan siendo vigentes y llegan hasta nosotros. También pudimos comprender cómo la tecnología ha ido integrándose a la práctica de la conservación, y algunas de las innovaciones se han desarrollado en ese ámbito.

Si bien reconocemos el sesgo histórico y geográfico presente en nuestro recuento tecnológico, como ya se advirtió en el primer capítulo, consideramos que este estudio de los antecedentes de registro patrimonial es suficiente para transmitirnos una idea general de la documentación como testigo del tiempo, como referencia temporal del objeto. En términos prácticos, documentar el momento histórico permite la comparación, y ésta,

a su vez, la detección de cambios. Reconocer las alteraciones, así como los posibles riesgos, posibilita tomar medidas de prevención o mitigación.

Por otro lado, el análisis crítico de las técnicas de detección de cambios nos sirvió, en parte, para entender la problemática existente en la actualidad con respecto al monitoreo de conservación, a la vez, que confirmamos que la tecnología constituye un aporte valioso en las labores de conservación, pues a través del uso de algoritmos es posible corregir algunos errores provocados por fallas en la documentación fotográfica multitemporal, es posible cuantificar de manera precisa los cambios en imágenes bidimensionales, es posible identificar cambios submilimétricos a partir del estudio de la incidencia de la luz en las superficies.

A partir de este análisis se detectó también que, si bien estas técnicas han sido validadas, no son efectivas para todo tipo de patrimonio material. Si bien las técnicas analizadas funcionan de manera muy adecuada para obras bidimensionales, siguen teniendo deficiencias para la detección de cambios en obras tridimensionales como son los relieves escultóricos. Cabe mencionar que nuestra propuesta no está exenta de este tipo de limitaciones, pues muy probablemente, no hay una herramienta que resuelva por sí sola la compleja problemática de la conservación.

No obstante, se trató de superar algunas de las deficiencias identificadas y se propuso una metodología para la detección de cambios en relieves escultóricos a partir de la comparación de modelos tridimensionales multitemporales basada en otras aplicaciones de inspección dimensional dirigidas al monitoreo de daños y el control de calidad. Para demostrar la funcionalidad de la propuesta metodológica se puso a prueba utilizando los casos de estudio de los relieves de estuco de la Tumba de Pakal y los relieves de piedra de las grutas de Osimo.

La técnica no solo se puso a prueba, sino que se comprobó por medio de inspecciones visuales a fotografías de las áreas con afectaciones perceptibles a simple vista. Con ello, se verificó que los cambios observados son consistentes con el tipo de daños que se pueden inferir de las fotografías, con lo que se consideró como exitosa la detección de cambios. Aquí no hay que perder de vista que la tecnología es una herramienta de apoyo, así que la interpretación a partir de la observación crítica siempre debe estar presente en un estudio de esta naturaleza. La detección de cambios aporta información valiosa y confiable, que después debe ser discutida e interpretada por especialistas en conservación que, a final de cuentas, son usuarios finales de este tipo de análisis.

Por último, la caracterización y evaluación de la técnica en sus dos variantes —con escaneo de luz estructurada y con fotogrametría—, por medio de un formulario diseñado *ex profeso*, hizo posible la contrastación de la hipótesis: se determinó que la metodología propuesta sí permite detectar y cuantificar cambios entre dos modelos tridimensionales, independientemente de la técnica mediante la cual hayan sido obtenidos, siempre y cuando los modelos sean comparables.

Al respecto, se determinó que de ser necesario, existen acciones adicionales que se pueden implementar antes de su análisis para mejorar la calidad de los datos y hacerlos comparables, por ejemplo, optimizar el reconocimiento de las imágenes tomadas en condiciones lumínicas diferentes —procedimientos mencionados en Peteler *et al.* (2015) y Malinverni *et al.* (2017)—, o realizando ajustes de escala, entre los modelos multitemporales cuando no se cuenta con puntos de control fijos, como se mencionó en el capítulo 4. Lo importante será que los datos comparados tengan características semejantes en cuanto a resolución e incertidumbre.

Se confirmó la reproductibilidad de la técnica, en tanto es posible reproducir el levantamiento tridimensional y, teniendo los modelos tridimensionales o en su caso los datos duros, como son las fotografías, es posible reproducir el flujo de trabajo de detección de cambios las veces que resulte necesario. También, se comprobó la efectividad comunicativa, ya que los resultados pueden ser expresados mediante mapas de desviación y mapas de tolerancia, susceptibles de ser personalizados según el caso, además de que tienen salida mediante imágenes bidimensionales estáticas y mediante reportes tridimensionales interactivos, que pueden ser consultados sin necesidad de software ni equipo especializado.

Finalmente, se logró minimizar los errores en la técnica, de modo que puede ser considerada una herramienta confiable. Al respecto, es oportuno mencionar que el formulario de evaluación se diseñó de modo que pueda utilizarse a futuro para evaluar otras técnicas de detección de cambio, e incluso sería posible realizar análisis comparativos entre ellas. La caracterización, evaluación y análisis comparativo de diversas técnicas sería útil ya que, como vimos, el empleo de una u otra dependerá del tipo de patrimonio que se quiere realizar, los objetivos del análisis y de los recursos con los que se cuente.

Esta primera propuesta metodológica puede reproducirse y ayudar a la detección oportuna de cambios en el patrimonio material, sin embargo, los alcances de esta investigación se quedan cortos en comparación con el potencial que tienen las técnicas de digitalización y análisis tridimensional. Simplemente, en esta técnica, hay herramientas

que faltan por explotar como son la generación secciones de inspección con información más acotada a áreas de interés, o la posibilidad de retomar los datos estadísticos del análisis y utilizarlos para otros tipos de cálculos.

Y, si bien es cierto que para su implementación se requiere de personal capacitado en el uso de modelos tridimensionales, en México existen diversas instancias, tanto públicas como privadas con la capacidad de implementar este tipo de técnicas. Por otro lado, la fotogrametría se considera una técnica de bajo costo y, actualmente, existen diversas opciones de software libre para edición y análisis de modelos tridimensionales, incluidas las reportadas en nuestro flujo de trabajo, lo que la convierte en una propuesta accesible para otros investigadores en el campo de la conservación de patrimonio material.

Para concluir, podemos afirmar que esta propuesta metodológica podrá ayudar a resolver, en algunos casos, el problema de la falta de datos cuantificables en el monitoreo de conservación de los relieves escultóricos. Además, podemos decir que esta propuesta podría tener otras aplicaciones en el ámbito de la conservación —así como nos lo hicieron notar algunos de los expertos con quienes se discutió la propuesta durante su desarrollo—, ya que una detección de cambios confiable podría ser útil también en casos de peritajes, apoyar en la cuantificación de costos e intervenciones, o para análisis de riesgos en recubrimientos arquitectónicos. A final de cuentas, como ya se mencionó, las innovaciones tecnológicas tienen su origen en las necesidades de los usuarios, y el patrimonio cultural material, en su vastedad y complejidad, brinda un gran abanico de posibilidades.

# REFERENCIAS

## Libro

- ALMAGRO, Antonio, 2004, *Levantamiento Arquitectónico*, Universidad de Granada, Granada, España.
- CHOAY, Françoise, 1992, *Alegoría del Patrimonio*, Gustavo Gili, Barcelona, España.
- DOEHNE, Eric, y Price, Clifford A. [1996] 2010, *Stone Conservation: An Overview of Current Research. Second Edition*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, EE. UU. Consultado: [http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/stone\\_cons\\_2nd\\_edit.html](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/stone_cons_2nd_edit.html)
- GONZÁLEZ-VARAS, Ignacio, [1999] 2000, *Conservación de Bienes Culturales. Teoría, historia, principios y normas*, Ediciones Cátedra, Madrid, España.
- HISTORIC ENGLAND, [2007] 2018, *3D Laser Scanning for Heritage. Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture*, Historic England, Swindon, Inglaterra.
- MACARRÓN, Ana María, [2002] 2014, *Historia de la conservación y la restauración. Desde la Antigüedad hasta el siglo XX*, Tecnos, España.
- NEWHALL, Beaumont, [1937] 2002, *Historia de la fotografía*, Gustavo Gili, Barcelona, España.
- PARRILLA, Ana María, Sheseña, Alejandro, y López Bravo, Roberto (Eds.), 2015, *Palenque: investigaciones recientes*, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, México.
- STEPHENS, John L., Catherwood, Frederick, y Bond, Joseph, 1843, *Incidents of travel in Yucatan*, Harper & Brothers, New York, EE. UU. Consultado: <http://archive.org/details/incidentsoftrave11843step>

## Sección de libro

- GARCÍA, Claudia Araceli, 2009, “El friso modelado en estuco de la Sub II-C1 de Calakmul. Una propuesta de conservación basada en la interpretación de su deterioro a través de su historia cultural”, en Luis Fernando Guerrero Baca (Coord.), 2009, *Conservación de bienes culturales. Acciones y Reflexiones*, INAH, México D.F., México. Consultado: [https://mediateca.inah.gob.mx/islandora\\_74/islandora/object/libro%3A401](https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/libro%3A401)
- GREGORINI, Benedetta, Lucesoli, Michele, Bernardini, Gabriele, Quagliarini, Enrico y Marco D’Orazio, 2020, “Combining Conservation and Visitor’s Fruition for Sustainable Building Heritage Use: Application to a Hypogeum”, en John Littlewood, Robert J. Howlett, Alfonso Capozzoli, y Lakhmi C. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings*, Springer, Singapur, Singapur.

- GUERRERO, Luis Fernando, 2009, "Presentación", en Luis Fernando Guerrero Baca (Coord.), 2009, *Conservación de bienes culturales. Acciones y Reflexiones*, INAH, México D.F., México. Consultado: [https://mediateca.inah.gob.mx/islandora\\_74/islandora/object/libro%3A401](https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/libro%3A401)
- MEDINA-GONZÁLEZ, Isabel, Pereira, Grégory, y Faugère-Kalfon, Brigitte, 2016, "Digitalización tridimensional para el estudio y la conservación de manifestaciones arqueológicas gráfico-rupestres uacúsechas", en Diego Jiménez-Badillo y Manuel Gándara Vázquez (Eds.), 2016, *El patrimonio cultural y las tecnologías digitales. Experiencias recientes desde México*, INAH/Conacyt, Ciudad de México, México.
- RUIZ, Antonio Miguel, García, José Luis, y Mesa, José Luis, 2010, "Error, incertidumbre, precisión y exactitud, términos asociados a la calidad espacial del dato geográfico", en Manuel G. Alcázar Molina (Ed.), *Catastro: formación, investigación y empresa*, selección de ponencias del I Congreso Internacional sobre Catastro Unificado y Multipropósito, Universidad de Jaén, 16 a 18 de junio de 2010. Jaén: Universidad de Jaén, Servicio de Publicaciones.

### Artículo en revista académica

- ABATE, D., Menna, F., Remondino, F., y M. G. Gattari, 2014, '3D painting documentation: evaluation of conservation conditions with 3D imaging and ranging techniques', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5, pp. 1-8. Consultado: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5/1/2014/>
- ABATE, D., 2019, 'Documentation of paintings restoration through photogrammetry and change detection algorithms', *Heritage Science*, vol. 7, no. 1, Consultado: <https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40494-019-0257-y>
- ABELLÁN, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., y J. Blanchard, 2010, 'Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring', *Geomorphology*, vol. 119 no. 3-4, pp. 162-171. Consultado: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X10001224>
- BIANCONI, F., Catalucci, S., Filippucci, M., Marsili, R., Moretti, M., Rossi, G., y E. Speranzini, 2017, 'Comparison between two non-contact techniques for art digitalization', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 882. Consultado: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/882/1/012005>
- CLINI, P., Nespeca, R., Angeloni, R., y R. Mammoli, 2019, 'The integrated survey of narrow spaces and underground architecture: the case study of Campana caves bas-reliefs', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2-W9, pp. 277-282, Bergamo, Italy: Copernicus GmbH. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-277-2019>
- EDGERTON, D., 2010, 'Innovation, Technology, or History: What Is the Historiography of Technology About?', *Technology and Culture*, vol. 51, no. 3, pp. 680-697. Consultado: <https://bidi.uam.mx:8889/docview/751306336?pq-origsite=summon>

- ITURRALDE, M. G., 2018, 'Metodología de un sistema de monitoreo y mantenimiento de los bienes inmuebles en las áreas históricas: caso aplicativo: "conjunto urbano arquitectónico de San Francisco"', *ASRI: Arte y sociedad. Revista de investigación*, no. 14, pp.103-120. Consultado: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6266262>
- JÁIDAR, Y., López-Armenta, M. F., Rodríguez, C., Villaseñor, I., Ruigomez, A. J., y I. S. Fragoso, 2017, 'Digitalización tridimensional para la documentación, análisis y conservación de bienes culturales: los relieves decorativos en piedra de la zona arqueológica de Tula, Hidalgo, México', *Intervención*, vol. 8, no.16, pp. 43-56. Consultado: <https://revistaintervencion.inah.gob.mx/index.php/intervencion/article/view/6135>
- KERSTEN, T. P., Lindstaedt, M., y B. Vogt, 2009, 'Preserve the Past for the Future – Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai', *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, no. 1, pp. 79-90. doi:10.1127/0935-1221/2009/0008
- LERCARI, N., 2019, 'Monitoring earthen archaeological heritage using multitemporal terrestrial laser scanning and surface change detection', *Journal of Cultural Heritage*, vol. 39, pp. 152–165. Consultado: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1432-8364&volume=2009&issue=1&spage=79>
- LERMA, J. L., Cabrelles, M., Navarro, S., y A. E. Segui, 2013, 'Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital', *Cuadernos de arte rupestre*, vol. 6, pp. 85-90. Consultado: <https://riunet.upv.es/handle/10251/61249>
- MAGAR, V., 2017, 'Viollet-le-Duc y Mérimée. Editorial', *Conversaciones*, vol. 3, (Impreso), pp. 5-10.
- MALINVERNI, E., Pierdicca, R., Sturari, M., Colosi, F., & R. Orazi, 2017, 'Documentation and detection of colour changes of bas relieves using close range photogrammetry', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-5/W1, 203–210. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-203-2017>
- MANFREDI, M., Bearman, G., Williamson, G., Kronkright, D., Doehne, E., Jacobs, M., y E. Marengo, 2014, 'A New Quantitative Method for the Non-Invasive Documentation of Morphological Damage in Paintings Using RTI Surface Normals', *Sensors*, vol. 14 no. 7, pp. 12271-12284. doi:10.3390/s140712271
- MICHALSKI, S., 2015, 'Tools for assessing needs and impacts', *Studies in Conservation Supplement 2*, vol. 60, pp. S2-23-31. Consultado: <https://www.iccrom.org/section/heritage-science/key-challenges>
- MORALES, Ricardo, 2007, 'Arquitectura prehispánica de tierra: conservación y uso social en las huacas de moche, Perú', *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, vol. 20, no. 2, pp. 256-277. Consultado: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1657-97632007000200007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-97632007000200007)

- NESPECA, R., y L. De Luca, 2016, 'Analysis, thematic maps and data mining from point cloud to ontology for software development', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B5, pp. 347-354. Consultado: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B5/347/2016/isprs-archives-XLI-B5-347-2016.pdf>
- NUÑÉZ, Jorge, 1994, 'Etnocentrismo e historia. Tres ejemplos clásicos', *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, vol. XV, no. 58. Consultado: <https://www.colmich.edu.mx/relaciones25/files/revistas/058/JorgeNunezSanchez.pdf>
- PALMA, G., Pingi, P., Siotto, E., Bellucci, R., Guidi, G., y Scopigno, R., 2019, 'Deformation analysis of Leonardo da Vinci's "Adorazione dei Magi" through temporal unrelated 3D digitization', *Journal of Cultural Heritage*. Consultado: <https://bidi.uam.mx:3276/science/article/pii/S1296207418303819>
- PATHAK, V. K., Singh, A. K., Sivadasan, M., y N. K. Singh, 2015, 'Framework for Automated GD&T Inspection Using 3D Scanner', *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, no.2, pp. 197-205. doi:10.1007/s40032-016-0337-7
- REYNO, T., Marsden, C., y D. Wowk, 2018, 'Surface damage evaluation of honeycomb sandwich aircraft panels using 3D scanning technology', *NDT & E International*, vol. 97, pp. 11-19. doi:10.1016/j.ndteint.2018.03.007
- RIVES, V., y J. Garcia-Talegon , 2006, 'Decay and Conservation of Building Stones on Cultural Heritage Monuments', *Materials Science Forum*, vol.514-516, pp. 1689-1694. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.1689
- RUZ, A., 1955, 'Exploraciones en Palenque: 1952', *Anales del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, vol. VI, no. 34, pp. 79-106. Consultado: [https://mediateca.inah.gob.mx/islandora\\_74/islandora/object/articulo%3A7739](https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/articulo%3A7739)
- VIOLLET-LE-DUC, E., [1875] 2017, 'Restauración' (Valerie Magar & Bernardo Gómez-Pimienta, Trads.), *Conversaciones*, vol. 3 (Impreso), pp. 5-10.
- VIOLLET-LE-DUC, Eugène, y Mérimée, Prosper, [1849] 2017, 'Instrucciones para la conservación, el mantenimiento y la restauración de edificios diocesanos, y en particular catedrales. Consejos para la restauración, 1849' (Valerie Magar & Bernardo Gómez-Pimienta, Trads.), *Conversaciones*, vol. 3 (Impreso), pp. 32-50.
- VILLASEÑOR, Isabel y Clifford A. Price, 2008, 'Technology and decay of magnesian lime plasters: the sculptures of the funerary crypt of Palenque, Mexico', *Journal of Archaeological science*, vol. 35, núm. 4, pp. 1030-1039. Consultado: [https://www.academia.edu/217754/Technology\\_and\\_decay\\_of\\_magnesian\\_lime\\_plasters\\_the\\_sculptures\\_of\\_the\\_funerary\\_crypt\\_of\\_Palenque\\_Mexico?email\\_work\\_card=view-paper](https://www.academia.edu/217754/Technology_and_decay_of_magnesian_lime_plasters_the_sculptures_of_the_funerary_crypt_of_Palenque_Mexico?email_work_card=view-paper)

## Artículo en periódico o boletín de prensa

- ARIA, 2017, 'Satellite Radar Detects Damage from Sept. 19, 2017 Raboso, Mexico, Quake', Boletín de prensa NASA. Consultado el 2 de julio de 2020 de: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA21963>
- INAH, 2009, 'Templo de Quetzalcóatl' [en línea], Boletín de prensa *INAH*. Consultado: 24 de noviembre de 2018, <https://www.inah.gob.mx/boletines/2021-templo-de-quetzalcoatl>
- INAH, 2017, 'INAH y Embajada de Estados Unidos presentan proyecto para preservar la Tumba de Pakal y estructuras de El Palacio, en Palenque' [en línea], Boletín de prensa *INAH*. Consultado: 24 de noviembre de 2018, <https://www.inah.gob.mx/boletines/6753-inah-y-embajada-de-estados-unidos-presentan-proyecto-para-preservar-la-tumba-de-pakal-y-estructuras-de-el-palacio-en-palenque>
- INAH, 2018, 'INAH y gobierno de Yucatán firman convenio para poner en valor las principales zonas arqueológicas de la entidad' [en línea], Boletín de prensa *INAH*. Consultado: 24 de noviembre de 2018, <https://www.inah.gob.mx/boletines/7059-inah-y-gobierno-de-yucatan-firman-convenio-para-poner-en-valor-las-principales-zonas-arqueologicas-de-la-entidad>
- NOTIMEX, 2018, 'Francia participará en restauración de iglesia principal de Xochimilco' [en línea], *Excélsior*. Consultado: 24 de noviembre de 2018, <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/francia-participara-en-restauracion-de-iglesia-principal-de-xochimilco/1232764>
- U.S. MISSION TO MEXICO, 2017, 'Embajadora Jacobson anuncia la subvención de 500 mil dólares para la zona arqueológica de Palenque' [en línea], Boletín de prensa *Embajada y consulados de Estados Unidos en México*. Consultado: <https://mx.usembassy.gov/es/embajadora-roberta-jacobson-anuncia-la-subvencion-de-500-mil-dolares-para-la-zona-arqueologica-de-palenque-en-chiapas/>

## Tesis

- CARRILLO-GARZA, Valeria, 2019, *La Digitalización Tridimensional del Patrimonio Cultural como Herramienta para la Conservación: Fotogrametría Digital y Escáner de Luz Estructurada* (Licenciatura), Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía «Manuel Del Castillo Negrete», Ciudad de México, México.

## Ponencia en congreso

- CORONADO, N., Escalante, M. F., Ocampo, C., y N. Hernández, 2017, 'Planificación y estrategias para la conservación del patrimonio arqueológico frente a un panorama complejo en Yucatán', presentado en *Foro Anual de Trabajo 2017 CNCPC, Ex Convento de Churubusco, Ciudad de México, México*. Consultado: <https://www.youtube.com/watch?v=lcvMs6iPeIY>
- MARTÍNEZ, J. C., y J. T. Guzmán, 2017, 'Análisis tridimensional de materiales arqueológicos: lingotes de plomo del pecio "Don Pancho"', presentado en *Cuarto*

*Congreso Internacional el Patrimonio Cultural y las Nuevas Tecnologías INAH, Campeche, México.* Consultado: <https://www.youtube.com/watch?v=218HMoluF9g>

TAPIA, M. I., y García, P., 2017, 'La Tumba de Pakal, un reto en conservación', presentado en *Foro Anual de Trabajo 2017 CNCPC, Ex Convento de Churubusco, Ciudad de México, México.* Consultado: <https://www.youtube.com/watch?v=lcVms6iPeIY>

## Memorias de congreso

CRASBORN, J., y M. Orrego, 2007, 'La elaboración de réplicas: un instrumento de conservación y protección al patrimonio cultural', presentado en *XX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología*, pp. 187-199. Consultado: [https://www.academia.edu/971591/LA\\_ELABORACION\\_DE\\_REPLICAS\\_UN\\_INSTRUMENTO\\_DE\\_CONSERVACION\\_Y\\_PROTECCION\\_AL\\_PATRIMONIO\\_CULTURAL](https://www.academia.edu/971591/LA_ELABORACION_DE_REPLICAS_UN_INSTRUMENTO_DE_CONSERVACION_Y_PROTECCION_AL_PATRIMONIO_CULTURAL)

PAYNE, E. M., 2016, 'Comparative 3D Scanning of Historical Casts: The Parthenon casts at the British Museum', *Casting. Ein Analoger Weg Ins Zeitalter Der Digitalisierung?: Ein Symposium Zur Gipsformerei Der Staatlichen Museen Zu Berlin*, pp. 212-220. doi:10.11588/arthistoricum.95.114

PETELER, F., Gattet, E., Bromblet, P., Guillon, O., Vallet, JM., y L. De Luca, 2015, 'Analyzing the evolution of deterioration patterns: A first step of an image-based approach for comparing multitemporal data sets', 2015 Digital Heritage, vol. 2, pp. 113-116. doi:10.1109/DigitalHeritage.2015.7419465

SITNIK, R., Bolewicki, P., Rutkiewicki, J., Michonski, J., Karaszewski, M., Lenar, J., Zaluski, W, 2010, 'Project "Revitalization and Digitization of the Seventeenth Century Palace Complex and Garden In Wilanow – Phase III" task 3D Digitalization of Selected Exhibits Collection', *Proceedings of the Euromed 2010*, pp. 7-13, Limassol, Cyprus.

TUCCI, G., Bartoli, G., Betti, M., Bonora, V., y M. Korumaz, 2018, 'Advanced procedure for documenting and assessment of Cultural Heritage: from Laser Scanning to Finite Element.' *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 364. doi:10.1088/1757-899X/364/1/012085

## Documentos e instrumentos normativos

s/a, 1931, *Carta de Atenas*, Atenas, Grecia. Consultado: <https://sic.cultura.gob.mx/documentos/1930.pdf>

s/a, 1967, Normas de Quito, en *Documentos Fundamentales para el Patrimonio Cultural. Textos internacionales para su recuperación, repatriación, conservación, protección y difusión*, Lima, Perú. Consultado: <https://www.cultura.gob.pe/sites/default/files/archivosadjuntos/2013/05/iiidocumentosfundamentales.pdf>

- ICOMOS, 1964, *Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios*, Venecia, Italia. Consultado: [https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/venice\\_sp.pdf](https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/venice_sp.pdf)
- ICOMOS, 1996, “Principios para la Creación de Archivos Documentales de Monumentos, Conjuntos Arquitectónicos y Sitios Históricos y Artísticos”, en *Documentos Fundamentales para el Patrimonio Cultural. Textos internacionales para su recuperación, repatriación, conservación, protección y difusión*, Lima, Perú. Consultado: <https://www.cultura.gob.pe/sites/default/files/archivosadjuntos/2013/05/iiidocumentosfundamentales.pdf>
- ICOMOS, 2000, *Informe Mundial 2000 de ICOMOS sobre Monumentos y Sitios en Peligro*. Consultado: [https://www.icomos.org/risk/world\\_report/2000/trends\\_spa.htm](https://www.icomos.org/risk/world_report/2000/trends_spa.htm)
- MÉXICO, 1972, “Ley Federal Sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas”, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 6 de mayo de 1972. Consultado: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/131\\_160218.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/131_160218.pdf)
- UNESCO, 1972, *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural*. Consultado: <https://whc.unesco.org/archive/convention-es.pdf>
- UNESCO, 2003, *Texto de la Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial*. Consultado: <https://ich.unesco.org/es/convención>
- UNESCO, 2003, *Carta para la Preservación del Patrimonio Digital*. Consultado: [http://wayback.archive-it.org/10611/20170205031008/http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CI/CI/pdf/mow/charter\\_preservation\\_digital\\_heritage\\_es.pdf](http://wayback.archive-it.org/10611/20170205031008/http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CI/CI/pdf/mow/charter_preservation_digital_heritage_es.pdf)

## Recurso digital en línea

- GARCÍA, P., s. f., *Drawing Machines* [en línea], consultado: 30 de junio de 2019, <https://drawingmachines.org/index.php>
- MARK, J. J., 2012, ‘Early Explorers of the Maya Civilization: John Lloyd Stephens and Frederick Catherwood’ en *Ancient History Encyclopedia*. Consultado: <https://www.ancient.eu/article/419/early-explorers-of-the-maya-civilization-john-lloyd/>
- VISIÓNARTIFICIAL, 2019, ‘Visión artificial’ en *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Consultado: 2 de julio de 2019, [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Visi%C3%B3n\\_artificial&oldid=116922050](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Visi%C3%B3n_artificial&oldid=116922050)

## Blog

- LINES IN THE AIR, 2015, Lines in the air [en línea], consultado: [http://thyroidin9.rssing.com/chan-6097207/all\\_p2.html](http://thyroidin9.rssing.com/chan-6097207/all_p2.html)
- VIDOLAB, 2018, *Computer Vision History: Milestones and Breakthroughs*. Vidolab blog [blog], 24 diciembre, consultado: 2 de julio de 2019, <https://computer-vision-ai.com/blog/computer-vision-history/>

# ANEXOS

## **Anexo 1. Reportes de calidad de modelos fotogramétricos Osimo**

- ▶ Reporte G1d12\_2018
- ▶ Reporte G1d12\_2019

## **Anexo 2. Reportes de inspección relieves de la Tumba de Pakal**

- ▶ Reporte C1\_Estuco 4
- ▶ Reporte C1\_Estuco 5
- ▶ Reporte C1\_Estuco 7
- ▶ Reporte C1\_Estuco 8

## **Anexo 3. Reportes de inspección relieves de las Grutas de Osimo**

- ▶ Reporte C1\_G1d12a
- ▶ Reporte C1\_G1d12b

## **Anexo 4. Formulario de evaluación**

- ▶ Formulario de evaluación
- ▶ Respuestas al formulario de evaluación
- ▶ Sumario de respuestas

# **g1d12\_2018**

**Processing Report  
12 June 2020**



# Survey Data

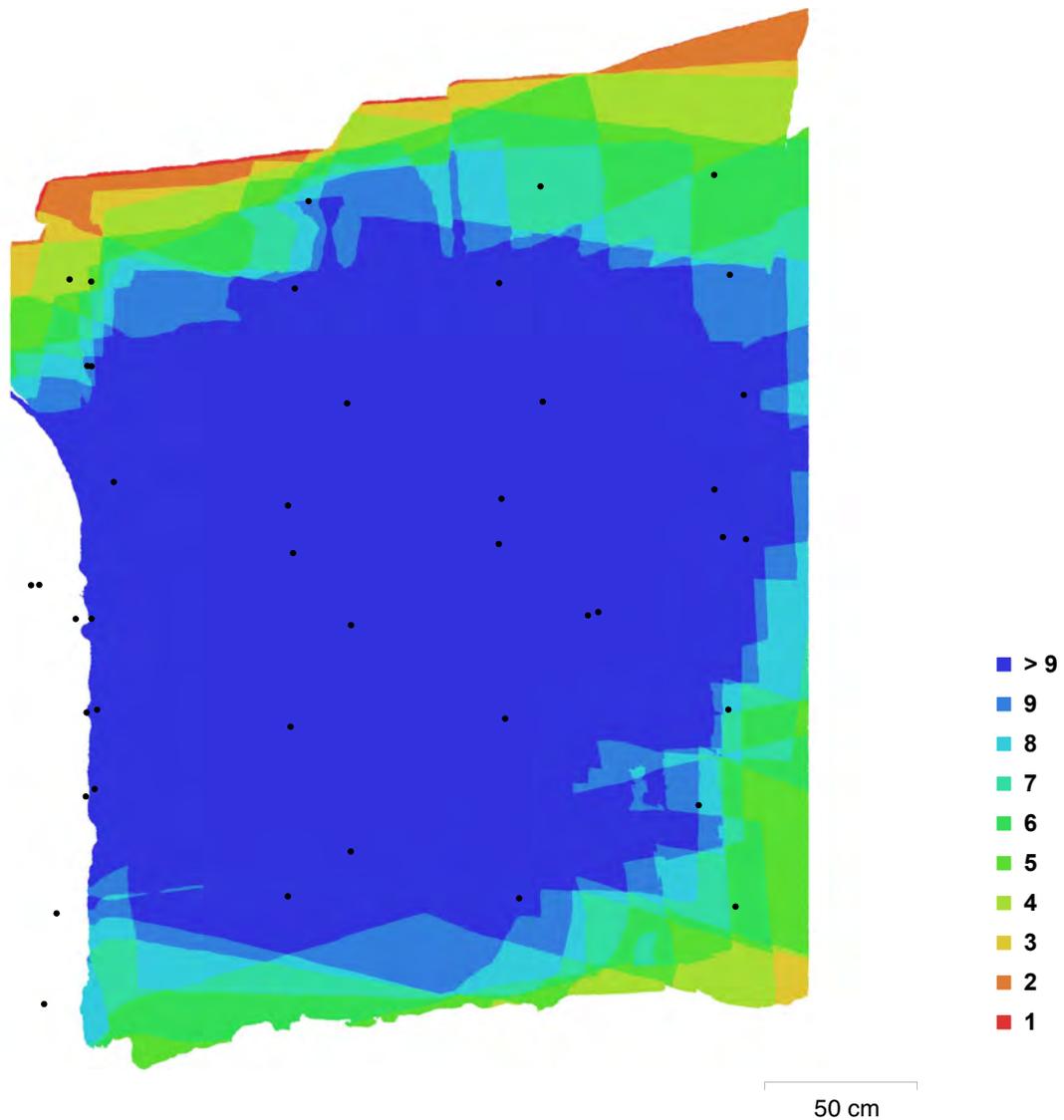


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	42	Camera stations:	42
Flying altitude:	1.22 m	Tie points:	152,800
Ground resolution:	0.279 mm/pix	Projections:	402,504
Coverage area:	7.39 sq m	Reprojection error:	1.1 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-9 (24 mm)	6000 x 4000	24 mm	5.94 x 5.94 um	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

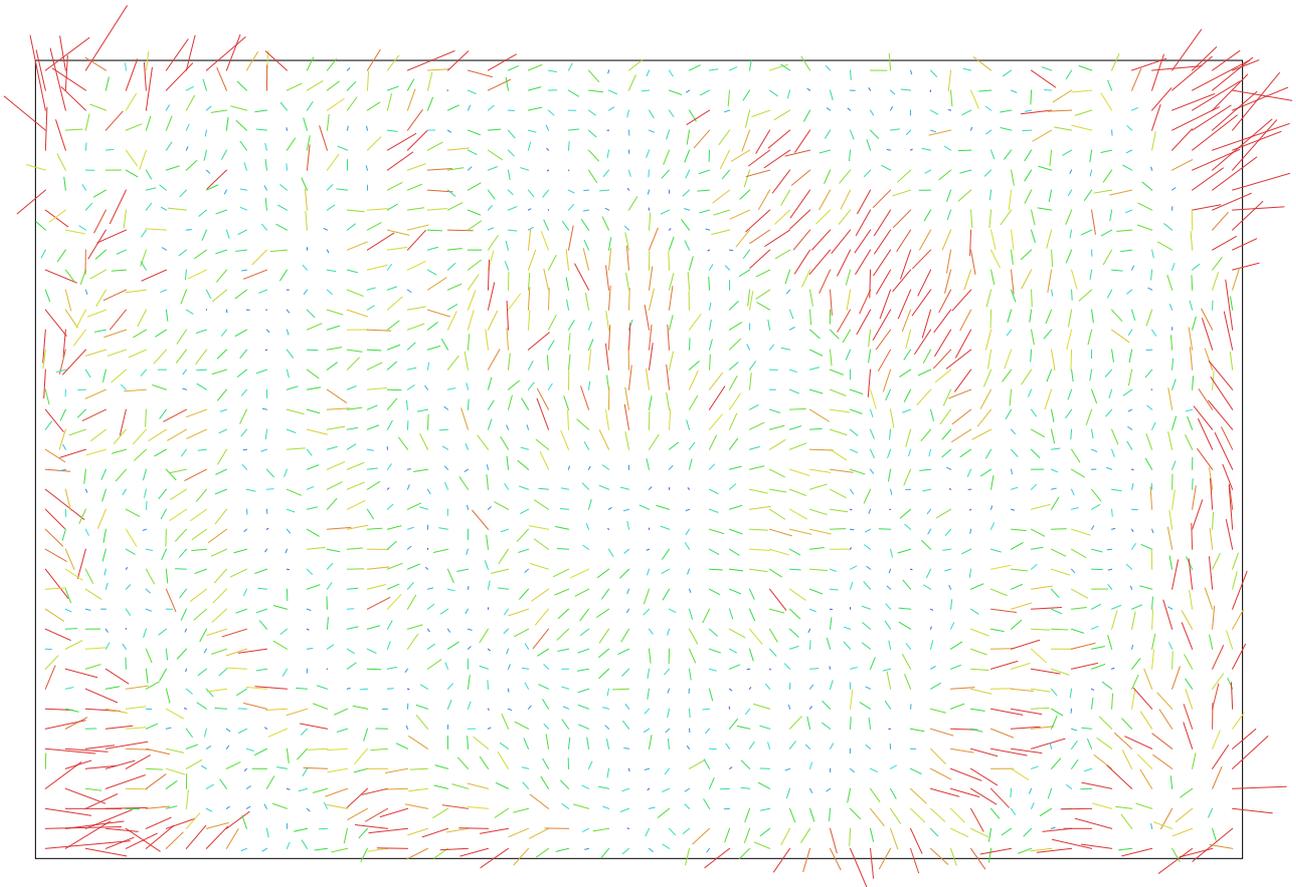


Fig. 2. Image residuals for ILCE-9 (24 mm).

## ILCE-9 (24 mm)

42 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
<b>6000 x 4000</b>	<b>24 mm</b>	<b>5.94 x 5.94 um</b>	<b>No</b>
Type:	Frame	F:	4111.92
Cx:	-6.76176	B1:	0
Cy:	-45.1593	B2:	0
K1:	-0.144625	P1:	-0.000841051
K2:	0.0654317	P2:	0.00187689
K3:	0.00907322	P3:	0
K4:	0	P4:	0

# Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
p056	0.00719209	0.00337908	0.00794634	4	0.002
p060	0.00554323	0.000166773	0.00554574	7	0.003
p004	0.0035172	0.00428545	0.00554399	7	0.002
p001	0.00326705	-0.00352201	0.00480398	17	0.003
p003	0.0042827	-0.000663432	0.00433378	23	0.004
p002	0.00168637	0.000431566	0.00174072	19	0.003
p005	0.0128335	-0.00165703	0.0129401	8	0.003
p007	0.00475043	-0.0023127	0.00528348	10	0.003
<b>Total</b>	<b>0.00626448</b>	<b>0.0025233</b>	<b>0.00675357</b>		<b>0.003</b>

Table 2. Control points.

<b>Label</b>	<b>XY error (m)</b>	<b>Z error (m)</b>	<b>Error (m)</b>	<b>Projections</b>	<b>Error (pix)</b>
p057	0.00100409	0.00124766	0.00160151	11	2.047
p058	0.00535109	0.000366306	0.00536361	7	4.808
p059	0.00489195	-0.000298859	0.00490107	23	0.288
<b>Total</b>	<b>0.00422586</b>	<b>0.000770314</b>	<b>0.00429549</b>		<b>2.262</b>

Table 3. Check points.

# Digital Elevation Model

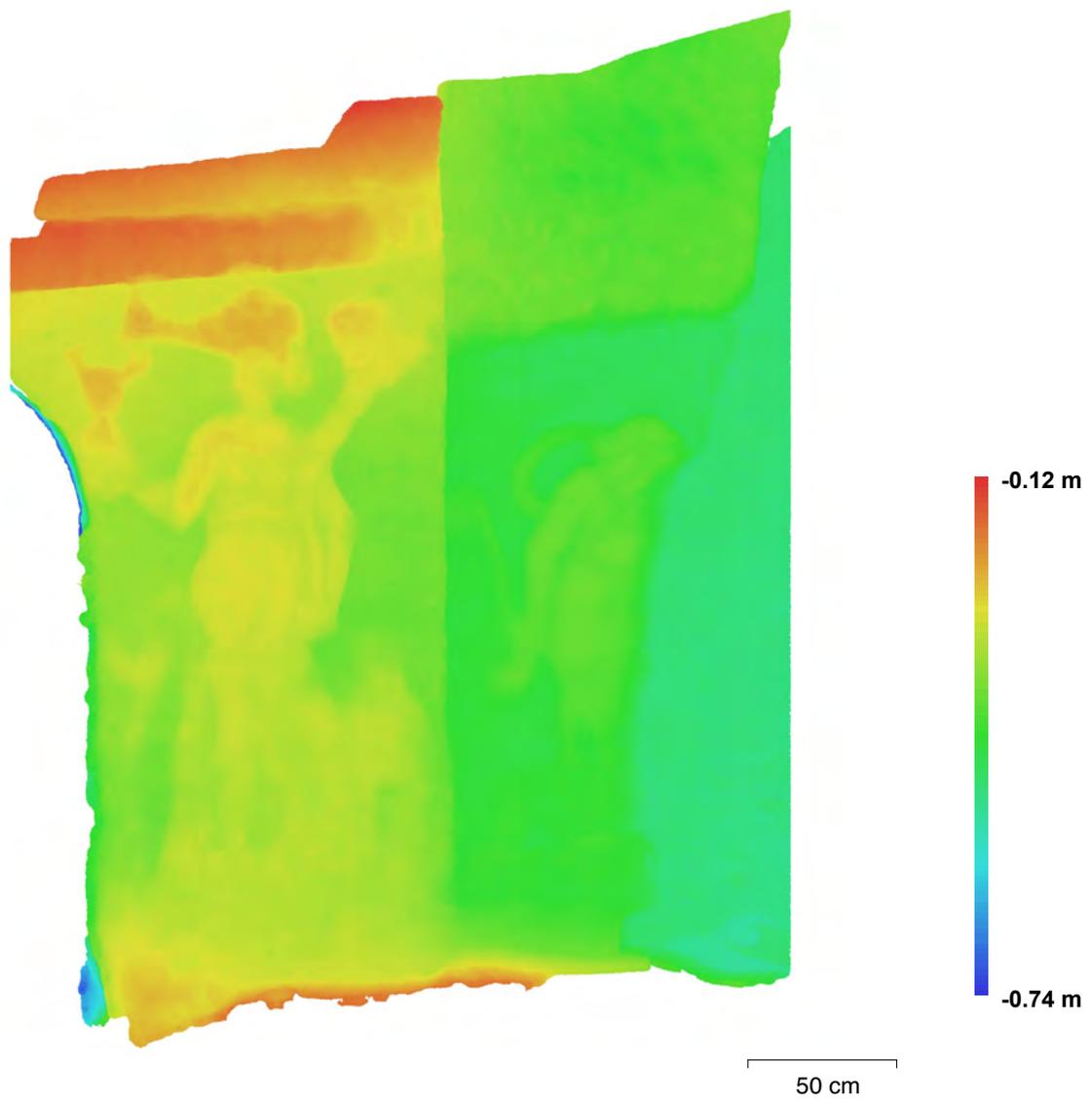


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.557 mm/pix  
Point density: 3.21821e+06 points per sq m

# Processing Parameters

## General

Cameras	42
Aligned cameras	42
Markers	11
Coordinate system	Local Coordinates (m)

## Point Cloud

Points	152,800 of 163,740
RMS reprojection error	0.135646 (1.09512 pix)
Max reprojection error	0.414613 (25.9434 pix)
Mean key point size	7.73832 pix
Effective overlap	2.77131

## Alignment parameters

Accuracy	Medium
Key point limit	0
Tie point limit	0
Matching time	13 minutes 50 seconds
Alignment time	1 minutes 36 seconds

## Dense Point Cloud

Points	34,849,308
--------	------------

## Reconstruction parameters

Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Processing time	13 minutes 16 seconds

## Model

Faces	6,259,745
Vertices	3,134,220
Texture	16,384 x 16,384, uint8

## Reconstruction parameters

Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	7,427,330
Processing time	26 minutes 57 seconds

## Texturing parameters

Blending mode	Mosaic
Texture size	16,384 x 16,384
UV mapping time	1 minutes 50 seconds
Blending time	4 minutes 42 seconds

# g1d12\_2019

Processing Report  
12 June 2020



# Survey Data

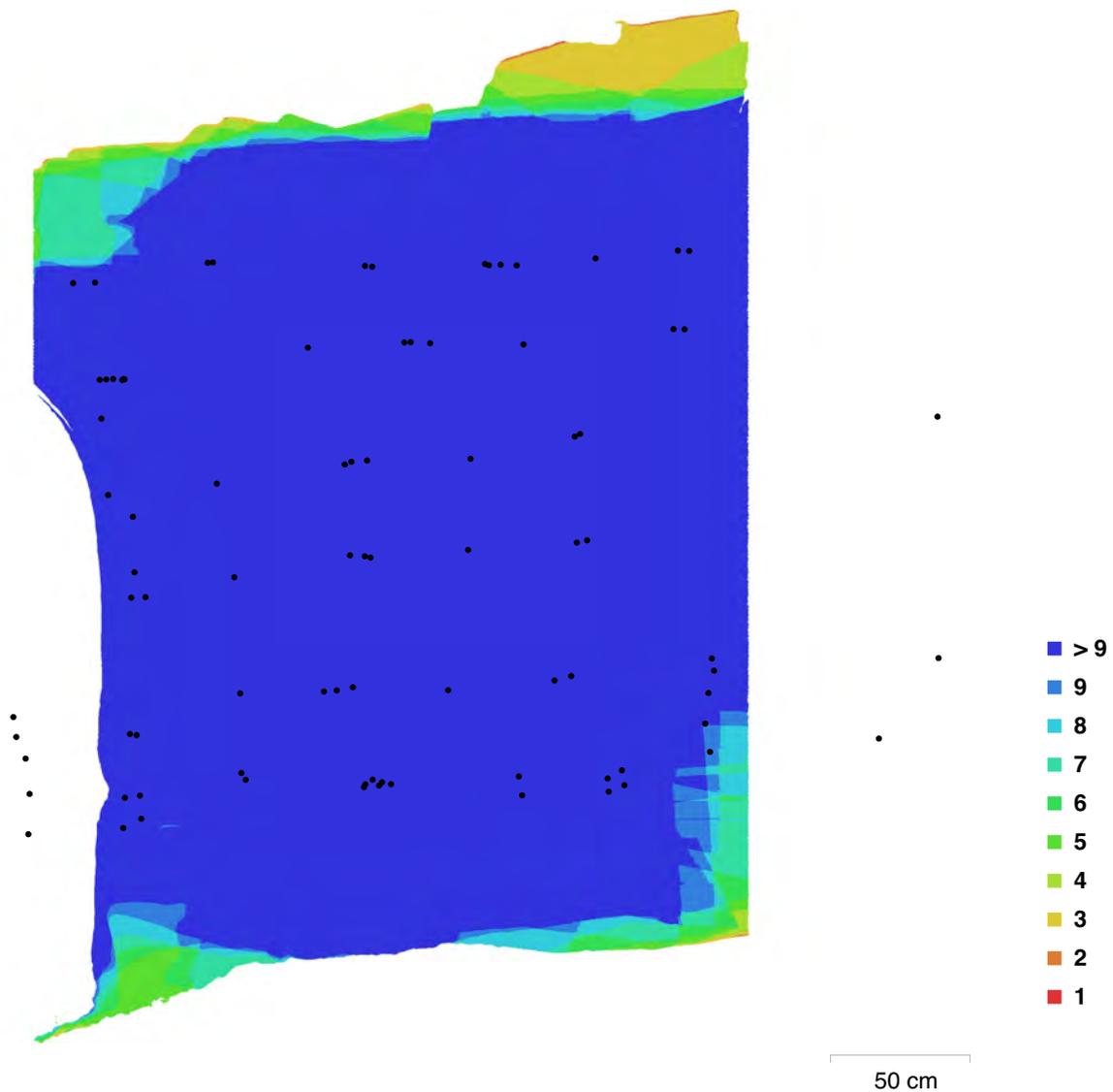


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	86	Camera stations:	86
Flying altitude:	1.08 m	Tie points:	299,803
Ground resolution:	0.288 mm/pix	Projections:	952,796
Coverage area:	7.6 sq m	Reprojection error:	1.15 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-9 (24mm)	6000 x 4000	24 mm	5.94 x 5.94 um	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

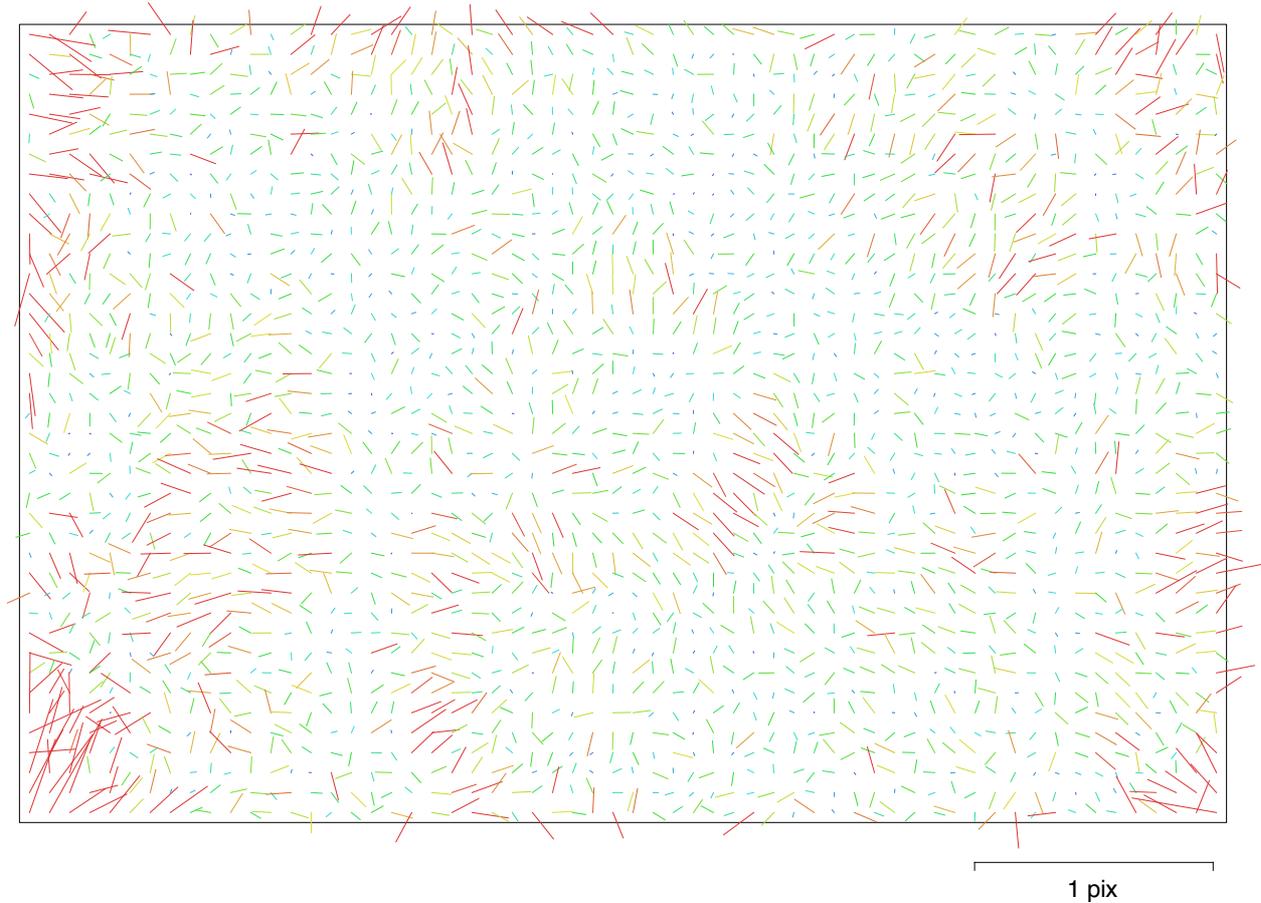


Fig. 2. Image residuals for ILCE-9 (24mm).

## ILCE-9 (24mm)

86 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
<b>6000 x 4000</b>	<b>24 mm</b>	<b>5.94 x 5.94 um</b>	<b>No</b>
Type:	Frame	F:	3936.53
Cx:	-23.8974	B1:	2.9836
Cy:	5.15093	B2:	6.17179
K1:	0.0279756	P1:	-0.000213588
K2:	0.00396849	P2:	0.000814201
K3:	0	P3:	0
K4:	0	P4:	0

# Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
p060	0.00212869	-0.00191056	0.00286034	8	0.003
p058	0.00310247	-0.00215949	0.00378004	12	0.003
p003	0.00557251	-0.000121412	0.00557383	27	0.004
p005	0.00612717	0.00304898	0.00684387	23	0.004
p010	0.00286646	-0.00409689	0.00500011	6	0.002
p009	0.00646549	-0.00144439	0.00662486	22	0.004
p007	0.00121918	0.00236732	0.00266282	17	0.004
p001	0.00170407	0.00212796	0.00272618	21	0.004
p002	0.00395145	0.00218842	0.00451699	30	0.004

<b>Label</b>	<b>XY error (m)</b>	<b>Z error (m)</b>	<b>Error (m)</b>	<b>Projections</b>	<b>Error (pix)</b>
<b>Total</b>	<b>0.00412007</b>	<b>0.00239019</b>	<b>0.00476319</b>		<b>0.004</b>

Table 2. Control points.

# Digital Elevation Model

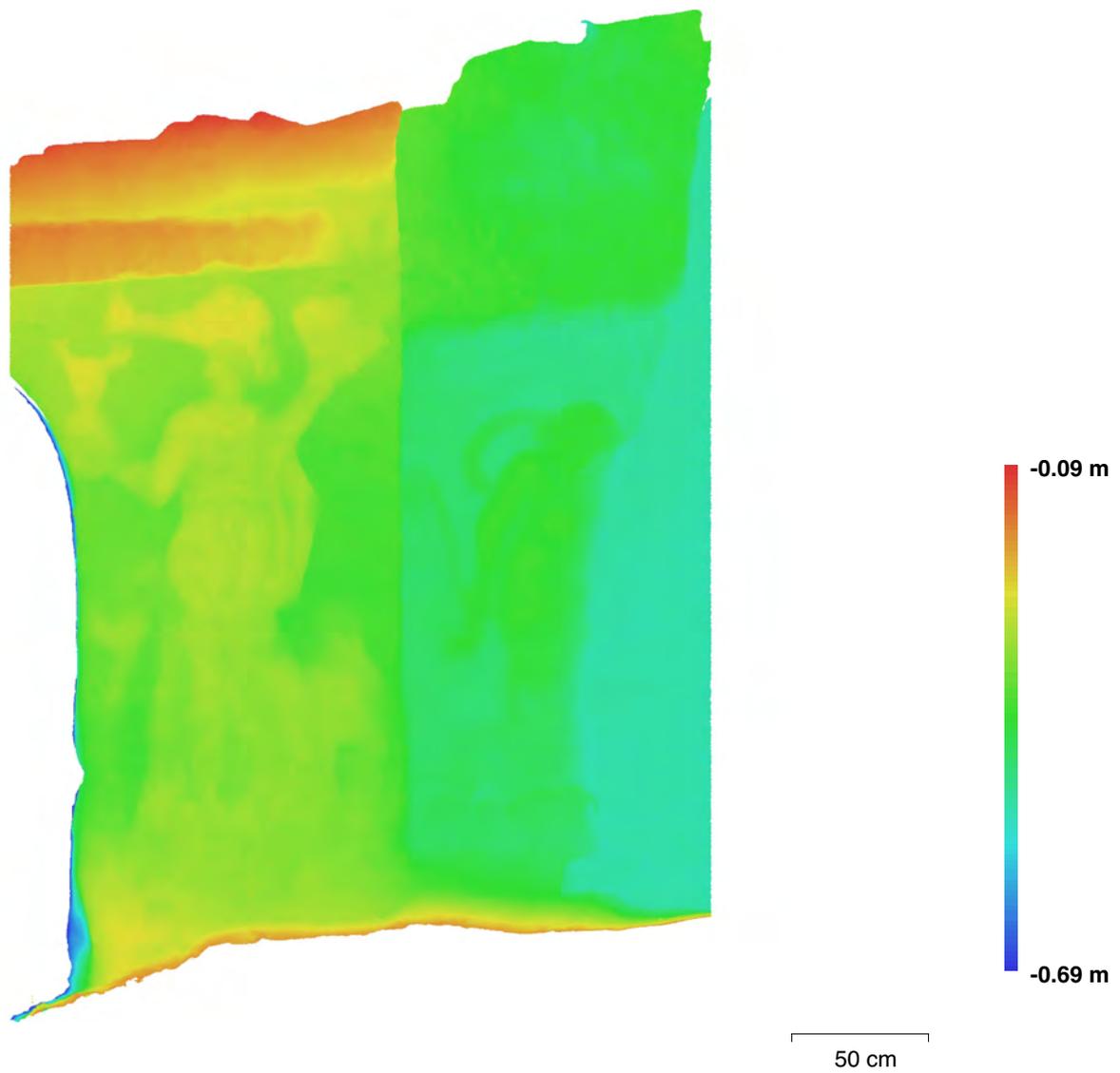


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.577 mm/pix  
Point density: 3.00566e+06 points per sq m

# Processing Parameters

## General

Cameras	86
Aligned cameras	86
Markers	9
Coordinate system	Local Coordinates

## Point Cloud

Points	299,803 of 322,642
RMS reprojection error	0.132905 (1.15344 pix)
Max reprojection error	0.402384 (44.1455 pix)
Mean key point size	7.71106 pix
Effective overlap	3.35418

## Alignment parameters

Accuracy	Medium
Key point limit	0
Tie point limit	0
Matching time	3 minutes 20 seconds
Alignment time	1 minutes 26 seconds

## Dense Point Cloud

Points	36,597,132
--------	------------

## Reconstruction parameters

Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Processing time	1 hours 9 minutes

## Model

Faces	3,369,041
Vertices	1,688,136
Texture	16,384 x 16,384, uint8

## Reconstruction parameters

Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	11,421,090
Processing time	46 minutes 50 seconds

## Texturing parameters

Blending mode	Mosaic
Texture size	16,384 x 16,384
UV mapping time	3 minutes 6 seconds
Blending time	7 minutes 7 seconds



# REPORTE DE INSPECCIÓN

Detección de Cambios para la Conservación del Patrimonio Material

Evaluación de la técnica Deviation Analysis en el Monitoreo de Relieves Escultóricos

## Caso de estudio

Relieves escultóricos de la tumba de Pakal

Localización: Palenque, Chiapas, México

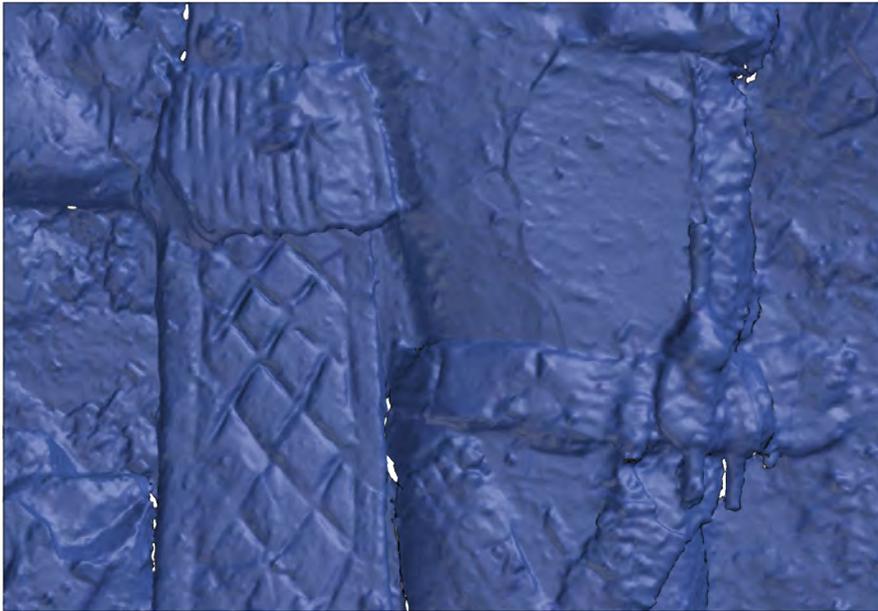
Clave de reporte: C1\_Estuco 4

Fecha de elaboración: 29 octubre 2020

Elaboración: María Fernanda López Armenta



Croquis de localización



### Modelo T0:

Identificador: 1\_Estuco 4

Fecha de levantamiento:

Diciembre 2017



### Modelo T1

Identificador: 2\_Estuco 4

Fecha de levantamiento:

Agosto 2018



### Levantamiento tridimensional

Técnica: Escaneo de luz estructurada

Instrumento: Creaform Go!Scan 20

Resolución de escaneo: 0.2 mm

Créditos: Laboratorio 3D CNCPC-INAH

### Parámetros de Inspección

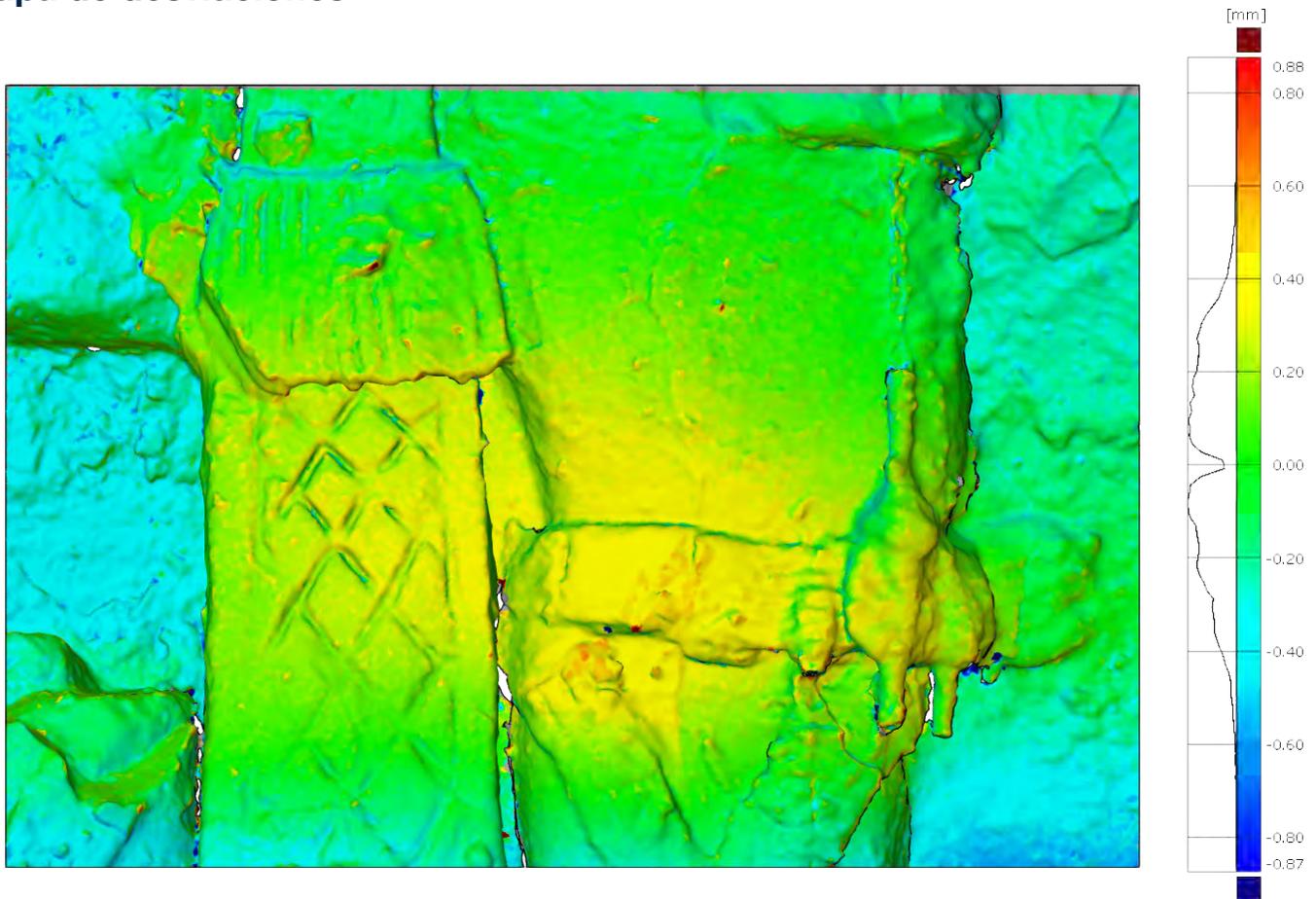
Software de inspección: GOM Inspect 2019

Alineación de modelos: Prealignment

Distancia máxima: 20.00 mm

Tolerancia: 1.00 mm

## Mapa de desviaciones



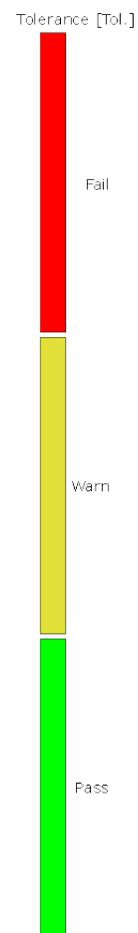
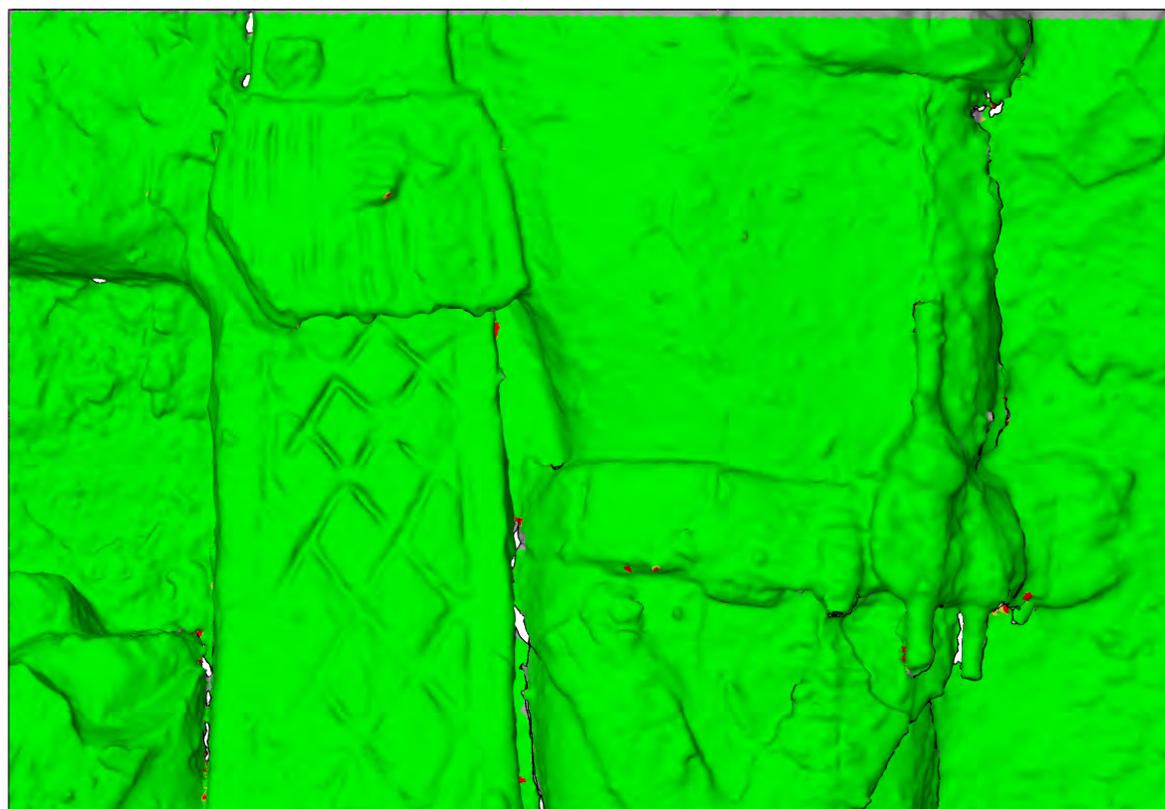
Unidades: mm

Escala de análisis: 3 Sigma

### Comparación de superficies: desviaciones

Max distance	+4.99
Min distance	-4.95
Mean distance	+0.00
Max distance $3\sigma$	+0.88
Min distance $3\sigma$	-0.87
Distance std deviation	+0.29
Area of valid distance	+169999.99
Integrated distance	-631.42
Integrated abs distance	+34659.54

## Mapa de tolerancias



Comparación de superficies: tolerancias			
	Tolerancias	Área	Porcentaje
	Más del 100%	416.95	0.2%
	75% a 100%	406.56	0.2%
	Entre 75%	169176.48	99.5%
	Total	169999.99	100.0%

Unidades área: mm<sup>2</sup>

## **Datos generales del proyecto**

Este proyecto se realizó con el apoyo del Conacyt, por medio del programa de Becas Nacionales y Mixtas; y con el apoyo de la UAM por medio del programa de Becas de Movilidad Internacional.

Los levantamientos de los relieves se realizaron como parte del “Proyecto de conservación de los elementos decorativos de la tumba de Pakal en Palenque” de la Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto Nacional de Antropología e Historia (CNCPC-INAH).

## **Créditos de los levantamientos<sup>1</sup>**

Laboratorio de Documentación y Análisis Tridimensional<sup>2</sup> CNCPC-INAH:

Gilberto García Quintana

María Fernanda López Armenta

Celedonio Rodríguez Vidal

Valeria Carrillo Garza

## **Edición y comparación de los modelos 3D**

María Fernanda López Armenta

---

1 *Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia*

2 Proyecto apoyado por Conacyt INFR-2015-01-251436



# REPORTE DE INSPECCIÓN

Detección de Cambios para la Conservación del Patrimonio Material

Evaluación de la técnica Deviation Analysis en el Monitoreo de Relieves Escultóricos

## Caso de estudio

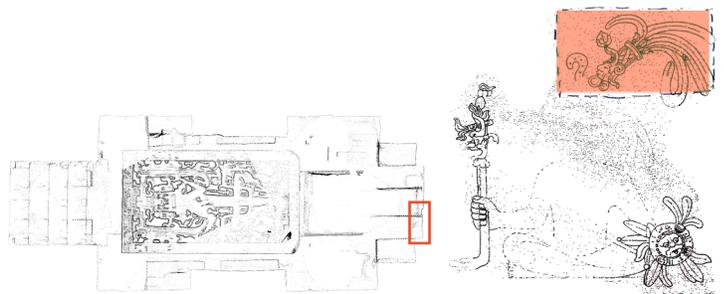
Relieves escultóricos de la tumba de Pakal

Localización: Palenque, Chiapas, México

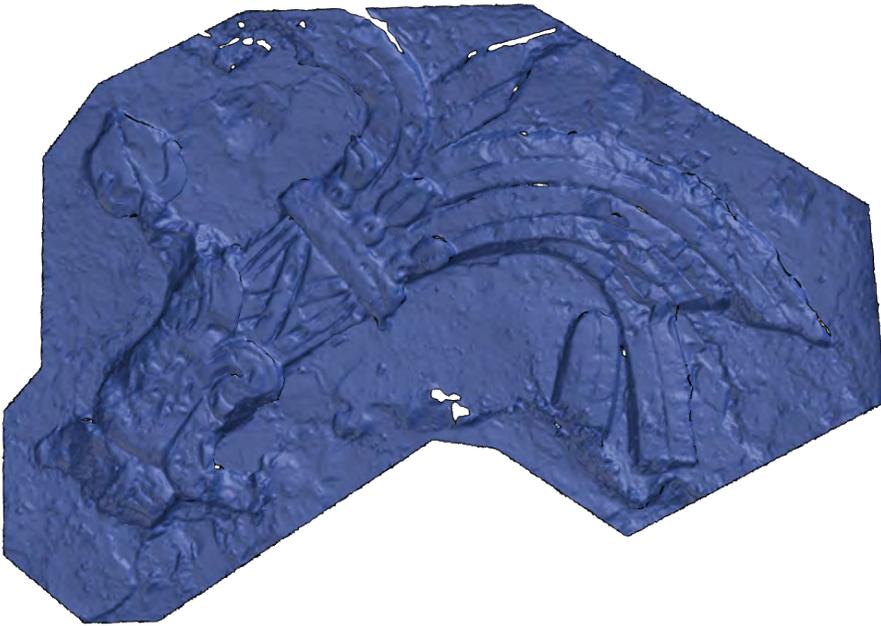
Clave de reporte: C1\_Estuco 5

Fecha de elaboración: 29 octubre 2020

Elaboración: María Fernanda López Armenta



Croquis de localización



### **Modelo T0:**

Identificador:

1\_Estuco 5

Fecha de levantamiento T0:

Diciembre 2017



### **Modelo T1**

Identificador:

2\_Estuco 5

Fecha de levantamiento T1:

Agosto 2018

### **Levantamiento tridimensional**

Técnica: Escaneo de luz estructurada

Instrumento: Creaform Go!Scan 20

Resolución de escaneo: 0.2 mm

Créditos: Laboratorio 3D CNCPC-INAH

### **Parámetros de Inspección**

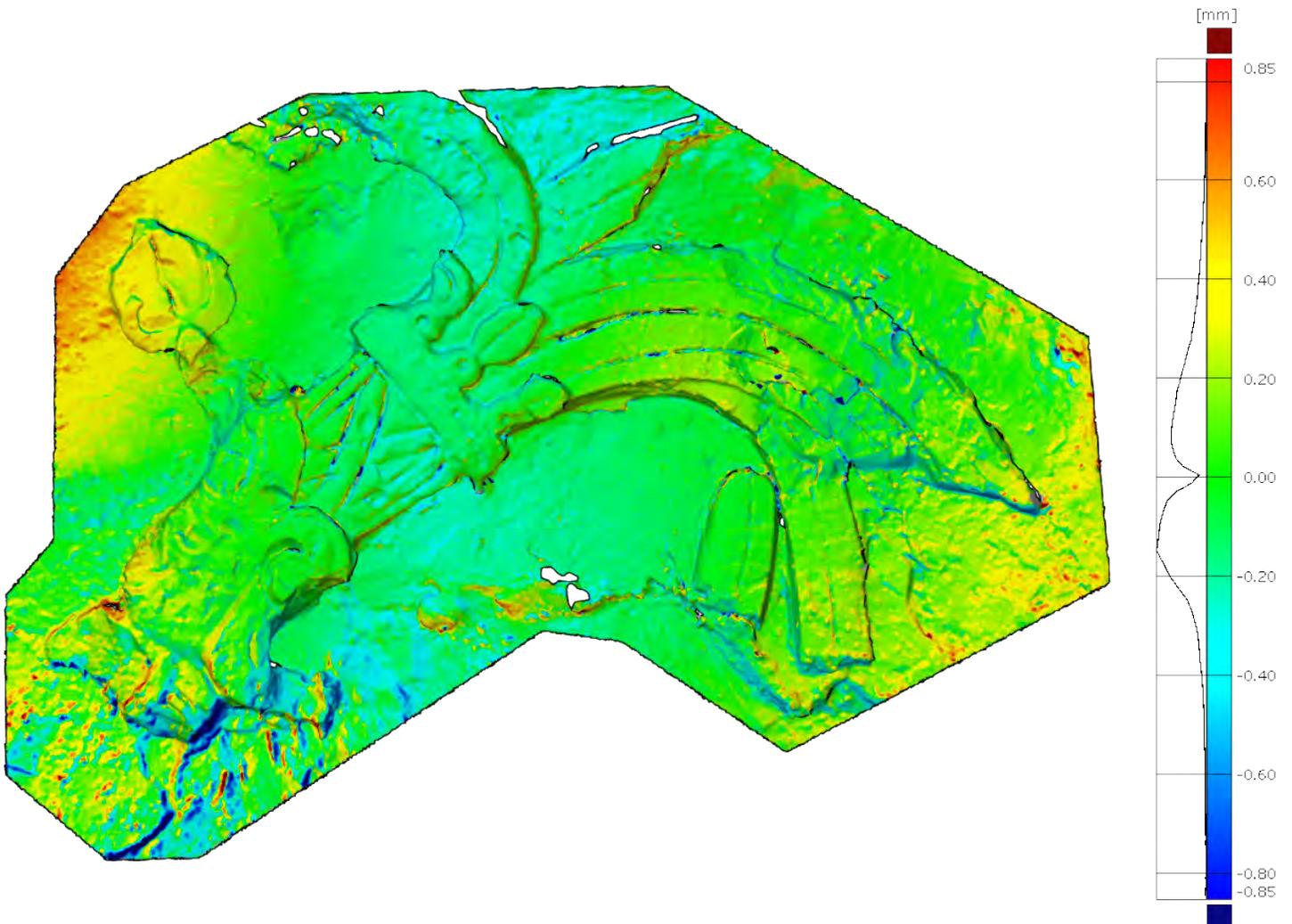
Software de inspección: GOM Inspect 2019

Alineación de modelos: Prealignment

Distancia máxima: 20.00 mm

Tolerancia: 1.00 mm

## Mapa de desviaciones



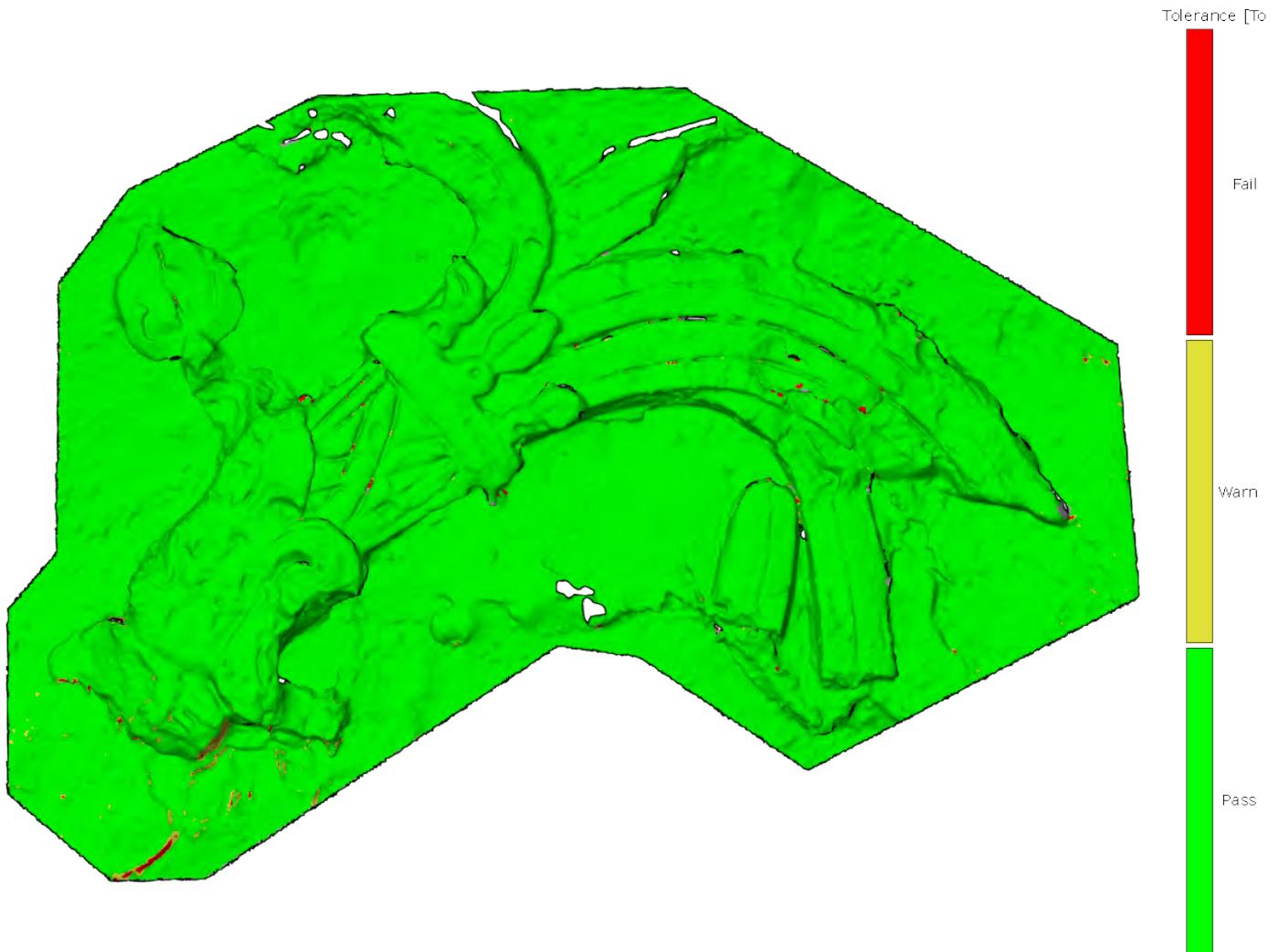
### Comparación de superficies: desviaciones

Max distance	+4.95
Min distance	-4.99
Mean distance	-0.00
Distance std deviation	+0.28
Area of valid distance	+264138.00
Integrated distance	-1577.08
Integrated abs distance	+52086.00

Unidades: mm

Escala de análisis: 3 Sigma

## Mapa de tolerancias



### Comparación de superficies: tolerancias

	Tolerancias	Área	Porcentaje
	Más del 100%	1010.49	0.4%
	75% a 100%	2099.15	0.8%
	Entre 75%	261028.37	98.8%
	Total	264138.00	100.0%

Unidades área: mm<sup>2</sup>

## **Datos generales del proyecto**

Este proyecto se realizó con el apoyo del Conacyt, por medio del programa de Becas Nacionales y Mixtas; y con el apoyo de la UAM por medio del programa de Becas de Movilidad Internacional.

Los levantamientos de los relieves se realizaron como parte del “Proyecto de conservación de los elementos decorativos de la tumba de Pakal en Palenque” de la Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto Nacional de Antropología e Historia (CNCPC-INAH).

## **Créditos de los levantamientos<sup>1</sup>**

Laboratorio de Documentación y Análisis Tridimensional<sup>2</sup> CNCPC-INAH:

Gilberto García Quintana

María Fernanda López Armenta

Celedonio Rodríguez Vidal

Valeria Carrillo Garza

## **Edición y comparación de los modelos 3D**

María Fernanda López Armenta

---

1 *Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia*

2 Proyecto apoyado por Conacyt INFR-2015-01-251436



# REPORTE DE INSPECCIÓN

Detección de Cambios para la Conservación del Patrimonio Material

Evaluación de la técnica Deviation Analysis en el Monitoreo de Relieves Escultóricos

## Caso de estudio

Relieves escultóricos de la tumba de Pakal

Localización: Palenque, Chiapas, México

Clave de reporte: C1\_Estuco 7

Fecha de elaboración: 29 octubre 2020

Elaboración: María Fernanda López Armenta



Croquis de localización





### **Modelo T0:**

Identificador: 1\_Estuco 7

Fecha de levantamiento:

Diciembre 2017



### **Modelo T1**

Identificador: 2\_Estuco 7

Fecha de levantamiento:

Agosto 2018



### **Levantamiento tridimensional**

Técnica: Escaneo de luz estructurada

Instrumento: Creaform Go!Scan 20

Resolución de escaneo: 0.2 mm

Créditos: Laboratorio 3D CNCPC-INAH

### **Parámetros de Inspección**

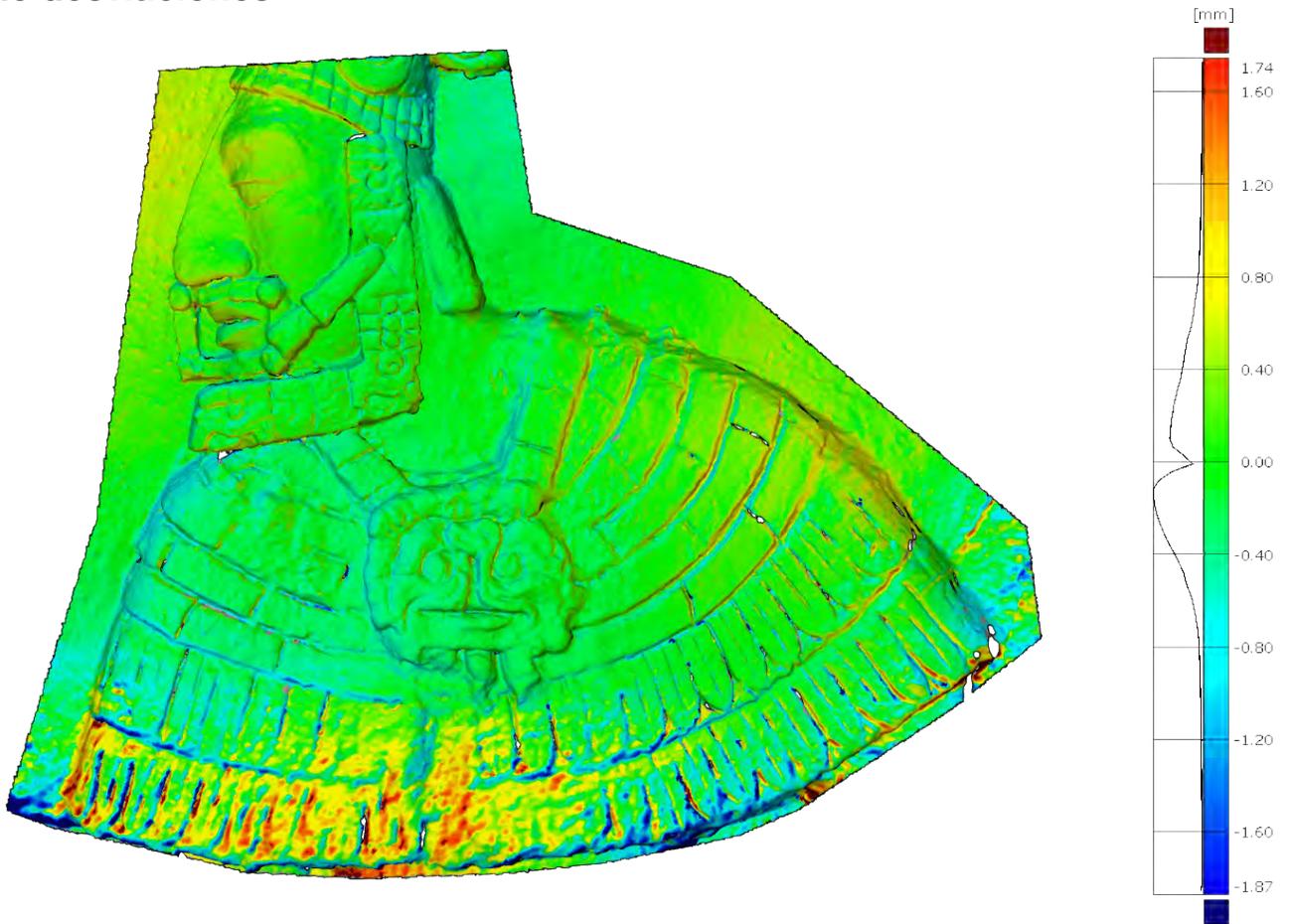
Software de inspección: GOM Inspect 2019

Alineación de modelos: Prealignment

Distancia máxima: 20.00 mm

Tolerancia: 1.00 mm

## Mapa de desviaciones



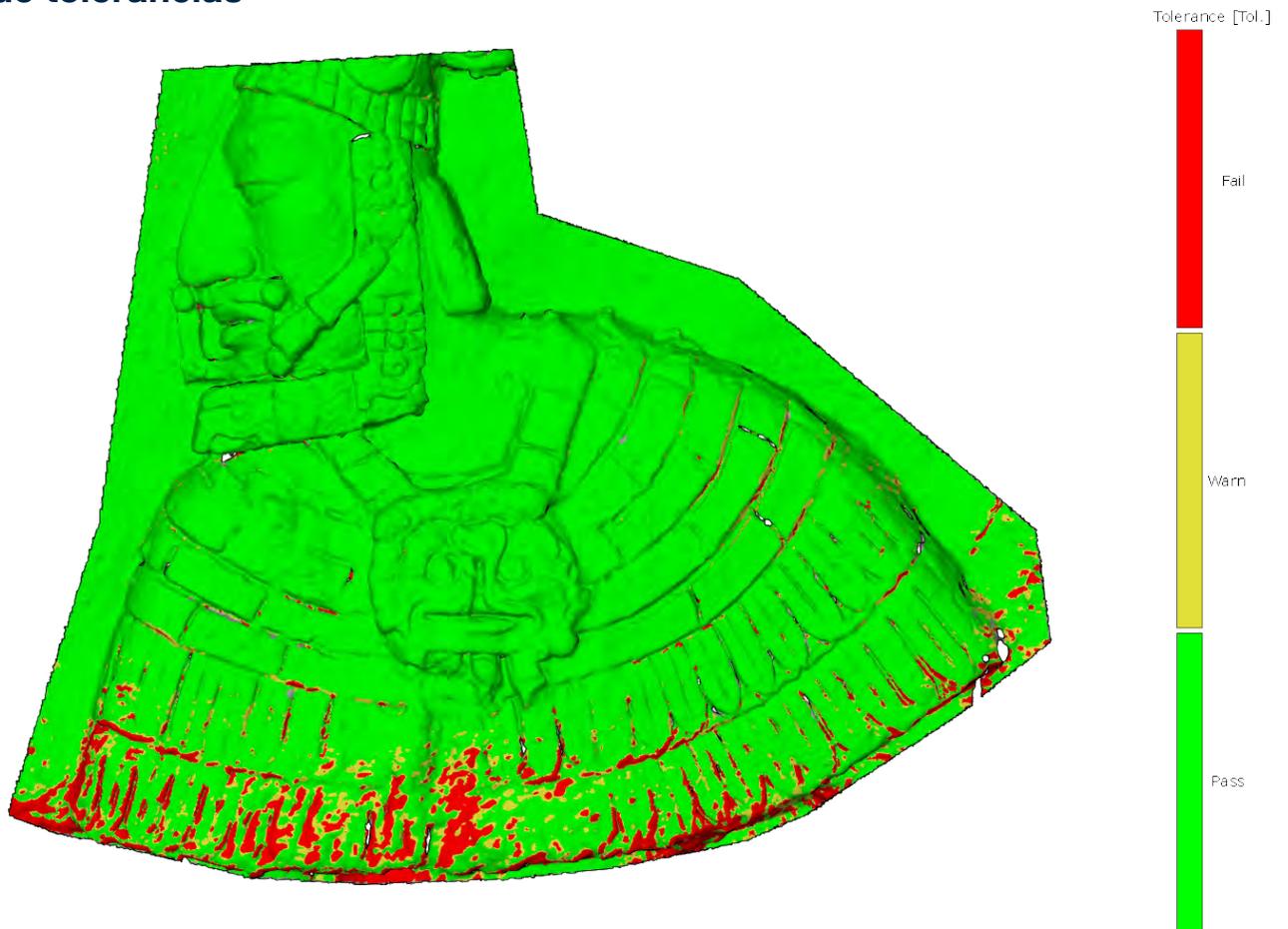
Unidades: mm

Escala de análisis: 3 Sigma

### Comparación de superficies: desviaciones

Max distance	+4.99
Min distance	-4.98
Mean distance	-0.06
Max distance $3\sigma$	+1.74
Min distance $3\sigma$	-1.87
Distance std deviation	+0.60
Area of valid distance	+390028.97
Integrated distance	-23464.58
Integrated abs distance	+164423.85

## Mapa de tolerancias



### Comparación de superficies: tolerancias

	Tolerancias	Área	Porcentaje
	Más del 100%	31874.35	8.2%
	75% a 100%	19023.89	4.9%
	Entre 75%	339130.74	87.0%
	Total	390028.97	100.0%

Unidades área: mm<sup>2</sup>

## **Datos generales del proyecto**

Este proyecto se realizó con el apoyo del Conacyt, por medio del programa de Becas Nacionales y Mixtas; y con el apoyo de la UAM por medio del programa de Becas de Movilidad Internacional.

Los levantamientos de los relieves se realizaron como parte del “Proyecto de conservación de los elementos decorativos de la tumba de Pakal en Palenque” de la Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto Nacional de Antropología e Historia (CNCPC-INAH).

## **Créditos de los levantamientos<sup>1</sup>**

Laboratorio de Documentación y Análisis Tridimensional<sup>2</sup> CNCPC-INAH:

Gilberto García Quintana

María Fernanda López Armenta

Celedonio Rodríguez Vidal

Valeria Carrillo Garza

## **Edición y comparación de los modelos 3D**

María Fernanda López Armenta

---

1 *Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia*

2 Proyecto apoyado por Conacyt INFR-2015-01-251436



# REPORTE DE INSPECCIÓN

Detección de Cambios para la Conservación del Patrimonio Material

Evaluación de la técnica Deviation Analysis en el Monitoreo de Relieves Escultóricos

## Caso de estudio

Relieves escultóricos de la tumba de Pakal

Localización: Palenque, Chiapas, México

Clave de reporte: C1\_Estuco 8

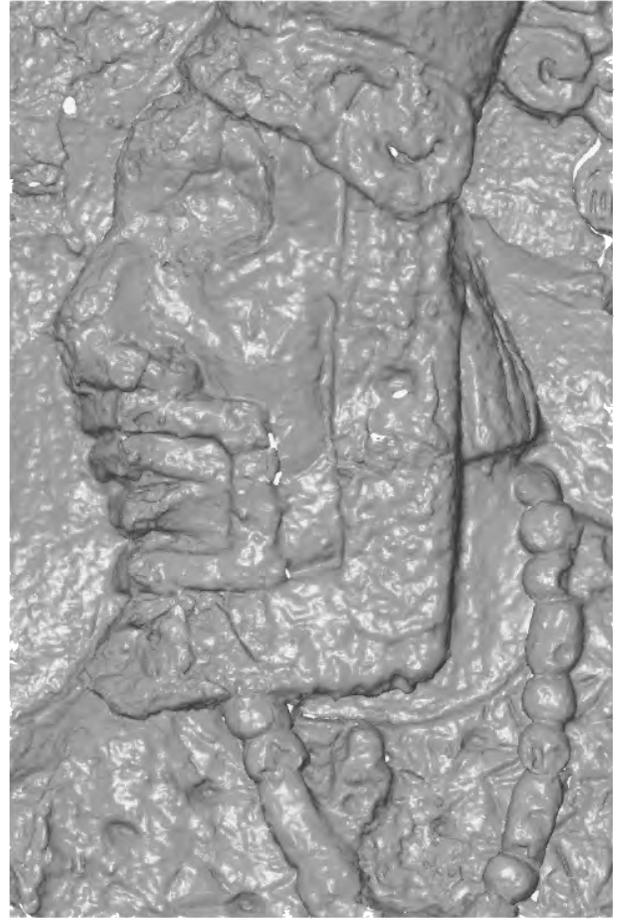
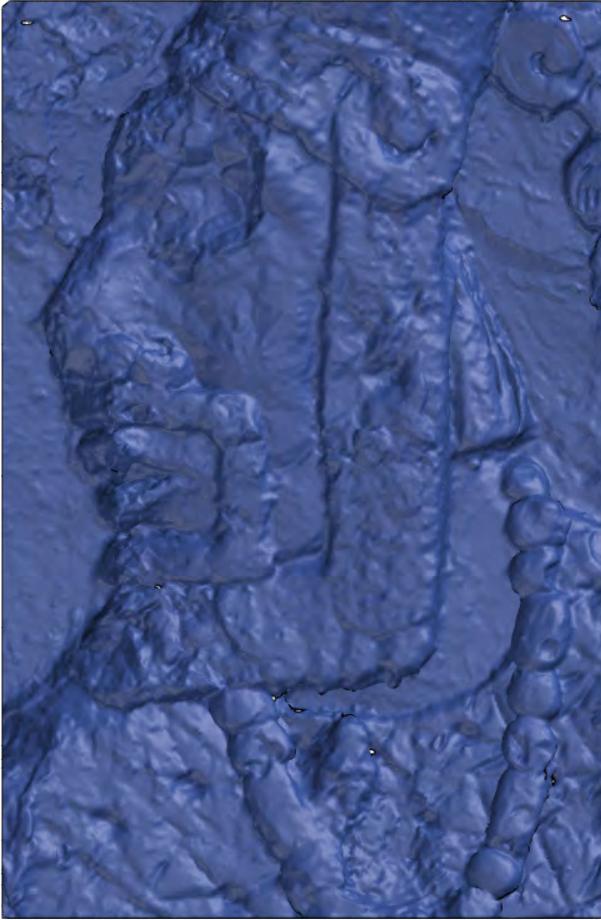
Fecha de elaboración: 29 octubre 2020

Elaboración: María Fernanda López Armenta



Croquis de localización





### **Modelo T0:**

Identificador: 1\_Estuco 8

Fecha de levantamiento: Diciembre 2017

### **Levantamiento tridimensional**

Técnica: Escaneo de luz estructurada

Instrumento: Creaform Go!Scan 20

Resolución de escaneo: 0.2 mm

Créditos: Laboratorio 3D CNCPC-INAH

### **Modelo T1**

Identificador: 2\_Estuco 8

Fecha de levantamiento: Agosto 2018

### **Parámetros de Inspección**

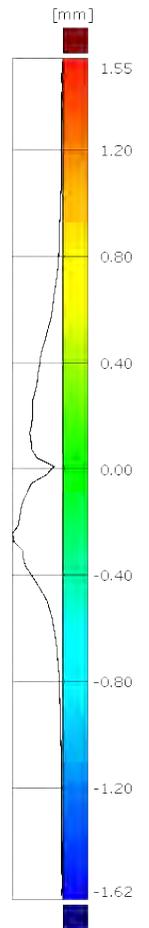
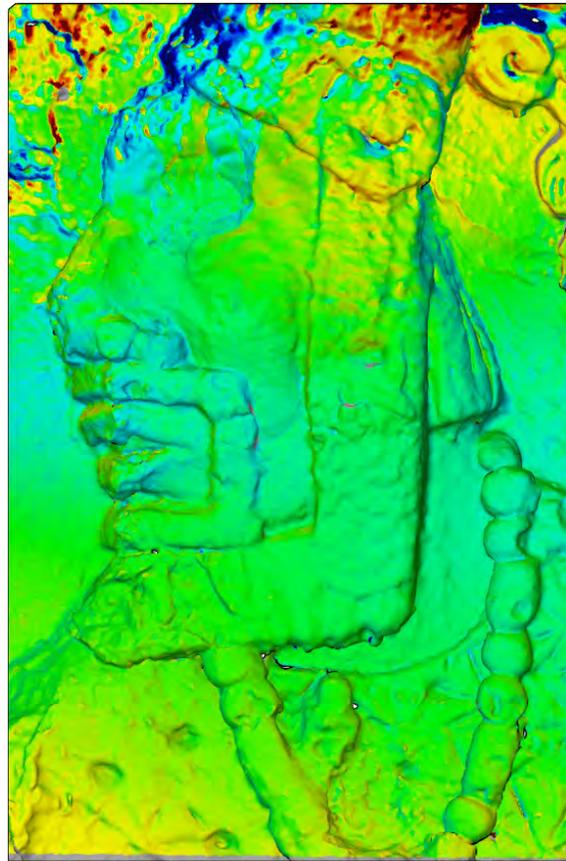
Software de inspección: GOM Inspect 2019

Alineación de modelos: Prealignment

Distancia máxima: 20.00 mm

Tolerancia: 1.00 mm

## Mapa de desviaciones



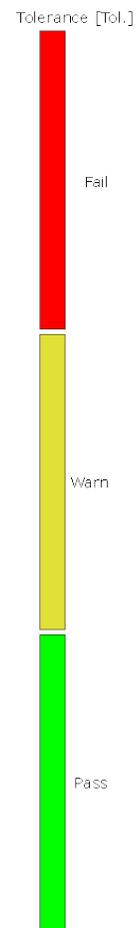
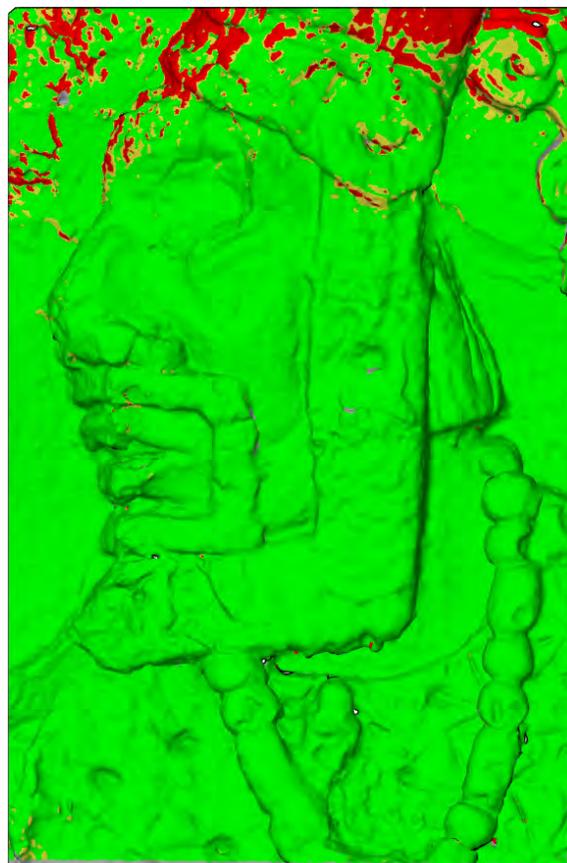
Unidades: mm

Escala de análisis: 3 Sigma

### Comparación de superficies: desviaciones

Max distance	+4.97
Min distance	-4.99
Mean distance	-0.04
Max distance $3\sigma$	+1.55
Min distance $3\sigma$	-1.62
Distance std deviation	+0.53
Area of valid distance	+206086.62
Integrated distance	-9160.13
Integrated abs distance	+77324.38

## Mapa de tolerancias



Comparación de superficies: tolerancias			
	Tolerancias	Área	Porcentaje
	Más del 100%	10312.90	5.0%
	75% a 100%	8477.54	4.1%
	Entre 75%	187296.18	90.9%
	Total	206086.62	100.0%

Unidades área: mm<sup>2</sup>

## **Datos generales del proyecto**

Este proyecto se realizó con el apoyo del Conacyt, por medio del programa de Becas Nacionales y Mixtas; y con el apoyo de la UAM por medio del programa de Becas de Movilidad Internacional.

Los levantamientos de los relieves se realizaron como parte del “Proyecto de conservación de los elementos decorativos de la tumba de Pakal en Palenque” de la Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto Nacional de Antropología e Historia (CNCPC-INAH).

## **Créditos de los levantamientos<sup>1</sup>**

Laboratorio de Documentación y Análisis Tridimensional<sup>2</sup> CNCPC-INAH:

Gilberto García Quintana

María Fernanda López Armenta

Celedonio Rodríguez Vidal

Valeria Carrillo Garza

## **Edición y comparación de los modelos 3D**

María Fernanda López Armenta

---

1 *Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia*

2 Proyecto apoyado por Conacyt INFR-2015-01-251436



# REPORTE DE INSPECCIÓN

Detección de Cambios para la Conservación del Patrimonio Material

Evaluación de la técnica Deviation Analysis en el Monitoreo de Relieves Escultóricos

## Caso de estudio

Relieves escultóricos de las Grutas de Osimo

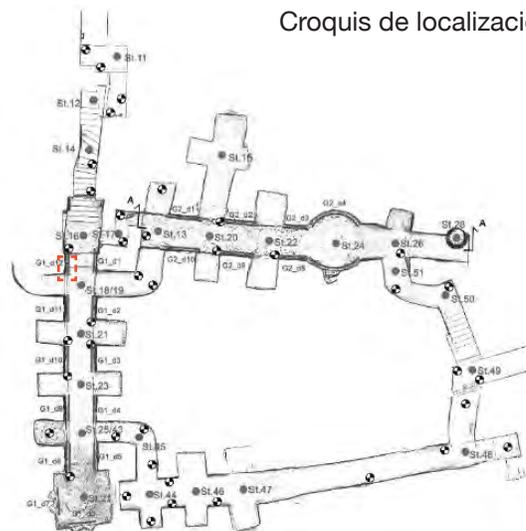
Localización: Osimo, provincia de Ancona, Italia

Clave de reporte: C1\_G1d12a

Fecha de elaboración: 29 octubre 2020

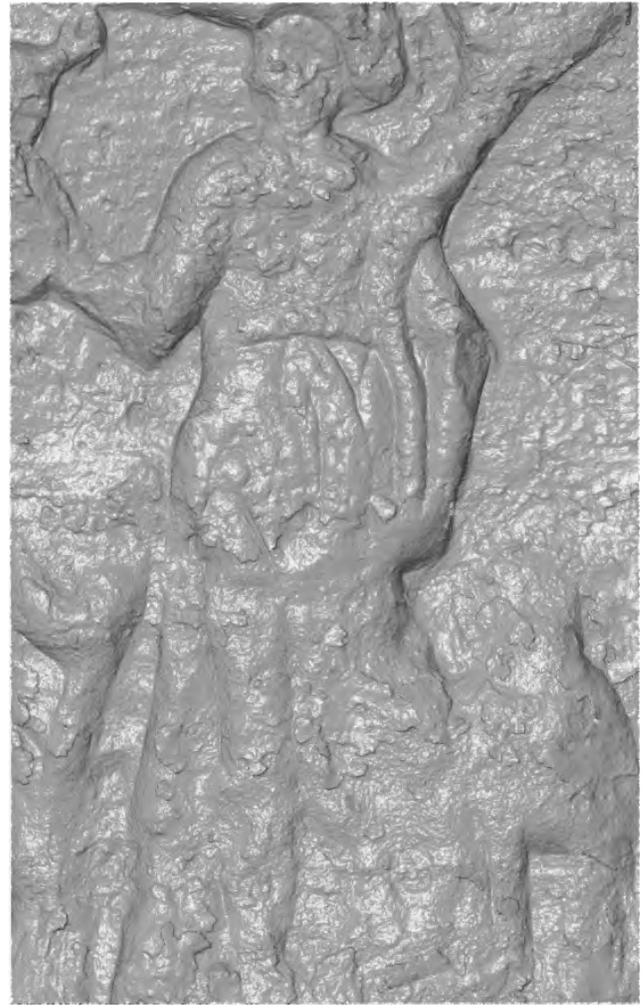
Elaboración: María Fernanda López Armenta

Croquis de localización





0 1000 mm



0 1000 mm

### **Modelo T0:**

Identificador: T0\_g1d12a

Fecha de levantamiento T0: Noviembre 2018

Resolución: 0.279 mm/pix

### **Levantamiento tridimensional**

Técnica: Fotogrametría digital

Instrumento: Cámara Sony Alpha9 (24mm)

Créditos: Distori Heritage UNIVPM

### **Modelo T1**

Identificador: T1\_g1d12a

Fecha de levantamiento T1: Noviembre 2019

Resolución: 0.288 mm/pix

### **Parámetros de Inspección**

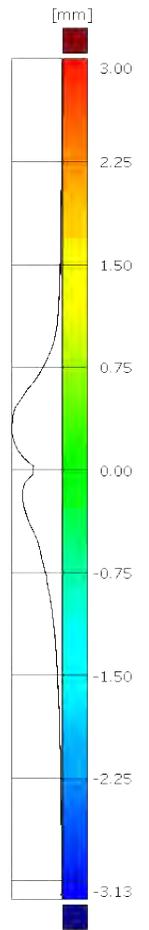
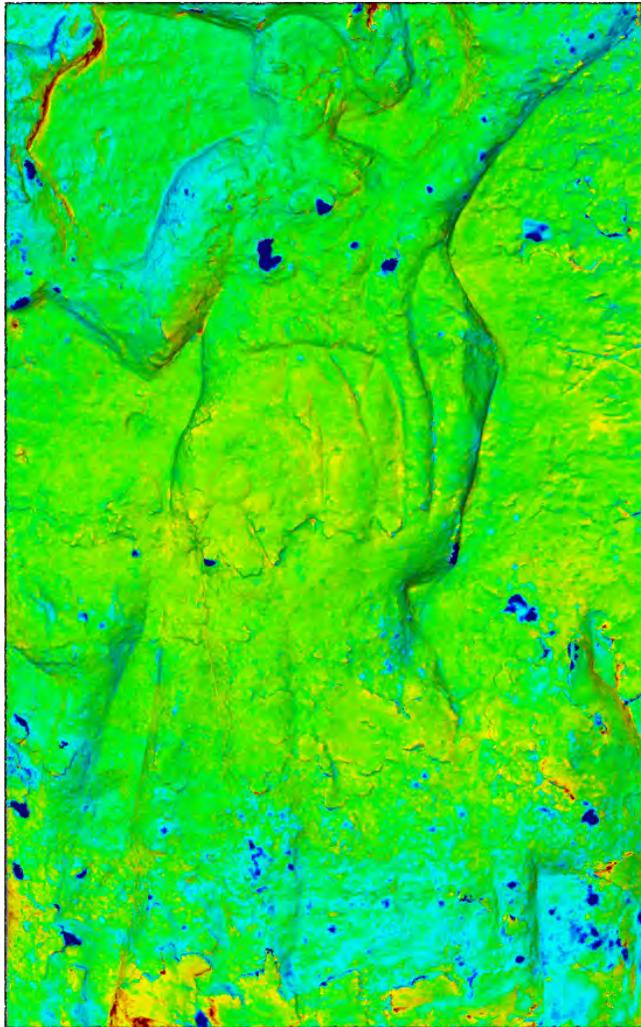
Software de inspección: GOM Inspect 2019

Alineación de modelos: Prealignment

Distancia máxima: 20.00 mm

Tolerancia: 1.00 mm

## Mapa de desviaciones

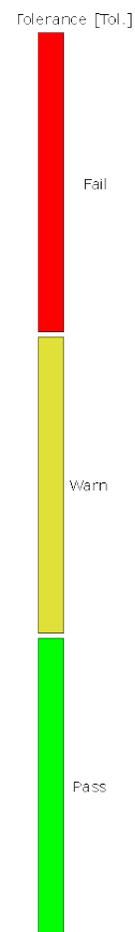
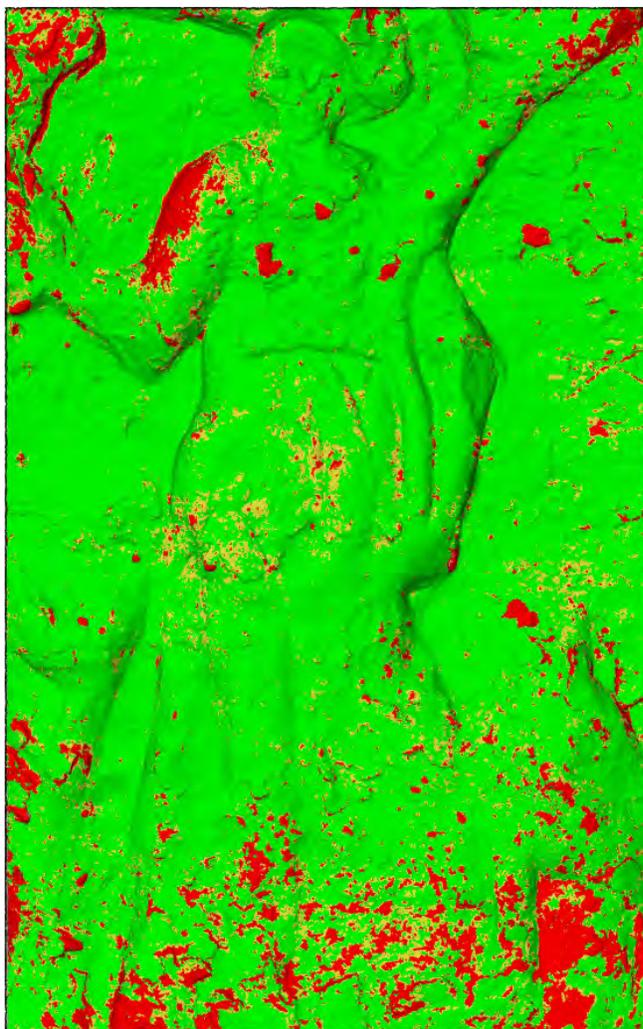


Unidades: mm

Escala de análisis: 3 Sigma

Comparación de superficies: desviaciones	
Max distance	+19.94
Min distance	-19.99
Mean distance	-0.07
Max distance $3\sigma$	+3.00
Min distance $3\sigma$	-3.13
Distance std deviation	+1.02
Area of valid distance	+2275492.17
Integrated distance	-61314.55
Integrated abs distance	+1254504.16

## Mapa de tolerancias



Comparación de superficies: tolerancias			
	Tolerancias	Área	Porcentaje
	Más del 100%	253594.57	11.1%
	75% a 100%	197390.23	8.7%
	Entre 75%	1824507.37	80.2%
	Total	2275492.17	100.0%

Unidades área: mm<sup>2</sup>

## **Datos generales del proyecto**

Este proyecto se realizó con el apoyo del Conacyt, por medio del programa de Becas Nacionales y Mixtas; y con el apoyo de la UAM por medio del programa de Becas de Movilidad Internacional.

## **Créditos de los levantamientos**

Distori Heritage Università Politecnica delle Marche

## **Edición y comparación de los modelos 3D**

María Fernanda López Armenta



# REPORTE DE INSPECCIÓN

Detección de Cambios para la Conservación del Patrimonio Material

Evaluación de la técnica Deviation Analysis en el Monitoreo de Relieves Escultóricos

## Caso de estudio

Relieves escultóricos de las Grutas de Osimo

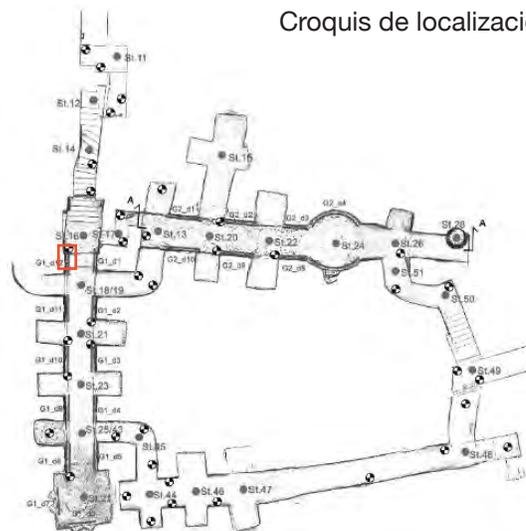
Localización: Osimo, provincia de Ancona, Italia

Clave de reporte: C1\_G1d12b

Fecha de elaboración: 29 octubre 2020

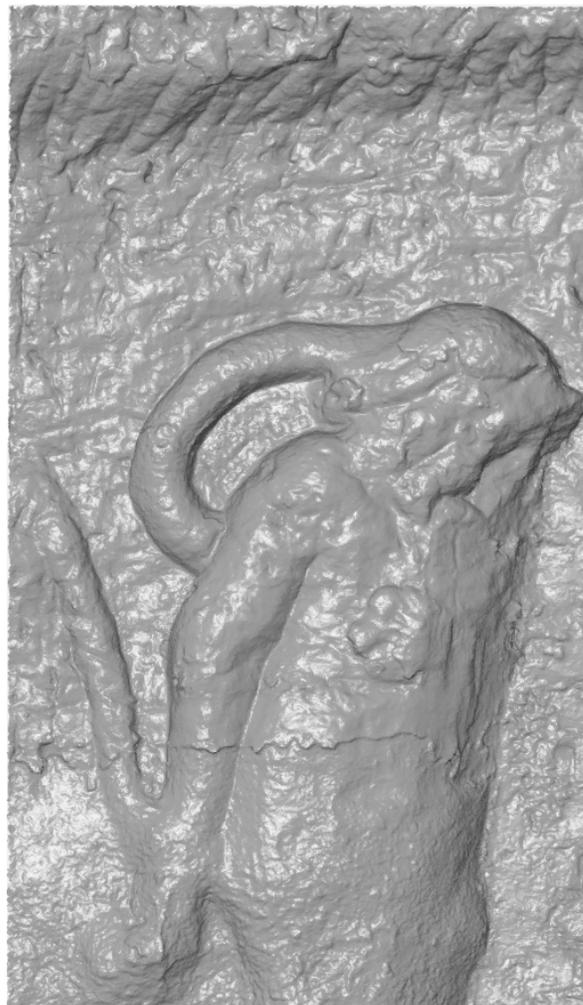
Elaboración: María Fernanda López Armenta

Croquis de localización





0 500 mm



0 500 mm

### **Modelo T0:**

Identificador: T0\_g1d12b

Fecha de levantamiento: Noviembre 2018

Resolución: 0.279 mm/pix

### **Levantamiento tridimensional**

Técnica: Fotogrametría digital

Instrumento: Cámara Sony Alpha9 (24mm)

Créditos: Distori Heritage UNIVPM

### **Modelo T1**

Identificador: T1\_g1d12b

Fecha de levantamiento: Noviembre 2019

Resolución: 0.288 mm/pix

### **Parámetros de Inspección**

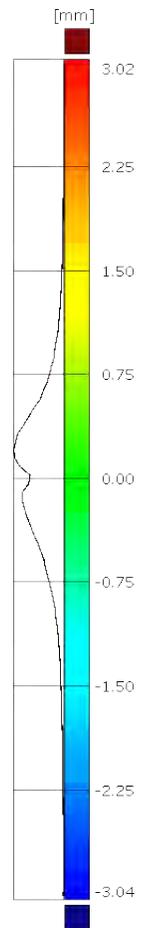
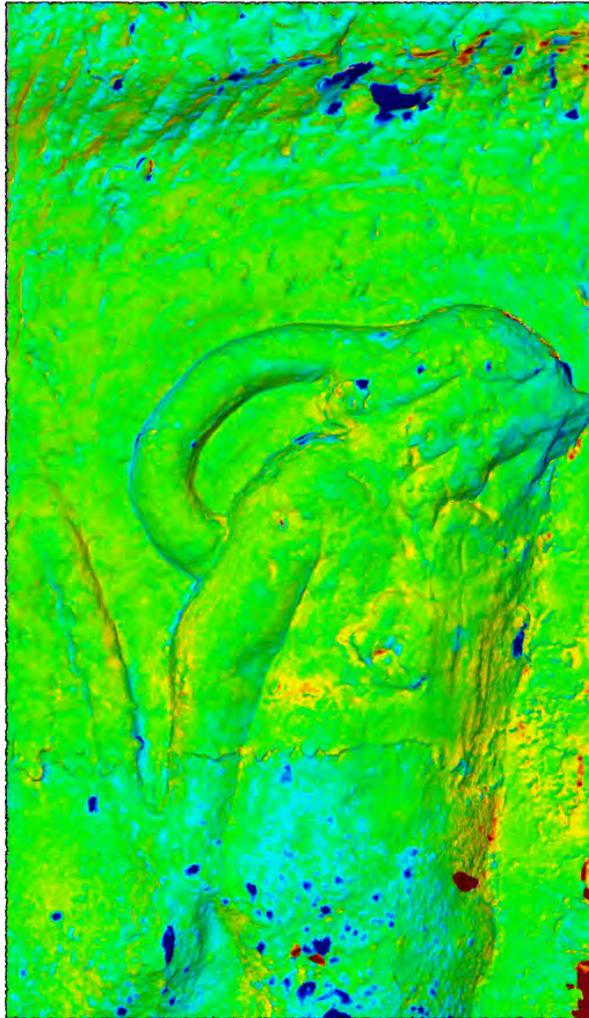
Software de inspección: GOM Inspect 2019

Alineación de modelos: Prealignment

Distancia máxima: 20.00 mm

Tolerancia: 1.00 mm

## Mapa de desviaciones

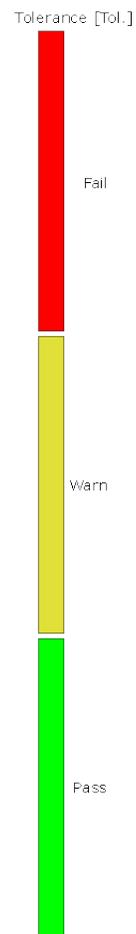
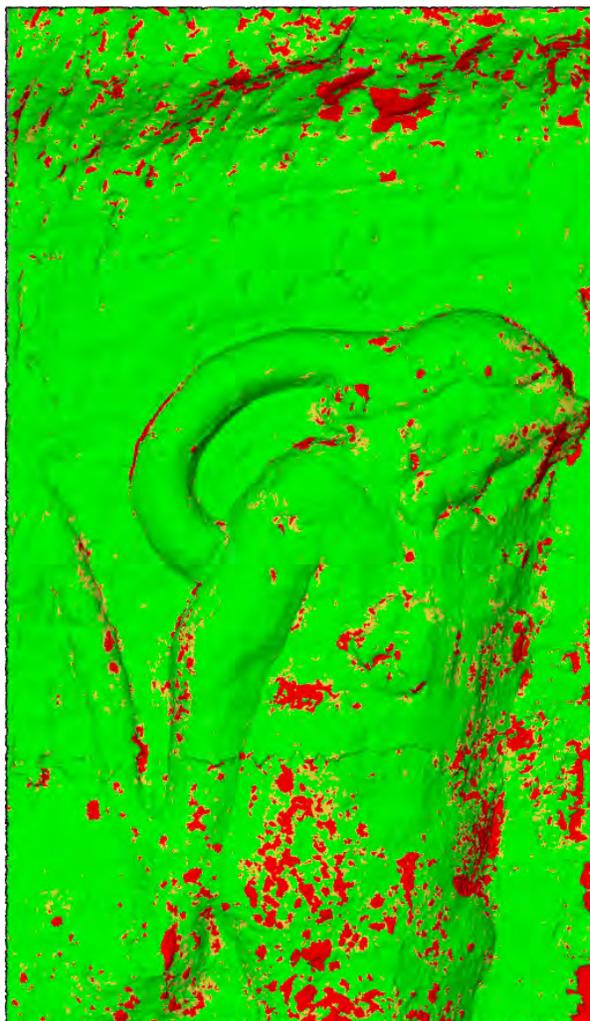


Unidades: mm

Escala de análisis: 3 Sigma

Comparación de superficies: desviaciones	
Max distance	+19.91
Min distance	-19.81
Mean distance	-0.01
Max distance $3\sigma$	+3.02
Min distance $3\sigma$	-3.04
Distance std deviation	+1.01
Area of valid distance	+1263826.66
Integrated distance	-19783.22
Integrated abs distance	+644954.20

## Mapa de tolerancias



Comparación de superficies: tolerancias			
	Tolerancias	Área	Porcentaje
	Más del 100%	127401.31	10.1%
	75% a 100%	94791.15	7.5%
	Entre 75%	1041634.20	82.4%
	Total	1263826.66	100.0%

Unidades área: mm<sup>2</sup>

## **Datos generales del proyecto**

Este proyecto se realizó con el apoyo del Conacyt, por medio del programa de Becas Nacionales y Mixtas; y con el apoyo de la UAM por medio del programa de Becas de Movilidad Internacional.

## **Créditos de los levantamientos**

Distori Heritage Università Politecnica delle Marche

## **Edición y comparación de los modelos 3D**

María Fernanda López Armenta

# Evaluación de técnicas de detección de cambios en patrimonio material

El presente formulario tiene como finalidad caracterizar y evaluar técnicas para la detección de cambios en relieves escultóricos. Una técnica de detección de cambios es una herramienta que permite la identificación y medición de variaciones que pueden indicar algún tipo de deterioro que puede o no representar un riesgo para el patrimonio material.

\* Required

1. Nombre de la técnica \*

---

2. Descripción general de la técnica

---

---

---

---

3. Referencias

---

---

---

---

## Requerimientos instrumentales de la técnica

En esta sección, nos interesa conocer los requerimientos instrumentales necesarios para poner en práctica la técnica. Así mismo, que tan accesibles son métodos, instrumentos y software, es decir, que tan asequibles y fáciles de conseguir son para instituciones o profesionales que se especializan en la conservación de bienes culturales. Se consideran aquí tres momentos en el desarrollo de una técnica de detección de cambios: la adquisición de datos o levantamiento, el procesamiento y edición que son todos los procesos para preparar los datos para el análisis (ej. revelado y edición de fotos, limpieza de modelos...), y detección de datos, que es donde se lleva a cabo el análisis propio de la técnica. Si la técnica tuviera otra etapa, favor de describirla en el campo de "Observaciones" al final de la sección.

4. ¿Qué instrumentos se utilizaron para la adquisición de los datos?

---

---

---

---

5. ¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la adquisición de los datos?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

6. ¿Qué software se utilizó para la adquisición de los datos?

---

---

---

---

---

7. ¿Qué tan accesible es el software utilizado para la adquisición de los datos?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesible	<input type="radio"/>	Muy accesible				

8. ¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la adquisición de los datos?

---

9. ¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas necesarios para la adquisición de los datos?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

10. ¿Qué instrumentos se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

---

---

---

---

---

11. ¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para el procesamiento y edición de datos?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

12. ¿Qué software se utilizó para el procesamiento y edición de datos?

---

---

---

---

---

13. ¿Qué tan accesible es el software utilizado para el procesamiento y edición de datos?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

14. ¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

---

---

---

---

---

15. ¿Qué tan accesibles son los métodos y técnicas utilizados para el procesamiento y edición de datos?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

16. ¿Qué instrumentos se utilizaron para la detección de cambios?

---

---

---

---

---

17. ¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la detección de cambios?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

18. ¿Qué software se utilizó para la detección de cambios?

---

---

---

---

---

19. ¿Qué tan accesible es el software utilizado para la detección de cambios?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesible	<input type="radio"/>	Muy accesible				

20. ¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la detección de cambios?

---

21. ¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas utilizados para la detección de cambios?

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

22. Observaciones

---

---

---

---

---

Nivel de experiencia para la operación y uso de la técnica

En este apartado, se quiere conocer la experiencia requerida tanto en quienes operan la técnica como a quien vaya dirigida la información que a raíz de ella se obtenga. El criterio para evaluar nivel de experiencia es en cuanto al uso de la tecnologías para la conservación de la cual se vale la técnica, por lo que un usuario con poca experiencia en tecnología podría tener solo experiencia en conservación.



29. Indique que nivel de experiencia requiere una persona para interpretar los resultados de la detección de cambios

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Poca experiencia	<input type="radio"/>	Mucha experiencia				

### Tiempos de operación

En esta sección estime cuanto tiempo se requiere para poner en práctica la técnica considerando la evaluación de una superficie de 1 m<sup>2</sup>

30. Tiempo de levantamiento

Mark only one oval.

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

31. Tiempo de procesamiento y edición de datos

Mark only one oval.

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

32. Tiempo de detección de cambios

Mark only one oval.

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

### Precisión

En esta sección se quiere conocer qué factores influyen en la precisión de la técnica y en qué medida. En la primera pregunta seleccione una o varias opciones, y a continuación evalúe las opciones seleccionadas según la medida en que influyen en la precisión de la técnica, marque el valor 5 en la opción que más influya y el 1 para la que menos influya.

33. ¿De qué depende la precisión de la técnica? \*

Puede seleccionar más de una opción.

Check all that apply.

- De los datos crudos
- De los algoritmos
- De los instrumentos, métodos o técnicas de medición
- Del operador
- Del software

Other:  \_\_\_\_\_

34. Indique en qué grado influyen los datos duros en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

35. Indique en qué grado influyen los algoritmos en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

36. Indique en qué grado influyen los instrumentos métodos o técnicas de medición en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

37. Indique en qué grado influye el operador en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

38. Si seleccionó la opción "otro" en la pregunta 1 de esta sección, indique qué tanto influye en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

Efectividad comunicativa

Si consideramos que las herramientas de detección de cambios sirvan no solo para el análisis, sino también para la comunicación, evalúe en esta sección los productos (ej. imágenes, cuantificación de área y/o volumen...) que se pueden obtener con su técnica y el grado de efectividad que tienen en la comunicación a quienes harán uso de ellos. El criterio para evaluarse un usuario es experto es en cuanto al uso de tecnologías para la conservación de la cual se vale la técnica, por lo que un usuario con poca experiencia en tecnología podría tener solo experiencia en conservación.

39. ¿Qué tipo de datos proporciona la técnica? \*

Es posible seleccionar más de una respuesta.

*Check all that apply.*

- Datos cuantitativos  
 Datos cualitativos

40. ¿Qué tipo de productos proporciona la técnica de detección de cambios? \*

---

---

---

---

---

41. Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios expertos \*

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco efectiva	<input type="radio"/>	Muy efectiva				

42. Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios no expertos \*

*Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	
Poco efectiva	<input type="radio"/>	Muy efectiva				

Comparabilidad de los resultados y replicabilidad de las mediciones

En este apartado, nos interesa conocer la consistencia de la herramienta de detección de cambios. La comparabilidad de los resultados radica en si los resultados conseguidos en un primer monitoreo será posible analizarlos en relación con anteriores o posteriores monitoreos. La replicabilidad se refiere a si es posible realizar la misma medición en condiciones distintas, ya sea realizada en otro momento, realizada por medio de otra técnica u realizada por otra persona.

43. ¿Es posible comparar los resultados de dos mediciones realizadas en diferentes momentos? \*

*Mark only one oval.*

- Sí  
 No  
 Tal vez

44. ¿Es posible comparar los productos o resultados de las mediciones con los de otras técnicas? \*

*Mark only one oval.*

- Sí
- No
- Tal vez

45. ¿Es posible reproducir la medición en un momento distinto?

*Mark only one oval.*

- Sí
- No
- Tal vez

46. ¿Es posible para otra persona reproducir la medición?

*Mark only one oval.*

- Sí
- No
- Tal vez

---

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

# Evaluación de técnicas de detección de cambios en patrimonio material

El presente formulario tiene como finalidad caracterizar y evaluar técnicas para la detección de cambios en relieves escultóricos. Una técnica de detección de cambios es una herramienta que permite la identificación y medición de variaciones que pueden indicar algún tipo de deterioro que puede o no representar un riesgo para el patrimonio material.

Nombre de la técnica \*

Detección de cambios superficiales por medio de Deviation Analysis. Variante fotogrametría

Descripción general de la técnica

La técnica consiste en la comparación de modelos 3D multitemporales por medio de la herramienta Deviation Analysis. En esta variante los registros multitemporales fueron realizados mediante fotogrametría.

Referencias

no aplica

Requerimientos instrumentales de la técnica

En esta sección, nos interesa conocer los requerimientos instrumentales necesarios para poner en práctica la técnica. Así mismo, que tan accesibles son métodos, instrumentos y software, es decir, que tan asequibles y fáciles de conseguir son para instituciones o profesionales que se especializan en la conservación de bienes culturales. Se consideran aquí tres momentos en el desarrollo de una técnica de detección de cambios: la adquisición de datos o levantamiento, el procesamiento y edición que son todos los procesos para preparar los datos para el análisis (ej. revelado y edición de fotos, limpieza de modelos...), y detección de datos, que es donde se lleva a cabo el análisis propio de la técnica. Si la técnica tuviera otra etapa, favor de describirla en el campo de "Observaciones" al final de la sección.

¿Qué instrumentos se utilizaron para la adquisición de los datos?

Cámara fotográfica Sony Alpha9 con 24mm de distancia focal, tripie, dos reflectores Broncolor Siros 800 L sobre tripie, uno equipado con softbox y otro con sombrilla reflectora plateada. (Solo en el primer levantamiento se usó escáner láser P40 y antena GNSS-RTK para adquisición de puntos de control georeferenciados.)

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la adquisición de los datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué software se utilizó para la adquisición de los datos?

Adobe camera raw para el revelado digital de las fotos, Cyclone para recuperar información de los puntos de control

¿Qué tan accesible es el software utilizado para la adquisición de los datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesible	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Muy accesible

¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la adquisición de los datos?

Levantamiento fotogramétrico

¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas necesarios para la adquisición de los datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué instrumentos se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

Computadora

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para el procesamiento y edición de datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué software se utilizó para el procesamiento y edición de datos?

Agisoft Photoscan, CloudCompare

¿Qué tan accesible es el software utilizado para el procesamiento y edición de datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

fotogrametría

¿Qué tan accesibles son los métodos y técnicas utilizados para el procesamiento y edición de datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué instrumentos se utilizaron para la detección de cambios?

Computadora

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la detección de cambios?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué software se utilizó para la detección de cambios?

GOM Inspect

¿Qué tan accesible es el software utilizado para la detección de cambios?

	1	2	3	4	5	
Poco accesible	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesible

¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la detección de cambios?

Deviation Analysis

¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas utilizados para la detección de cambios?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

Observaciones

Durante el primer levantamiento se utilizó un escáner láser y una antena GPS para adquirir puntos de control, este tipo de equipo no es tan accesible, sin embargo es posible realizar la técnica utilizando otros recursos más accesibles para adquisición de puntos de control.

En este apartado, se quiere conocer la experiencia requerida tanto en quienes operan la técnica como a quien vaya dirigida la información que a raíz de ella se obtenga. El criterio para evaluar nivel de experiencia es en cuanto al uso de la tecnologías para la conservación de la cual se vale la técnica, por lo que un usuario con poca experiencia en tecnología podría tener solo experiencia en conservación.

¿Cuántas personas se requirieron para la adquisición de datos?

- 1
- 2-3
- Más de 3

Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza la adquisición de datos

- Poca experiencia      1      2      3      4      5      Mucha experiencia
- 

¿Cuántas personas se requirieron para el procesamiento y edición de datos?

- 1
- 2-3
- Más de 3

Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza el procesamiento y edición de datos

- Poca experiencia      1      2      3      4      5      Mucha experiencia
- 

¿Cuántas personas se requirieron para la detección de cambios?

- 1
- 2-3
- Más de 3

Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza la detección de cambios

	1	2	3	4	5	
Poca experiencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Mucha experiencia

Indique que nivel de experiencia requiere una persona para interpretar los resultados de la detección de cambios

	1	2	3	4	5	
Poca experiencia	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mucha experiencia

### Tiempos de operación

En esta sección estime cuanto tiempo se requiere para poner en práctica la técnica considerando la evaluación de una superficie de 1 m<sup>2</sup>

Tiempo de levantamiento

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

Tiempo de procesamiento y edición de datos

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

Tiempo de detección de cambios

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

### Precisión

En esta sección se quiere conocer qué factores influyen en la precisión de la técnica y en qué medida. En la primera pregunta seleccione una o varias opciones, y a continuación evalúe las opciones seleccionadas según la medida en que influyen en la precisión de la técnica, marque el valor 5 en la opción que más influya y el 1 para la que menos influya.

¿De qué depende la precisión de la técnica? \*

Puede seleccionar más de una opción.

- De los datos crudos
- De los algoritmos
- De los instrumentos, métodos o técnicas de medición
- Del operador
- Del software
- Other: .....

Indique en qué grado influyen los datos duros en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Mayor influencia

Indique en qué grado influyen los algoritmos en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mayor influencia

Indique en qué grado influyen los instrumentos métodos o técnicas de medición en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mayor influencia

Indique en qué grado influye el operador en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mayor influencia

Si seleccionó la opción "otro" en la pregunta 1 de esta sección, indique qué tanto influye en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

### Efectividad comunicativa

Si consideramos que las herramientas de detección de cambios sirven no solo para el análisis, sino también para la comunicación, evalúe en esta sección los productos (ej. imágenes, cuantificación de área y/o volumen...) que se pueden obtener con su técnica y el grado de efectividad que tienen en la comunicación a quienes harán uso de ellos. El criterio para evaluarse un usuario es experto es en cuanto al uso de tecnologías para la conservación de la cual se vale la técnica, por lo que un usuario con poca experiencia en tecnología podría tener solo experiencia en conservación.

¿Qué tipo de datos proporciona la técnica? \*

Es posible seleccionar más de una respuesta.

- Datos cuantitativos
- Datos cualitativos

¿Qué tipo de productos proporciona la técnica de detección de cambios? \*

Mapas codificados con color en 2D y 3D, cálculo de áreas, cálculo de porcentajes de área analizada, dimensión de las desviaciones

Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios expertos \*

	1	2	3	4	5	
Poco efectiva	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy efectiva

Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios no expertos \*

	1	2	3	4	5	
Poco efectiva	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy efectiva

### Comparabilidad de los resultados y replicabilidad de las mediciones

En este apartado, nos interesa conocer la consistencia de la herramienta de detección de cambios. La comparabilidad de los resultados radica en si los resultados conseguidos en un primer monitoreo será posible analizarlos en relación con anteriores o posteriores monitoreos. La replicabilidad se refiere a si es posible realizar la misma medición en condiciones distintas, ya sea realizada en otro momento, realizada por medio de otra técnica u realizada por otra persona.

¿Es posible comparar los resultados de dos mediciones realizadas en diferentes momentos? \*

- Sí
- No
- Tal vez

¿Es posible comparar los productos o resultados de las mediciones con los de otras técnicas? \*

- Sí
- No
- Tal vez

¿Es posible reproducir la medición en un momento distinto?

- Sí
- No
- Tal vez

¿Es posible para otra persona reproducir la medición?

- Sí
- No
- Tal vez

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

# Evaluación de técnicas de detección de cambios en patrimonio material

El presente formulario tiene como finalidad caracterizar y evaluar técnicas para la detección de cambios en relieves escultóricos. Una técnica de detección de cambios es una herramienta que permite la identificación y medición de variaciones que pueden indicar algún tipo de deterioro que puede o no representar un riesgo para el patrimonio material.

Nombre de la técnica \*

Detección de cambios superficiales por medio de Deviation Analysis. Variante escaneo luz estructurada.

Descripción general de la técnica

La técnica consiste en la comparación de modelos 3D multitemporales por medio de la herramienta Deviation Analysis. En esta variante, los registros multitemporales fueron realizados mediante escaneo de luz estructurada.

Referencias

no aplica

## Requerimientos instrumentales de la técnica

En esta sección, nos interesa conocer los requerimientos instrumentales necesarios para poner en práctica la técnica. Así mismo, que tan accesibles son métodos, instrumentos y software, es decir, que tan asequibles y fáciles de conseguir son para instituciones o profesionales que se especializan en la conservación de bienes culturales. Se consideran aquí tres momentos en el desarrollo de una técnica de detección de cambios: la adquisición de datos o levantamiento, el procesamiento y edición que son todos los procesos para preparar los datos para el análisis (ej. revelado y edición de fotos, limpieza de modelos...), y detección de datos, que es donde se lleva a cabo el análisis propio de la técnica. Si la técnica tuviera otra etapa, favor de describirla en el campo de "Observaciones" al final de la sección.

¿Qué instrumentos se utilizaron para la adquisición de los datos?

Escáner de luz estructurada Creaform Go!Scan 20, computadora (workstation) portátil HP Zbook 15

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la adquisición de los datos?

Poco accesibles      1      2      3      4      5      Muy accesibles

¿Qué software se utilizó para la adquisición de los datos?

VxElements

¿Qué tan accesible es el software utilizado para la adquisición de los datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesible	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Muy accesible

¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la adquisición de los datos?

escaneo de luz estructurada

¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas necesarios para la adquisición de los datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué instrumentos se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

computadora

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para el procesamiento y edición de datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué software se utilizó para el procesamiento y edición de datos?

VxElements y Geomagic Wrap

¿Qué tan accesible es el software utilizado para el procesamiento y edición de datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

no aplica

¿Qué tan accesibles son los métodos y técnicas utilizados para el procesamiento y edición de datos?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	Muy accesibles				

¿Qué instrumentos se utilizaron para la detección de cambios?

Computadora

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la detección de cambios?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

¿Qué software se utilizó para la detección de cambios?

GOM Inspect

¿Qué tan accesible es el software utilizado para la detección de cambios?

	1	2	3	4	5	
Poco accesible	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesible

¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la detección de cambios?

Deviation Analysis

¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas utilizados para la detección de cambios?

	1	2	3	4	5	
Poco accesibles	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy accesibles

Observaciones

El software de procesamiento y edición que se utilizó era el que se tenía disponible, sin embargo, existen otras opciones de software mucho más accesibles con las que se pueden reemplazar.

En este apartado, se quiere conocer la experiencia requerida tanto en quienes operan la técnica como a quien vaya dirigida la información que a raíz de ella se obtenga. El criterio para evaluar nivel de experiencia es en cuanto al uso de la tecnologías para la conservación de la cual se vale la técnica, por lo que un usuario con poca experiencia en tecnología podría tener solo experiencia en conservación.

¿Cuántas personas se requirieron para la adquisición de datos?

- 1
- 2-3
- Más de 3

Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza la adquisición de datos

	1	2	3	4	5	
Poca experiencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Mucha experiencia

¿Cuántas personas se requirieron para el procesamiento y edición de datos?

- 1
- 2-3
- Más de 3

Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza el procesamiento y edición de datos

	1	2	3	4	5	
Poca experiencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mucha experiencia

¿Cuántas personas se requirieron para la detección de cambios?

- 1
- 2-3
- Más de 3

Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza la detección de cambios

	1	2	3	4	5	
Poca experiencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Mucha experiencia

Indique que nivel de experiencia requiere una persona para interpretar los resultados de la detección de cambios

	1	2	3	4	5	
Poca experiencia	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mucha experiencia

### Tiempos de operación

En esta sección estime cuanto tiempo se requiere para poner en práctica la técnica considerando la evaluación de una superficie de 1 m<sup>2</sup>

Tiempo de levantamiento

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

Tiempo de procesamiento y edición de datos

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

Tiempo de detección de cambios

- De 0 a 3 horas
- De 4 a 6 horas
- 7 horas o más

### Precisión

En esta sección se quiere conocer qué factores influyen en la precisión de la técnica y en qué medida. En la primera pregunta seleccione una o varias opciones, y a continuación evalúe las opciones seleccionadas según la medida en que influyen en la precisión de la técnica, marque el valor 5 en la opción que más influya y el 1 para la que menos influya.

¿De qué depende la precisión de la técnica? \*

Puede seleccionar más de una opción.

- De los datos crudos
- De los algoritmos
- De los instrumentos, métodos o técnicas de medición
- Del operador
- Del software
- Other: .....

Indique en qué grado influyen los datos duros en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

Indique en qué grado influyen los algoritmos en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mayor influencia

Indique en qué grado influyen los instrumentos métodos o técnicas de medición en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Mayor influencia

Indique en qué grado influye el operador en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mayor influencia

Si seleccionó la opción "otro" en la pregunta 1 de esta sección, indique qué tanto influye en la precisión

Omitir si la opción no fue seleccionada en la pregunta 1 de esta sección

	1	2	3	4	5	
Menor influencia	<input type="radio"/>	Mayor influencia				

### Efectividad comunicativa

Si consideramos que las herramientas de detección de cambios sirven no solo para el análisis, sino también para la comunicación, evalúe en esta sección los productos (ej. imágenes, cuantificación de área y/o volúmen...) que se pueden obtener con su técnica y el grado de efectividad que tienen en la comunicación a quienes harán uso de ellos. El criterio para evaluar si un usuario es experto es en cuanto al uso de tecnologías para la conservación de la cual se vale la técnica, por lo que un usuario con poca experiencia en tecnología podría tener solo experiencia en conservación.

¿Qué tipo de datos proporciona la técnica? \*

Es posible seleccionar más de una respuesta.

- Datos cuantitativos
- Datos cualitativos

¿Qué tipo de productos proporciona la técnica de detección de cambios? \*

Mapas codificados con color en 2D y 3D, cálculo de áreas, cálculo de porcentajes de área analizada, dimensión de las desviaciones

Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios expertos \*

	1	2	3	4	5	
Poco efectiva	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy efectiva

Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios no expertos \*

	1	2	3	4	5	
Poco efectiva	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Muy efectiva

### Comparabilidad de los resultados y replicabilidad de las mediciones

En este apartado, nos interesa conocer la consistencia de la herramienta de detección de cambios. La comparabilidad de los resultados radica en si los resultados conseguidos en un primer monitoreo será posible analizarlos en relación con anteriores o posteriores monitoreos. La replicabilidad se refiere a si es posible realizar la misma medición en condiciones distintas, ya sea realizada en otro momento, realizada por medio de otra técnica u realizada por otra persona.

¿Es posible comparar los resultados de dos mediciones realizadas en diferentes momentos? \*

- Sí
- No
- Tal vez

¿Es posible comparar los productos o resultados de las mediciones con los de otras técnicas? \*

- Sí
- No
- Tal vez

¿Es posible reproducir la medición en un momento distinto?

- Sí
- No
- Tal vez

¿Es posible para otra persona reproducir la medición?

- Sí
- No
- Tal vez

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

# Evaluación de técnicas de detección de cambios en patrimonio material

2 responses

[Publish analytics](#)

## Nombre de la técnica

2 responses

Detección de cambios superficiales por medio de Deviation Analysis. Variante fotogrametría

Detección de cambios superficiales por medio de Deviation Analysis. Variante escaneo luz estructurada.

## Descripción general de la técnica

2 responses

La técnica consiste en la comparación de modelos 3D multitemporales por medio de la herramienta Deviation Analysis. En esta variante los registros multitemporales fueron realizados mediante fotogrametría.

La técnica consiste en la comparación de modelos 3D multitemporales por medio de la herramienta Deviation Analysis. En esta variante, los registros multitemporales fueron realizados mediante escaneo de luz estructurada.

## Referencias

2 responses

no aplica



## Requerimientos instrumentales de la técnica

¿Qué instrumentos se utilizaron para la adquisición de los datos?

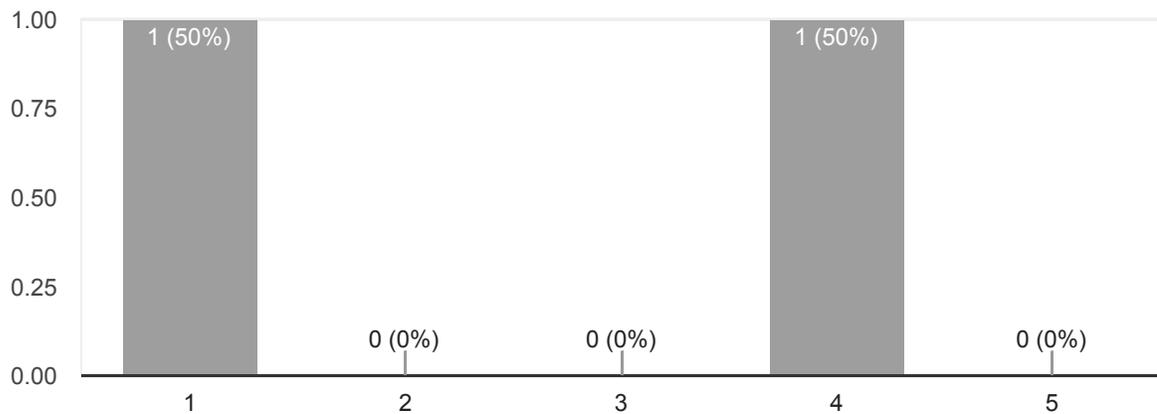
2 responses

Cámara fotográfica Sony Alpha9 con 24mm de distancia focal, tripie, dos reflectores Broncolor Siros 800 L sobre tripie, uno equipado con softbox y otro con sombrilla reflectora plateada. (Solo en el primer levantamiento se usó escáner láser P40 y antena GNSS-RTK para adquisición de puntos de control georeferenciados.)

Escáner de luz estructurada Creaform Go!Scan 20, computadora (workstation) portátil HP Zbook 15

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la adquisición de los datos?

2 responses



¿Qué software se utilizó para la adquisición de los datos?

2 responses

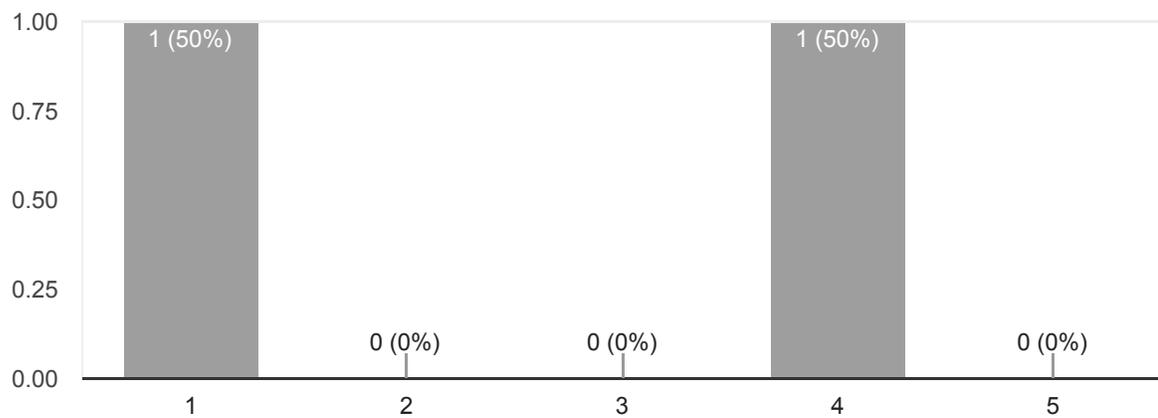
Adobe camera raw para el revelado digital de las fotos, Cyclone para recuperar información de los puntos de control

VxElements



¿Qué tan accesible es el software utilizado para la adquisición de los datos?

2 responses



¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la adquisición de los datos?

2 responses

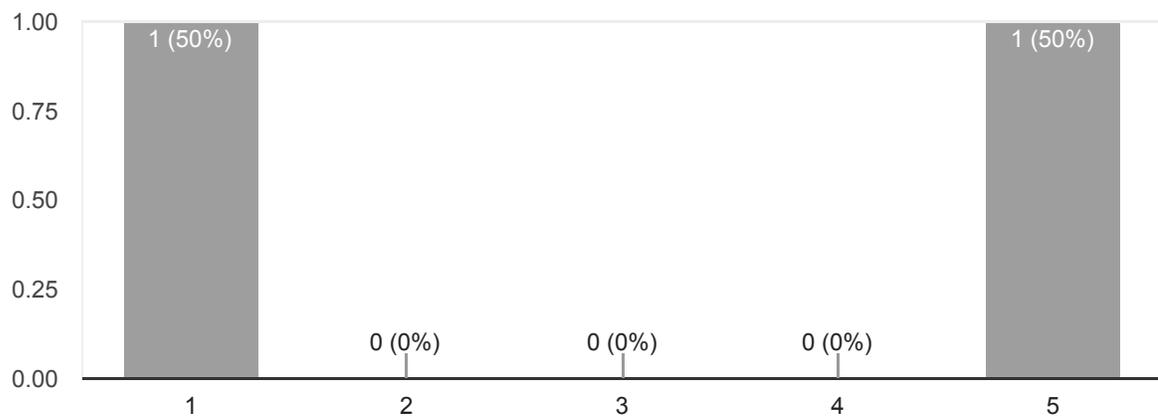
Levantamiento fotogramétrico

escaneo de luz estructurada



¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas necesarios para la adquisición de los datos?

2 respuestas



¿Qué instrumentos se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

2 respuestas

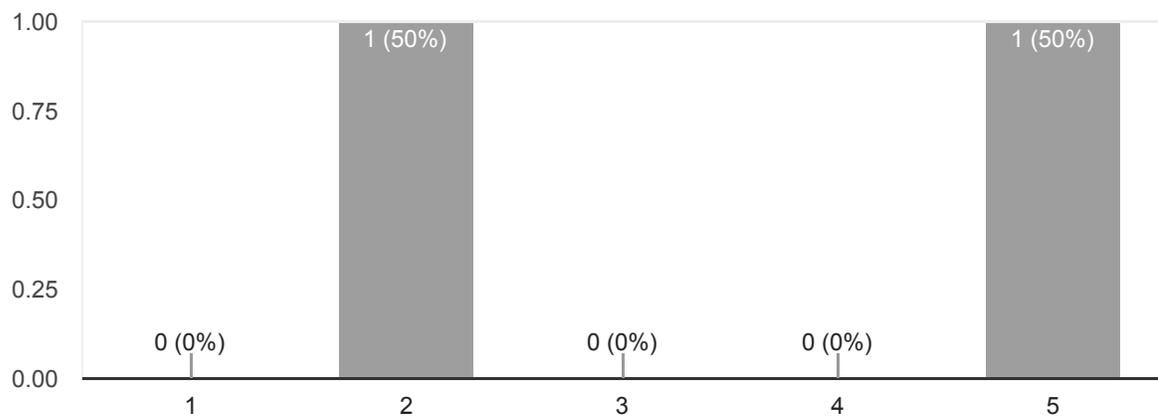
Computadora

computadora



¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para el procesamiento y edición de datos?

2 responses



¿Qué software se utilizó para el procesamiento y edición de datos?

2 responses

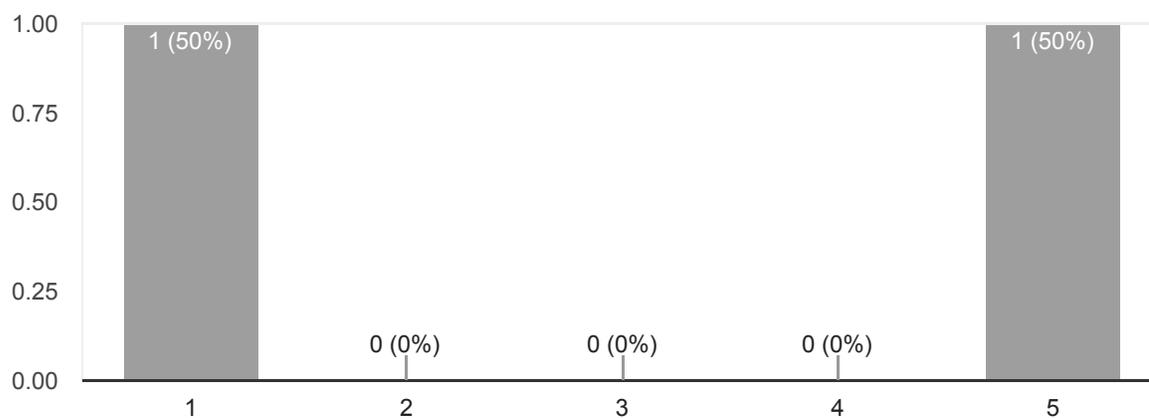
Agisoft Photoscan, CloudCompare

VxElements y Geomagic Wrap



¿Qué tan accesible es el software utilizado para el procesamiento y edición de datos?

2 responses



¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para el procesamiento y edición de datos?

2 responses

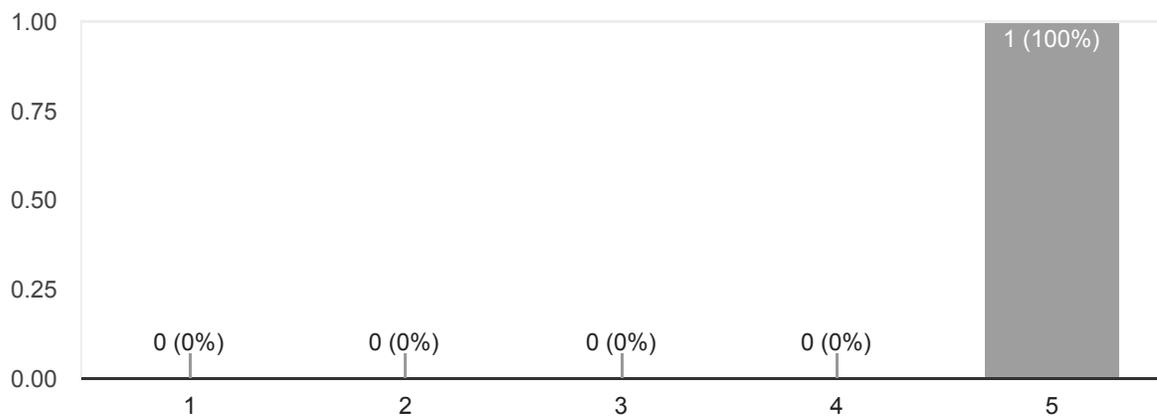
fotogrametria

no aplica



¿Qué tan accesibles son los métodos y técnicas utilizados para el procesamiento y edición de datos?

1 response



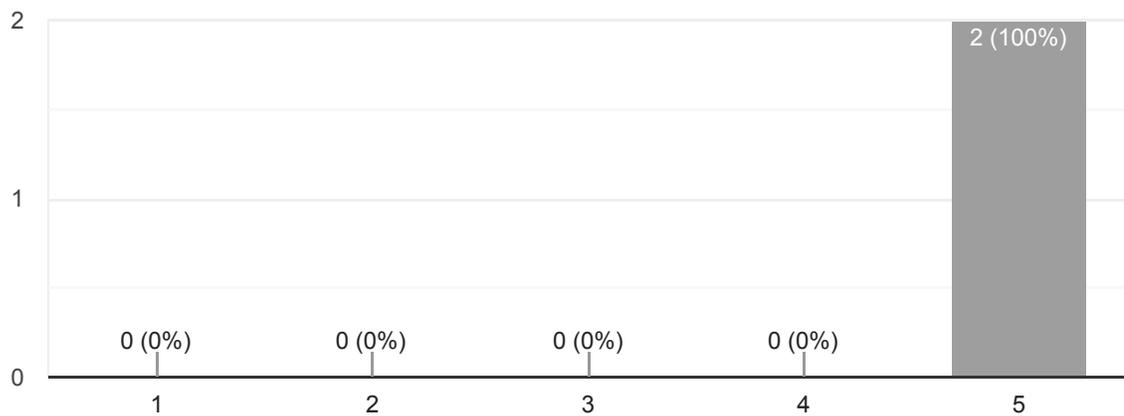
¿Qué instrumentos se utilizaron para la detección de cambios?

2 responses

Computadora

¿Qué tan accesibles son los instrumentos utilizados para la detección de cambios?

2 responses



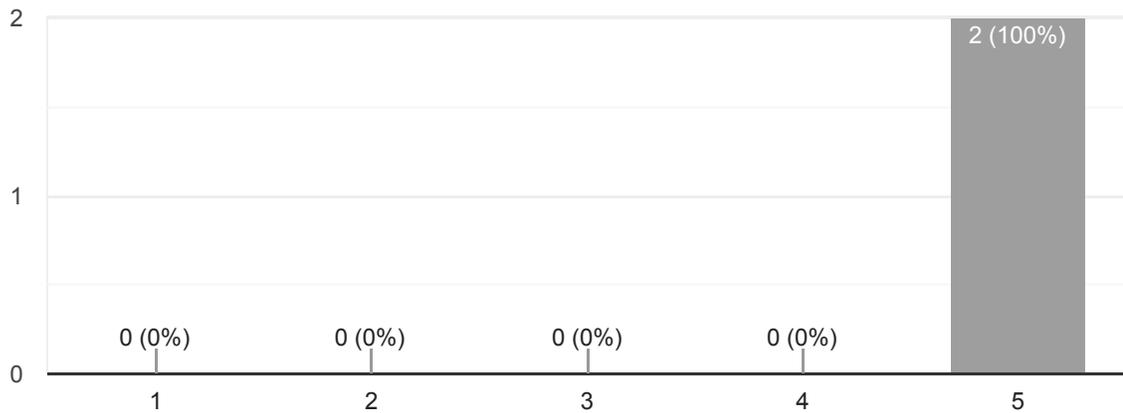
¿Qué software se utilizó para la detección de cambios?

2 responses

GOM Inspect

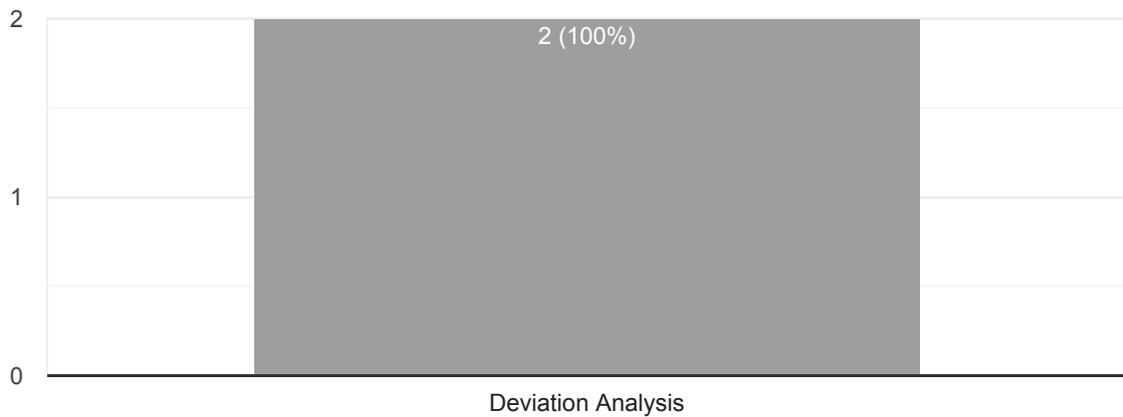
¿Qué tan accesible es el software utilizado para la detección de cambios?

2 responses



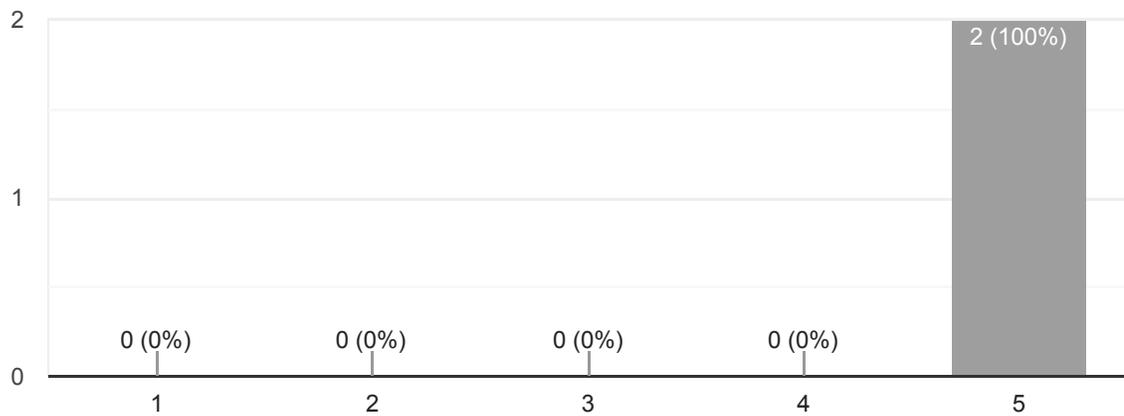
¿Qué métodos o técnicas se utilizaron para la detección de cambios?

2 responses



¿Qué tan accesibles son los métodos o técnicas utilizados para la detección de cambios?

2 responses



### Observaciones

2 responses

Durante el primer levantamiento se utilizó un escáner láser y una antena GPS para adquirir puntos de control, este tipo de equipo no es tan accesible, sin embargo es posible realizar la técnica utilizando otros recursos más accesibles para adquisición de puntos de control.

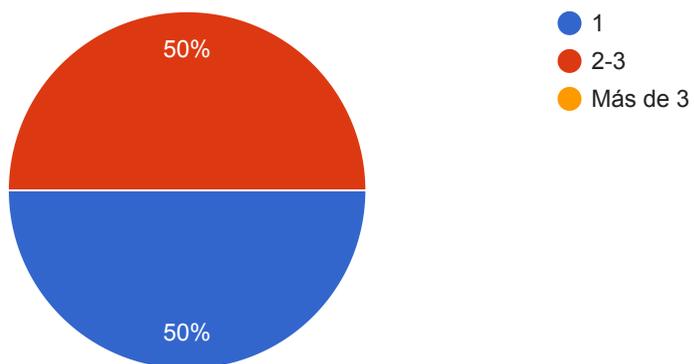
El software de procesamiento y edición que se utilizó era el que se tenía disponible, sin embargo, existen otras opciones de software mucho más accesibles con las que se pueden reemplazar.

Nivel de experiencia para la operación y uso de la técnica



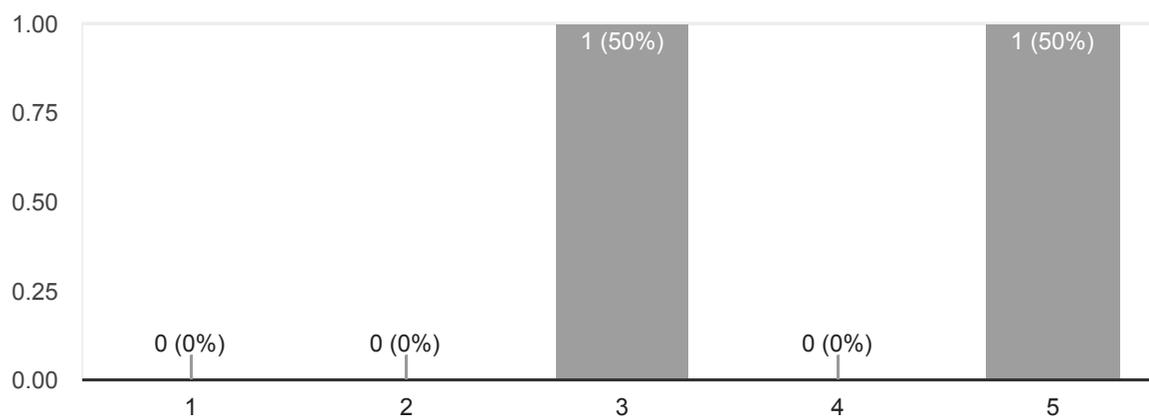
### ¿Cuántas personas se requirieron para la adquisición de datos?

2 responses



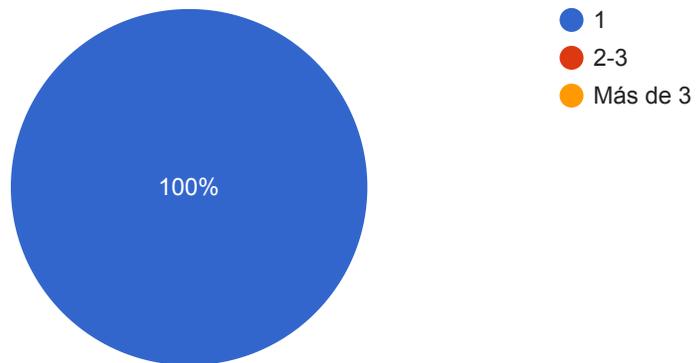
### Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza la adquisición de datos

2 responses



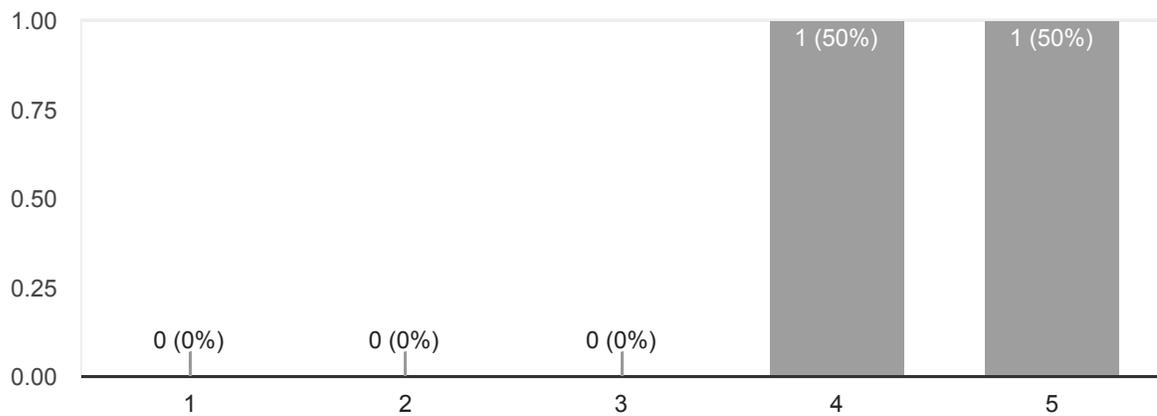
¿Cuántas personas se requirieron para el procesamiento y edición de datos?

2 responses



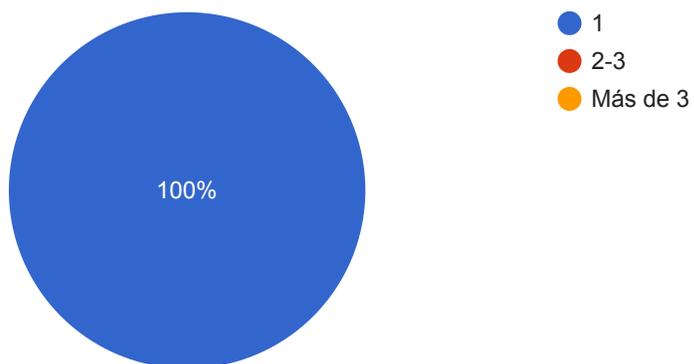
Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza el procesamiento y edición de datos

2 responses



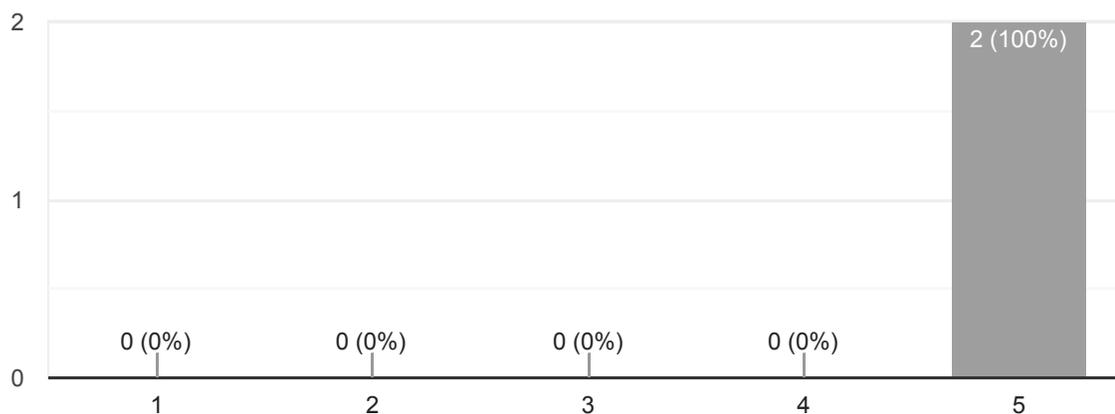
### ¿Cuántas personas se requirieron para la detección de cambios?

2 responses



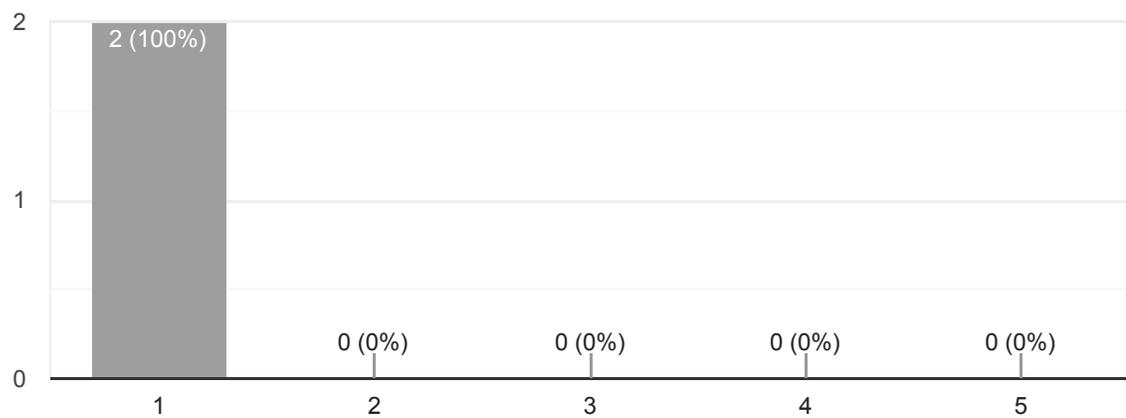
### Indica qué nivel de experiencia requiere quien realiza la detección de cambios

2 responses



Indique que nivel de experiencia requiere una persona para interpretar los resultados de la detección de cambios

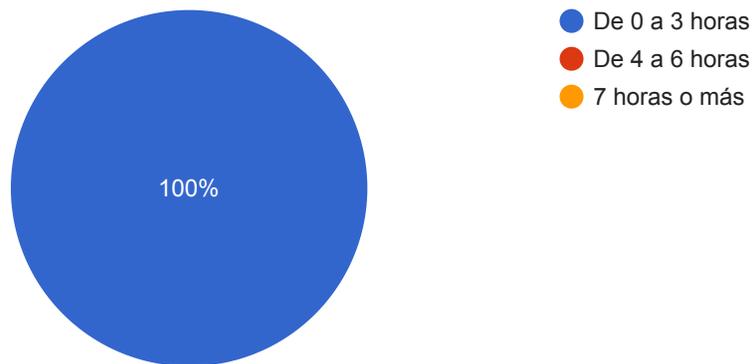
2 responses



## Tiempos de operación

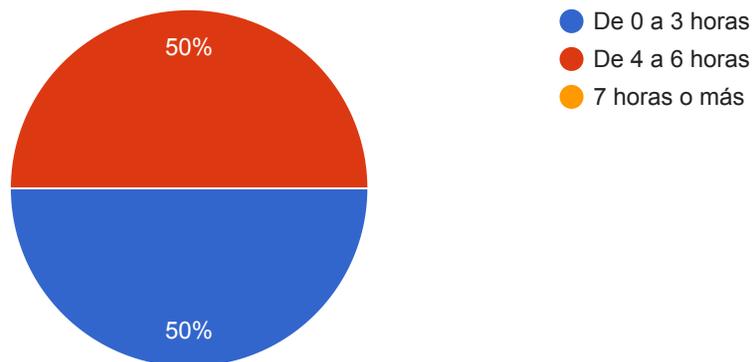
Tiempo de levantamiento

2 responses



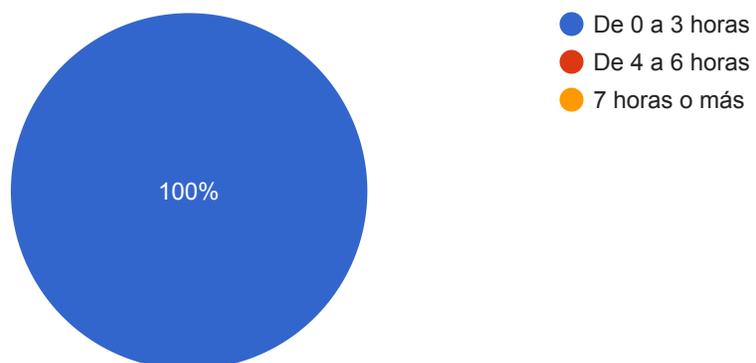
## Tiempo de procesamiento y edición de datos

2 responses



## Tiempo de detección de cambios

2 responses

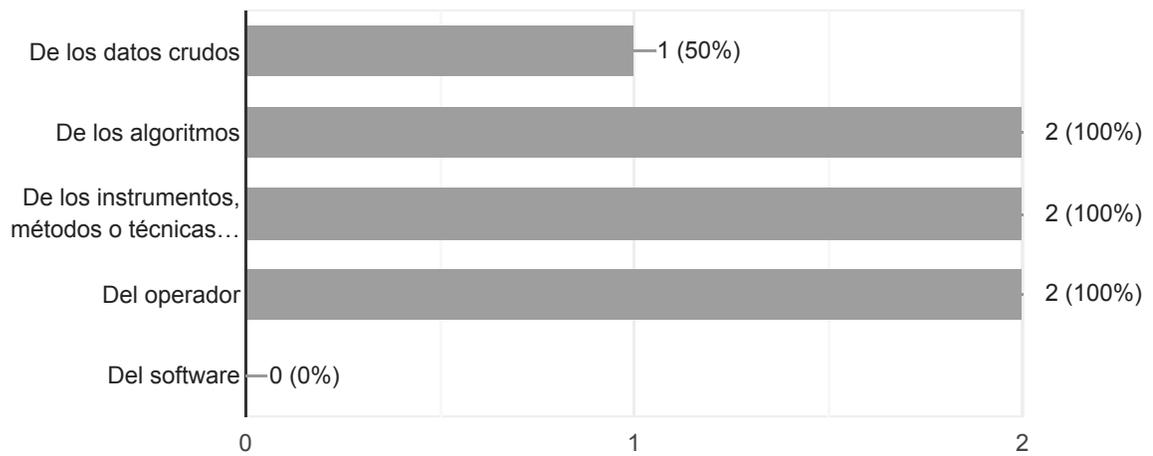


Precisión



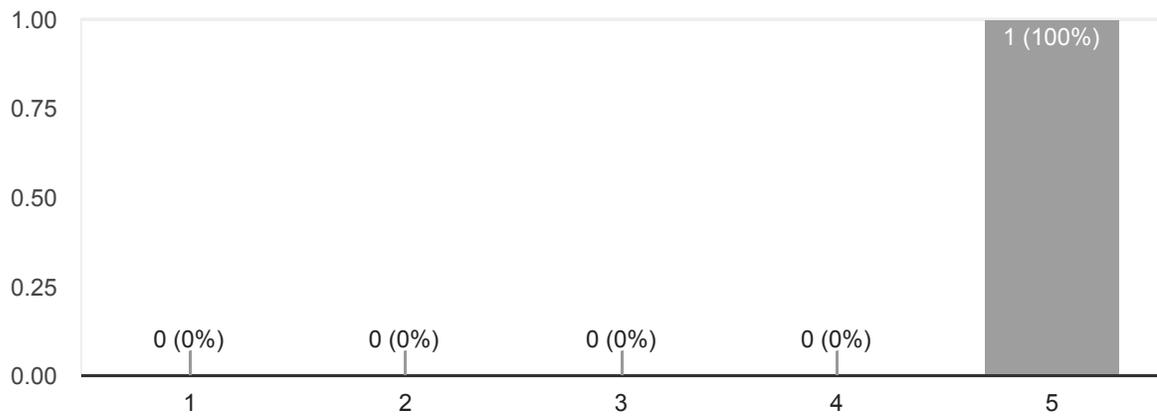
## ¿De qué depende la precisión de la técnica?

2 responses



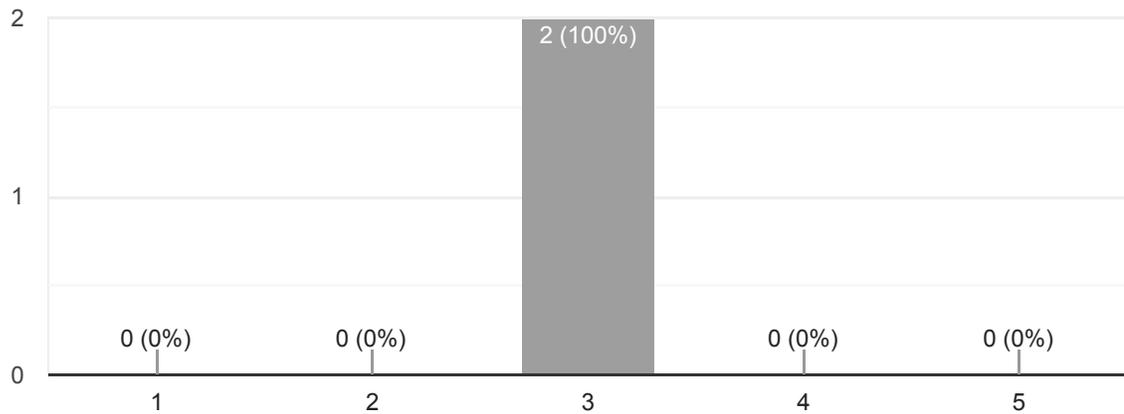
## Indique en qué grado influyen los datos duros en la precisión

1 response



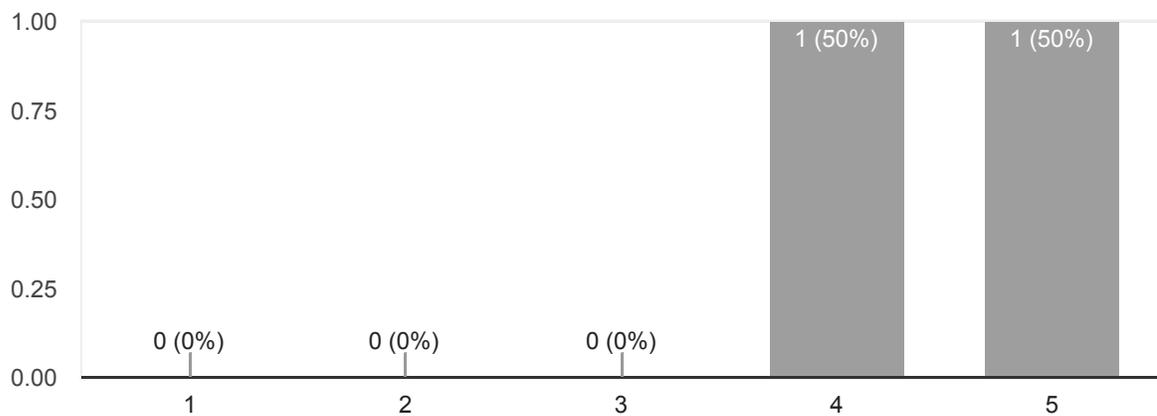
Indique en qué grado influyen los algoritmos en la precisión

2 respuestas



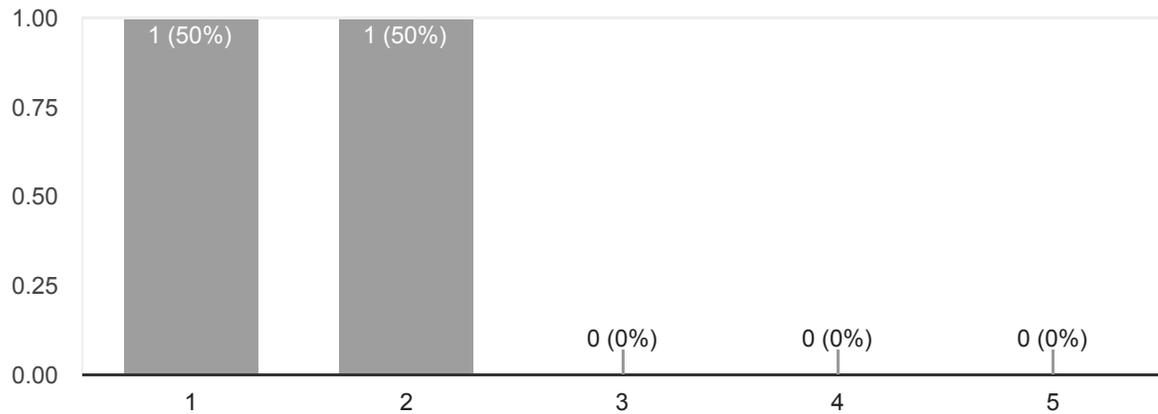
Indique en qué grado influyen los instrumentos métodos o técnicas de medición en la precisión

2 respuestas



Indique en qué grado influye el operador en la precisión

2 responses



Si seleccionó la opción “otro” en la pregunta 1 de esta sección, indique qué tanto influye en la precisión

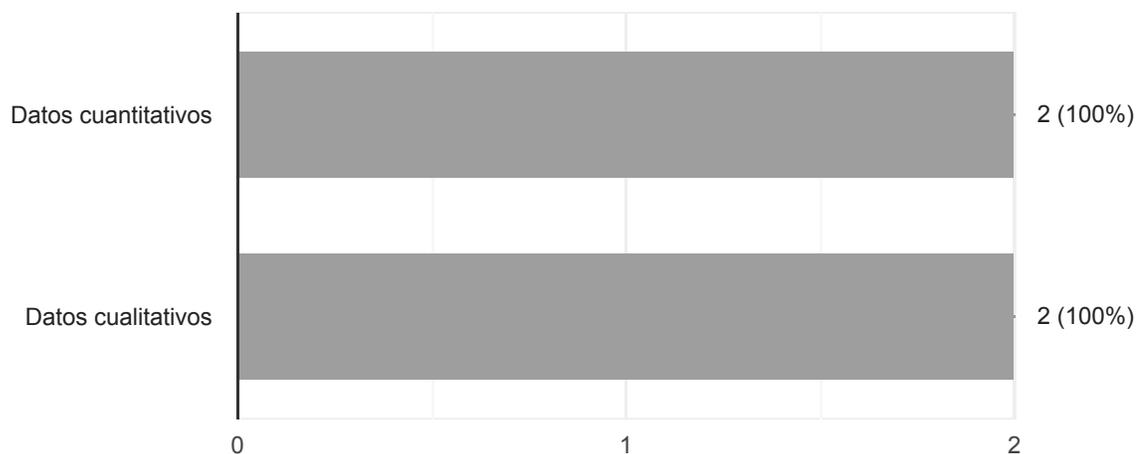
0 responses

No responses yet for this question.

## Efectividad comunicativa

¿Qué tipo de datos proporciona la técnica?

2 responses



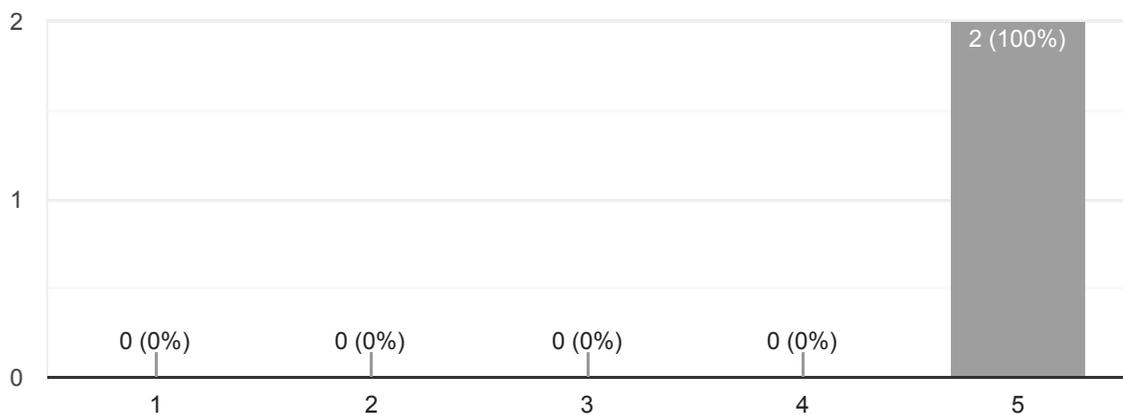
¿Qué tipo de productos proporciona la técnica de detección de cambios?

2 respuestas

Mapas codificados con color en 2D y 3D, cálculo de áreas, cálculo de porcentajes de área analizada, dimensión de las desviaciones

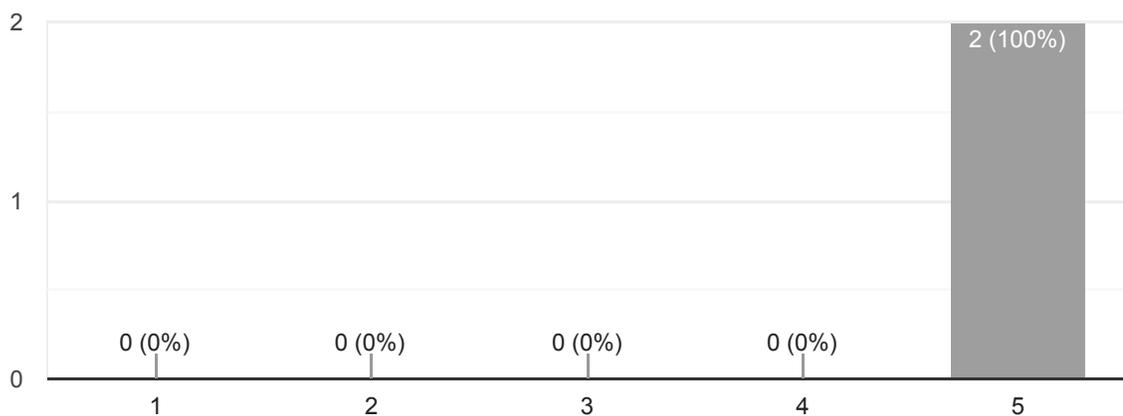
Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios expertos

2 respuestas



Indique el grado de efectividad comunicativa que tienen los resultados en usuarios no expertos

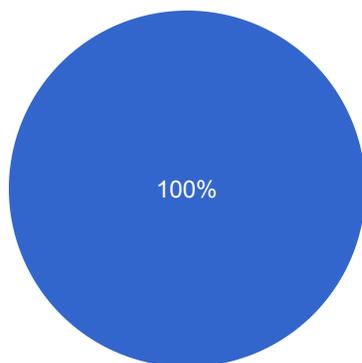
2 respuestas



## Comparabilidad de los resultados y replicabilidad de las mediciones

¿Es posible comparar los resultados de dos mediciones realizadas en diferentes momentos?

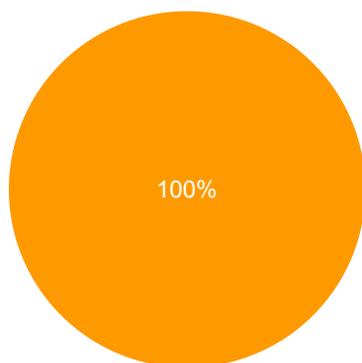
2 responses



- Sí
- No
- Tal vez

¿Es posible comparar los productos o resultados de las mediciones con los de otras técnicas?

2 responses

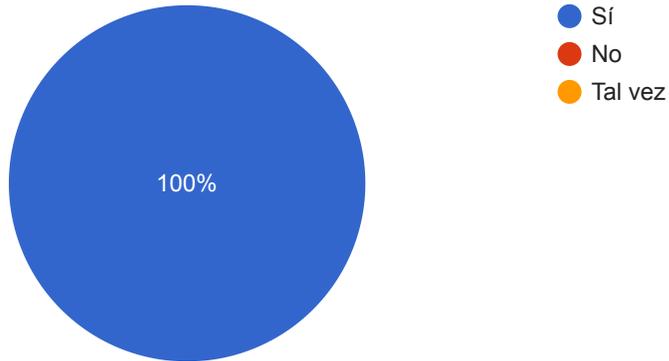


- Sí
- No
- Tal vez



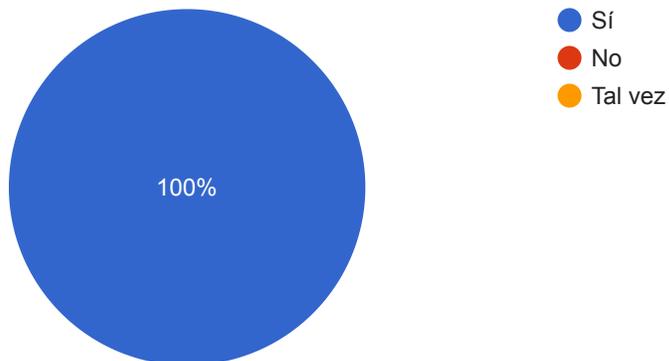
¿Es posible reproducir la medición en un momento distinto?

2 responses



¿Es posible para otra persona reproducir la medición?

2 responses



This content is neither created nor endorsed by Google. [Report Abuse](#) - [Terms of Service](#) - [Privacy Policy](#).

Google Forms

