

**facultad de
bellas artes**



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA**

Doctorado en Artes

**“REGISTRO EN 3 DIMENSIONES DE BIENES CULTURALES.
APLICACIONES AL ARTE CONTEMPORÁNEO”**

María Mercedes Morita

Director: Dr. Gabriel Mario Bilmes

Codirectora: Prof. Marcela Andruchow

Diciembre 2016

La Plata, Argentina.

Esta tesis fue realizada en el Laboratorio de Ablación, Limpieza y Restauración con Láser del Centro de Investigaciones Ópticas (LALRL-CIOp), dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

Parte de los resultados de esta tesis han dado lugar a las publicaciones y presentaciones a congresos que se mencionan a continuación; a un trabajo cuyo manuscrito se encuentra en preparación y un premio del Concurso Nacional de Innovación Cultural, del Ministerio de Cultura de la Nación.

Publicaciones

Técnicas de registro 3D para documentación de objetos patrimoniales

Morita M; Bilmes, G.

Publicado en: COIBRECOPA 2015: Congreso Iberoamericano de Restauración y Conservación del Patrimonio / Luis P. Traversa... [et al. editores]. - 1a ed. Editorial: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), La Plata, 2015. Edición multilingüe. p. 430-437.

ISBN 978-987-3838-03-3

<http://digital.cic.gba.gob.ar/handle/123456789/1370>

Digitalización 3D para documentación de objetos patrimoniales e instalaciones de Media Art

Morita M; Bilmes, G.

Publicado en: Publicación Online de Conservación y Restauración - Año 3 N° 8 - Diciembre 2016 - ISSN 2422-7234 - CABA - Argentina

<http://conversaonline.wixsite.com/conversa/morita>

Fotónica y tecnologías de la luz en conservación y restauración de patrimonio

Bilmes, G.; Morita M.

Revista CONVERSA. Publicación Online de Conservación y Restauración - Año 1 N° 2 – Marzo, 2015 - ISSN 2422-7234 - CABA – Argentina

<http://conversaonline.wix.com/conversa#!en-blanco/c1zjp>

Photonics methods applied to heritage conservation in Argentina

María Mercedes Morita and Gabriel Mario Bilmes

Intervención, Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología de la Escuela Nacional de Conservación Restauración y Museología, Instituto Nacional de Antropología e Historia (ENCRyM-INAH), México.

Trabajo enviado.

3D image acquisition techniques for documentation of cultural heritage. Advantages of using close range digital photogrammetry

Manuscrito en preparación para ser enviado a una revista de circulación internacional con referato.

Presentaciones a congresos

Advantages of using 3D digital photogrammetry for documentation of cultural heritage

Morita, M.

IX Reunión Iberoamericana de Óptica y XII Reunión Iberoamericana de Óptica, Láseres y Aplicaciones (RÍAO/OPTILAS)

21-25 de noviembre, 2016. Pucón, Chile

Laser cleaning and 3D imaging methods applied to heritage conservation in Argentina

Morita, M.

IX Reunión Iberoamericana de Óptica y XII Reunión Iberoamericana de Óptica, Láseres y Aplicaciones (RIAO/OPTILAS)

21-25 de noviembre, 2016. Pucón, Chile

Escaneo láser, fotogrametría digital y realidad aumentada.

FOCAL - Feria de Óptica y Comunidad asociada a la Luz

19 y 20 de agosto. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata

Fotogrametría 3D

M. M. Morita; G. Bilmes

Escuela de Fotónica y Óptica Nestor Gaggioli. 12 y 13 de agosto 2015, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Presentado también en el V Encuentro Estudiantes Óptica y Fotónica (EEOF) 27 y 28 de mayo 2014, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Delta, Campana, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Characterization, restoration and 3D documentation of archaeological metal objects found in Patagonia, Argentina

M. Morita; L. Zilio; G. Bilmes

LACONA X. Lasers in the conservation of Artworks

10,11 y 12 de junio, 2014. American University of Sharjah, Emiratos Árabes Unidos

Laser based methods for material characterization, imaging and 3D documentation applied to heritage conservation in Argentina

M.M. Morita; G. Bilmes; A. Orsetti

LACONA X. Lasers in the conservation of Artworks

10,11 y 12 de junio, 2014. American University of Sharjah, Emiratos Árabes Unidos

Técnicas fotónicas aplicadas a Bienes Culturales

M.M. Morita, G. Bilmes

Primer Congreso Internacional Científico y Tecnológico. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

19 y 20 de septiembre de 2013. Teatro Argentino de la Ciudad de La Plata.

Premios

Concurso Nacional De Innovación Cultural

Organizado por el Ministerio de Cultura de la Nación, a través de la Dirección Nacional de Innovación Cultural

Otorgado por el Proyecto: “Registro y difusión de bienes culturales mediante imágenes 3D”

14 de octubre de 2016

A mi novio Nicolás y a mi familia,
quienes me apoyaron incondicionalmente
en esta travesía llamada doctorado.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 PROBLEMÁTICAS DE LA CONSERVACIÓN DEL ARTE CONTEMPORÁNEO	7
1.1. El arte del siglo XX-XXI	7
1.1.1. Condiciones para la conservación y restauración de arte contemporáneo	10
1.2. El empleo de nuevas tecnologías: Media Art y New Media Art	12
1.3. El problema de la obsolescencia de los materiales	16
1.3.1. Emulación, migración, reposición y re-interpretación	17
1.3.1.1. La emulación y los aficionados.....	20
1.4. El arte de Instalación	22
1.4.1. La documentación de Instalaciones.....	24
1.5. La intencionalidad artística y la intervención del artista en la conservación de su obra	26
1.5.1. La intencionalidad en la obra de arte	27
1.5.2. La “re-creación”	29
1.6. El concepto de autenticidad	30
1.7. Referencias	32
Capítulo 2 DOCUMENTACIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE BIENES CULTURALES ...	36
2.1. Los bienes culturales	36
2.1.1. Lo cultural	36
2.1.2. Patrimonio, identidad y bien cultural	37
2.2. Los sistemas de documentación y las TICs	39
2.2.1. Los metadatos y los repositorios digitales.....	41
2.2.2. Situación en Argentina.....	43
2.3. El registro 3D	45
2.3.1. Antecedentes	46
2.4. La virtualización del patrimonio cultural y los museos virtuales	53
2.5. Realidad Virtual y Realidad Aumentada	57
2.6. Los formatos de visualización	60
2.7. Referencias	64
Capítulo 3 TÉCNICAS DE REGISTRO Y PROCESAMIENTO 3D	68
3.1. La fotogrametría	69
3.1.1. Principios generales de la fotogrametría	70
3.1.2. Fotogrametría de visión computacional	73
3.1.2.1. Fotogrametría digital con Structure from Motion	74

3.1.2.2. Instrumental, procedimientos y software.....	76
3.1.2.3. Alcances y limitaciones de la fotogrametría digital con Structure from Motion	80
3.2. Técnicas de escaneo 3D.....	81
3.2.1. Reconstrucción por Triangulación.....	81
3.2.1.1. Escáner láser por triangulación.....	81
3.2.1.2. Escáner de luz estructurada por triangulación.....	82
3.2.2. Reconstrucción por tiempo de vuelo.....	85
3.2.2. Instrumental, montaje y procedimientos.....	85
3.2.2.1. Escáneres 3D de bajo costo.....	87
3.2.3. Alcances y limitaciones de las técnicas de escaneo 3D.....	90
3.3 Procesamiento de imágenes 3D.....	91
3.3.1 Software de procesamiento de imágenes 3D.....	92
3.3.2. Color y Texturización de mallas.....	94
3.3.3. Incorporación de registros 3D en la web: “3DHOP”.....	94
3.4. Referencias.....	97
Capítulo 4 EL REGISTRO 3D EN LA DOCUMENTACIÓN Y CONSERVACIÓN DE ARTE CONTEMPORÁNEO.....	101
4.1. El “modelado” como complemento y alternativa del registro 3D.....	104
4.2. El uso de la Realidad Virtual.....	107
4.2.1. La e-Installation.....	111
4.2.1.1. El caso de la obra “Kaleidophonic Dog”.....	115
4.2.2. El motor de juegos como herramienta de diseño en e-Installations.....	117
4.2.3. Sensores y dispositivos HMD.....	118
4.3. El uso de Realidad Aumentada.....	120
4.4. Referencias.....	123
Capítulo 5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	125
5.1. Objetos y obras utilizados para el registro en 3D.....	125
5.2. Instrumental y técnicas empleadas.....	127
5.2.1. Escaneo láser.....	127
5.2.2. Escaneo con luz estructurada.....	128
5.2.3. Fotogrametría digital con Structure from Motion (SFM).....	128
5.2.4. Realidad virtual.....	129
5.2.5. Realidad aumentada.....	129
5.2.6. Hardware.....	129
5.3. Software utilizados.....	130
Capítulo 6 RESULTADOS.....	131

6.1. Estudio comparativo de las técnicas Fotogrametría con SFM, Escaneo Láser y Escaneo con Luz Estructurada	131
6.1.1. Registro 3D realizado con fotogrametría digital con SFM	131
6.1.1.1. Adquisición de las fotografías.....	131
6.1.1.2. Comparación y evaluación de software de SFM.....	134
6.1.2. Registro 3D realizado con escaneo láser y escaneo con luz estructurada	136
6.1.3. Análisis de la deformación de las imágenes 3D.....	138
6.1.4. Microfotogrametría 3D con SFM.....	140
6.1.5. Discusión y conclusiones	140
6.2. Procesamiento de registros 3D	144
6.2.1 Alineación de mallas texturizadas.....	144
6.2.2. Efectos para visualización.....	146
6.2.3 Cálculos de volumen	146
6.2.4. Diseño de soportes y réplicas	147
6.3. Influencia de las características del objeto en el registro 3D realizado con fotogrametría digital	148
6.3.1. Discusión y conclusiones	155
6.4. Aplicaciones de la Fotogrametría digital con SFM a obras de arte y colecciones de museos argentinos	156
6.4.1. “Figura reclinada” de Naum Knop.....	157
6.3.1.1. Adaptación de la imagen 3D a un formato para su uso en internet.....	161
6.4.2 “Figura” de Aurelio Macchi.....	163
6.4.3. Calcos en yeso de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP	165
6.4.4. Instrumento musical del Museo “Emilio Azzarini”	168
6.4.5. “Días de Mar” de Dani Lorenzo.....	171
6.4.6. “Puentes de otoño” de Natalia Abot Glenz	176
6.5. Incorporación de los modelos 3D a escenas de Realidad Virtual	179
6.6. Incorporación de imágenes 3D a aplicaciones de Realidad Aumentada	184
6.7. Aplicación de imágenes 3D al diseño de la obra artística	187
6.8. Referencias	189
Conclusiones	190
Agradecimientos	198
Apéndice 1 Software más comunes empleados para Structure from Motion.....	200
Apéndice 2 Sistema para el Registro 3D de Bienes Culturales.....	206

Introducción

En los últimos años la preservación y puesta en valor del Patrimonio Cultural ha crecido en la escala de prioridades de nuestra sociedad. Para poder perpetuar ese legado, además de estudiarlo y conservarlo, es necesario difundirlo. Se impone, por tanto, una creciente necesidad de digitalizar los bienes culturales utilizando nuevas tecnologías. También es importante redefinir el rol del museo ya que éste ha evolucionado en el tiempo dejando de ser el lugar donde se guardaban colecciones y al que accedía solo una parte de la sociedad. Hoy, con Internet y las nuevas tecnologías de la comunicación, han aparecido nuevos tipos de museos, entre los que se destacan los que son visitables virtualmente en el ciberespacio. A los usuales consumidores de museos se han añadido nuevos públicos, con nuevas demandas. Todas estas innovaciones se han manifestado en nuevos espacios de comunicación e iniciativas culturales. La aplicación de nuevas tecnologías al patrimonio cultural abarca mucho más que el proceso de informatización en el registro, la digitalización y la catalogación de los objetos y obras de arte, más bien abre un nuevo mundo de posibilidades para facilitar un mayor acceso real a los bienes culturales.

Por otra parte, la conservación y documentación del arte contemporáneo presenta nuevas problemáticas particulares respecto al arte tradicional, dependiendo del tipo de obra de que se trate. Las creaciones realizadas a partir de los años 70 del siglo XX tienen características peculiares; los artistas se liberan de todas las reglas establecidas previamente y nacen obras que no respetan normas de creación, ejecución, exposición y esencialmente de duración. En este marco el concepto de *duración* de las obras, implica y refleja varios cambios en la postura que toma el conservador/restaurador. En la obra de arte contemporáneo pueden aparecer recursos materiales y técnicas muy diversas, muy actuales en sus desarrollos tecnológicos o con materiales y técnicas más “tradicionales”. En muchos casos el empleo de nuevas tecnologías implica un cierto conocimiento técnico de las mismas. Esto es válido tanto para la instancia creativa como también para la documentación, conservación y restauración de la obra.

Otra de las problemáticas vinculada con la preservación del arte contemporáneo es la conservación, documentación y exhibición de las llamadas instalaciones, obras de arte cuyos elementos se emplazan en el espacio de manera tridimensional, manteniendo relaciones entre sí y con el espectador. Este aspecto también se pone de manifiesto cuando se trata de obras que

contienen elementos electrónicos, como por ejemplo en Arte de Medios Mixtos o Media Art¹. Cuando este tipo de obras se retiran de su exhibición, la única forma de asegurar que se puedan volver a ver en su estado original es generando una documentación detallada, que en su mayoría se compone de fotografías, planos de construcción, entrevistas con los artistas y material audiovisual, recuperando las bases conceptuales del proyecto “obra”. Pero el problema es que, en este tipo de registro, en general, no puede reproducirse la obra en su totalidad y, sobre todo, el nivel de experiencia sinestésica que poseen las instalaciones de Media Art que emplean videos, sonido o movimiento.

La presencia del artista es otro aspecto muy importante a tener en cuenta en la conservación del arte contemporáneo. Su participación en los criterios de conservación, restauración, exhibición y documentación de la obra impacta y modifica significativamente los procedimientos tradicionales. En general, los conservadores, especialmente los argentinos, no utilizan estrategias sistematizadas para el registro de información que pueda proveer el autor de la obra, acerca de la intención artística y sus proyecciones sobre el futuro de la misma.

Por último, también ha cambiado el concepto tradicional de autenticidad² de la obra de arte, que difícilmente puede aplicarse a la conservación/restauración de arte contemporáneo. El motivo es, sobre todo, la obsolescencia de los componentes industrializados que ya no se están produciendo, como por ejemplo televisores CRT (tubo de rayos catódicos), o formas anticuadas de almacenamiento de datos, tales como EPROM (memoria de sólo lectura programable borrrable). Las obras que utilizan este tipo de componentes han dado lugar a nuevos conceptos de originales, donde los materiales no son protagonistas, sino un medio para transmitir una idea. Por todas estas razones, el arte contemporáneo requiere que los restauradores tengan un conocimiento más amplio de técnicas y procedimientos novedosos y, por tanto, una mayor

¹ El DOCAM Research Alliance (*Documentation and Conservation of the Media Arts Heritage*) define “Media Art”: “Creado durante diversas épocas, los trabajos pueden ser analógicos, digitales, mecánicos o electrónicos; son igual y frecuentemente multimedios y conformados por combinación de medios materiales que van desde máquinas, software, sistemas electrónicos e imágenes analógicas o digitales hasta las tradicionales (elementos esculpidos o pictóricos) y no tradicionales (materiales y técnicas industriales). Cuando se activan, los componentes tecnológicos de estas obras de arte crean un sistema dinámico que se despliega al espectador todo el tiempo. Es por esta razón que esas obras de arte son igualmente descritas como medios basados en duración limitada” DOCAM, “Presentation of DOCAM”. <http://www.docam.ca/en/?p=28>. (Consultado en febrero de 2016)

² El concepto de autenticidad comienza a hacerse vigente a partir de 1972 cuando se firma la convención de UNESCO para la Protección del Patrimonio Mundial, donde la autenticidad tiene un papel fundamental para la postulación e inscripción de los Monumentos en la Lista del Patrimonio Mundial. Más tarde la Carta de Nara, Japón, en 1994 aclara algunos conceptos sobre la autenticidad: “*Dependiendo de la naturaleza del patrimonio cultural, de su contexto cultural, y de su evolución a través del tiempo, los juicios de autenticidad pueden vincularse al valor de una gran variedad de fuentes de información. Algunos de los aspectos de las fuentes pueden ser la forma y el diseño, los materiales y la sustancia, el uso y la función, la tradición y las técnicas, la ubicación y el escenario, así como el espíritu y el sentimiento, y otros factores internos y externos. El uso de estas fuentes permite la elaboración de las dimensiones específicas de estas fuentes de patrimonio cultural objeto de examen: artísticas, históricas, sociales y científicas*”. Recientemente la autenticidad ha ganado relevancia en los proyectos de arqueología virtual tal y como se infiere de la Carta de Londres de 2009 (<http://smartheritage.com/seville-principles/london-charter>) y especialmente de los Principios de Sevilla de 2011 (<http://smartheritage.com/seville-principles/seville-principles>).

formación científica y tecnológica. Sin embargo, en Argentina todavía persiste la formación tradicional del restaurador, es decir, la enseñanza en taller del oficio y técnicas de las artes visuales tradicionales y las prácticas en/con objetos artísticos básicamente de corte tradicional. Esta forma de enseñanza es válida para la mayoría de las situaciones con las que un restaurador se encuentra en su trabajo diario, pero no suficiente cuando se enfrenta a obras que no respetan las viejas tradiciones del oficio y técnicas de las artes plásticas, en cuanto a los soportes y el uso de materiales. En el arte contemporáneo los conceptos de creación, ejecución, exhibición y duración de las obras se vuelven controversiales y, frente a esto, los conservadores muchas veces terminan tomando decisiones basadas en la subjetividad y la experiencia adquirida, sin tener en cuenta los elementos previamente mencionados: la intención del artista, el concepto de la obra y el carácter efímero de la materia, que puede o no ser proyectado previamente por el artista.

En las últimas décadas la vieja formación de taller pasó a ser universitaria y con una metodología más científica, de alguna manera influenciada por restauradores que viajaban a Europa, aprendían nuevas técnicas y adquirían nuevos criterios y tendencias. Pero en las carreras universitarias y en las instituciones museísticas argentinas todavía no se ve un gran avance en cuanto al uso de nuevas tecnologías. Esta falta de recursos tecnológicos rige tanto para los procesos de conservación preventiva, incluyendo el registro y documentación de colecciones, como para la restauración de obras y se evidencia en ambos tipos de colecciones: arte tradicional y arte contemporáneo.

Un segundo aspecto que contribuye a este retraso es la falta de articulación entre el complejo científico-tecnológico argentino y las instituciones públicas, en particular las que albergan y exhiben patrimonio cultural. A pesar de que cada vez más instituciones culturales y museísticas en el mundo utilizan distintas tecnologías, los conservadores y restauradores argentinos visualizan muchos productos tecnológicos como algo desconocido, inalcanzable, costoso, difícil de adquirir y manipulable solo por especialistas. En este sentido se puede afirmar que hay una contradicción entre el consumo individual de tecnología y la forma limitada en que las instituciones públicas la utilizan. En el ámbito de la conservación-restauración, las políticas públicas e institucionales no suelen contemplar la innovación, el uso apropiado de nuevas tecnologías, la adquisición de materiales y la capacitación de los recursos humanos. El personal calificado de los museos muchas veces está al tanto de los nuevos avances tecnológicos y nuevas técnicas, pero no cuenta con los medios o con iniciativas de gestión por parte de las instituciones para su implementación y su uso. El único acercamiento con la ciencia y la tecnología que actualmente tiene el conservador-restaurador en Argentina es, por lo general, para realizar análisis de materiales. Estos estudios siempre son llevados a cabo por terceros, es decir, por instituciones dedicadas a esas técnicas avanzadas, como por ejemplo los laboratorios que brindan servicios de ensayos no destructivos, pero no son conservadores de formación. Esto

es lógico entendiendo el carácter técnico y científico de los análisis, que indiscutiblemente siempre serán realizados por un especialista en la materia. Pero lo que sí es discutible, es la falta de interacción entre ambas disciplinas. Los estudios solicitados por el restaurador suelen ser en un contexto de prestación de servicios y no vistos como potenciales trabajos de investigación que involucren la interacción de ambas partes: el restaurador y el científico. Existen algunos grupos dispersos de conservadores-restauradores que se dedican a realizar estudios de bienes culturales utilizando equipamiento científico moderno y nuevas tecnologías, en laboratorios para tales fines, pero son muy pocos y en general no interactúan con el resto. De hecho, muchos de ellos dan clases en la universidad pública, pero siguen transmitiendo la disciplina de forma tradicional.

Un claro ejemplo de esta situación es el caso del registro en 3 dimensiones. Esta es una de las tecnologías que más impacto está teniendo en el campo de la preservación del patrimonio cultural. Si bien están ampliamente difundidas a nivel mundial, las técnicas de registro en 3D casi no tienen antecedentes de desarrollo y/o aplicación en la Argentina. Los museos argentinos utilizan técnicas tradicionales como el dibujo y la fotografía y en general no han incorporado registros en 3D. Los sistemas de documentación en la mayoría de las instituciones están basados en fichas técnicas, ya sea en soporte de papel o como base de datos digital, donde la información registrada es limitada a un texto, en el mejor de los casos acompañado por un esquema del objeto con sus respectivas medidas o una fotografía. Muchas veces los objetos son tan complejos respecto a su forma que una simple foto no alcanza para registrar las dimensiones o el estado de conservación. Además, estas fotografías no tienen la posibilidad de servir a otras áreas del museo, ya sea para estudios de restauración, difusión al público, educación o exhibición involucrando tecnología interactiva (por ejemplo, una pantalla táctil donde se visualice la obra de arte u objeto arqueológico y se lo pueda manipular virtualmente). Asimismo, estas técnicas tradicionales de registro, como también lo son los dibujos a mano alzada, no logran obtener detalles de la forma y textura del objeto para el análisis de su estructura, dimensiones, estado de conservación y posibles agregados no originales en el caso de que el historial de la pieza posea intervenciones desconocidas o no identificables. Si bien las técnicas tradicionales son suficientes en conservación preventiva, no ocurre lo mismo en aquellos casos en los que se requiere realizar estudios de deterioro, o es necesario planificar restauraciones. Por ejemplo, en las restauraciones que implican agregados a originales, los añadidos no son realizados de una manera fácil y rápida dado que se dificulta su diseño si no se tienen las medidas precisas. Las normas de conservación para depósito, traslado y exhibición de los objetos exigen que los soportes y contenedores de guarda sean diseñados con la estructura ajustada cuidadosamente al original para evitar que al moverlos o trasladarlos sufran daños. Este proceso se hace particularmente difícil cuando se trata de objetos complejos en forma y tamaño.

Por otra parte, en Argentina la difusión de las colecciones todavía sigue siendo precaria, en el sentido de que los museos no se “aggiornaron” al avance de las nuevas tecnologías en comunicación. El concepto de museo virtual, es entendido muchas veces como una página web que funciona como exhibidor de imágenes fotográficas con breves descripciones de las piezas y no como un espacio interactivo, no solo para el público general sino también para especialistas. Es así que los museos argentinos no utilizan sistemáticamente técnicas de adquisición y procesamiento de imágenes o de realidad virtual para difundir sus colecciones o para que el público e investigadores interactúen con ellas. Los sistemas de gestión y difusión de bienes culturales ya existentes en el país cuentan con una escasa información de las colecciones y, en general, la única técnica de registro, como ya se mencionó, es la fotografía en 2 dimensiones. Cabe acotar que muchas veces, por cuestiones de seguridad, la información de los objetos de colección que se difunde es una porción limitada de los datos con que se cuenta.

El Laboratorio de Ablación Limpieza y Restauración con Láser (LALRL) del Centro de Investigaciones Ópticas de La Plata -CIOp- (CONICET.CIC-UNLP) ha iniciado recientemente una línea de investigación y desarrollo para la utilización de tecnología 3D en bienes culturales. El LALRL-CIOp cuenta desde 1997 con un laboratorio específico dedicado al uso de técnicas fotónicas que se aplican en patrimonio cultural. Tiene experiencia en la aplicación de la ablación láser como método de limpieza en diversos materiales y como técnica de caracterización de materiales³. En los últimos años, el LALRL-CIOp ha experimentado con las técnicas de escaneo con luz estructurada y láser y con fotogrametría digital. El presente trabajo de tesis forma parte de esta nueva línea de investigación y se desarrolló en el marco de un programa que propone la transferencia del conocimiento y la experiencia adquiridos a instituciones públicas que albergan objetos patrimoniales. En este sentido, uno de los objetivos generales de esta tesis ha sido desarrollar nuevas herramientas tecnológicas que puedan ser empleadas por la comunidad de conservadores, acentuando la importancia del trabajo interdisciplinario e interinstitucional para resolver problemas y desafíos que presenta el estado actual de este campo de conocimiento.

En lo específico esta tesis se centró, por un lado, en la relevancia, posibilidades y limitaciones que tienen las nuevas tecnologías de registro 3D para el arte contemporáneo, concretamente en la conservación y documentación de colecciones de museos. Específicamente, escaneo con láser, escaneo con luz estructurada y fotogrametría digital y su combinación con técnicas de

³ BILMES, G. M. et al. (2005) “Cleaning and characterization of objects of cultural value by laser ablation” *Optical Methods for Arts and Archaeology*. R. Salimbeni & L. Pezzati (Eds) *Proceedings of the SPIE*, Vol 5857, pp. 19-25.

BILMES, G. M. et al. (2008) “Laser cleaning of 19th century papers and manuscripts assisted by digital image processing” *Lasers in the Conservation of Artworks*. Castillejo, et al. (Eds). Taylor & Francis Group, London, pp. 361-365.

BILMES, G. M. et al. (2012) "LIBS analysis and laser cleaning of metal objects rescued from the corvette h.m.s. Swift" *Proceedings of LACONA IX*. Archetype Publications Ltd. Fitzroy Square, London. pp. 179-181.

procesamiento de imágenes. Además, se analizó su uso en distintos tipos de colecciones patrimoniales y artísticas como objetos arqueológicos, escultura tradicional y contemporánea, obras contemporáneas de técnica mixta y arte de instalación. También se exploró la utilización de los registros 3D para educación, difusión de patrimonio, investigación, restauración y re-instalación de obras. Por otro lado, se analizaron las posibilidades que brinda el registro 3D en la documentación de obras de arte efímero e instalaciones, incluyendo la presencia del artista y su participación en el proceso de exhibición, aspecto que hasta el momento no había sido todavía suficientemente explorado. Asimismo, el trabajo que se presenta analiza la posibilidad de combinar varias técnicas de registro 3D con técnicas inmersivas de realidad virtual y el uso de registros 3D en las obras de arte de instalación y Media Art, particularmente los vinculados al problema de la obsolescencia de materiales técnicos. Finalmente, y como un producto concreto transferible a las instituciones museísticas, se presenta un kit (sistema de registro de imágenes 3D para bienes culturales) basado en fotogrametría digital, con instrumental de bajo costo y software libre.

Capítulo 1

PROBLEMÁTICAS DE LA CONSERVACIÓN DEL ARTE CONTEMPORÁNEO

1.1. El arte del siglo XX-XXI

El periodo histórico que va desde 1914 hasta 1991 fue denominado por Eric Hobsbawm (HOBSBAWM, 2002) como “el siglo XX corto”. Fue un siglo marcado por revoluciones sociales, políticas, económicas, culturales y tecnológicas. Sin embargo, también significó un período tremendamente violento. Según Hobsbawm, fue la era más violenta de toda la humanidad, ya sea en el aspecto económico como en el militar. La violencia económica estuvo dada por la acumulación y concentración de riqueza en pocas manos y la especulación y la financiarización de la economía global. La violencia militar estuvo expresada esencialmente en las dos guerras mundiales, la guerra de Vietnam y muchas otras “guerras de pequeña escala”.

Las condiciones fundamentales que hicieron posible los más relevantes hechos del siglo XX se generaron en el siglo XIX jugando un papel relevante los avances científicos y tecnológicos producidos a partir de la revolución industrial en Europa y los Estados Unidos. Entre estos podemos destacar: la invención de la radio, la aparición del automóvil y el avión y más tarde, en la segunda mitad del siglo, la televisión, el desarrollo de la microelectrónica, la computadora personal, el láser, las fibras ópticas y el teléfono móvil. Estos desarrollos científico tecnológicos tuvieron un fuerte impacto en el arte del siglo XX. Por otro lado, el crecimiento industrial y la vida en las ciudades también tuvieron una fuerte influencia en el arte de este siglo, por ejemplo, en el Pop Art. Se pueden distinguir dos grandes movimientos artísticos en el siglo XX: Las vanguardias artísticas y el arte postmoderno. Las vanguardias artísticas, que en realidad se anticipan a fines del siglo XIX, son fuertemente influenciadas por la ciencia, la tecnología, la literatura y la filosofía y con una actitud de absoluta libertad de expresión, alteran la estructura de las obras, abordando temas tabúes y desordenando los parámetros de la academia (MILICUA, J. et al 1994).

Sin embargo, Hobsbawm ofrece una visión escéptica acerca del progreso de las artes y los cambios de la sociedad (sobre todo occidental) durante la segunda mitad del siglo XX. (HOBSBAWM, 2002). Sobre el arte de segunda posguerra dice que “*consistía en gran medida*

en un serie de artilugios crecientemente desesperados mediante los cuales los artistas buscaban darle a su trabajo una marca inmediatamente reconocible, una sucesión de manifiestos de desesperación... o de gestos que reducían al absurdo (ad absurdum) la clase de arte que era primordialmente comprada para la inversión y sus coleccionistas [...] como agregando un nombre individual a pilas de ladrillo ('arte minimalista'), o evitando que se convirtiese en una mercancía dotándolo de una vida demasiado corta como para ser permanente (performance art). El olor de la muerte inminente se elevó desde estos avant-gardes. El futuro ya no era más de ellos, aunque nadie sabía de quién era. Más que nunca, sabían que se encontraban en el borde”⁴

También afirmaba que *“La revolución cultural del último siglo XX puede así ser entendida como el triunfo del individuo sobre la sociedad, o más bien, la ruptura de las hebras que en el pasado habían tejido los seres humanos en tejidos sociales”⁵*. “A grandes rasgos este sería el punto de partida del arte de posguerra que precedió a las nuevas vanguardias.

Por otro lado, el arte posmoderno, surgido en la década de 1970, toma elementos de la vanguardia, así como también de las artes clásicas, y crea mezclas de estilos y épocas, acude al uso de técnicas tradicionales y de nuevas tecnologías, pero a diferencia de las anteriores, asume el arte como objeto y como finalidad en sí mismo. El posmodernismo suele abordar el tema de la cultura del consumo, la cultura popular, la globalización y el rol y valor del arte en la sociedad. Reúne varios movimientos artísticos, que incluyen las instalaciones artísticas, el arte conceptual y el arte multimedia.

A finales del siglo XX empieza la revolución en la información y las telecomunicaciones y por eso, a partir de 1990 algunos llaman a este periodo la "Era de la información" (CASTELLS, 2005). Aunque también podría decirse que este proceso empezó en la segunda mitad del siglo XIX con la invención del teléfono y la telegrafía y un siglo después continuó con Internet. En este contexto, el posmodernismo refleja en sus obras el aspecto globalizado de la sociedad de finales del siglo XX, caracterizado por los medios de comunicación de masas y el crecimiento de la cultura visual, con una gran proliferación de imágenes, tanto impresas como electrónicas, diluyendo la frontera entre la “realidad” y su representación, así como el concepto de originalidad.

Hay consenso en el hecho de que el arte posmoderno es el arte de finales del siglo XX y principios del XXI. Sin embargo, se utiliza también el término "arte contemporáneo", en sentido literal, para denominar al arte actual. El pasaje del arte moderno a arte contemporáneo se inició en los años cincuenta, emergió en los sesenta, fue discutido durante los setenta y resulta innegable desde los ochenta del pasado siglo (SMITH, 2012). En esta tesis el concepto de arte contemporáneo abarca cronológicamente el periodo que va desde la finalización de la

⁴ HOBBSAWM, 2002, p. 516-517.

⁵ HOBBSAWM, 2002, p. 334.

Segunda Guerra Mundial (1945) hasta nuestros días. Esta definición es la que la mayoría de los museos de arte suelen utilizar para las colecciones de este periodo. También aceptaremos la acepción "arte moderno" o "arte posmoderno" (desde los años 1970) para referir al arte contemporáneo.

Los nuevos modos de vida y los cambios en los valores sociales influyeron sobre los contextos de producción de la obra de arte, afectando las temáticas, los materiales utilizados, las formas expresivas, la composición y estructura y el propio concepto de la obra como objeto artístico. También el rol del espectador ejerció cada vez mayor presión en la creación artística.

Lo que distingue al arte del siglo XX, en especial su última etapa, es la generación de un nuevo lenguaje plástico con múltiples ramificaciones, de las que van a resultar las principales tendencias de ese periodo. Este nuevo lenguaje caracterizado principalmente por la libre interpretación de las formas plásticas y el fuerte carácter individual que cada artista imprime en sus obras, hará que la historia del arte del siglo XX sea una historia de artistas y no de grandes tendencias como había venido sucediendo hasta entonces. En este contexto toma cuerpo el concepto de idea/proyecto como soporte de la obra de arte. Lo simbólico se constituye en motor de la obra de algunos artistas iniciándose así el camino hacia la conceptualización del arte y la liberalización del lenguaje formal en favor de lo abstracto (CORCHO GÓMEZ, 2008).

El arte contemporáneo se da en el marco de una sensación ampliamente compartida de que la difusión y la contingencia son lo único que existe. Ante ello, la contemporaneidad exige respuestas que difieren significativamente de las que motivaron los muchos y variados modernismos del siglo XIX y XX. Las problemáticas a las que se enfrenta el arte contemporáneo derivan, en gran parte, de que la noción de que los grandes y productivos relatos de la modernidad -que incluyeron al arte como espejo, ocio o disenso autorizado- han fenecido. Una consecuencia inmediata de ello es que el arte contemporáneo se ha vuelto -en forma y contenido, sentidos y usos- detalladamente cuestionador y vasto en sus modos de indagar y en el alcance de sus búsquedas (SMITH, 2012). Al mismo tiempo el arte contemporáneo en la ausencia de garantías históricas (propias de la utopía de la Modernidad) y al igual que otras competencias humanas, solo ofrece respuestas parciales.

“Ensayos provocativos, gestos dubitativos, objetos equívocos, proyecciones tentativas, proposiciones inseguras o previsiones esperanzadas: (...) son las formas más comunes de arte en la actualidad”⁶

Lo que aumenta la diferencia entre las inquietudes del arte contemporáneo con los variados modernismos, es que las preocupaciones que cada obra aborda, no lo hace solo para sí y para sus contemporáneos, sino que también de modo definitivo, como una indagación sobre la condición de ser del presente: la que se pregunta ¿qué significa existir en las condiciones de la contemporaneidad? (SMITH, 2012). Otra de sus peculiaridades es que el arte contemporáneo es

⁶ SMITH, 2012, p. 16.

un *arte del mundo*, es decir no un arte universal con diversas manifestaciones locales, tampoco artes locales propias del colonialismo o la globalización, sino artes particulares generadas por la diversidad del mundo. En estos sentidos el arte contemporáneo es el arte en y de la contemporaneidad (SMITH; 2012).

Por otro lado, en cuanto a la relación del arte con las nuevas tecnologías y medios (video, realidad virtual, láser, digitalización, etc.), o con lo que Frank Popper llamó los medios de la era electrónica, ha devenido en múltiples prácticas que obligan a hablar de una nueva materialidad de la obra de arte, pero también de un nuevo tipo de relaciones entre los artistas y los científicos y de un nuevo comportamiento del espectador ante el arte, que ya no se limita a intervenir intelectualmente en la obra sino que participa interactivamente con ella: “*El término interacción –afirma F. Popper– da al espectador un rol determinante. Ahora el artista se esfuerza en provocar cambios recíprocos entre las obras y el espectador, lo cual es posible gracias a los recientes sistemas tecnológicos que crean un sistema en el que la obra de arte reacciona a las acciones del usuario/espectador*”⁷. El espectador pasa de estar cercado dentro de un paradigma hermenéutico a moverse en otro heurístico.

Otra de las formas del arte contemporáneo que modifica el estatus del espectador en la contemporaneidad es el arte de instalación. Éste arte se diferencia de los medios tradicionales (escultura, pintura, fotografía, video) en que está dirigido directamente al espectador como una presencia literal en el espacio. Las instalaciones tienen como característica clave que presuponen un espectador corporizado sensorialmente. Suponen un sujeto observador que se adentra físicamente en la obra para experimentarla. A diferencia de la escultura y pintura tradicionales (como obras contenidas en sí mismas), el arte de instalación trabaja con emplazamientos determinados en los que el espacio entero está tratado como una situación completa en las que se adentra el espectador (BISHOP, 2008). Las instalaciones por lo general se desmontan y destruyen, implicando su transitoriedad en un esquema efímero y sensible que insiste en la experiencia en primera persona del espectador. Con un énfasis en la inmediatez sensorial, la participación física y la conciencia agudizada del visitante que llega a formar parte de la pieza en exhibición. (BISHOP; 2008)

1.1.1. Condiciones para la conservación y restauración de arte contemporáneo

Las características múltiples y variadas del arte contemporáneo también impactan en su conservación y restauración. Hay muchas razones por las cuales la conservación del arte contemporáneo necesita un enfoque diferente, algunas de ellas son:⁸

⁷ POPPER, 1993, p.8.

⁸ Proyectos del *The Getty Conservation Institute*. “Modern and Contemporary Art Research Initiative”. http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/modcon/overview.html. Consultado en octubre de 2013.

- La cantidad casi ilimitada de materiales que usan los artistas. Muchas obras tienen materiales que sufren distintos cambios en el tiempo, lo cual requiere diferentes métodos de conservación. Sumado a esto, existen materiales que son directamente productos comerciales con sus respectivas fórmulas, lo cual hace que la información de su producción y composición dependa solo de una empresa comercial, que muchas veces ya no está disponible.
- Algunos materiales modernos tienen un deterioro tan rápido que la obra sólo puede ser exhibida por un corto período de tiempo.
- Hay obras de arte que, al incorporar tecnologías, como electrónica, video o software plantean dilemas de conservación, a medida que esta tecnología se convierte en obsoleta rápidamente. Muchas veces se requieren expertos de otras disciplinas para reemplazar componentes técnicos, o la migración a formato digital.
- A veces, las obras de arte modernas o contemporáneas se basan más en conceptos que en aspectos físicos, por lo tanto, se necesita volver a discutir y reconsiderar los criterios y conceptos establecidos para la conservación.
- La opinión del artista y su autoridad en la conservación de la obra es otro aspecto significativo del arte contemporáneo. La intención del artista es muy difícil de definir en la práctica y puede variar en el tiempo considerablemente. Además, se deben considerar las implicancias éticas y legales. Como dice Negri, *“definir el ‘arte’ no sólo importa a críticos y museos, sino también para las exenciones fiscales, los permisos de entrada y salida, la división o conservación de un patrimonio, la protección contra el fraude y la copia, etc. Los artistas amplían permanentemente los límites del arte, por lo que resulta necesario adaptar las nuevas manifestaciones artísticas dentro de los escasos marcos legales existentes. Pasa con los hologramas o el arte digital, en particular cuando incluyen contenidos generados por los propios usuarios o ‘galerías de arte virtuales’ de obras preexistentes (...). Otra cuestión es el concepto de ‘autoría’ y si existe un derecho del artista a evitar la exhibición de su propia obra cuando considera que las condiciones no son las adecuadas.”*⁹
- La interacción de la obra con el espectador de manera física y espacial. Por ejemplo, en el caso de instalaciones.

Durante la década de 1990 se desarrollan una cantidad importante de trabajos teóricos sobre conservación de arte contemporáneo, debido a que la gran variedad de obras que ingresaban a los museos exigía una comprensión sobre su significado y la intención del artista. Este panorama dio lugar a varios proyectos internacionales y conferencias sobre la conservación y restauración de arte contemporáneo, con especial interés en la documentación y la exhibición de

⁹ NEGRI, Juan Javier. “Los límites entre arte y derecho” Página 12, martes 24 de julio de 2002.
Recuperado de: <http://www.pagina12.com.ar/diario/suplementos/espectaculos/6-25929-2002-01-01.html>

instalaciones y arte multimedia, además de promover la interacción interdisciplinaria entre curadores, conservadores y artistas. Entre los más importantes que se pueden mencionar están el simposio “*Modern Art: Who Cares?*”¹⁰, realizado en 1997 y organizado por la Fundación para la Conservación de Arte Contemporáneo, en Ámsterdam; la red INCCA¹¹, formada en 1999, integrada por un grupo de veintitrés personalidades destacadas del mundo de la conservación procedentes de once organizaciones europeas y actualmente financiada por el Instituto Holandés para el Patrimonio Cultural (ICN); y el “*International Symposium Contemporary Art Who Cares?*”¹², 2010, el segundo de la serie, que reunió a más de 550 profesionales de 32 países. También se pueden mencionar las actividades del DOCAM *Research Alliance*¹³ que consistieron en identificar y poner en práctica cinco ejes de investigación y proponer herramientas, guías y métodos que contribuyan a la conservación del patrimonio de Media Art. Estos cinco ejes son: la conservación, la documentación, la catalogación, la historia de las tecnologías y la terminología. Otro encuentro importante son las jornadas que, desde principios del 2000, se celebran anualmente en el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, donde se realizan ponencias de especialistas sobre aspectos diversos relacionados con la problemática de la conservación y restauración del arte contemporáneo. Estos proyectos y los que se mencionarán a lo largo de este capítulo tienen una característica muy importante en común: todos consideran a la documentación de arte contemporáneo de instalación y multimedia como una parte integral de las estrategias de conservación (MUÑOZ MORCILLO et al., 2016).

En este capítulo se definen algunas de las problemáticas que se presentan en conservación de arte contemporáneo. En particular el empleo y manejo de nuevas tecnologías; la obsolescencia de materiales que constituyen la obra; el respeto por la intención artística y los nuevos desafíos que se plantean en las obras de instalación y en el arte efímero.

1.2. El empleo de nuevas tecnologías: Media Art y New Media Art

Se utiliza una variedad de términos para definir obras de arte con base tecnológica: por ejemplo, videoarte, arte electrónico, arte digital, arte multimedia, *net art*, o *new media art*. El concepto de *Media Art* pretende unificar diferentes producciones artísticas que se relacionan con

¹⁰ “Modern Art: Who Cares?” Conferencia en Ámsterdam, 8-10 de septiembre de 1997.

¹¹ INCCA. International Network for the Conservation of Contemporary art. <http://www.incca.org>

¹² Contemporary Art Who Cares. Conferencia en el Amsterdam Royal Tropical Institute (Amsterdam) 9-11 de junio de 2010.

¹³ DOCAM. Documentation et Conservation du Patrimoine des Arts Médiatiques. <http://www.docam.ca/>

los *medios*. Oliver GRAU, toma una visión amplia del arte mediático, situándolo en el contexto de la historia del arte. El arte mediático de hoy en día no puede ser entendido solo por los detalles tecnológicos; no puede entenderse sin su historia, y debe ser entendido en la proximidad de otras disciplinas -estudios cinematográficos, culturales y mediáticos, informáticos, filosóficos y ciencias que se ocupan de la imagen (GRAU, 2007). Los creadores de Media Art representan un nuevo tipo de artista, quien no solo enuncia el potencial estético de métodos avanzados de creación de imágenes y formula nuevas opciones de percepción y posiciones artísticas en esta revolución mediática, sino que también investiga específicamente formas innovadoras de interacción y diseño de interfaces, contribuyendo, como artistas y como científicos, al desarrollo del medio. (GRAU, 2003). Para Antoni Mercader, Media Art *“se trata de una convención empleada para denominar, en un sentido muy amplio, el fenómeno artístico de armonización entre la comunicación mediática y la práctica artística. Un reto expresivo derivado de una actitud experimental en la concepción, en las metodologías de trabajo, en el modo de producción y en la utilización de las tecnologías de la comunicación audiovisual y/o multimedia para la creación artística”*¹⁴. Otros autores definen al Media Art como un arte que puede tratar de esos supuestos nuevos medios, pero que también pueden ser sólo obras que simplemente utilizan esa tecnología de medios. Este aspecto tecnológico del Media Art implica un conocimiento de las fases de producción, por ejemplo, de un producto audiovisual o multimedia, haciéndolo una práctica artística multidisciplinaria, no sólo en su aspecto técnico, sino también para la utilización de diferentes lenguajes (PAUL, 2003; RUSH, 2005). El fundador de la Universidad de Artes y Diseño de Karlsruhe, y del ZKM | *Centre for Art and Media* (el primer museo de Media Art del mundo), Heinrich Klotz, le pidió una definición al artista cibernético Stephan von Huene en los años 90 y este le contestó con una descripción cualitativa basada en el proceso tecnológico de creación y cierta capacidad performativa o de transmisión de la tecnología de la obra: *“Media Art es una forma de arte en la que el proceso de transmisión de la obra de arte a través de dispositivos tecnológicos es parte integrante de la obra del artista y de la obra de arte. Creo que la parte importante se refiere al proceso de transmisión”*¹⁵. Se trata, pues, también de una definición autorrefencial pero con una proyección semántico-comunicativa ligada a la base tecnológica de la obra.

En definitiva, lo que diferencia al Media Arte de otras expresiones artísticas es su carácter de intersección entre arte, ciencia y nuevas tecnologías.

Sin embargo, mientras la tecnología avanza y cambia constantemente (de lo analógico a lo digital, por ejemplo), el Media Art se redefine también. Por lo tanto, surge un nuevo concepto: el arte digital. Este arte utiliza tecnología digital como parte esencial del proceso creativo o de presentación. Desde 1970 se han utilizado varios términos para describirlo, incluyendo arte

¹⁴ MERCADER, 2009 (sin datos), citado en: Grupo de trabajo D-27: Media Art/Arte digital (2009), “Media art: un arte complejo”, Actas del IV Congreso de la CiberSociedad.

¹⁵ Carta a Heinrich Klotz, (ZKM, Karlsruhe), 10.9.1993. Publicado en Stephan von Huene (2012).

computacional y arte multimedia, pero recién a finales del siglo XX se empieza a usar el término “New Media Art”, para denominar las artes que utilizaban video, sonido y otras formas híbridas. También porque algunos críticos consideran al término “*más adecuado para definir este tipo de práctica que aúna arte, ciencia y tecnología*”¹⁶. Para algunos autores otro elemento que define el New Media Art es la intervención de la informática (PAUL, 2008). Sin embargo, New Media Art también se puede utilizar para llamar al arte de la biotecnología e ingeniería genética, los cuales incorporan tecnología digital en alguna etapa de su producción o presentación. El New Media Art a menudo se caracteriza por ser dinámico, en tiempo real, participativo, colaborativo, performativo, modular y personalizable. El arte que utiliza tecnología digital como medio puede manifestarse de diversas formas y explora una amplia gama de temas. Puede manifestarse como instalación con o sin componentes de red; como proyecto de realidad virtual que utiliza dispositivos tales como cascos y dispositivos hápticos para transportar a los espectadores / participantes en un mundo virtual; como arte creado para y distribuido a través de Internet; como arte de software que ha sido codificado por el artista; como el Media Art móvil o locativo que hace uso de dispositivos como teléfonos móviles, Game Boys o trajes con microprocesadores integrados, GPS, o redes inalámbricas (PAUL, 2008).

Un aspecto novedoso y discutible en el Arte Digital es que desde el punto de vista creativo el proceso de producción, por ejemplo, mediante un algoritmo o un código abstracto tiene la misma relevancia que el producto, por ejemplo, una imagen. “*Con el arte digital postmoderno la imagen pasa a ser una manifestación secundaria -un epifenómeno material, por así decirlo- del código abstracto que, de este modo, se convierte en el vehículo principal de la creatividad. Hasta hace poco, el objetivo primordial de las artes plásticas era la producción de imágenes materiales, y el código inmaterial que guiaba el proceso creativo desempeñaba un papel secundario y a menudo inconsciente*”.¹⁷

Otro aspecto importante del arte digital es que el acto creativo –el funcionamiento o proceso de creación– resulta más explícito que en cualquier otro medio que se haya empleado a lo largo de la historia del arte. “*Hay más posibilidades de libertad en el arte digital -los ‘elementos mentales’ se pueden ‘combinar y manipular de forma más libre’ que en las artes no digitales-; por eso existen imágenes bidimensionales y objetos tridimensionales totalmente realizados con medios digitales y fabricados con máquinas controladas por ordenador. La computadora amplió la creatividad al permitir una mayor exploración del azar y la creación de ‘permutaciones’ estéticas más complejas. También proporciona un medio de producir arte absolutamente nuevo y extiende el horizonte de creatividad infinitamente, permitiendo al artista*

¹⁶ CIRELLUEGO, 2008, p. 9.

¹⁷ KUSPIT, 2006, p. 11-12.

*moverse en la frontera sutil que separa permutaciones inestables y estables, a veces diferenciándolas, a veces confundíendolas*¹⁸.

Diversos grupos internacionales se dedican a la documentación de Media Art. Uno de ellos es “*Electronic Art Intermix*” (EAI)¹⁹. Es una organización sin fines de lucro cuyo programa básico es la distribución y conservación de una importante colección de más de 3.500 obras de vídeo, de diversos artistas. Por más de 37 años, EAI ha fomentado la creación, exhibición, distribución y preservación del video arte y, más recientemente, los proyectos de arte digital. Otro ejemplo es el proyecto de la Mediateca del Centro Cultural de la Fundación “*la Caixa*”, iniciado en 1994 en Barcelona. Su objetivo ha sido acercar al público las últimas aportaciones del mundo de la creación audiovisual y multimedia y como centro de documentación con una finalidad patrimonial, ha asumido el compromiso de preservar, documentar y organizar para la consulta, todo lo que esté relacionado con las nuevas formas de expresión que se presentan en el panorama artístico actual (MARCOS, 2003). Otro caso es del *Archive of Digital Art* (ADA, former Database of Virtual Art)²⁰ que desde hace más de una década documenta el arte digital de instalación. Sobre una cuidadosa evaluación de más de 5000 artistas internacionales, la ADA contiene una colección compuesta por varios cientos de obras que se distinguen por ser invenciones artísticas, contener interfaces innovadoras o software original. También es importante mencionar el modelo de referencia Open Archival Information System (OAIS)²¹, originario de la NASA. Este modelo ha sido ampliamente adoptado por la comunidad de conservación digital como una forma de identificar las características claves de un sistema de conservación. Uno de sus aspectos más importantes es que proporciona un lenguaje y un marco común para discutir temas relacionados con la conservación digital. OAIS se ocupa de todos los aspectos técnicos del ciclo de vida de un objeto digital: ingesta, almacenamiento de archivos, gestión de datos, administración, acceso y planeamiento de preservación. El modelo también aborda cuestiones de metadatos y recomienda cinco tipos de metadatos que deben ser adjuntados al objeto digital: información referencial (identificación), proveniencia (incluyendo historia de la conservación), contexto, fijeza²² (indicadores de autenticidad), y representación (formato, estructura del archivo). El desarrollo de normas con apoyo del modelo de referencia OAIS puede servir para promover la interoperabilidad entre las bibliotecas digitales, archivos y otras instituciones manteniendo la información digital en el largo plazo.

Por otro lado, el proyecto PERICLES²³ tiene como objetivo garantizar que el contenido digital

¹⁸ KUSPIT, 2006, p. 34 y 35.

¹⁹ Electronic Art Intermix (EAI) <http://www.eai.org/webPage.htm?id=37>

²⁰ ADA. Archive of Digital Art. <https://www.digitalartarchive.at/about/mission.html>

²¹ Consultative Committee for Space Data Systems. (2012). Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS). Washington, DC: CCSDS Secretariat, p. 1-1. Disponible en: <http://public.ccsds.org/publications/archive/650x0m2.pdf>

²² Traducción de “*fixity*”. *File Fixity* es un término de preservación digital que se refiere a la propiedad de un archivo digital de ser fijo o sin cambios.

²³ PERICLES Project. <http://pericles-project.eu/>

sea accesible en un entorno que está sujeto a cambios continuos. Estos cambios pueden no sólo ser tecnológicos, sino también en la semántica, la práctica académica o profesional, o la sociedad misma, lo cual puede afectar las actitudes y los intereses de los diferentes actores que interactúan con el contenido. PERICLES adopta un enfoque de "conservación mediante el diseño" que implica el modelado; la captura y mantenimiento de la información detallada y compleja sobre los contenidos digitales; el entorno en el que existe; y los procesos y políticas a las que están sujetos. Aborda estos desafíos de preservación en dos dominios: obras de arte digitales, tales como instalaciones interactivas basadas en software y otros medios digitales de colecciones y archivos del Tate²⁴; y datos de experimentos científicos procedentes de la Agencia Espacial Europea y la Estación Espacial Internacional.

1.3. El problema de la obsolescencia de los materiales

Las obras que contienen componentes electrónicos o digitales sufren el problema de la obsolescencia de estos elementos. Algunas obras digitales se basan en la existencia de un software particular y un código, que deberán también ser preservados de alguna manera, al igual que el resto de los elementos. Cuando un hardware digital ya no se utiliza y se convierte en obsoleto, las obras de arte digitales que de él dependen corren peligro porque sin él los archivos no se pueden leer.

El ZKM | *Centre for Art and Media*, en Karlsruhe, Alemania, es una de las instituciones que trabaja en este tipo de problemas (COPESTAKE, 2013). Este centro alberga más de 500 obras digitales en su colección y es uno de los lugares más importantes a nivel mundial que se ocupan de la conservación de arte digital. El ZKM compra hardware viejo, como televisores antiguos y computadoras viejas, por eBay o las instalaciones de tratamiento de residuos electrónicos. Las piezas se almacenan y recogen con fines de preservación digital. Como parte de estos esfuerzos, la institución alquila un depósito en las afueras de la ciudad donde almacenan más de 1600 televisores CRT (Basados en tubos de rayos catódicos), que ahora están fuera de producción. Estos televisores pueden ser elementos clave de algunas de las obras de arte. Por ejemplo, la obra "Versailles Fountain" (1992), de Nam June Paik, utiliza 38 de estos televisores, los cuales son constantemente reparados. Sin embargo, en el ZKM son conscientes de que esta medida es temporal y que para garantizar que el arte digital no se convierta en obsoleto con el avance de la tecnología, se deben tomar medidas para transferir la obra a otros sistemas operativos para que

²⁴ Tate posee la colección nacional de arte británico desde el 1500 hasta la actualidad y el arte moderno y contemporáneo internacional. <http://www.tate.org.uk/about/our-work/collection>

se pueda ver en el formato nuevo. Esto es lo que se llama **migración** de la obra, que muchas veces también es complicado y costoso.

Otro ejemplo de obsolescencia de materiales en arte contemporáneo, específicamente arte digital, es la obra “The Legible City” (1989) de Jeffrey Shaw. Consiste en una simulación. Una bicicleta fija que es montada por el visitante apuntando hacia una pantalla gigante, en la cual se observan letras 3D que forman palabras u oraciones a lo largo de los costados del camino. El artista utilizó planos reales de Manhattan, Karlsruhe y Ámsterdam. Las arquitecturas de estas ciudades son reemplazadas por formaciones de texto. Cuanto más rápido se pedalea más rápido aparecen las letras en la pantalla describiendo la ciudad. El problema con esta obra es que fue diseñada en una computadora Silicon Graphics, que se dejó de producir hace más de 15 años. El museo sólo tiene diez en depósito. El peligro es que cuando esta tecnología desaparezca la obra ya no pueda ser vista. La solución para “The Legible City” fue portarla a un sistema basado en Linux. Este proceso tomó varios años y fue realizado en conjunción con los deseos del artista.

Otra de las labores del ZKM es la de digitalizar Video Art de cintas magnéticas.

Sin embargo, no hay consenso en si restaurar el arte digital es lo correcto. Algunos artistas pudieron haber previsto mostrar sus obras como una performance, para que deje de existir cuando la tecnología para ejecutarla deje de funcionar.

Richard Rinehart, director de la Galería de Arte Samek en la Universidad de Bucknell, y su compañero Jon Ippolito, profesor de la Universidad de Maine, han escrito el primer libro dedicado al tema de la conservación de Media Art “Re- Collection: New Media, Art and Social Memory” (RINEHART e IPPOLITO, 2014). En este libro, los autores tratan las estrategias para el rescate del Media Art, desde una perspectiva teórica y práctica, incluyendo la idea de la memoria social y analizando diferentes ejemplos. Por otro lado, investigan lo que ellos consideran las tres amenazas a la creación en el siglo XXI: la tecnología, porque muchas de las obras de Media Art dependen del constante cambio en el avance de software y hardware; las instituciones, que muchas veces utilizan métodos de conservación antiguos; y las leyes, que complican el acceso a las obras con restricciones de propiedad intelectual como copyright y licencias. Los autores proponen un enfoque de medios variable, que resulte en obras independientes de sus medios para cuando las partes originales sean obsoletas.

Actualmente se ha desarrollado una teoría acerca de los criterios que se deben utilizar para la re-instalación de este tipo de obra, basada en los conceptos de emulación, migración, reposición y re-interpretación (PÉREZ-DE-CELIS et al., 2008; HOFMAN, 2007; DEPOCAS et al., 2003)

1.3.1. Emulación, migración, reposición y re-interpretación

Los conceptos de Emulación, migración, reposición y re-interpretación son parte de los criterios de conservación de arte de nuevos medios y tienen en cuenta aspectos como la originalidad, la

durabilidad, el uso y la intención del artista.

Emulación: Uno de los problemas a los que se enfrenta el conservador, en el caso de obras de arte que tienen software, es la posibilidad de ejecutar en un futuro un software obsoleto en nuevos sistemas o en un nuevo hardware. Una de las estrategias que se puede considerar para paliar este problema sería el de conservar para cada pieza el equipo en el cual puede ser ejecutado; sin embargo, esta solución es poco práctica. Otra solución relativamente sencilla es el proceso de emulación, que consiste en preservar la ejecución del software (diseñado como parte de la obra de Media Art). La emulación propone recrear por software las condiciones originales de hardware para las cuales la obra fue diseñada en su momento. Por lo tanto, consiste en escribir un programa que genera una plataforma en la cual el código original puede funcionar y ejecutarse bajo los nuevos sistemas de software, respetando la intención original del artista. *“Emular es imitar la apariencia de algo sin utilizar el mismo medio”*²⁵

Migración: La migración consiste en actualizar la obra de arte según normas contemporáneas, aceptando todos los cambios que esto puede generar visual y sensorialmente. Para poder hacerlo debe considerarse explícitamente el deseo del artista, ya sea que este lo exprese o haya expresado, o que la evolución de la obra forme parte del sentido de la misma. Si esto no fuera posible, la permanencia de la pieza puede considerarse sujeta a una fecha de caducidad dependiendo de la transformación de los medios o la plataforma bajo la que fue creada.

Reposición: La estrategia de Reposición también llamada Duplicación se aplica a los medios que pueden ser perfectamente clonados, es decir en los que no hay diferencia entre el original y la copia. Se aplica a aquellos dispositivos que sirven para soporte, pero cuyo cambio o reposición no interfieren con el significado de la pieza.

Re-interpretar una obra implica no solamente la actualización a nivel tecnológico sino también la puesta al día del diálogo que esa obra tenía con su contexto. Tal vez, este modo de conservar es aquel que separa la intención de una obra de su materialidad, de la manera más radical.

Como un ejemplo de la utilización de estos conceptos en la conservación de arte contemporáneo, en el año 2004, el Museo Guggenheim junto con la Fundación Daniel Langlois organizó una exposición titulada *“Seeing Double: Emulation in Theory and Practice”*²⁶. Aquí, las obras de arte, particularmente las que utilizan elementos electrónicos e imágenes digitales, que operan en sus medios físicos originales como por ejemplo sistemas operativos y computadoras obsoletos, se mostraron junto a sus versiones emuladas en nuevos medios, como por ejemplo un Windows XP o una PC actual. La exposición fue organizada con la

²⁵ IPPOLITO, 2014. “Wagging the long tail of digital Preservation” conferencia para Digital Archiving conference, organizado por el ZAK, Zentrum für Angewandte Kulturwissenschaft und Studium Generale, Karlsruhe Institute of Technology. Alemania, 14 de noviembre de 2014. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=1ReKENbhsuw> (Traducción de María Mercedes Morita).

²⁶ Exhibición del Guggenheim Museum de New York. Seeing Double: Emulation in Theory and Practice, Marzo 18- Mayo 16, 2004.

participación del investigador y especialista en informática de emulación Jeff Rothenberg. En la figura 1 se observan las dos versiones de la obra “The Erl King” de Grahame Weinbren y Roberta Friedman. La realizada entre 1982 y 1986, y la emulada en 2004. En 1998, Rothenberg había publicado "*Avoiding Technological Quicksand: Finding a Viable Technical Foundation for Digital Preservation*" (ROTHENBERG, 1998).

“The Erl King”, una obra de video arte, invita al espectador a controlar la estructura narrativa de la obra a través del uso de un monitor de pantalla táctil. Debido a la combinación única de hardware obsoleto (tanto fuera de la plataforma y hecho a medida) y el software escrito por el artista, esta obra resultó ser un candidato ideal para la emulación de hardware y fue exhibida en *Seeing Double*. Para los visitantes de la exhibición la versión emulada era prácticamente indistinguible de la original. La técnica de emulación permitió a los conservadores salvar el código fuente de la obra y la experiencia del usuario mientras se reemplaza su cuerpo con “*tripas actuales*”.



Figura 1. “The Erl King”, 1982-1985, y su versión emulada de 2004. Exhibición de *Seeing Double: Emulation in Theory and Practice*. Guggenheim Museum, New York. (Imagen de RINEHART e IPPOLITO, 2014).

Asimismo, el proyecto “*Digital Art Conservation*”²⁷ (2010-2012) se dedicó a la investigación de estrategias para la conservación de arte digital. Particularmente, obras de arte creadas mediante programación por computadora y tecnologías digitales. Se inició en el ZKM | *Centre for Art and Media* y se llevó a cabo en colaboración con otras cinco instituciones de la región. En el transcurso del proyecto, se analizaron cuestiones vinculadas a la conservación de arte digital, tanto desde un punto de vista práctico como teórico. Además, se probaron estrategias concretas para la conservación de un amplio espectro de obras de arte digital. Estas estrategias fueron

²⁷ Digital Art Conservation. <http://www.digitalartconservation.org/>

evaluadas críticamente por medio del tratamiento ejemplar de diez obras de colecciones regionales. Una publicación extensa en tres ediciones en idiomas diferentes (alemán, inglés y francés) documenta exhaustivamente las actividades del proyecto y presenta los resultados de los estudios de caso.

Cabe mencionar que uno de los pioneros en el campo del almacenamiento, archivo y conservación de Media Art fue el grupo holandés LIMA²⁸. Además, de ser un repositorio de obras multimedia, están constantemente actualizando la transición hacia la mayoría de las técnicas y tecnologías actuales. Dentro del equipo, los especialistas en conservación almacenan las obras digitales y procuran que ésta pueda ser exhibida en el presente y en el futuro.

Para hacer accesible las obras de Media Art a veces es necesario cambiar algunos elementos sin afectar su significado. Como se mencionó más arriba, la emulación y la migración permiten la transmisión del significado a expensas del medio original. En tales casos, también se requiere a menudo la necesidad de una "reinterpretación" (RINEHART e IPPOLITO, 2014), una adaptación del concepto de arte para el nuevo medio. Ambas estrategias pueden ser incluidas en el modelo de "preservación informacional" (MUÑOZ VIÑAS, 2003), es decir, la preservación de significados a través de la documentación y la migración, en oposición a la "conservación preventiva" que trata de conservar todas las piezas originales de la obra de arte el mayor tiempo posible con medidas directas y ambientales de preservación. La preservación informacional sirve también como marco para las estrategias de conservación y como punto de partida para la idea de la virtualización²⁹ de obras de Media Art como una especie de "obra de arte migrada" (MUÑOZ MORCILLO et al., 2016).

1.3.1.1. La emulación y los aficionados

En una conferencia que Jon Ippolito (IPPOLITO, 2014) dio en el marco de Digital Archiving Conference, en el Center for Digital Tradition (CODIGT) de Karlsruhe, Alemania, se trató el tema de la emulación y los amateurs (aficionados) que actúan fuera de las instituciones. Ippolito afirma que los amateurs con intereses y habilidades especiales podrían ayudar a los profesionales a lograr la tarea de documentar y conservar New Media Art a pesar del cada vez mayor ritmo de obsolescencia tecnológica. En su charla, basada en los temas de su reciente libro (RINEHART e IPPOLITO, 2014), un tema recurrente fue el escaneo y representación 3D de objetos físicos en espacios virtuales y la emulación de obras con componentes tecnológicos.

“El almacenamiento fue la práctica de conservación tradicional por defecto de los objetos culturales hasta el siglo XIX o incluso el XX, pero no se aplica a los objetos del siglo XXI, con

²⁸ LIMA. <http://www.li-ma.nl/site/>

²⁹ Ver capítulo 4. Sección e-Installation.

componentes tecnológicos digitales. Si guardáramos estos objetos, luego de 20 años cuando los queramos utilizar ocurrirán cosas como: diskettes que no pueden ser colocados en las nuevas computadoras, enchufes que no encajan en los sistemas eléctricos actuales, CDs que se deslaminan, cintas que se desmagnetizan. La cultura digital se renueva cada pocos años: Un CD dura 5 años, lo cual no es nada para la historia cultural. ¿Qué otra alternativa tenemos? La respuesta la debemos buscar fuera de los museos e instituciones culturales (...) Existen modelos para preservar las obras, que las re-ejecutan: La emulación. Emular es imitar la apariencia de algo sin utilizar el mismo medio”³⁰

Ippolito utiliza como ejemplo la mencionada obra de Grahame Weinbren y Roberta Friedman “The Erl King”. El éxito de la emulación de “The Erl King” fue posible gracias a talentosos técnicos, un artista voluntarioso, el acceso al software y hardware original, y organizaciones dispuestas a financiar. Es difícil imaginar gastar dos años y decenas de miles de dólares para recrear cada instalación interactiva de video desde 1980, mucho menos todos los ejemplos de Media Art que están en extinción (IPPOLITO, 2016). En este sentido, la solución podría estar en la participación de actores fuera de las instituciones.

El ejemplo anterior es una emulación del 2004; sin embargo, la práctica de emulación ha existido desde hace mucho más tiempo en el caso de la emulación por aficionados para jugar videojuegos retro. Ippolito describe el ejemplo del videojuego Super Mario, el cual ha sobrevivido muy bien gracias a estas personas que crean estos programas fuera de las instituciones. *“No puedo pensar en una sola instancia de software creada por la comunidad de preservación profesional en una manera flexible, pasada de mano en mano por décadas, bifurcándose, re-convergiéndose y constantemente mejorándose sin una sola institución o propietario de Copyright al volante (...) El aficionado responsable del emulador FCE³¹ no trabaja programando en ninguna corporación de software privada ni del estado. Estos aficionados están en el sótano de sus casas”*.

Otro caso que menciona Ippolito para ejemplificar cómo los aficionados tienen un rol cada vez más activo en la conservación o documentación de las obras es Photosynth³² (2008), un proyecto de Microsoft y la Universidad de Washington, que utiliza cientos de fotografías de aficionados etiquetadas como “Notre Dame” del sitio Flickr y las conecta con un modelo 3D de la catedral Notre Dame de París. Utilizando algoritmos de visión computacional, Photosynth permite a los espectadores explorar la catedral virtualmente, con vistas desde el cielo y detalles de su fachada (AGUERA Y ARCAS, 2007). Otra vez, no hay instituciones de por medio, sólo

³⁰ IPPOLITO, J. “Wagging the long tail of digital Preservation” conferencia para Digital Archiving conference, organizado por el ZAK, Zentrum für Angewandte Kulturwissenschaft und Studium Generale, Karlsruhe Institute of Technology. Alemania, 14 de noviembre de 2014. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=1ReKENbhsuw> (Traducción de María Mercedes Morita).

³¹ FCE: Family Computer Emulator. Como muchos proyectos de código abierto, ninguna compañía controla el código fuente de este emulador. En cambio, el programador, conocido con el nombre de Bero, lanzó su código online para otros fans de videojuegos, para que jueguen y lo extiendan.

³² Photosynth. <http://photosynth.net/>

gente común que ha tomado fotografías, por ejemplo, en sus vacaciones. Otro ejemplo es el museo de San Francisco, que junto a Autodesk 123DCatch³³ permite a los visitantes escanear con su celular los objetos exhibidos, con el objetivo de llevarse a su casa la imagen 3D.

También se puede mencionar la *e-Installation* de una video-escultura de Nam June Paik, realizada por el equipo interdisciplinario del ZAK | Centre for Cultural and General Studies y el Intelligent Sensor-Actuator-Laboratory (ISAS), del Karlsruhe Institute of Technology (KIT). “Una *e-Installation* es una versión virtualizada de una obra de arte de los nuevos medios que incluye toda la información sinestésica (es decir, multisensorial) de la obra”³⁴. En este caso, el resultado es un renderizado 3D que permite al espectador presenciar la obra utilizando un casco de realidad virtual, caminando en un entorno virtual, donde todos los componentes en riesgo de la obra (por el cese de su producción industrial), como monitores y tubos de neón, fueron recreados en 3D y colocados en la realidad virtual. Tales *e-Installations* podrían proporcionar algún día un punto de referencia para los conservadores mucho más robusto (aunque algo menos accesible) que las fotografías o videos de la instalación. Para realizar esta *e-Installation* se usaron paquetes de software como Blender y Unreal Engine, que vienen del mundo de los videojuegos (mundo *gamer*).

1.4. El arte de Instalación

Se puede afirmar que la *instalación* es un género de arte contemporáneo cuyo término indica el acto de desplegar diversos elementos en las coordenadas espacio-temporales (SÁNCHEZ ARGILÉZ, 2009). Se trata de una modalidad contemporánea de la escultura – nacida en la década de 1960 en el contexto del arte Pop – en la cual el artista toma un espacio de la arquitectura y lo transforma con una intención estética y comunicativa. Son obras que integran diferentes formas artísticas y procesos mediáticos y se proponen para ser recorridas, atravesadas e interferidas por los espectadores (GUTIERREZ GÓMEZ, 2009). Puede incluir cualquier medio, desde materiales naturales hasta los más nuevos medios de comunicación, tales como video, sonido, computadoras e internet.

Las instalaciones en algunos casos tienen un carácter efímero ya que, por ejemplo, se realizan especialmente para un sitio en un determinado tiempo de exhibición, o son realizadas con materiales que se degradan, o que pueden ser apropiados o utilizados por el espectador. La interacción con el espectador es otra de sus características, motivando la percepción sensorial completa; o despertando emociones, sentimientos o reflexiones, dando cabida a un significado

³³ 123DCatch. <http://www.123dapp.com/catch>

³⁴ MUÑOZ MORCILLO, 2016, p. 1.

intencionalmente dado por el artista y a lo que pueda sentir cada espectador acerca de la obra individualmente.

En la década de 1960, la palabra instalación fue empleada por revistas como *Artforum*, *Arts Magazine* y *Estudio Internacional* para describir la forma en que una exhibición es organizada. La documentación fotográfica de este arreglo fue denominada “*installation shot*”³⁵. Desde entonces, la distinción entre el arte de instalación y una instalación de las obras de arte se ha vuelto borrosa. Ambos apuntan al deseo de aumentar la conciencia del espectador en cómo se colocan los objetos (instalados) en un espacio y su respuesta a ese arreglo. Pero hay diferencias importantes. Por ejemplo, una sala de pinturas de Ilya Kabakov es propiamente un arte de instalación, debido a que el entorno en el que se instalan es también parte de la obra (Figura 2). En una obra de arte de instalación toda la situación en su totalidad dice ser la obra de arte. Este enfoque totalizador a menudo ha llevado a los espectadores y críticos a pensar en el arte de instalación como una experiencia “inmersiva”. Al hacer un trabajo lo suficientemente grande como para que el espectador entre físicamente, los artistas de instalación están ineludiblemente conscientes de la presencia del espectador.



Figura 2. Ilya y Emilia Kabakov “*Where is our place?*”, 2003. Exhibido en Fundación PROA, Buenos Aires.

Para artistas como Vito Acconci las obras interactivas pueden utilizarse para expresarse políticamente (AUSLANDER, 1990). Por ejemplo, en Brasil, que sufrió una brutal dictadura militar durante los años 1960 y 1970, las instalaciones de Hélio Oiticica (1937-1980) se centraron en la idea de la libertad individual, oprimida por las fuerzas gubernamentales. Este artista desarrolló el término “supra-sensorial”, que esperaba podría “liberar al individuo de su condicionamiento opresivo” por el Estado. Sus obras invitan a los espectadores a caminar descalzos sobre arena y paja, o a escuchar discos de Jimi Hendrix mientras se relajan en una hamaca.

³⁵ Término referido a la expografía.

El arte de instalación de la década de 1980, por el contrario, fue más visual y de lujo, a menudo caracterizado por el gigantismo y el uso excesivo de los materiales (Claes Oldenburg “Pico” 1982, o Ann Hamilton y Cildo Meireles). En “Volátil” de Meireles (1980-1994), los espectadores entran en una habitación de ceniza gris con una vela en el otro extremo, mientras que el aire está impregnado con olor a gas.

Las distintas formas en que el arte de instalación incorpora al espectador en el espacio han conducido necesariamente a una serie de problemas sobre la forma en que se lo define. A pesar de esta subjetividad, la mayoría de los críticos de arte están de acuerdo en la historia del género: la importancia de los precursores modernistas como El Lissitzky y su “Proun Room” (1923), “Merzbau” (1933) de Kurt Schwitters, los *environments* y *happenings* de Kaprow de la década de 1960, así como los debates en torno al minimalismo y post- arte de la instalación minimalista de la década de 1970. También señalan su ascenso internacional en la década de 1980 y su glorificación como forma de arte institucionalmente aprobada por excelencia en la década de 1990, llenando museos como el Guggenheim de Nueva York y el Turbine Hall del Tate Modern (BISHOP, 2005).

1.4.1. La documentación de Instalaciones

Uno de los problemas de la conservación del arte de instalación es el aspecto limitado y, en general, bidimensional de los registros y de la documentación de las obras, compuestos, en su mayoría, por fotografías, videos, dibujos y descripciones textuales. Estas formas de representación no registran la experiencia física del espacio. Una instalación, dada su tridimensionalidad, tiene una relación con su ambiente espacial, transformándolo e interactuando. La relación entre la obra de arte, el espacio y el propio cuerpo del espectador determina significativamente la percepción de la obra. Estas relaciones y la posición de una instalación en el espacio son difíciles de representar en dos dimensiones, pero a la vez son cruciales a la hora de la descripción/documentación y la re-instalación.

Por otra parte, preservar una idea, una noción intangible es el principal objetivo y desafío del conservador-restaurador. En el caso de una instalación que además comprenda elementos electrónicos, a veces los materiales pueden ser sustituidos por unos no originales, implicando una contrariedad en los criterios de restauración tradicionales como es el de la “reversibilidad”.

Un elemento que antes no estaba presente en el arte tradicional es la iluminación externa. La luz puede ser utilizada en una obra como un medio directo para expresar ideas artísticas, así como un medio indirecto para acceder a las obras. La percepción de una obra con luz eléctrica, o de una instalación de luz, no está determinada solamente por la luz que utiliza el artista (como el tipo de lámparas, la intensidad de iluminación, la temperatura de color, etc.) sino también por su ubicación. Las especificaciones de la sala como sus dimensiones, la textura de la superficie,

la absorción y reflexión de la luz, son componentes importantes e influyen en la apariencia de la obra de arte. Cualquier fuente de luz cambiará con el tiempo y muchas tecnologías serán obsoletas. Por lo tanto, la documentación, re-instalación y reconstrucción de una instalación requiere la consideración de diferentes aspectos vinculados con la iluminación. Un estudio desarrollado por el proyecto del INCCA “*Inside Installations*”³⁶ se enfocó en evaluar métodos y técnicas para documentar la calidad de la luz, midiendo sus diferentes aspectos³⁷. La idea consistió en documentar obras de arte de manera que la información adquirida permita recrear la intensidad, resolución, color y apariencia de la luz en el futuro.

Otro aspecto a tener en cuenta en la obra de arte de instalación es el movimiento. Las obras de arte cinético pueden contener elementos que rotan, saltan o ruedan de manera lenta, rápida o repentina, produciendo también ruido en el proceso. Este tipo de obras son problemáticas desde el punto de vista de la conservación: por ejemplo, si tienen motores que pueden sufrir desgaste. No obstante, en estas obras, tal vez el reto más importante del conservador sea el de documentar todos aquellos movimientos, que esencialmente son parte de la obra. En este sentido, *Inside Installations* ha trabajado en la documentación de movimiento y sonido, y ha difundido ensayos al respecto³⁸. Entre los métodos que se mencionan está el del análisis de video 3D, donde un objeto en movimiento es registrado por dos videocámaras en simultáneo en diferentes ángulos y el método de la fotografía modificada.

Finalmente, el sonido puede ser un elemento muy relevante en una obra de instalación. En estos casos, se necesita realizar una documentación del sonido de forma separada, tener en cuenta la importancia del tamaño del objeto y del espacio de exhibición desde una perspectiva acústica, las técnicas de grabación de micrófono y la postproducción de la grabación.

Una de las principales estrategias de conservación de los museos es el desarrollo serio y riguroso de los sistemas de documentación. Los modelos de catalogación generalmente fueron diseñados para obras de arte tradicionales. Estos modelos tienden a ser pasivos, incompletos e inadecuados a las especificidades de arte contemporáneo. Esto suele ocurrir en el caso de instalaciones, que pueden ser diseñadas para ser exhibidas en áreas específicas y, por tanto, necesitan de un registro del contexto de la reinstalación, o también sucede con obras de Media

³⁶ “*Inside Installations. Preservation and Presentation of Installation Art*”, un proyecto del INCCA (2004-2007), organizado conjuntamente por cinco organizaciones europeas y financiado por la Unión Europea. Han participado en más de treinta estudios de casos de museo. El objetivo era investigar las obras complejas basadas en instalación a través de entrevistas con los artistas, análisis de materiales y nuevas formas de documentación. El proyecto consistía en la reinstalación de treinta y tres instalaciones complejas (muchas de arte multimedia), con la detallada investigación y adecuada documentación. También se trabajó en el desarrollo de directrices y herramientas, salidas de la experiencia del proyecto, en cinco temas de investigación: la preservación, la participación del artista, la documentación, la teoría y la semántica y la gestión del conocimiento y de intercambio de información.

³⁷ *Inside Installations. “Documentation of light”*. Possibilities and restrictions of documentation and measuring light in the context of installation art. Disponible en: <http://www.sbm.nl/uploads/inside-installations-kl.pdf>

³⁸ *Inside Installations. “Documentation of movement and sound”* Disponible en: <http://www.sbm.nl/uploads/inside-installations-kl.pdf>

Art, donde se deberá registrar el significado de los materiales o el grado de importancia del software y hardware utilizados.

En resumen, las instalaciones de Media Art presentan un reto a la hora de la exhibición y la preservación para los museos: muchas instalaciones de Media Art no están más en exhibición, ya sea porque los repuestos escasean, el mantenimiento es demasiado complicado o costoso, o el museo simplemente no puede proporcionar el espacio necesario.

1.5. La intencionalidad artística y la intervención del artista en la conservación de su obra

La mayoría de obras de arte contemporáneo cuentan con la presencia viva de su autor, por lo que su colaboración es crucial en la conservación de las mismas. Una de las técnicas más efectivas que los conservadores tienen para estar informados de la opinión del artista es la entrevista. Mediante este mecanismo se puede obtener una gran cantidad de información relevante a la hora de intervenir en la preservación de la obra. Es importante saber, por ejemplo, que derechos le concede el autor a la institución que posee su obra, con el fin de interpretarla en el futuro cuando las tecnologías utilizadas posiblemente ya no estén disponibles.

El criterio de autenticidad que un artista puede tener de su obra varía mucho según el género al que pertenece. Por lo general, los que hacen Video Art tienden a percibir su obra como algo fluido. Por ejemplo, para el artista Peter Campus, el medio físico es irrelevante: *“Quiero que mi obra continúe cambiando y creciendo (...) Porque esto es un medio que continúa cambiando, y yo no quiero pretender que no”* (WOLFF, 2013).

Para tener un conocimiento acerca de los detalles conceptuales y tecnológicos de la obra e información sobre la intención del artista y sus expectativas se requiere una documentación detallada y eficaz. En este contexto, en el año 2000, Jon Ippolito publicó el *"Variable Media Questionnaire"*³⁹ para obras de Media Art. Este proyecto fue el primer intento de involucrar a los artistas de Media Art en temas de conservación siguiendo un cuestionario estándar similar a los de Erich-Ganzert Castrillo (GANZERT-CASTRILLO, 1979) y entrevistas técnicas con los pintores alemanes. El Variable Media Questionnaire (VMQ), consecuencia del *"Variable Media Network"*⁴⁰ pretende tomar, para cada obra en particular, información acerca de la intención, las expectativas futuras del artista, el marco óptimo para la exposición, los detalles sobre las tecnologías utilizadas y consejos sobre cómo preservar la obra de arte y qué tipo de reemplazos

³⁹ Guggenheim Museum "Variable Media Questionnaire" Disponible en: <http://variablemediaquestionnaire.net/>

⁴⁰ Guggenheim Museum <http://variablemedia.net/>

pueden ser tomados en cuenta. Esta documentación ayuda a los conservadores y restauradores de arte en los procesos de toma de decisión durante las prácticas de emulación, migración y recreación de la obra. A diferencia de la mayoría de las bases de datos que registran medidas y fotografías, el VMQ registra interpretaciones y fomenta a los creadores a definir sus obras independientemente del medio que utilizan, para que la obra pueda ser traducida una vez que el medio se convierta en obsoleto.

Algo llamativo del VMQ es su interactividad con el usuario, a través de una interfaz web de múltiples secciones y ventanas que además permiten la multitarea. Otra particularidad es que no está dirigido solamente al artista, sino a cualquier usuario relacionado con esa obra, pudiendo ser un conservador, curador, coleccionista, un visitante del museo, etc. en ambos roles de entrevistador o entrevistado. Además, los registros pueden ser de acceso totalmente público desde el sitio web.

Otro proyecto relacionado con la documentación de la intención artística de obras de arte contemporáneo es la Base de Datos de Archivos de Artistas, realizado por la red INCCA, (INCCA Database for Artists' Archives). Alberga investigaciones inéditas sobre artistas contemporáneos, incluyendo descripciones de los proyectos, informes analíticos, tesis estudiantiles y transcripciones de entrevistas.

Por otro lado, en 2003, el grupo V2 (fundado en 1982 como un colectivo de artistas, localizado en Holanda) ha llevado a cabo investigaciones sobre los aspectos de la documentación para preservación del arte electrónico. El proyecto fue llamado “*Capturing Unstable Media*” (FAUCONNIE y FROMMÉ, 2003).

1.5.1. La intencionalidad en la obra de arte

El criterio de conservar la obra de arte respetando la intención artística trae al análisis el famoso problema de la estética del arte, el del *intencionalismo*. El intencionalismo ha ganado posición a partir de los años setenta, a través de la obra clave “*Must we mean what we say?*” (CAVELL, 1976), hasta representar hoy una postura fuerte y definida (WOLLHEIM, 1987; BAXANDALL, 1989; HIRSCH, 1967). En los últimos años el debate entre intencionalistas y anti-intencionalistas ha resurgido con fuerza, como muestran en particular el libro de G. Iseminger, “*Intention and Interpretation*” (ISEMINGER, 1992) y la explícita defensa de Beardsley y de su crítica a «la falacia intencional», realizada por G. Dickie y K. Wilson (DICKIE y WILSON 1995).

De ambas corrientes se puede afirmar que uno de los requisitos de lo artístico es su carácter intencional, sin que ello implique que el significado de la obra, si lo posee, esté determinado por la intención del artista. Según Beardsley y Dickie, un artista lo es en cuanto fabrica un objeto con la intención de hacer arte, pero el significado y el valor artísticos de este objeto no

dependen de la intención del autor.

Esto da lugar al análisis que hace Muñoz Viñas en su libro “Teoría Contemporánea de la Conservación” (MUÑOZ VIÑAS, 2003) sobre las obras de arte como objetos simbólicos. Para explicar estos conceptos, toma el famoso aforismo de Formaggio según el cual arte es “*todo aquello que los hombres llaman arte*”⁴¹ y concluye que algo es artístico no por razones intrínsecas al objeto, sino porque los espectadores, los hablantes, sus usuarios, lo reconocen como tal. De esto se desprende una definición de valor artístico: “*un valor que la sociedad otorga a un objeto concreto –es decir, un valor mutable en el tiempo y variable según el grado y tipo de formación de cada persona, de cada observador, de cada sujeto*”⁴²

Carreño, por su lado, menciona que en el caso de Beardsley, el artista pretende crear un objeto capaz de provocar una experiencia estética, con una finalidad estética (CARREÑO, 2001). Para Dickie tener intencionalidad artística significa que el artista pretende crear un objeto para su exhibición en un contexto artístico, o crear un objeto siguiendo las reglas de la institución arte. Dickie asume el hecho de que buena parte de la práctica artística contemporánea no pretende la creación de una experiencia estética y que, por lo tanto, no es adecuado definir lo artístico en esos términos.

En este sentido, cabe mencionar al artista Marcel Duchamp, quien ha logrado transmitir a través de sus obras la idea de que en una experiencia artística no basta con el estímulo sensorial, sino que también debe estimular el pensamiento. Duchamp presenta en 1913 la obra “*La rueda de bicicleta y taburete*” con la que introduce el concepto del “*ready-made*”. El artista decía que “*arte es lo que se denomina arte y por lo tanto puede ser cualquier cosa*”. El *ready-made* fue definido más tarde por André Breton como “*objeto de uso común promovido a la dignidad de objeto de arte por la simple elección del artista*”⁴³. Para Duchamp un *ready-made* es un objeto sacado de su contexto original, desfuncionalizado y convertido en arte, construido para forzar al espectador a pensar.

Siguiendo con el análisis de Carreño, se pone en discusión a la obra que no es considerada arte por su autor, sino por el público o la literatura y, para esto, toma el ejemplo de la obra “*Erizo*” de Duchamp, quien de ninguna manera contemplaba finalidad estética para su objeto, sino más bien una finalidad humorística y crítica de la institución arte. Pero, según Dickie, lo que lo convierte en artístico sería el hecho de que Duchamp nunca abandonó el contexto, la institución arte. En este sentido, el resto de los botelleros producidos como copias idénticas no serían de objetos artísticos, puesto que la intención es diferente. El significado del *Erizo* es dependiente del contexto, por lo tanto, cada vez que se copia el botellero no se reproducen las intenciones artísticas de Duchamp. Por otro lado, “*La rueda de bicicleta y taburete*” que se expone en la Galería de Estocolmo es una copia del original, pero exhibido en esa institución permite una

⁴¹ FORMAGGIO, 1976.

⁴² MUÑOZ-VIÑAS, 2003, p. 56.

⁴³ BRETON, 1938, p. 2.

interpretación idéntica a la del original, ya que se trataría de un ejemplar más de un “tipo” (WOLLHEIM, 1972), donde la intención de Duchamp es perfectamente reproducible: hacer una crítica a la concepción del objeto artístico como algo único e irrepetible.

1.5.2. La “re-creación”

Las obras de Media Art son frecuentemente exhibidas con la ayuda de un equipo técnico, el cual pudo no haber estado a disposición del autor en el momento en que se hizo la pieza “original”. Muchas veces las partes obsoletas y defectuosas de las obras que se presentan en diferentes exhibiciones son reemplazadas por nuevas por el mismo artista, lo que a veces significa recrear la obra. Sin embargo, este proceso habitual plantea la cuestión de qué versión de la obra debe ser conservada. A primera vista, se podría pensar que debería ser la última versión, que fue hecha o autorizada por el artista. No obstante, la práctica de re-creación, o en muchos casos de reconstrucción, de las obras es el resultado no sólo de la obsolescencia del equipamiento técnico. A veces los mismos artistas encuentran nuevos significados que los llevan a reinterpretar sus obras en diferentes etapas de su carrera a medida que las re-exhiben. En el arte puede haber cambios de significado, causados por la variabilidad del medio sociocultural o también por hábitos e intereses de los espectadores. Por lo tanto, en términos de Zoltán Szegedy-Maszák sería “imprudente e insensible” para el autor no explorar esta posibilidad (SZEGEDY-MASZÁK, 2015).

Un ejemplo que ilustra la re-creación es la obra basada en internet “*Criptograma*”⁴⁴ (1996) de Szegedy-Maszák, que convierte texto en esculturas virtuales y vice-versa. La primera versión de *Criptograma* fue exhibida en Budapest en 1996. La instalación invitaba a los visitantes a escribir en el espacio tridimensional, creando un *Criptograma* comunitario como una especie de libro de visitas encriptado, al cual se podría acceder a través de un sencillo sistema de realidad virtual. Una de las razones por las que Szegedy-Maszák desarrolló una versión web del *criptograma* era que en ese momento (enero de 1996), las cuestiones tales como la criptografía, la privacidad, la libertad de expresión y la censura eran temas de actualidad entre la comunidad en red. La versión de Internet de *criptograma* representó una respuesta artística a estas discusiones y actividades.

Cabe destacar que, debido al continuo cambio del mundo del software y hardware, es imposible desechar una pieza de Web Art declarándola “terminada”. Cualquier sitio web que quiera mantener el interés de los usuarios a veces tiene que ir cambiando para brindar algo “nuevo”. Al mismo tiempo, el rápido desarrollo tecnológico de Internet constantemente fuerza a los artistas “net” a estar en un estado de cambio, poniendo a prueba nuevos software en este entorno donde la emergencia de nuevas tecnologías y software pueden conducir a resultados sorprendentes.

⁴⁴ <http://www.c3.hu/criptogram/>

1.6. El concepto de autenticidad

Como se mencionaba en la Introducción, el concepto tradicional de *autenticidad* de la obra de arte difícilmente puede aplicarse a la conservación/restauración de arte contemporáneo (WEYER, 1995; FISKE, 2006; JOKILEHTO, 1985). La *autenticidad* no se refiere a los materiales utilizados en la conservación-restauración, sino al objeto restaurado. El objetivo es la preservación no falsificada de un objeto, generalmente entendido como una obra de arte, aunque en textos más recientes también incluye a objetos del patrimonio cultural. Avanzando en el tiempo esa recuperación material no exclusivamente original se orienta hacia la recuperación de valores no materiales: simbólicos, culturales, históricos, artísticos. La teoría de la restauración orientada hacia el arte tradicional (BOITO, 1883; Carta de Atenas⁴⁵, 1931; BRANDI, 1977) asume que la condición auténtica también requiere autenticidad del material y de las técnicas de oficio, por lo menos en gran medida. Esta idea ha prevalecido en la formación de los restauradores, enseñándoles a respetar el original y a conservar las partes como el todo.

No obstante, este paradigma no se cumple en muchas obras de arte contemporáneo, en especial en el arte de la instalación. Como se explicó anteriormente, en un futuro los criterios de autenticidad no serán válidos para intervenir las instalaciones de Media Art, dada la obsolescencia de los componentes industrializados que ya no se producirán, como televisores, pantallas, y lámparas, o las formas de almacenamiento de datos como discos, chips o los propios sistemas operativos. Los nuevos conceptos de originales se renuevan, y los materiales ya no son importantes, sino que son usados para transmitir una idea. Esto último puede verse en la definición extendida del arte, de Joseph Beuys. Se pretende dar al observador “*una experiencia estética tan auténtica como sea posible en lugar de un objeto de arte tan auténtico como sea posible*”⁴⁶. Para dar al receptor una posibilidad suficiente de experiencia o para que ésta sea posible una y otra vez, se requiere entender la fidelidad de la obra. Esa fidelidad a la experiencia pretendida por la obra de arte, o al menos la mayor cercanía a ella, puede dar lugar a una amplia gama de interpretaciones válidas; se puede ver en la música y el teatro y, de la misma manera, en la *reinstalación* de una instalación.

Por su carácter efímero y su lenguaje conceptual, la instalación es un tipo de obra de arte que plantea muchos cuestionamientos en cuanto a su conservación y exhibición. Por un lado, la ubicación en el espacio es determinante y suele tener un papel relevante en la transmisión del significado de la obra, siendo un factor a tener en cuenta al momento del montaje de exhibición.

⁴⁵ Carta de Atenas, 1931. Disponible en:
http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/guatemala_carta_de_atenas_1931_spa_orof.pdf

⁴⁶ WEYER, 2006, p. 44.

Por otro lado, el hecho de que muchas veces poseen elementos efímeros, llevan al restaurador a optar por la sustitución de piezas y, por ende, a entrar en el terreno de la autenticidad de la obra. Volviendo a lo que se explicaba más arriba en la documentación de instalaciones, en vez de conservar el objeto como tal, se deberá conservar su idea reflejada en el proyecto como obra de arte, y esta idea es eternamente durable. La obra podría ser presentada infinitas veces como reproducción de la original, cuando por original se entiende la idea proyectada (TEXEIRA, 2009). Es decir, la obra es siempre la misma, incluso con diferentes materiales.

La relación entre autenticidad e intención del artista en algunos casos del arte contemporáneo se encuentra en medio de profundas contradicciones (SORALUZE HERRERA, 2006), puesto que *“la intención del artista y autenticidad luchan por prevalecer hegemoníamente en el tratamiento a realizar. Sin embargo, la obediencia a uno de los factores solicita un acercamiento a priori de los valores de antigüedad, histórico y novedad...”*⁴⁷. Existen obras en que prevalece la autenticidad material de la obra, como los son los objetos de valor histórico-artístico. En otros casos, en obra contemporánea, la intención del artista prevalece ante todos los otros valores. Esto da pie a cuestionar casos en los que el artista no está presente, o casos en los que el artista vivo ve su obra deteriorarse y pretende rehacerla porque ésta perdió su función. Para cualquier caso, se requiere una evaluación de la toma de decisiones.

Por último, volviendo a los aficionados y el posible riesgo de atentar contra la integridad de la obra surge la siguiente pregunta ¿Cualquiera puede hacer lo que quiere con una obra, incluso atentando contra los originales? Ippolito hace una diferenciación entre lo analógico y lo digital. Por ejemplo, en el Partenón, un friso de mármol o está en el Partenón o está en el museo Británico. En lo analógico, se tiene uno u otro. Pero en los medios digitales se pueden tener ambos. Se puede tener el original y la nueva versión. En cuanto al riesgo de que los aficionados utilicen las réplicas 3D para cualquier cosa, se podría criticar entonces a los museos que utilizan imágenes de obras para vender en la tienda de recuerdos. En este sentido, el uso de la imagen de obras de arte para potenciar la continuidad del museo en casa del visitante está totalmente asumido a partir del momento en que los museos salieron al mercado.

⁴⁷ SORALUZE HERRERA, 2006, p. 168.

1.7. Referencias

- AGÜERA Y ARCAS, Blaise "How Photosynth can connect the world's images," TED2007, Marzo 2007. Disponible en:
https://www.ted.com/talks/blaise_aguera_y_arcas_demos_photosynth
- AUSLANDER, Philip. "Vito Acconci and the Politics of the Body in posmodern Performance". En: *After the Future: posmodern Times and Places* (Gary Shapiro. ed.). Albany: State University of New York Press, 1990.
- BAXANDALL, M. "Modelos de Intención" Madrid: Blume, 1989.
- BISHOP, Claire. "But is it installation art?" *Tate Etc.* issue 3: Spring 2005. 1 de enero de 2005.
<http://www.tate.org.uk/context-comment/articles/it-installation-art>
- BISHOP, Claire. "El arte de instalación y su herencia". En: Ramona. *Revista de artes visuales*. N°78. Marzo, 2008.
- BRANDI, Cesare "Postilla teórica al trattamento delle lacune" En: *Teoria del restauro*. Torino 1977, pp. 71-76.
- BRETON, André y ELUARD, Paul. *Dictionnaire Abrégé du Surréalisme*, 1938, p. 23.
- BOITO, Camillo. "Prima Carta del Restauraio" III Conferencia de Architectos e Ingenieros civiles de Roma, 1883.
- CARREÑO, F. P. "«Institución-arte» e intencionalidad artística" *Enrahonar: quaderns de filosofia*, N. 32-33, 2001, pp. 151-167.
- CASTELLS, Manuel. *La era de la información. Vol 1: Economía, sociedad y cultura. La sociedad red*. Mexico: Alianza Editorial, 2005
- CAVELL, S. "Must We Mean What We Say?" Cambridge: Cambridge University Press, 1976.
- CHRISTIANE, Paul. "Digital Art" Thames & Hudson, 2006
- CIRELLUEGO, Lourdes. "Lo digital en el arte". Madrid: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, 2006.
- Consultative Committee for Space Data Systems. (2012). *Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS)*. Washington, DC: CCSDS Secretariat, p. 1-1. Disponible en:
<http://public.ccsds.org/publications/archive/650x0m2.pdf>
- COPESTAKE, Jen. "Saving digital art from an early death at the ZKM museum". Artículo de BBC Click. 22 de octubre de 2013. Recuperado de: <http://www.bbc.com/news/technology-24585267>
- CORCHO GÓMEZ, Inmaculada. "Los orígenes del arte del siglo XX" Documento de Internet E-excellence biblioteca virtual ISBN-84-9714-i. 025-7 18/07/2008
- DEPOCAS A. et al. "Permanence through change: the variable media approach" New York: Guggenheim Museum, 2003, pp. 47-53.

DICKIE, G. y WILSON, W.K. "The Intentional Fallacy: Defending Beardsley" *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 1995, 53 (3), p. 233-249

FISKE, T. "Authenticities and the Contemporary Artwork, or Between Stone and Water" En: Timm, I. (ed.) *VDR-Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut*. Verlag Schnell & Steiner GmbH, 2006. pp. 34-40.

FORMAGGIO, D. "Arte". Barcelona: Labor. 1976.

GANZERT-CASTRILLO, E. (Museum für Moderne Kunst, Frankfurt, 1996) "Archiv für Technik und Arbeitsmaterialien zeitgenössischer Künstler" Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1979.

GRAU, Oliver. "Media Art Histories". Cambridge: MIT-Press. 2007.

GRAU, Oliver. "Virtual Art: From Illusion to Immersion". Cambridge: MIT Press. 2003.

GUTIÉRREZ GÓMEZ, Alba Cecilia "La instalación en el arte contemporáneo colombiano" En: *El Artista*. Número 6/diciembre de 2009. ISSN: 1794-8614

FAUCONNIE, S y FROMMÉ, R. "Capturing Unstable Media" Marzo de 2003. Disponible en: http://v2.nl/files/2003/publishing/articles/capturing_summary.pdf

HIRSCH, E.D. "Validity in Interpretation" New Haven & Londres: Yale University Press, 1967

HOBSBAWM, Eric. "The Age of Extremes". New York: Abacus/Time Warner, 2002.

HOFMAN, Vanina. "Album inestable. Un acercamiento a la conservación del arte electrónico" En: *Arte electrónico. Entornos cotidianos*. Vanina Hofman (coord.) Colección Papers per a Debat, nº 5. Sabadell: FUNDIT; Escuela Superior de Diseño ESDi, 2007, p. 97.

HUENE, Stephan von. "Split Tongue, Texts & Interviews". Hirmer: Múnich, 2012. p. 169.

IPPOLITO, J. "Wagging the long tail of digital Preservation" conferencia para Digital Archiving conference, organizado por el ZAK, Zentrum für Angewandte Kulturwissenschaft und Studium Generale, Karlsruhe Institute of Technology. Alemania, 14 de noviembre de 2014. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=1ReKENbhsuw>

IPPOLITO, J. "Trusting Amateurs with Our Future" En: *A Companion to Digital Art* Christiane Paul, ed. (Hoboken: Wiley Blackwell) Publicado online: 5 de marzo de 2016
DOI: 10.1002/9781118475249.ch25

ISEMINGER, G. "Intention and Interpretation" Temple University Press, 1992.

JOKILEHTO, J. "Authenticity in Restoration Principles and Practice" En: *APT* 17, 1985, No. 3-4, pp. 5-11.

KUSPIT, Donald. "Arte digital y videoarte: Transgrediendo los límites de la representación". Madrid: Círculo de Bellas Artes, 2006.

MARCOS, Mari Carmen "La Mediateca de la Fundación de la Caixa" *El profesional de la información*, v. 12, n. 6, noviembre-diciembre 2003. Disponible en: <http://www.elprofesionaldelainformacion.com/contenidos/2003/noviembre/13.pdf>

- MILICUA, J. et al. *Historia Universal del Arte- Arte S. XX - VV- IX*. Editorial Planeta, 1994.
- MUÑOZ MORCILLO, J. et al. "e-Installation: Synesthetic Documentation of Media Art via Telepresence Technologies, En: Boştenaru Dan, Maria; Crăciun, Cerasella (eds.): *Space and Time Visualisation*. Springer Nature, 2016, pp. 173-191.
- MUÑOZ-VIÑAS, S. *Teoría contemporánea de la Restauración*. Madrid: Editorial Síntesis. 2003
- NEGRI, Juan Javier. "Los límites entre arte y derecho" Artículo del diario *Página 12*, martes 24 de julio de 2012. Recuperado de:
<https://www.pagina12.com.ar/diario/suplementos/espectaculos/6-25929-2012-07-24.html>
- PÉREZ-DE-CELIS, M. et al. "Arte de Nuevos Medios: La importancia de la documentación técnica en su Conservación y Mantenimiento" *Conservación de arte contemporáneo: 9ª Jornada: Febrero 2008*, ISBN 978-84-8026-379-5, págs. 179-188.
- PAUL, Christiane. "Digital Art". New York: Thames and Hudson world of Art, 2003.
- PAUL, Christiane. "New Media in the White Cube and Beyond: Curatorial Models for Digital Art". University of California Press, Berkeley, CA, 2008.
- POPPER, Frank. "L' art à l' âge électronique" Paris: Hazan Eds. 1993
- RINEHART, R. e IPPOLITO, J. "Re-Collection. Art, New Media, and Social Memory" The MIT Press. Cambridge, Massachusetts. London, England. 2014.
- ROTHENBERG, Jeff "Avoiding Technological Quicksand: Finding a Viable Technical Foundation for Digital Preservation" 1998 (1/99, 35 pp) ISBN 1-887334-63-7
- RUSH, Michael. "New media in Art" EEUU: Thames and Hudson world of Art, 2005
- SÁNCHEZ ARGILÉS, Mónica. "La instalación, cómo y por qué. Claves y pistas para entender su desarrollo en España" Artículo en *El Cultural*. 26/06/2009.
<http://www.elcultural.com/revista/arte/La-instalacion-como-y-por-que/25543>
- SMITH, Terry. "Qué es el arte contemporáneo" Buenos Aires: Siglo Veintiuno Editores, 2012.
- SORALUZE HERRERA, Ioseba Imanol. Tesis doctoral: *La conservación de los objetos artísticos contemporáneos: degradaciones, criterios de actuación y tratamientos de restauración*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- SZEGEDY-MASZÁK, Zoltán. "Reconstruction or Interpretation?" Conference in MAPS. Media Art Preservation Symposium. Budapest, 7 y 8 de Diciembre 2015.
- TEIXEIRA, J. C. M. "La creación contemporánea además de la materialidad. Los artistas y los límites en la conservación y restauración del arte contemporáneo" Facultad de Bellas Artes Departamento - Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- THE GETTY CONSERVATION INSTITUTE. "Modern and Contemporary Art Research Initiative". http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/modcon/overview.html
- WEYER, C. "Die Authentizität in der Restaurierung moderner Kunst" En: *Kunsthistoriker, Mitteilungen des österreichischen Kunsthistorikerverbandes*, 11/12, 1994/1995.
- WEYER, C. "Restoration Theory applied to Installation Art" Foundation for the Conservation of Contemporary Art, Mayo 2006.

WOLFF, R. "Keeping New Media New: Conserving High-Tech Art" Artículo en: Art News. Disponible en: <http://www.artnews.com/2013/10/23/keeping-new-media-new/> 23 de octubre de 2013.

WOLLHEIM, R. "El arte y sus objetos", Barcelona: Seix Barral, 1972

WOLLHEIM, R. "La pintura como un arte" Madrid: Visor, 1987.

Capítulo 2

DOCUMENTACIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE BIENES CULTURALES

2.1. Los bienes culturales

2.1.1. Lo cultural

Históricamente, la palabra cultura ha tenido varias acepciones. García Canclini explica el término cultura en contraposición a tres referentes distintos, y en relación a diferentes momentos de la historia: *cultura-civilización*; *cultura-naturaleza*; y *cultura-sociedad* (GARCÍA CANCLINI, 2004).

La primera distinción fue elaborada por la filosofía alemana a fines del siglo XIX y principios del XX. Según esta corriente, un trozo de mármol sería un objeto de civilización porque fue extraído de una cantera, implicando técnicas para convertir una materia prima en un producto civilizatorio. Pero ese mismo mármol, si está tallado por un artista, agregándole un valor de belleza, se transforma en una obra de arte, es decir, se transforma en cultura. Este enfoque ha sido fuertemente criticado ya que establece una división entre lo material y lo espiritual, y, por lo tanto, la división de grupos sociales que se dedican a una u otra dimensión. Además, tiene un carácter etnocentrista, en cuanto a que los conocimientos y los gustos que valdrían la pena difundir son los de Occidente moderno, concentrada en un área euronorteamericana. En esta filosofía idealista también se basa el uso actual cotidiano del término cultura, para referirse al cúmulo de conocimientos y aptitudes intelectuales y estéticas de una persona.

Frente a este uso, surgió un conjunto de usos científicos, que se caracterizaron por separar la cultura en oposición a otros referentes. Las dos principales confrontaciones a que se somete el término son *naturaleza-cultura* y *sociedad-cultura*. La primera diferenciaba lo creado por el hombre (tecnología, economía, religión, moral, arte), de lo natural en el mundo. Aunque esta definición de cultura parecía demasiado simple y muy extensa, sirvió, por un lado, para distinguir lo cultural de lo genético, y por otro, para superar el etnocentrismo. En este sentido, ayudó a combatir la discriminación y descalificación hacia algunos grupos sociales.

La segunda confrontación, *sociedad-cultura*, tratada por autores como Ralph Linton y Pierre Bourdieu, nace a mediados del siglo XX. Según Jean Baudrillard, la sociedad está estructurada con cuatro tipos de valores: valor de *uso*, valor de *cambio* (ambos del esquema marxista), y agregaba valor *signo* y valor *símbolo* (BAUDRILLARD, 1982). Esta clasificación permite diferenciar lo socioeconómico de lo cultural. Las dos primeras clases de valor tienen que ver principalmente con la materialidad del objeto, con la base material de la vida social. Por el contrario, las dos últimas se refieren a la cultura, a los procesos de significación. Pierre Bourdieu establece esta diferenciación entre cultura y sociedad, al mostrar que la sociedad está estructurada con dos tipos de relaciones: las de *fuerza*, correspondientes al valor de uso y de cambio, y las relaciones de *sentido*, que organizan la vida social, las relaciones de significación (BOURDIEU, 1990). El mundo de las significaciones, del sentido, constituye la cultura. “*Se puede afirmar que la cultura abarca el conjunto de los procesos sociales de significación, o, de un modo más complejo, la cultura abarca el conjunto de procesos sociales de producción, circulación y consumo de la significación en la vida social*”⁴⁸

2.1.2 Patrimonio, identidad y bien cultural

Podemos decir que el Patrimonio Cultural es el conjunto de bienes materiales e inmateriales, que manifiestan el paso del tiempo de un grupo humano y que refuerzan su identidad frente a otros grupos. Esta dimensión identitaria es analizada por Arrieta Urtizbera, al establecer diferentes dimensiones del “valor cultural” del patrimonio (ARRIETA URTIZBEREA, 2008). El elemento cultural es valorizado y seleccionado por los grupos sociales porque simboliza su identidad. Símbolo del «nosotros», es el fundamento principal del patrimonio cultural y, por lo tanto, objetivo de las acciones encaminadas a garantizar su conservación, restauración o rehabilitación.

Desde la perspectiva de su materialidad patrimonial, los múltiples aspectos en los que se plasma la cultura de los grupos sociales, como sus relaciones sociales, ritos, ceremonias o comportamientos, es decir, los sistemas de valores y creencias se revelan en el "monumento histórico" que es el condensador físico de esos elementos, revistiéndose de un elevado valor simbólico (GONZÁLEZ VARAS, 2006). El reconocimiento de este valor, hasta el punto de identificar a una cultura por el conjunto de sus monumentos, fue un proceso occidental que culminó en el siglo XIX. Sin embargo, este tipo de identificación hizo que se postergara el interés por una multitud de objetos dotados de una capacidad documental como testimonios de cultura, y, como tales, igualmente insustituibles. Fue necesario, entonces, superar o completar el concepto de monumento para lograr integrar a todos estos objetos, dando lugar a la formulación, durante la segunda mitad del siglo XX, del concepto de "bien cultural".

⁴⁸ GARCIA CANCLINI, 2004, p. 34.

A partir de las huellas de la presencia humana, se puede reconstruir la cultura desarrollada por un grupo en un determinado territorio, en cuanto estos signos brindan información sobre el conjunto de los comportamientos adoptados por el hombre en relación con su realidad circunstante. Estos signos son considerados un "bien" que es necesario salvaguardar. El concepto de bien cultural es entendido como cualquier manifestación o testimonio significativo de la cultura humana. Al ser un concepto amplio, supera todos los conceptos precedentes como "monumento", "obras de arte", "antigüedades" o "documentos históricos", que no son desechados, pero serán incluidos en este concepto mucho más global. El término "bien cultural" es el más actual, aunque en muchas ocasiones es sinónimo de "patrimonio histórico o "patrimonio cultural".

El Patrimonio Cultural como producto de la creatividad humana, se hereda, se transmite y se modifica de individuo a individuo y de generación a generación. Estos bienes deben ser protegidos, conservados y difundidos como expresión de la identidad cultural de una sociedad.

La preservación y puesta en valor en Argentina de nuestro Patrimonio Cultural ha crecido en la escala de prioridades y para poder perpetuar este legado, además de estudiarlo y conservarlo, es necesario darlo a conocer, difundirlo. Con el aporte de las nuevas tecnologías con las que cuenta la sociedad actual la digitalización de los patrimonios culturales abre inmensas posibilidades para esta tarea. En este contexto también es importante el rol del museo y su evolución en los últimos cien años. Se trata de definir al museo ya no como un templo sagrado al que sólo accedía una elite ilustrada y con suficientes recursos económicos para coleccionar, sino como un espacio que evoluciona conforme pasa el tiempo. En los últimos años, con Internet y los nuevos medios de difusión de la información, han aparecido nuevos tipos de museos, visitables virtualmente. A los usuales consumidores de museos se han añadido nuevos públicos, con nuevas demandas. Todas estas innovaciones se han manifestado en nuevos espacios de comunicación e iniciativas culturales.

La aplicación de nuevas tecnologías al patrimonio cultural abarca mucho más que el proceso de conservación, digitalización y catalogación de los objetos y obras de arte, más bien abre un nuevo mundo de posibilidades para facilitar el acceso real a los bienes culturales.

Por otro lado, la contribución de nuevas tecnologías en la documentación de obras de arte contemporáneo está teniendo un impacto creciente y en muchos casos impacta directamente en la propia creación de la obra de arte. Como un ejemplo, los métodos de adquisición 3D posibilitan una interacción distinta con la obra de arte permitiendo registrar aspectos de relevancia puestos de manifiesto por el artista. Por otro lado, el registro de imágenes en 3D puede intervenir también en el proceso de creación de la obra y en la inserción de las colecciones en espacios interactivos.

Entre las tecnologías que más impacto están teniendo en patrimonio cultural podemos mencionar en forma creciente las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) y las fotónicas. Entre las aplicaciones más destacadas de estas tecnologías se pueden mencionar

- Sistemas informáticos estandarizados y públicos para inventariado, catalogación y difusión de actividades (páginas web, blogs, Facebook, twitter, etc.)
- Registro en 3D para reconstrucción digital, que permite reconstruir digitalmente con exactitud objetos perdidos o deteriorados, y analizar y restaurar piezas
- Museos virtuales
- Realidad virtual y realidad aumentada

2.2. Los sistemas de documentación y las TICs

Antes de empezar a hablar del aporte de las nuevas tecnologías para la conservación de los bienes culturales, es importante mencionar la metodología de la gestión de colecciones o manejo de colecciones. Es una actividad que involucra, a partir del objeto, todas las diferentes variables sobre el mismo: su registro e inventario, documentación, conservación, custodia, investigación, seguridad y difusión. La gestión o el manejo integral de colecciones, implica la implementación en todos los estamentos de una institución museística, de una práctica de gestión basada en una filosofía de la institución, correspondiente a la misión, visión y mandato que un museo determine para sí misma. (MARTÍNEZ SILVA, 2009).

También resulta pertinente definir el concepto de documentación. Bravo Juega hace una distinción entre los conceptos "documentación" e "investigación". La documentación es la ciencia que a través de unas técnicas llamadas documentales (coleccionar, ordenar, clasificar, recuperar y difundir), tiene como fin, hacer accesible el contenido de las fuentes de conocimiento. Mientras que la investigación sobre las colecciones es la profundización en el conocimiento de los fondos, y su especialidad. Los objetivos de ambos procesos difieren: la primera pretende recuperar la información, la segunda, conocer las colecciones en el ámbito de su especialidad, aunque el fin último común sea la difusión del conocimiento (BRAVO JUEGA, 1997).

En esta tesis se utilizará el término *documentación* como sinónimo de *registro*⁴⁹. La puesta en valor de bienes culturales tiene relación directa con la información conocida de ellos: es indispensable un registro con información textual y visual. Las instituciones tienen la obligación de mantener un registro de los objetos que ingresan temporalmente como los que forman parte

⁴⁹ No se confunda esta utilización del término registro con el número de registro propio de la documentación y seguimiento geográfico del bien.

de su colección permanente, con el fin de conocerlos y conservarlos. Así, la fotografía documental permite la identificación directa de los objetos, contribuye a evitar su manipulación permanente e innecesaria, permite el análisis comparativo de objetos similares y resuelve posibles conflictos jurídicos (MARTÍNEZ SILVA, 2009). Sin embargo, como se tratará en esta tesis, muchas veces este tipo de registro tradicional no alcanza, especialmente cuando se trata de obras de arte de instalación o Media Art.

La documentación o registro de un bien cultural será para el conocimiento de la comunidad sobre lo que se tiene, y permitirá la realización de los estudios pertinentes necesaria para la conservación de estos bienes. El registro de bienes culturales tiene dos tipos de usuarios: los internos a la institución, que son los conservadores, museólogos, restauradores, técnicos y profesionales que trabajan allí y que son responsables de intervenir en el registro o base de datos, o hacer uso del mismo; y el externo, el cual tradicionalmente se limita a los investigadores que utilizan la base de datos –previa autorización- para su trabajo profesional. Pero los miembros de la comunidad también deben participar activamente en la conservación de bienes culturales, por lo tanto, también tienen derecho a usar los instrumentos de las instituciones para preservar dichos bienes. Así, el registro de bienes culturales se convierte en un instrumento fundamental para brindar acceso a los bienes de parte de la comunidad, como usuarios externos. Es importante entonces que la información en el registro sea comprensible, dinámica y atractiva para el uso del público general, personas no calificadas y de diversas áreas de interés, como pueden ser el sector educativo, el público general, o el sector del turismo (DECARLI y TSAGARAKI, 2006).

Un ejemplo relevante sobre cómo se puede hacer un registro con las características mencionadas es la experiencia desarrollada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH-Conaculta, México) que puso en operación el Sistema Único de Registro Público de Monumentos y Zonas Arqueológicas e Históricas⁵⁰. Esta base de datos permite la inscripción de los bienes culturales desde cualquier punto de la República Mexicana a través de Internet, y sirve para la organización y clasificación de la totalidad del patrimonio cultural del país. El sistema unifica criterios técnicos y académicos para el registro de los bienes culturales, información que antes se encontraba dispersa en bases de datos heterogéneas. De esta manera, el registro del patrimonio —una de las tareas sustantivas que lleva a cabo el INAH— se estandariza y concentra en un sistema de fácil acceso y utilización. “*El Sistema Único de Registro de Monumentos y Zonas Arqueológicas e Históricas dará a los mexicanos la oportunidad de consultar los datos ordenados y estandarizados sobre el patrimonio cultural tangible*” dijo la arqueóloga Silvia Mesa, directora de Registro Público de Monumentos y Zonas

⁵⁰ <http://www.registropublico.inah.gob.mx>

Arqueológicos del INAH, en una entrevista para un artículo del INAH⁵¹. “Con esta iniciativa, el INAH reconoce la relevancia de reorganizar y modernizar las prácticas tradicionales de registro, implementando un programa de cobertura nacional que unifica criterios para garantizar una inscripción pública estandarizada del patrimonio cultural bajo su responsabilidad, lo que propiciará su conocimiento, protección, conservación y difusión”, concluyó la arqueóloga Mesa.

Otro caso que ejemplifica la forma en que un museo trabaja con ambientes digitales y el uso de internet es el Museo Metropolitano (MET), NY, EEUU. El MET es uno de los pocos museos que ha creado un amplio acceso online a todas las obras catalogadas. También utiliza marketing por correo electrónico y programas de medios sociales que proporcionan contenidos y experiencias interactivas. Más de un millón de fans, seguidores y suscriptores interactúan con el MET diariamente por Facebook, Twitter, Flickr, Tumblr, ArtBabble, iTunes U, y YouTube. El MET es también miembro fundador del Google Art Project, que atrae a la audiencia más amplia de Internet de Google directamente a sus galerías y colecciones (CAMPBELL y RAFFERTY, 2011).

2.2.1. Los metadatos y los repositorios digitales

Los documentos electrónicos, a fin de ser fácilmente recuperados, compartidos y utilizados por diferentes usuarios y para diferentes propósitos, deben estar descritos siguiendo esquemas y reglas comunes, por ejemplo, especificaciones/normas y metadatos. El término metadatos, es decir, datos acerca de los datos, se refiere a datos que describen otros datos. En general, un grupo de metadatos es un grupo de datos que describen el contenido informativo de un objeto al que se denomina *recurso* (SENSO y DE LA ROSA PIÑEIRO, 2003). Otra clase de definiciones trata de precisar el término como descripciones estructuradas y opcionales que están disponibles de forma pública para ayudar a localizar objetos (BULTERMANN, 2004).

Los metadatos han cobrado gran relevancia en el mundo de Internet, por la necesidad de clasificar la enorme cantidad de datos. Además de la clasificación, los metadatos pueden ayudar en las búsquedas. Europeana⁵², Wikipedia y Google Projects son ejemplos de iniciativas a gran escala de repositorios digitales atractivos para los usuarios (KRASSIMIRA et al., 2012). Europeana se focaliza en almacenar datos de instituciones europeas, entre las que figuran museos, universidades y bibliotecas; Wikipedia, como un servicio Web 2.0⁵³, tiene contenido

⁵¹ “INAH estrena nuevo sistema de registro de bienes culturales” Recuperado de: <http://www.inah.gob.mx/es/boletines/786-inah-estrena-nuevo-sistema-de-registro-de-bienes-culturales>. Viernes, 11 de Marzo de 2011.

⁵² <http://www.europeana.eu/portal/en>

⁵³ Web 2.0 o también llamada Web social. La etiqueta 2.0 viene siendo empleada para designar a una nueva generación de servicios web que comparten una misma filosofía, unos mismos principios. Pero

generado por los usuarios; y Google Projects representa más el enfoque de una compañía tecnológica, proporcionando servicios web, como Google Books, Google Earth, Google Art Project, etc.

La idea de Europeana nació en 2005, cuando la *European Commission* quiso promover y apoyar la creación de una biblioteca digital europea. El objetivo era que los recursos de información europeos fueran más fáciles de usar en un entorno online y que se combinaran ambientes multiculturales y multilingües con avances tecnológicos. Así, en noviembre de 2008 se lanzó Europeana.eu. Hasta ahora tiene en disponibilidad más de 19 millones de elementos digitales (Imágenes: pinturas, dibujos, mapas, fotos e imágenes de objetos de museo; Textos: libros, diarios, cartas, y papeles de archivo; Sonido: música, grabaciones de cintas, discos y radio; Videos: películas, noticieros y programas de televisión). Actualmente, en Europeana hay 108 socios de 23 países, y nuevos proyectos relacionados a la creación de *aggregators*⁵⁴ de artefactos digitales regionales y locales. Así, por ejemplo, MICHAEL76 (2004-2008) y MICHAEL+ (2006-2009) están asociados con los *aggregators* de Europeana, proporcionando descriptores multilingües de recursos digitales. Europeana llegó a casi 49 millones de objetos en enero de 2016, superando claramente el objetivo global de 30 millones de artículos a finales de 2015. El avance de los objetos sonoros y audiovisuales ha sido más lento, pero el objetivo del 2015 prácticamente se ha alcanzado (98%)⁵⁵. Los porcentajes de cumplimiento de los objetivos individuales varían entre los Estados Miembros, pero en general el esfuerzo de éstos ha sido alto. Sin embargo, los Estados miembros hacen hincapié en la importancia de considerar los problemas de calidad junto con la cantidad y siguen reportando iniciativas para alentar a las instituciones culturales a que sus materiales digitalizados de dominio público estén disponibles en Europeana.

La Fundación Wikimedia es una organización no gubernamental sin fines de lucro. Wikipedia es uno de sus proyectos, *que consiste en una enciclopedia de contenido libre que reúna todo el conocimiento humano en nuestro idioma, comenzado el 20 de mayo de 2001 y que ya cuenta con 1.283.035 artículos*. Wikipedia crece cada día gracias a la participación de voluntarios de todo el mundo. Es el mayor proyecto de recopilación de conocimiento jamás realizado en la historia de la humanidad⁵⁶. En la actualidad, hay más de 82 000 colaboradores activos y trabaja en artículos en más de 270 idiomas. Con sus 365 millones de lectores, 18 millones de artículos

también se utiliza el mismo término para designar una web construida para la gran masa de usuarios. Las características de estas web sociales son la colectividad de la información compartida y la arquitectura de la participación. (ARROYO VÁZQUEZ, 2014)

⁵⁴ Aggregator: Una página de Internet o programa que colecta artículos relacionados en contenido y los muestra o los linkea.

⁵⁵ *Cultural heritage Digitization, online accessibility and digital preservation*. REPORT on the Implementation of Commission Recommendation 2011/711/EU 2013-2015

⁵⁶ <https://es.wikipedia.org>. Consultado el 13 de septiembre de 2016.

(más de 3,6 millones en inglés) y 281 ediciones en diferentes idiomas Wikipedia es la mayor y más popular obra de consulta general en internet. Es un buen ejemplo de servicio web 2.0, en conjunto con YouTube, MySpace y Facebook. Algunos han señalado la importancia de la Wikipedia no sólo como una referencia enciclopédica, sino también como una fuente de noticias que se actualiza con frecuencia. Una investigación en la revista Nature en 2005 (GILES, 2005) encontró que los artículos científicos que compararon se acercaban al nivel de precisión de la Enciclopedia Británica y tenía una tasa similar de errores graves. Por otro lado, muchas instituciones dedicadas a los bienes culturales están utilizando Wikipedia para promover sus colecciones.

Para mencionar el último ejemplo, Google Arts & Culture⁵⁷ es un sitio web del Instituto Cultural de Google que presenta una recopilación de imágenes en alta resolución de obras de arte expuestas en varios museos del mundo, así como un recorrido virtual por las galerías en las que se encuentran. El proyecto se inició en 2001, con Google Art Project. Al principio contaba con 1061 obras de diecisiete museos, entre los que se encuentran el Tate Britain de Londres, el MET de Nueva York y la Galería Uffizi de Florencia. El 17 de julio de 2016, el proyecto fue relanzado como Google Arts & Culture, el cual incluye una aplicación móvil que permite acceder a los contenidos de más de mil museos en 70 países.

2.2.2. Situación en Argentina

En Argentina no existe en este momento un sistema único de inventario de las colecciones museológicas que combine diferentes tipos de patrimonio y diferentes usos: conservación, educación, investigación, etc.; aunque sí existe un sistema de registro nacional, el Servicio Nacional de Inventarios de Patrimonio (SeNIP)⁵⁸, que ofrece acceso a información sobre los bienes culturales registrados de acuerdo con sus especificidades y tipologías. Pero el acceso a esta información es bastante incompleto, precario y poco atractivo para el público, y además posee limitadas imágenes de los objetos y documentos. Actualmente, a través del SeNIP, se puede acceder a las bases de datos CONar (Colecciones Nacionales Argentinas) y MEMORar (fondos documentales históricos de museos).

La Dirección Nacional de Patrimonio y Museos es la encargada de validar los datos que se ingresan a estas bases. En la Tabla 1 se detallan los campos obligatorios para el ingreso de bienes culturales en la base CONar.

⁵⁷ <https://www.google.com/culturalinstitute/beta/?hl=es>

⁵⁸ <http://senip.gob.ar/>

- Nombre de la institución
- Número de inventario
- Nombre preferente/conjunto
- Colección
- Autor/fabricante/cultura - Nombre
- Autor/fabricante/cultura – Nombre de fábrica
- Título/título de la serie
- Descripción física – Aspecto
- Material – Nombre
- Técnica – Nombre
- Valores – Dimensiones
- Lugar de ejecución
- Fecha de ejecución
- Contexto cultural – Nombre Sitio
- Contexto estilístico – Tipo

Tabla 1. Campos obligatorios para el ingreso de bienes culturales en la base CONar.

Un sistema más completo y moderno requiere una extensa planificación para poder anticipar las necesidades de diferentes usuarios y su capacidad en el manejo de computación. Además, requiere por parte de las instituciones tener gente con capacitación previa en el manejo del lenguaje de digitalización de la información para poder satisfacer las diferentes necesidades.

La tecnología que se dispone sería suficiente para la ejecución de proyectos poco abarcativos o muy locales. Sin embargo, para un proyecto más integrado es recomendable tener bien estudiados diferentes datos (volúmenes de registro, posibilidades de tecnología, tiempo disponible, presupuesto, capacitación, modo de implementación y niveles de los diferentes usuarios).

Uno de los resultados del desarrollo de esta tesis fue la evaluación de distintas instituciones de la ciudad de Buenos Aires y de la ciudad de La Plata que albergan patrimonio cultural a fin de encontrar los nichos en los que la digitalización 3D de las colecciones resultaba relevante. Se puede concluir que muchas instituciones no actúan de la misma manera en cuanto al uso de los inventarios y la información de las obras. Por empezar, las formas de publicación de información son muy heterogéneas. Desde museos con recorridos virtuales en sus sitios web (el proyecto Argentina Virtual), hasta instituciones que no poseen un portal web, y los que hacen uso de éstas, difieren en cuanto a cantidad y tipo de información publicada. Un dato común a todas las instituciones es que no hacen público los trabajos de conservación y restauración de sus obras, cuando, como se decía anteriormente, la comunidad también debe tener acceso a este aspecto de los bienes culturales. No obstante, la seguridad también es un factor importante para planificar la difusión de las colecciones, por lo que se la deberá tener en cuenta. Los usuarios no especializados necesitan que la información sea previamente procesada (con imágenes, descriptiva y con resultados explicados) y con posibilidades de visitar la obra. La capacidad

tecnológica no es la causa principal por la cual no se crea un sistema de registro tan complejo, la falta de trabajo interdisciplinario que pueda plantear y llevar a cabo una propuesta de estas características también es un rasgo de las instituciones culturales.

2.3. El registro 3D

Como se mencionó en la introducción, el problema de las técnicas tradicionales de documentación de bienes culturales se centra en que requieren el contacto con el objeto, o se limitan a fotografías sin alta resolución y detalles, o dibujos a mano alzada de los originales. Estas técnicas implican falta de precisión en la reproducción y la eventual pérdida de información en la descripción. Los registros 2D además restringen las potenciales aplicaciones de los objetos patrimoniales, como su difusión e interacción con el público y los estudios de conservación y proyectos de restauración.

Es por esto que en los últimos años el uso de tecnologías para la adquisición de imágenes en 3D ha ganado una mayor atención por parte de los museos y arqueólogos (BOULANGER et al., 1998; PEZZATI y FONTANA, 2007). Un gran número de instituciones dedicadas a la investigación han trabajado en el modelado de esculturas (GUIDI et al., 2004; BERNARDINI, et al., 2002), la documentación y virtualización de sitios arqueológicos (LAMBERS et al., 2007; BALZANI et al., 2004), la clasificación automatizada de piezas (KAMPEL et al., 2007) y aplicaciones de visualización (ANDERSON y LEVOY, 2002). Además, la disponibilidad de imágenes en 3D abre la puerta a la reproducción virtual para fines didácticos y de visualización. Se pueden producir copias físicas de originales y los registros 3D también pueden servir para futuros proyectos de conservación como, por ejemplo, sistemas de embalaje y proyectos de restauración (CALLIERI et al., 2011).

Uno de los campos en los que el uso del 3D es estratégico es en la documentación: se ha empleado en pintura de caballete (WEI et al., 2005), esculturas de todo tamaño (SANSONI y DOCCHIO, 2005; TORRES et al., 2010), objetos y sitios arqueológicos y edificaciones enteras.

El uso de la imagen 3D con alta resolución permite además el registro de los deterioros que a simple vista no son detectables como grietas, cambios dimensionales o desprendimientos, además del registro de dimensiones a escala real de la totalidad del objeto o de cualquier segmento que el usuario quiera tomar sin necesidad de manipular la pieza.

Para evaluar los usos potenciales de los registros 3D, en el campo de los bienes culturales, se podría hacer una división entre datos 3D “renderizados⁵⁹” y “no renderizados” (DELLEPIANE, 2014). Estos conceptos serán tratados en profundidad en el siguiente capítulo, pero, en rasgos generales, el primer grupo de datos 3D estaría conformado por animaciones pre-computarizadas destinadas a fines de educación y de difusión, y el uso de renderizados interactivos para realidad virtual, realidad aumentada, cibermuseos, instalaciones virtuales, multimedia, etc. Dentro del segundo grupo, se podrían ubicar los modelos 3D para catálogos, producción de copias o usar los datos 3D para estudios de conservación y restauración. Con respecto a esta última aplicación, se podrían usar los registros 3D para realizar una restauración por computadora (PALMAS et al., 2013), el análisis de propiedades físicas: volumen, altura, superficie o centro de masa (SCOPIGNO et al., 2003), o el estudio científico de las piezas, por ejemplo en antropología o arqueología.

La restauración virtual es tal vez uno de las aplicaciones más avanzadas de los registros 3D, ya sean renderizados o no. Son simulaciones de intervenciones en el objeto, que evitan la manipulación de los fragmentos (CALLIERI et al., 2011). Las imágenes 3D, por otro lado, sirven para el diseño de construcción de las partes faltantes y de estructuras de soportes internos, así como también para la documentación de las intervenciones, mediante mapeos virtuales y dibujos automáticos por computadora.

Los antecedentes internacionales que se mencionarán a continuación presentan un panorama general sobre los estudios que se pueden realizar partiendo de una imagen tridimensional. Durante el desarrollo de este trabajo se ha podido experimentar con casi todas las aplicaciones mencionadas y utilizando software libre.

2.3.1. Antecedentes

En los museos más importantes del mundo ya se ha utilizado la tecnología de escaneo en 3D de obras de arte. En general estos trabajos han sido realizados por importantes grupos e instituciones dedicadas a la investigación: por ej. El *National Research Council of Canada* (NRC) ha trabajado en el Museo del Louvre de Paris, en los escaneos láser en 3D a color de tres pinturas de Renoir y un panel del Renacimiento (BLAIS et al., 2005) (Figuras 3, 4 y 5). En este caso se realizó el registro con el objeto de monitorear los cambios dimensionales y características de las obras tales como deformación o distorsión de las pinturas sobre tabla, datos de la capa pictórica como las pinceladas y craquelados y el grano de la madera.

⁵⁹ El render es una imagen digital que se crea a partir de un modelo 3D cuyo objetivo es dar una apariencia realista desde cualquier perspectiva del modelo. Este modelo 3D se somete a diversos procesos, que con el uso de técnicas como el texturizado de materiales y la iluminación, crean una serie de efectos ópticos que se asemejan a una situación específica en el mundo real. Estos conceptos serán tratados en profundidad en el siguiente capítulo.



Figura 3. Un sistema de seguimiento controla la posición de la pintura y genera de forma automática un patrón de rejilla. Cada cuadrícula indica con precisión las secciones que deben ser analizadas para minimizar la superposición. El sistema de seguimiento también registra la forma general de la pintura a una resolución de 200 μm . (Imagen de BLAIS et al., 2005).

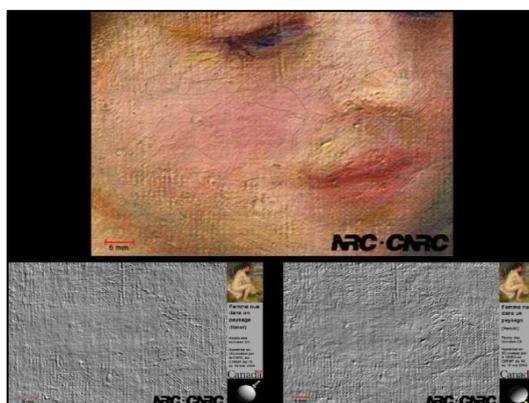


Figura 4. La imagen a color muestra craquelados. La imagen sombreada a blanco y negro de la misma zona muestran craquelados y el relieve del lienzo debido a una capa delgada de pintura. (Imagen de BLAIS et al., 2005).



Figura 5. El *High Resolution Color Laser Scanner* es montado en una plataforma de traslado con precisión para escanear secciones de la pintura de 4 x 20 cm. (Imagen de BLAIS et al., 2005).

El NRC también hizo el estudio del estado de conservación de la tabla de álamo de la Mona Lisa, junto al *Institute for Information Technology* (BLAIS et al., 2007), para documentar y medir con precisión la tabla deformada. Además, se pudieron detectar zonas de craquelados causados por re-enmarcados, una grieta de 12 cm, una línea de contorno que reveló un velo de

seda que ningún espectador había detectado antes y un área sobre la que se había realizado una restauración anterior (Figura 6).

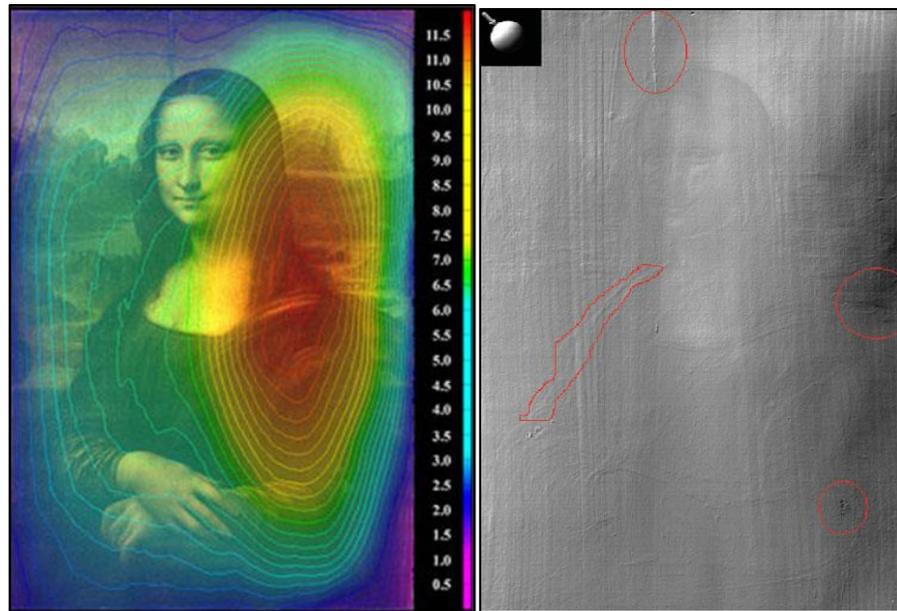


Figura 6. Estudio del estado de conservación de la tabla de álamo de la Mona Lisa. Izquierda: Mapa de color para ilustrar la forma general del panel. El área roja muestra una desviación convexa de 12 mm. Derecha: Gran parte del relieve se debe a la veta de la madera. Se aprecian zonas de craquelados, una grieta de 12 cm, una línea de contorno que revela velo de seda y un área de restauración anterior. (Imágenes de BLAIS et al., 2007).

Otro importante grupo dedicado a la investigación del uso del 3D en bienes culturales es el *Gruppo Beni Culturali* del *Consiglio Nazionale delle Ricerche* y el *Istituto Nazionale di Ottica Applicata*. Ellos diseñaron un sistema de scanner láser para realizar una imagen virtual de la Estatua de Minerva de Arezzo, que permitió el análisis de la posición original de uno de sus brazos (FONTANA et al., 2002) (Figuras 7 y 8).



Figura 7. Sistema de scanner láser para realizar una imagen virtual de la Estatua de Minerva de Arezzo. Scanner de línea láser, constituido por una cabeza óptica, montada en un trineo motorizado que permite la exploración de objetos tales como estatuas, relieves y detalles arquitectónicos. (Imagen de FONTANA et al., 2002).



Figura 8. Imagen virtual de la Estatua de Minerva de Arezzo. La imagen 3D digital permitió la realización de una aplicación de software capaz de visualizar las dos posiciones hipotéticas para el brazo derecho de la estatua. (Imágenes de FONTANA et al., 2002).

Los medallones de terracota de Giovanni da Maiano, del *Historic Royal Palace, Hampton Court Palace*, Inglaterra, son un ejemplo de lo que sería el uso imágenes en 3D para el monitoreo a largo plazo del estado de conservación, como procedimiento de rutina en una institución museológica. Los medallones fueron escaneados para documentar cada rajadura y pérdida de material y controlar los cambios de su condición cada 5 años (HALLET et al., 2008). Además, la creación de mapas topográficos permite monitorear y cuantificar cambios en la superficie, incluyendo la identificación de nuevas o potenciales áreas de pérdida, localización y dimensiones de rajaduras y la apariencia de las adiciones de suciedad ambiental (Figura 9).

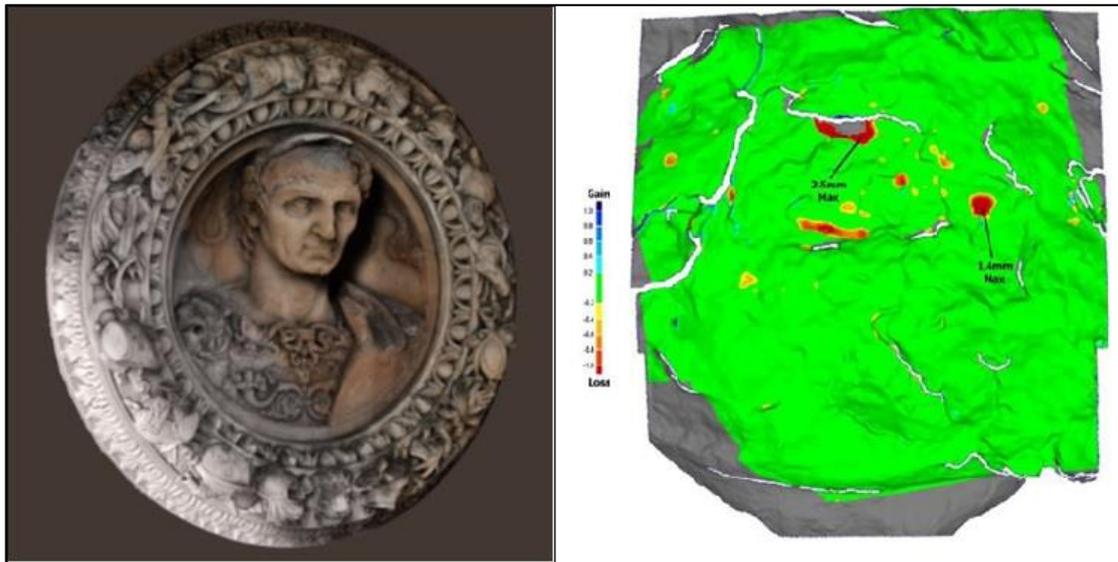


Figura 9. Izquierda: Medallón de terracota de Giovanni da Maiano. Historic Royal Palace, Hampton Court Palace, Inglaterra. Derecha: Mapa topográfico del medallón. Las áreas verdes indican cambio de menos de $\pm 0,2$ mm, que es considerado insignificante. Las áreas en rojo o amarillo muestran que más de 0,2mm del material ha sido perdido. (Imágenes de HALLET et al., 2008).

Otro caso de digitalización en 3D es el de la Fuente de los Leones (CANO et al., 2010), un proyecto llevado a cabo por el Grupo de Investigación en Informática Gráfica, GIIG del Departamento de Lenguas y Sistemas Informáticos de la Universidad de Granada y Patronato de la Alhambra y Generalife. En este trabajo se utilizó un scanner láser para el registro y documentación del estado previo a una intervención. A partir de estos registros derivaron distintas aplicaciones: simulaciones virtuales de reconstrucción de elementos perdidos o sustituciones de piezas, reconstrucciones virtuales para visitantes en el sitio web, etiquetado y mapa de deterioro virtuales, obtención de medidas reales sobre la imagen y cálculos de diferencia de volumen tras una limpieza (Figura 10).

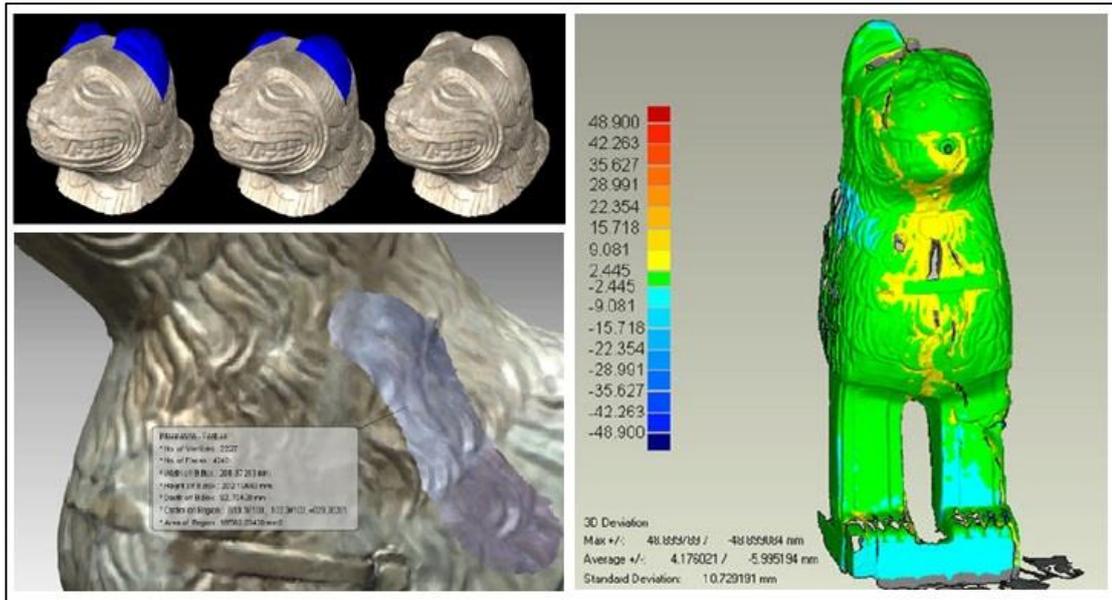


Figura 10. Escultura de la Fuente de los Leones. Arriba a la izquierda: simulaciones virtuales de reconstrucción de elementos perdidos o sustituciones de piezas. Abajo a la izquierda: etiquetado y mapa de deterioro en registros 3D. A la derecha: cálculos de diferencia de volumen tras una limpieza. (Imágenes de CANO et al., 2010).

Uno de los casos más emblemáticos del uso de estas tecnologías es el proyecto digital del David de Miguel Ángel, realizado por la Universidad de Stanford y un grupo dirigido por Levoy de Marc (Figura 11) (LEVOY et al., 2000; LEVOY, 2005). Las obras escaneadas fueron: El David, los cuatro esclavos sin terminar, el San Mateo (Galería de la Academia, Florencia), las cuatro estatuas alegóricas *Noche, Día, Amanecer* y *Atardecer* (capilla de los Medici) y la configuración arquitectónica de ambos museos.

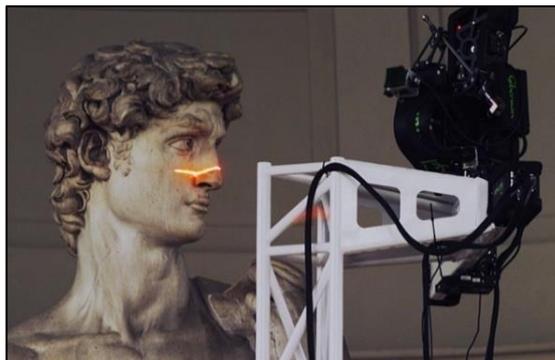


Figura 11. Proceso de escaneo del David con láser. (Imagen de LEVOY, 2004).

Los resultados fueron óptimos, en cuanto a la resolución de las imágenes (0,29 mm) para la documentación del estado de conservación y en cuanto a las aplicaciones que se derivaron de ellos: la creación de imágenes 3D disponibles en un catálogo online, sólo para uso científico, y la construcción de una réplica del David, hecha en resina, a escala reducida (SCOPIGNO et al., 2003) (Figura 12).



Figura 12. Réplica del David, hecha en resina, a escala reducida. (Imagen de LEVOY, 2005)

El Istituto per le Technologie dell'INformazione (ISTI) del CNR de Pisa, Italia, ha trabajado con la restauración por computadora. El proceso de reconstrucción de un objeto fragmentado implica el análisis visual de cada fragmento, las pruebas de correspondencia entre cada uno de ellos y la manipulación continua en cada intento de correspondencia. Todos estos procesos pueden realizarse con métodos computacionales. La mayoría de ellos proponen un ensamblaje por computado automático, determinado por las características geométricas del fragmento. Por el contrario, el equipo del ISTI ofrece al usuario un sistema interactivo, con la libertad de sugerir las posibles conexiones o relaciones espaciales entre fragmentos. Este sistema fue utilizado en la restauración de la Madonna de Pietranico (L'Aquila, Italia), una estatua de terracota del siglo XV, que fue severamente dañada durante el terremoto de 2009 (Figura 13) (PALMAS et al., 2013; CALLIERI et al., 2011).



Figura 13. Reconstrucción de la Madonna de Pietranico mediante el método computacional desarrollado por el ISTI-CNR. (Imágenes de PALMAS et al., 2013).

Actualmente, algunos museos latinoamericanos también están comenzando a usar la tecnología de scanner 3D como método de registro para sus bases de datos. Es el caso del INAH-

Conaculta, México⁶⁰. El proyecto es la Digitalización Tridimensional de Sitios y Artefactos Arqueológicos, mediante el cual, hasta el momento, se han desarrollado 490 imágenes tridimensionales de la Colección Mezcala del acervo del Museo del Templo Mayor (MTM) y el registro en 3D de la Zona Arqueológica de Xochicalco, en Morelos.

2.4. La virtualización del patrimonio cultural y los museos virtuales

Los antecedentes históricos más antiguos del museo se remontan a los templos griegos donde se guardaban objetos de culto u ofrendas que de vez en cuando se exhibían al público para que pudiera contemplarlos y admirarlos. El concepto de museo más cercano a lo que se entiende hoy en día surge en el Renacimiento, con la aparición de edificios dedicados a exposiciones de objetos valiosos y el surgimiento de las *galerías de arte*, donde se mostraban pinturas y esculturas. Las galerías eran de los palacios y castillos, que eran vestíbulos espaciosos con muchas ventanas o abiertos y sostenidos por columnas o pilares, destinados a los momentos de descanso y a la exhibición de objetos de adorno, muchas veces obras de arte

Actualmente, el concepto de museo es muy diferente al de sus orígenes. La definición de museo ha evolucionado a lo largo del tiempo en función de los cambios de la sociedad. Desde su creación en 1946, el International Council of Museums (ICOM) actualiza esta definición para que corresponda con la realidad de la comunidad museística mundial. Hoy, se define al museo como “*una institución permanente, sin fines de lucro, al servicio de la sociedad y abierta al público, que adquiere, conserva, estudia, expone y difunde el patrimonio material e inmaterial de la humanidad con fines de estudio, educación y recreo*”⁶¹. Esta definición es una referencia dentro de la comunidad internacional.

La nueva museología de la década 1980 hizo que los museos cambiaran la forma en que transmitían la información del contexto de las exhibiciones al público (PEARCE, 1986; WASBURN, 1984; MCDONALD y ALSFORD, 1991; ALSFORD, 1991). La sociedad actual consume información en grandes cantidades, apoyándose en el uso de las TICs para lograrlo. El acceso a la información es cada vez mayor, ya sea por la cantidad de formatos o las amplitudes de contenido y este fenómeno comienza a crecer con la explotación de Internet. A comienzos de la década del 90 se empiezan a establecer las primeras interacciones entre las TICs y los museos. A través de herramientas innovadoras y gracias al potencial de la World Wide Web (WWW) como fuente de información, se crearon los museos virtuales. Así, el contenido y el

⁶⁰ Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Dirección de Medios de Comunicación, 18 de Junio de 2012. <http://www.inah.gob.mx>

⁶¹ 22ª Conferencia general de Viena (Austria), 2007

contexto de la colección museística se volvió más accesible y atractivo al público general y se enriqueció la experiencia del visitante del museo. Esto ha provocado la reconceptualización del término “museo” y generado un concepto distinto llamado “museo virtual”, relacionado íntimamente con las TICs. El museo virtual puede ser también imaginario (MALRAUX, 1947); itinerante, por la característica de ser llevado a muchos lugares, y además posee la ventaja de albergar volúmenes indeterminados de obras y exhibiciones.

Existe actualmente una discusión sobre el término *museo virtual* (DESVALLÉES y MAIRESSE, 2010). Desvallées afirma que, en realidad, el término *museo virtual* generalmente se lo utiliza para mal llamar al *cibermuseo*, el cual es definido de manera general como “*una colección de objetos digitalizados, articulada lógicamente y compuesta de diferentes soportes que por su conectividad y su carácter de acceso múltiple, permiten trascender los modos tradicionales de comunicación y de interacción con el visitante (...); no dispone de lugar ni de espacio real y sus objetos, así como las informaciones conexas, pueden ser difundidos a los cuatro rincones del mundo*”⁶². Desvallées sostiene que “virtual” no se opone a “real”, sino a “actual”. “*Un huevo es un pollito virtual; está programado para ser pollito y debería serlo si nada se opone a su desarrollo. En este sentido, el museo virtual puede ser definido como el conjunto de museos imaginables, o bien como el conjunto de posibles soluciones aplicadas a las problemáticas a las que responde en especial el museo clásico*”⁶³. El museo virtual entonces designa globalmente el campo problemático de lo museal. Incluyen naturalmente al cibermuseo, pero no se limitan sólo a él.

Teniendo conocimiento de esta cuestión, en esta tesis, sin embargo, se utilizará el término *virtual*, para referir a algo no real, es decir, para referir a los objetos (o colecciones enteras) visualizados en una pantalla de computadora, con imágenes 3D, por ejemplo. Esta apropiación del término *virtual* y, luego, de *virtualización*, tiene su causa en las tantas publicaciones de instituciones internacionales, como museos y asociaciones de conservación, y trabajos científicos que utilizan estos términos.

Regresando a las TICs, el desarrollo reciente de la tecnología digital ha hecho accesible una gran cantidad de recursos, y abrió el camino a plataformas de contenidos colaborativos. Experiencias como Google Arts and Culture están extendiendo el acceso potencial de la web hacia el mundo de los museos, con el uso de *smartphones* y las aplicaciones para celulares que ofrecen tours de museos virtuales. Sin embargo, el tipo de público que visita los grandes museos no está realmente en busca de una experiencia estética que pueda ser reemplazada o incluso mejorada por una representación digital. Realiza más bien una visita enmarcada en el turismo cultural, de modo que muchos museos son, en la actualidad, atractivos turísticos. Esto

⁶² SCHWEIBENZ, 2004, p. 3

⁶³ DESVALLÉES y MAIRESSE, 2010, p. 55.

proporciona beneficios para las comunidades receptoras, ya que sus museos son revitalizados y hasta mantenidos por esta actividad (BARRETO, 2007). La visita a una ciudad incluye ver un museo, de la misma forma que ir de compras, degustar la comida local o disfrutar de la vida social. Lo que está sucediendo, y parece ponerse más claramente de manifiesto en el futuro próximo, es que la forma en que el patrimonio cultural se produce está cambiando. Actualmente es más común bajar de internet al celular los contenidos que proporciona el museo cuando se realiza una visita que usar los auriculares que proporciona ese museo. Los contenidos están de alguna manera conectados con el objeto que uno está viendo, por un código QR, una etiqueta, un dispositivo georreferenciado, un programa de reconocimiento visual, etc. No obstante, uno puede acceder por internet a los contenidos de cualquier fuente a la que se tenga acceso. La persona puede usarlos en el momento de la visita, o generarse una guía personalizada seleccionando las obras que se quiere ver, o incluso “*rankear*” el museo y sus instalaciones.

La posibilidad de poner a disposición la información e imágenes de las piezas en forma digital, aumenta en gran medida el acceso al público, acelera el trabajo de los estudiantes e investigadores de todo el mundo, y abre nuevas posibilidades a los educadores en todos los entornos. También permite al museo compartir sus recursos de manera más amplia, integrando colecciones que han sido separadas por la geografía y el tiempo, a través de muchas instituciones del patrimonio cultural y centros de investigación. La digitalización de materiales ayuda a alcanzar a públicos que no están dispuestos a ver los museos como una fuente de información. De hecho, la tendencia es que los museos dejen de ser vistos como fuentes de información y se transformen en lugares para vivir experiencias.

Existe un gran número de publicaciones que en los últimos años hablan de la necesidad de un cambio en la práctica de los museos (HERMAN, 1997; HEIN, 2000; FALK y SHEPPARD, 2006; SVANBERG 2010; BLACK, 2012). Muchas de estas instituciones han encontrado en la digitalización de sus colecciones una forma de acercarse al público. Sin embargo, la utilización de registros digitales, ya sea 2D o 3D, varía de acuerdo con la misión de cada institución y sus metas y prioridades a corto y largo plazo. Así, los registros 3D en un museo de ciencias naturales, estarán posiblemente más ligados a actividades de investigación y de educación que en uno de arte contemporáneo, que podrían tener más utilidad en los procesos de diseño de exhibición e interacción con las obras o la re-instalación de instalaciones.

Los museos deben ser capaces de diversificar sus estructuras y propuestas: si al usuario medio se le ofrece un recorrido educativo o de divulgación, a los usuarios profesionales se les deberá proponer una herramienta más específica y sistemática. Los usuarios reales, los usuarios potenciales, y los usuarios remotos de Internet son nuevas categorías de público que los museos deberán abordar explorando nuevas tecnologías con el fin de comunicar y promover su patrimonio. Esto sucede con más frecuencia, y probablemente con más eficacia, en los museos de ciencias, donde, debido a su propia naturaleza, el concepto de estructura-contenedor está más

fácilmente abandonado para convertirse en una realidad cada vez más animada, donde se centra la atención en brindarle al visitante actividades lúdico-educativas. Sin embargo, las tecnologías interactivas, y sobre todo la Realidad Virtual, han ganado hoy el consentimiento a nivel internacional también en los museos tradicionales y en exposiciones o eventos culturales. A pesar de este consenso general, como se dijo anteriormente, todavía es muy raro toparse con instalaciones inmersivas al visitar museos.

Un ejemplo de museo que ha logrado adaptarse a los nuevos tiempos es el Smithsonian, en Washington, EEUU. Fundado en 1846, el Smithsonian es el complejo de museos, educativo y de investigación más grande del mundo, consistiendo en 19 museos y galerías, el Parque Zoológico Nacional y nueve centros de investigación. Pero la mayoría de la gente no puede viajar a los museos Smithsonian. Incluso cuando pueden, las limitaciones de espacio sólo muestran una pequeña parte de sus colecciones. Ante esta situación, el museo inició un proyecto de digitalización. El laboratorio del *Digitization Program Office*⁶⁴ del Smithsonian trabaja con todos los museos y centros del Smithsonian. El equipo usa una variedad de métodos de escaneo y herramientas 3D, como escaneo laser y con luz estructurada, fotogrametría y tomografía computada, para capturar la información geométrica, y a veces de color, de las colecciones y sitios: Una vez que los objetos son escaneados, son usados para diferentes propósitos, incluyendo:

- Enviar contenido online usando la herramienta 3D Explorer.
- Permitir a estudiantes descargar e imprimir en 3D gratuitamente los objetos icónicos del Smithsonian
- Proveer nuevas herramientas de medición a los investigadores
- Proveer reportes de condición de los objetos a los conservadores

La digitalización ofrece una manera de hacer que los objetos – y la valiosa información que contienen – estén disponibles sin poner en peligro su integridad por la manipulación o por exhibición de los mismos y además ayuda a realizar actividades institucionales tales como la conservación y préstamos de las colecciones de manera más fácil.

El avance de la tecnología para la adquisición de imágenes 3D viene incrementándose en el último tiempo. Los desarrollos abarcan técnicas holográficas e interferométricas, escáneres láseres y de luz estructurada, y tecnología de visión computacional (como el caso de la fotogrametría con *Structure from Motion*). Por otro lado, el acceso a la tecnología que existe hoy día a nivel de usuario particular también implica que estas técnicas sean cada vez más fáciles de usar y menos costosas. Los principales museos del mundo ya cuentan con equipos comerciales de escaneo láser y recientemente muchos conservadores y arqueólogos se empiezan a capacitar y especializar en las técnicas de registro 3D de objetos y procesamiento de imágenes.

⁶⁴ <https://dpo.si.edu/>

2.5. Realidad Virtual y Realidad Aumentada

Los museos contemporáneos son mucho más que lugares dedicados a depositar y exhibir colecciones y obras de arte; de hecho, hoy en día son considerados como un medio privilegiado de comunicación y desempeñan un papel central en hacer accesible la cultura a la audiencia masiva. Una de las claves para acercarse al público general es el uso de nuevas tecnologías y los nuevos paradigmas de interacción. La realidad virtual inmersiva es probablemente una de las tecnologías más atractivas y potencialmente eficaces para servir a este propósito. Y, por otro lado, los sitios arqueológicos, espacios urbanos y paisajes que albergan patrimonio también empiezan a incorporar esta nueva forma de interacción y comunicación con el la comunidad local o el turista.

La tecnología de Realidad Virtual (VR en inglés) ya alcanzó un nivel de madurez que le permite introducirse en aplicaciones de la vida real, como la medicina, la educación y el patrimonio cultural. Más recientemente, hubo un desarrollo significativo en investigación en el ámbito de la Realidad Aumentada (AR en inglés). La AR extiende sistemas de realidad virtual con el soporte para la fusión de elementos reales y virtuales en escenas compuestas continuas. Mediante la combinación de VR con técnicas de visión computacional, los sistemas de AR ofrecen una visión natural de escenas reales enriquecidas con objetos virtuales (WOJCIECHOWSKI et al., 2004). La VR y la AR son tecnologías que ya empiezan a tener un alto impacto en muchos ámbitos, también aquellos no comúnmente asociados a las tecnologías informáticas. Uno de esos dominios es el patrimonio cultural. En el caso de los museos no se exhiben sus colecciones enteras por diversas razones. Una de ellas es la preservación de colecciones cuyo estado de conservación es muy frágil. Otra es el espacio limitado con que las instituciones cuentan, haciendo restringida la interacción de los visitantes del museo con los artefactos exhibidos. En estas situaciones el visitante no puede ver los objetos desde todos los ángulos, comparar los objetos o estudiarlos en diferentes contextos. En este sentido, la VR y la AR pueden ofrecer una gran ayuda. Estas tecnologías ofrecen soluciones que permiten la visualización de imágenes digitales en 3D de piezas de museo, tanto en entornos virtuales como reales. También permiten que los visitantes interactúen con las imágenes en una variedad de posibilidades.

Hace ya unos años, un estudio europeo de 2003 mostraba que el 35% de los museos ya incorporaban alguna forma de presentación 3D de objetos, como la VR o la AR, para mejorar las exhibiciones (TSAPATORI et al., 2003). Actualmente, no sólo son los museos los que utilizan cada vez más estas tecnologías interactivas con fines de exhibición y difusión, sino que también son usadas frecuentemente para exhibir el patrimonio inmueble: edificios arquitectónicos, sitios arqueológicos y paisajes naturales.

En lo que respecta a América Latina, el Museo Arqueológico de Campeche, México, fue uno de los primeros en experimentar con la realidad virtual. La antigua ciudad maya de Calakmul fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 2002 y su hallazgo más importante pertenece a una tumba del siglo VIII d. C. con una momia del gobernante del periodo, llamado Garra de Jaguar y que fue sepultado junto a todas sus joyas de jade y efectos personales. Años después de la declaración hubo un proyecto de puesta en valor del yacimiento donde se utilizó una aplicación de realidad aumentada para comunicar a los visitantes la importancia del sitio arqueológico. La aplicación consistía en que los visitantes podían observar mediante el uso de un dispositivo HMD (Head-Mounted Display), los objetos del ajuar y la disposición del enterramiento a través de reconstrucciones virtuales 3D. Las imágenes que se aplicaron a la cerámica digital fueron hechas a partir de fotografías de los objetos originales, mientras que por otra parte esta aplicación completaba virtualmente la reproducción de la cámara funeraria con los objetos del ajuar que han desaparecido (RUIZ-RODARTE, 2006).

También en el ámbito latinoamericano se llevó a cabo en 2010 un proyecto de realidad aumentada para el Museo de sitio de la zona arqueológica de Xochicalco, en el estado de Morelos, México, donde se encuentra un asentamiento prehispánico. La aplicación consistía en un cuestionario relacionado con el yacimiento de Xochicalco, cuyas respuestas se encuentran en unas tarjetas que contienen marcadores impresos en el reverso, de modo que el visitante tendría que mostrar una tarjeta con la respuesta correcta a una cámara, apareciendo en la pantalla el contenido virtual asociado que explica la respuesta a la cuestión planteada y que presentaba la reproducción 3D de las diferentes estructuras monumentales del yacimiento de Xochicalco (BELLIDO GANT y RUIZ TORRES, 2012).

En Argentina, fue recién en estos últimos años que aparecieron iniciativas que incorporan tecnología de imágenes 3D para la exhibición y difusión de bienes culturales. Un ejemplo de ello es el proyecto Argentina Virtual⁶⁵, desarrollado por el portal educ.ar. Consiste en recorridos virtuales por edificios públicos e históricos significativos del país, en una vista de 360° (Figura 14). Para la realización del proyecto se contó con el importante asesoramiento de historiadores, escritores y otros profesionales. Se seleccionaron 12 edificios: museos nacionales y provinciales; edificios públicos administrativos e históricos patrimoniales. El usuario puede seleccionar el recorrido deseado y realizar acercamientos para ver detalles de interés. Asimismo, se incluyeron comentarios de carácter histórico y arquitectónico que complementan la información y las particularidades de cada edificio (tanto en formato de texto como de audio), a modo de visita guiada. Además, se eligieron 10 objetos por edificio, que se presentan en 3D y realidad aumentada.

⁶⁵ <http://argentinavirtual.educ.ar/>



Figura 14. Izquierda: Visualización del recorrido virtual de “Argentina Virtual” del Patio de la Palmeras, Casa Rosada, Presidencia de la Nación. Derecha: Fuente del Patio de Palmeras, vista en 3D en la misma web.

Otro caso es el Museo de Ciencias Naturales de La Plata, que ofrece a su público una experiencia de realidad aumentada de uno de sus dinosaurios, el Diplodocus, mediante la utilización de una Tablet que se encuentra a disposición en la sala de exhibición (Figura 15). La aplicación fue creada por un grupo de 8 estudiantes y jóvenes graduados de distintas carreras de la Universidad platense, ganadores del concurso Proyectos de Cultura Digital que organizó el Centro de Producción Digital bonaerense.⁶⁶



Figura 15. Realidad Aumentada en el Museo de Ciencias Naturales de La Plata. (Imagen extraída de El día, publicado en Edición Impresa: La Ciudad, 01.08.2014).

Otro interesante ejemplo es el del British Museum, que junto a la empresa Samsung, se encuentra a la vanguardia de la difusión y exhibición digital. El Samsung Digital Discovery Centre fue creado en 2009 para proporcionar un centro tecnológico de última generación para que niños y jóvenes puedan conocer y relacionarse con las colecciones del museo. La creación de una experiencia de realidad virtual basada en la colección del Museo Británico es la última innovación de esta asociación. En agosto de 2015, el museo dispuso de un fin de semana especial destinado a realizar una visita con realidad virtual. Los visitantes pudieron explorar virtualmente un sitio de la Edad de Bronce, diseñado por Soluis Heritage, donde pudieron ver

⁶⁶<http://pasado.eldia.com/edis/20140801/El-dinosaurio-mas-famoso-Museo-cobra-vida-pantalla-realidad-aumentada-laciudad15.htm>

escaneos 3D de objetos de la colección del museo de este período, colocados en su sitio original. Entre los dispositivos disponibles para los visitantes había cascos de realidad virtual, tablets y un domo inmersivo. Los grupos de hasta 5 personas a la vez podían entrar en el domo y usar una pantalla interactiva para explorar el mundo de realidad virtual y objetos 3D en la experiencia de inmersión. Se invitó a los participantes a navegar por una típica casa circular de la edad de bronce en realidad virtual. Dentro de la casa, los visitantes podían interactuar con escaneos 3D de objetos de la colección del museo. Los visitantes también pudieron experimentar cambios en la iluminación y la atmósfera, explorando un área de investigación en crecimiento que sugiere un contexto ritual para las casas que están alineadas con el sol.

Finalmente, un ejemplo del uso de realidad aumentada es el caso del proyecto CHES (el programa *Cultural Heritage Experiences Through Socio-personal Interactions and Storytelling*) aplicado al museo de la Acrópolis, en Atenas, Grecia (KEIL et al., 2013). Cada visitante elige su propio recorrido narrativo, guiado por una Tablet, a través de una historia personalizada que conecta artefactos de piezas de museo, exhibiciones y colecciones externas basada en los intereses del individuo (Figura 16)



Figura 16. Realidad aumentada en la Galería Arcaica del Museo de la Acrópolis. (Imagen de KEIL et al., 2013).

2.6. Los formatos de visualización

Los museos virtuales necesitan imágenes de alta resolución con el fin de proporcionar la mayor cantidad de información posible sobre las exposiciones virtuales. Sin embargo, el nivel de detalle depende de la resolución de las imágenes digitales y la alta resolución de las imágenes convencionales producen archivos muy grandes difíciles de manejar y de enviar por las redes, debido a la dependencia con la velocidad de internet. Una estrategia adoptada para hacer frente a este problema son los servidores de imágenes que utilizan una arquitectura de "muñeca rusa" y dan al usuario oportunidades de escalabilidad e interactividad, ya que las múltiples resoluciones

de un registro se almacenan en un solo archivo y permiten transmitir progresivamente una imagen. FlashPix y JPEG2000 son dos formatos de imagen que introdujeron un nuevo concepto para la arquitectura de imagen (GEORGOULA y PATIAS, 2003). También permiten el almacenamiento de metadatos.

Internet tiene el enorme potencial de ofrecer a los visitantes virtuales acceso universal a través de la WWW a un entorno de museo virtual. Además, el aumento de la eficiencia de las conexiones a Internet hace posible la transmisión de archivos multimedia significativos relacionados con los artefactos de exposiciones en museos virtuales. La tecnología más popular para la visualización WWW incluye Web3D que ofrece herramientas como VRML y X3D, que pueden ser utilizados para la creación de un museo virtual interactivo. El consorcio Web3D⁶⁷ contiene estándares abiertos para la comunicación en 3D en tiempo real y las normas más importantes incluyen: VRML97 y X3D. Muchas aplicaciones de museo basadas en VRML se han desarrollado para la web. A partir de abril de 1997 VRML97 ha sido sinónimo de *Virtual Reality Modeling Language*. Técnicamente hablando, VRML no es ni VR, ni un lenguaje de modelado, sino un formato de intercambio en 3D que define la mayor parte de la semántica de uso común encontrada en aplicaciones 3D de hoy en día, tales como las fuentes de luz, los puntos de vista, la geometría, la animación, la niebla, las propiedades del material y el mapeado de texturas. Otra definición establece que VRML sirve como un lenguaje sencillo para la publicación de páginas web en 3D, así como para proporcionar la tecnología necesaria para integrar tres dimensiones, dos dimensiones, texto y multimedia en un modelo coherente. "*Cuando estos tipos de medios de comunicación se combinan con lenguajes de script y las capacidades de Internet, es posible un nuevo género de aplicaciones interactivas*"⁶⁸. Algunas informaciones son mejor experimentadas en forma tridimensional, como la información de los museos virtuales. Sin embargo, VRML puede ser excesivamente trabajoso y costoso. QuickTime VR (QTVR) y los actuales software de escenas panoramas que permiten la animación y proporcionan vistas 360° podrían representar una solución alternativa para los museos. Por el contrario, X3D es un formato de Open Standards XML, que ofrece la comunicación de datos en 3D en tiempo real a través de todas las aplicaciones de red. Aunque X3D es a veces considerado como una interfaz de programación de aplicaciones (API) o un formato de archivo para el intercambio de geometría, su principal característica es que combina ambas cosas un solo archivo. Por otra parte, X3D es considerada como la revisión de la especificación VRML97 ISO, que incorpora los últimos avances en las características comerciales de hardware de gráficos, así como mejoras en base a años de retroalimentación de la comunidad de desarrollo VRML97. Para un museo virtual, haciendo posible la presentación

⁶⁷ <http://www.web3d.org/>

⁶⁸ VRML, The Annotated VRML 97 Disponible en:

<http://accad.osu.edu/~pgerstma/class/vnv/resources/info/AnnotatedVrmlRef/ch1.htm>

de exhibiciones virtuales, la visualización general consiste en páginas Web dinámicas incrustadas con modelos 3D VRML. Esto puede ser mejorado con otra información multimedia (es decir, clips de películas, sonido) y se utiliza de forma remota a través de protocolos web (es decir, HTTP).

Otro formato de gráficos 3D es el COLLABorative Design Activity (COLLADA)⁶⁹ que define un esquema XML estándar abierto para el intercambio de activos digitales entre varias aplicaciones de software de gráficos que de otro modo podrían almacenar sus activos en formatos incompatibles. Una de las principales ventajas de COLLADA es que incluye una función más avanzada del comportamiento físico del objeto 3D, como la detección de colisiones con otros objetos (que Web3D no admite).

Por otra parte, las tecnologías más potentes que se han utilizado en entornos de museo incluyen OpenSceneGraph (OSG)⁷⁰ y una variedad de motores de juego 3D (por ejemplo, QuakeDev⁷¹ y Second Life⁷²). OSG es un multi-plataforma de alto rendimiento conjunto de herramientas de gráficos en 3D de código abierto, utilizado por los museos para generar aplicaciones de realidad virtual más potentes, especialmente en términos de inmersión e interactividad ya que soporta texto, vídeo, audio y escenas en 3D en un solo entorno 3D. Por otro lado, los motores de juegos 3D son también muy potentes ya que proporcionan una visualización superior y el apoyo físico. Los *serious games* son un nuevo concepto que permite la utilización de espacios de colaboración en 3D que se utilizan con fines educativos y de aprendizaje, en una serie de ámbitos educativos. Los principales puntos fuertes de las aplicaciones de juegos serios podrían ser generalizados, como en las áreas de la comunicación, la expresión visual de información, mecanismos de colaboración, la interactividad y el entretenimiento. Ambas tecnologías (motores OSG y juegos en 3D) en comparación con VRML y X3D puede proporcionar ambientes muy realistas y envolventes, pero tienen el inconveniente de que se requieren conocimientos de programación avanzados con el fin de diseñar e implementar aplicaciones personalizadas.

Más recientemente, WebGL (Web Graphics Library) es una API de JavaScript para la representación interactiva de gráficos 3D y 2D dentro de cualquier navegador web sin el uso de *plug-ins*. Los elementos WebGL se pueden mezclar con otros elementos HTML y componerse con otras partes de la página o fondo (TAVARES, 2012; PARISI, 2012).

WebGL es una de las tantas plataformas en las que se puede desplegar el motor de juegos Unity, una plataforma de desarrollo flexible y poderosa para crear juegos y experiencias interactivos

⁶⁹ COLLADA – Digital Asset Schema Release 1.5.0, http://www.khronos.org/files/collada_spec_1_5.pdf

⁷⁰ OpenSceneGraph, 2009. Available at: <http://www.openscenegraph.org/projects/osg>

⁷¹ QuakeDev, 2009. Available at: <http://www.quakedev.com>

⁷² Second Life, 2009. Available at: <http://secondlife.com>

3D y 2D⁷³. En capítulo 4 se detallarán las posibilidades que tienen los motores de juegos -en particular se hablará de Unity 3D- para el registro y exhibición de colecciones de arte, especialmente en arte contemporáneo de instalación.

⁷³ Unity 3D. <http://unity3d.com/>

2.7. Referencias

- ALSFORD, S. "Museums as hypermedia: Interacting on a museum-wide scale" En: D. Bearman (Ed.), Proceedings of the ICHIM '91 Conference, Pitts- burgh, Pennsylvania, USA, October, 1991, pp. 7–16.
- ANDERSON, S. y LEVOY, M. "Unwrapping and Visualizing Cuneiform Tablets" En: *IEEE Comput. Graph.* 2002, Vol 22, pp. 82-88.
- ARRIETA URTIZBEREA, Iñaki. "Las dimensiones sociales y culturales del patrimonio edificado: una propuesta para su estudio". En: *Patrimonios culturales y museos: más allá de la historia y del arte* (Iñaki Arrieta Urtizbera (ed.) Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua. 2008.
- ARROYO VÁZQUEZ, Natalia. "¿Web 2.0? ¿web social? ¿qué es eso?". e-Lis e-prints in library & information science. 2014. Disponible en: <http://eprints.rclis.org/10566/>.
- BALZANI, M. et al. "Digital representation and multimodal presentation of archeological graffiti ad Pompei" En: 5th Int. Symp. Virtual Reality Archeology and Cultural Heritage, Eurographics Symp.Proc., Chrysanthou, Y., Cain, K., Silberman, N., Niccolucci, F., Eds.; Brussels: Belgium, December 6-10, 2004; pp. 93-103
- BARRETTO, Margarita. "Turismo y Cultura. Relaciones, Contradicciones y Expectativas.". Tenerife. Editorial Aca y Pasos RTPC, Edición N° 1. Museos y Turismo, 2007, pág. 137-154.
- BAUDRILLARD, Jean. "Crítica de la economía política del signo". Editorial: Siglo veintiuno editores , 1982.
- BELLIDO GANT, L. y RUIZ TORRES, D. "Museos de nueva generación: la pantalla como acceso" en *Museos Argentinos*. Fundación YPF, 2012. investigaciones.museosargentinos.org ar
- BERNARDINI, F. et al. "Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pietà" *IEEE Comput. Graph.* 2002, 22, pp. 59-67
- BLACK, Graham "Transforming Museums In The Twenty-First Century / Graham Black, n.p.: London: Routledge, 2012.
- BLAIS, F. et al. "Ultra-High Resolution Imaging at 50µm using a Portable XYZ-RGB" En: *NRC Publications Archive*. 2005.
- BLAIS, F. et al. "Ultra High-Resolution 3D Laser Color. Imaging of Paintings The Mona Lisa by Leonardo Da Vinci" En: *NRC Publications Archive*. 2007.
- BOULANGER, P. et al. "How to virtualize reality: an application to re-creation of world heritage site". Proc. Conf. Virtual Systems and Multimedia, Gifu, Japan. Noviembre 18-20, 1998; pp. 18-20.
- BOURDIEU, Pierre. "Sociología y cultura" Editorial Grijalbo, S.A. 1990.
- BRAVO JUEGA, M. I. "Documentación o investigación" En: *El Museo: centro de documentación*. Describiendo colecciones: ¿inventarios, catálogos, dossieres...? Revista N 2, 1997; 91-94.

- BULTERMANN, D. C. A. "Is It Time for a Moratorium on Metadata?" *IEEE Multimedia*, 11(4):10-17, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, Ca, USA, octubre-diciembre de 2004.
- CALLIERI M et al. "Modelli digitali 3D per il supporto al restauro: riassettaggio digitale e ricostruzione virtuale. La madonna di Pietranico - Storia, restauro e ricostruzione di un'opera in terracotta" pp. 74 - 82. Lucia Arbace, Elisabetta Sonnino (eds.). Pescara, Italy: Edizioni ZIP, 2011.
- CAMPBELL, T. y RAFFERTY, E. Metropolitan Museum of Art: Report from the Director and the President for 2011. Disponible en: http://www.metmuseum.org/en/about-the-museum/annualreports/~media/Files/About/Annual%20Reports/2010_2011/Director%20and%20Pre%20sident.ashx
- CANO et al. 2010. "Uso de escáner láser 3D para el registro del estado previo a la intervención de la Fuente de los Leones de La Alhambra". *Virtual Archaeology Review* (ISSN: 1989-9947) 05/2010; 1(2): pp. 89-94.
- DECARLI, G. y TSAGARAKI, C. "Un inventario de bienes culturales ¿por qué y para quién?" *ILAM*, 2006
- DELLEPIANE, M. Intro Grafica 3D per beni culturali. Curso teórico-práctico. Summer School 2014.
- DESVALLÉES, A. y MAIRESSE, F. "Conceptos claves de museología" ICOM, Armand Colin, 2010.
- FALK, John H. y SHEPPARD, Beverly "Thriving in the knowledge age: new business models for museums and other cultural institutions". Lanham, MD: Rowman & Littlefield Publishers, 2006.
- FONTANA, R. et al. "Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo" En: *Journal of Cultural Heritage*. 2002, Vol. 3, Nro 4, pp. 325-331.
- GARCIA CANCLINI "Diferentes desiguales y desconectados" capítulo 1: La cultura extraviada en sus definiciones. Barcelona: Editorial Gedisa, S.A., 2004.
- GEORGOULA, O. y PATIAS, P. "Visualization tools using FlashPix image format" En: A. Gruen, S. Murai, J. Niederoest, F. Remondino (Eds.), *Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, PART 5/W10, Febrero 2003
- GILES, J. "Internet encyclopedias go head to head. *Int. Weekly Journal of Science "Nature"*, 14.12.2005, pp. 900-901.
- GONZALEZ VARAS, Ignacio. "Conservación de bienes culturales: Teoría, Historia, Principios y normas". Madrid: Ediciones Cátedra, 2006.
- GUIDI, G. et al. "High accuracy 3D modeling of Cultural Heritage: the digitizing of Donatello's Maddalena". En: *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004, Vol 13. pp. 370-380.
- HALLET, Z. et al. 2008. High-resolution 3D Laser Digitisation of the Maiano Terracotta Roundels for Documentation and Condition Monitoring. En: M. Castillejo *et al.*, eds. *Lasers in the Conservation of Artworks: Proceedings of the International Conference Lacona VII, Madrid, Spain, 17-21 September 2007*. CRC Press, pp. 413-18.

HEIN, H. S. "The Museum In Transition: A Philosophical Perspective" / Hilde S. Hein, n.p.: Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press, cop. 2000.

HERMAN, Guy. "Shortcuts to Oz: Strategies and Tactics for getting Museums to the Emerald City." In: *The Wired Museum: Emerging Technology And Changing Paradigms* / Katherine Jones-Garmil, Editor; Introduction By Maxwell L. Anderson, n.p.: Washington, D.C.: American Association of Museums, 1997.

KAMPEL, M et al. "Rule based system for archaeological pottery classification" *Pattern Recognition in Cultural Heritage and Medical Applications*. Volume 28, Issue 6, 15 April 2007, pp. 740-747.

KEIL, J. et al. "Interactive Adaptive Storytelling with AR at Acropolis Museum". In A.C. Addison et al.(eds), *Digital Heritage Congress, Paris, Marseille 2013*, 56–57.

KRASSIMIRA, I. et al. "Digitization of Cultural Heritage – Standards, Institutions, Initiatives". En: *Access to Digital Cultural Heritage: Innovative Applications of Automated Metadata Generation*. Plovdiv University Publishing House "Paisii Hilendarski" 2012, Plovdiv, Bulgaria.

LAMBERS, K. et al. "Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modeling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru" *J. Archaeol. Sci.* 2007.

LEVOY, M. "Image-based modeling (IBM)and image-based rendering (IBR)" CS 248 - *Introduction to Computer Graphics*. Diapositivas de la conferencia del 8 de diciembre, 2005..

LEVOY, M. et. al. "The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues" En: *Proc. SIG-GRAPH 00, Computer Graph. Proc., Annu. Conf. Ser., New Orleans, Louisiana, 2000*, pp. 131-144.

MALRAUX, A. "La Musée imaginaire" Gallimard, Paris, 1996 [orig. 1947].

MARTÍNEZ SILVA, J. M. "Gestión o manejo de colecciones" En: *Manual De Registro Y Documentación de Bienes Culturales* (Lina Nagel Vega, ed.). Editorial: Centro de Documentación de Bienes Patrimoniales, 2009.

MCDONALD, G y ALSFORD, S. "The museum as information utility" En: *Museum Management and Curatorship* (1991) 10 305–311.

PALMAS, G. et al. "A computer-assisted constraint-based system for assembling fragmented objects," *Proc. Digit. 2013 - Fed. 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, 2nd UNESCO Mem. World Conf. Plus Spec. Sess. fromCAA, Arqueol. 2.0 al., vol. 1*, pp. 529–536, 2013

PARISI, T. "WebGL: Up and Running". O'Reilly Media, Incorporated (2012-08-15).

PEARCE, S. M. *Thinking about things. approaches to the study of artifacts*, *Museum Journal* (1986) 198–201.

PEZZATI, L. y FONTANA, R. "3D Scanning of Artworks" *Cost G7 Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science*. 2007

RUIZ-RODARTE R. "Virtual museography for an archaeological site", in *Proceedings of the EVA London Conference, London, 2006*.

- SANSONI, G. y DOCCHIO, F. (2005) "3-D optical Measurements in the Field of Cultural heritage: The Case of the Vittoria Alata of Brescia" IEEE Trans. Instr. Meas. 2005, 54, pp. 359-368.
- SCHWEIBENZ W., 2004. "Museos virtuales" Noticias del ICOM [primea definición, 1998], vol. 57, no 3, p. 3.
- SCOPIGNO, R. et al. "Using optically scanned 3D data in the restoration of Michelangelo's David," Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng., vol. 5146, pp. 44-53, 2003
- SENSO, J. A. y DE LA ROSA PIÑEIRO, A. "El concepto de metadato. Algo más que descripción de recursos electrónicos". Ciência da Informação, vol. 32, n. 2: 95-106. 2003.
- SVANBERG, F. "Towards the Museum as Forum and Actor?" In: The Museum as Forum And Actor / Ed. Fredrik Svanberg, n.p.: Stockholm: The Museum of National Antiquities, 2010.
- TAVARES, G. "WebGL Fundamentals". HTML5 Rocks. (2012-02-09).
- TORRES, J.C. et al. "Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio," Virtual Archaeol. Rev., vol. 1, 2010. pp. 51-54
- TSAPATORI, M. et al. "ORION Research Roadmap for the European archaeological museums sector" (Final Edition). Junio, 2003. <http://www.orion-net.org>
- WASHBURN, W.E. "Collecting information, not objects". Museum News. 62 (3) (1984) 5-15.
- WEI, W. et al. "Three dimensional documentation of two dimensional works of art" En: Salimbeni, Renzo; Pezzati, Luca (Eds) 2005, Optical Methods for Arts and Archaeology. Proceedings of the SPIE, Nro 5857, pp. 52-61.
- WOJCIECHOWSKI et al. "Building Virtual and Augmented Reality museum exhibitions". Web3D '04. Proceedings of the ninth international conference on 3D Web Technology. pp. 135-144. ACM New York, NY, USA, 2004.

Capítulo 3

TÉCNICAS DE REGISTRO Y PROCESAMIENTO 3D

Las técnicas de registro de imágenes en 3D se pueden clasificar básicamente en dos tipos. Las que involucran el contacto mecánico con el objeto y las que son sin contacto. Las primeras se utilizan fundamentalmente para el control dimensional en procesos de fabricación industrial y están restringidas a examinar el objeto apoyando un elemento de medida (palpador) sobre la superficie del mismo, típicamente una punta de acero duro o zafiro. Una serie de sensores internos determinan la posición espacial del palpador. Ejemplos de estos sistemas 3D por contacto son las CMM (Máquina de medición por coordenadas) o los brazos de medición. Estas técnicas por contacto no son adecuadas para su empleo en restauración y conservación porque podrían afectar la superficie de las piezas.

Por otro lado, las técnicas sin contacto mecánico se pueden clasificar en dos grandes grupos. Las acústicas y las fotónicas. Las acústicas utilizan como principio básico ultrasonido y las fotónicas radiación del espectro electromagnético (luz visible, infrarroja, ultravioleta, microondas, rayos X, etc.) que interactúan con el objeto. Con un detector apropiado se registra, dependiendo de la técnica, las ondas ultrasónicas o la radiación reflejada, absorbida o transmitida por el objeto en diferentes condiciones, configuraciones o planos. El procesamiento posterior de la información adquirida mediante técnicas computacionales y de procesamiento de imágenes permite obtener la imagen en tres dimensiones del objeto.

En general las técnicas acústicas se utilizan fundamentalmente para registrar aspectos no visibles del interior de los objetos. Sin embargo, éstas requieren, en general, la colocación de los sensores en contacto con la pieza, lo cual puede ser una importante limitación para muchos objetos patrimoniales. Por el contrario, las técnicas fotónicas no tienen esta limitación.

Existe una gran variedad de técnicas fotónicas para registro 3D (SANSONI et al., 2009; PANKAJ, 2014; BLAIS, 2004; REMONDINO, 2006; TARGOWSKI et al., 2008; VÁZQUEZ-ARELLANO et al., 2016). Nos referiremos en lo que sigue a tres de las más usadas en conservación y restauración: el escaneo con láser y con luz estructurada, y la fotogrametría digital de objeto cercano. (TORRES et al., 2010; SCHAICH, 2013).

Las técnicas de escaneo con láser y luz estructurada han sido utilizadas para registrar objetos de forma muy detallada. En particular, para la documentación de pinturas (WEI et al, 2005) y

piezas donde es necesaria una alta resolución para el análisis del estado de conservación (CANO et al., 2010) o para planificar proyectos de restauración (CALLIERI et al., 2011). Por otro lado, la fotogrametría digital ha sido ampliamente aplicada en la documentación y virtualización de objetos y escenas de gran tamaño, como sitios arqueológicos y arquitectónicos que no requieren imágenes de alta resolución (VAN DAMME, 2015; LAMBERS et al., 2010; DOCCI y MAESTRI, 2015). El uso de fotogrametría digital para el registro detallado de objetos en la escala milimétrica y submilimétrica ha sido escasamente reportada en la literatura (REMONDINO et al., 2014; YANAGI y CHIKATSU, 2010; THESSALONIKI, 2009; SAMAAN et al., 2013; ALBY et al., 2009; GALANTUCCI, 2015). Para estos propósitos, los arqueólogos y conservadores suelen confiar más en las técnicas de escaneo laser y luz estructurada. Estas técnicas son similares en términos de resolución, costo y complejidad y están muy presentes en la literatura sobre registros de patrimonio cultural, dejando de lado a la fotogrametría digital (WEI et al., 2010). Sin embargo, el desarrollo reciente de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes abre nuevas posibilidades para la fotogrametría digital para registrar objetos de una manera más simple, con la calidad y resolución de las técnicas de escaneo.

En esta tesis se compararon estas tres técnicas, explorando sus ventajas y aplicaciones en documentación de objetos patrimoniales, para luego evaluar sus posibilidades para el registro de obras de arte contemporáneo.

A continuación, se explican los fundamentos de cada una de estas técnicas de registro 3D, el instrumental y los procedimientos involucrados.

3.1. La fotogrametría

La fotogrametría es una técnica para determinar las propiedades geométricas de objetos y situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. La palabra Fotogrametría significa literalmente “medición de fotografías” o “medir sobre fotos”. Basada, en sus inicios, hace más de un siglo, en la estereoscopia, ha ido evolucionado incorporando nuevas tecnologías, siendo empleada en una variedad cada vez mayor de aplicaciones. En consecuencia, la fotogrametría de hoy es muy diferente a la de hace 100, 50, o incluso hace tan sólo 10 años. (VAN DAMME, 2015). Sin embargo, el concepto general no ha cambiado: una única imagen fotográfica de un objeto proporciona información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Pero cuando se cuenta con dos o más fotos del mismo objeto tomadas desde diferentes posiciones en la zona de superposición de las imágenes se puede tener

información tridimensional. La fotogrametría es básicamente una técnica de medición de coordenadas 3D que utiliza fotografías.

Clásicamente se puede clasificar a la fotogrametría en tres tipos de acuerdo con el tipo de medición utilizada. Por un lado, la fotogrametría espacial que utiliza cámaras que generalmente son ubicadas en satélites artificiales. Por otro lado, la fotogrametría aérea que utiliza fotos tomadas desde el aire con una cámara montada en un avión en posición vertical. En este caso se toman múltiples fotografías del terreno a medida que el avión vuela a lo largo de una trayectoria, y las imágenes superpuestas son procesadas en un plotter estéreo. La visualización de las imágenes en 3D se puede realizar en forma directa utilizando la técnica de ojos cruzados o la de ojos paralelos, o mediante algún dispositivo óptico para visión estereoscópica, en general compuestos por lentes o prismas. Finalmente, en la fotogrametría terrestre las imágenes son tomadas sobre o cerca del suelo, desde una posición fija, por lo general conocida, con la cámara en posición horizontal respecto del objeto. Este tipo de fotogrametría también puede dividirse en *fotogrametría de objeto cercano* ($D=$ 10 cm a 300 m, utilizando cámaras convencionales), *macrofotogrametría* ($D=$ de 1 a 10 cm, utilizando lentes de enfoque) y *microfotogrametría* (D menor a 1 cm, utilizando cámaras acopladas a microscopios).

En general, los productos generados por la fotogrametría espacial y aérea son mapas. Muchos de los mapas que utilizamos hoy en día se crean con fotografías tomadas desde aviones, mediante la unión de las imágenes, que pueden incluir una corrección geométrica, debido a la inclinación del eje de la toma respecto al plano del terreno (para fotografía aérea donde se toma en posición vertical). Los resultados pueden utilizarse para medir distancias reales, dado que son una representación exacta de la superficie de la Tierra (después de haber sido ajustados por el relieve topográfico).

Con el avance de las tecnologías informáticas, los productos generados por fotogrametría pueden ser directamente resultados computacionales, como por ejemplo las imágenes DEM (*Digital Elevation Model*) que son mapas topográficos digitales, o las llamadas nubes de puntos 3D, por lo general productos generados por fotogrametría terrestre, que son conjuntos de puntos con coordenadas XYZ e información de color (RGB). Estas nubes de puntos permiten generar imágenes 3D de alta resolución para el registro de objetos. Por esta razón esta tesis se centrará en esta última variante de fotogrametría.

3.1.1. Principios generales de la fotogrametría

En un registro fotográfico cada rayo de luz procedente de un objeto fotografiado (A) atraviesa el punto de vista (lente, objetivo) de la cámara (S) y forma una imagen sobre la película o la CCD (*charge-coupled device* de las modernas cámaras digitales). Se trata de un proceso bien definido: conocidos la posición del objeto, la posición del punto de vista, los parámetros

intrínsecos de la cámara (por ejemplo, la distancia focal) y la orientación de la cámara, se puede calcular la posición del punto respectivo en la imagen (a) (Figura 17). En cambio, si se quisiera hacer el camino a la inversa, es decir, reconstruir la superficie real del objeto (A), dada la imagen y dado un punto identificado sobre la misma (a), habrá que determinar (dar coordenadas) al punto correspondiente sobre la superficie del objeto. Para hacer esto se necesita entonces información de los parámetros intrínsecos de la cámara que se utilizó (GÓMEZ LAHOZ, 2010).

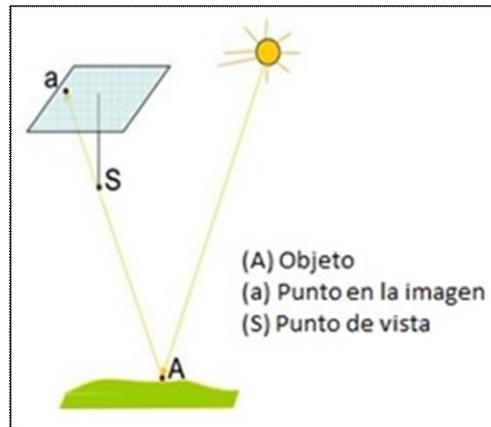


Figura 17. Proceso de un registro fotográfico (Figura basada en la de GÓMEZ LAHOZ, 2010)

Con esa información se puede obtener lo que se denomina un haz perspectivo, es decir un haz que tiene la dirección aS, pero con el que aún no se puede saber en qué posición de ese haz se encuentra el punto real del objeto (A) (Figura 18a). En cambio, si se dispone de dos imágenes del mismo objeto, entonces la posición espacial del punto A en el haz se puede encontrar como la intersección de los dos rayos de proyección (Figura 18b). Este procedimiento se denomina **triangulación** y permite recuperar la información de profundidad a partir de dos imágenes.

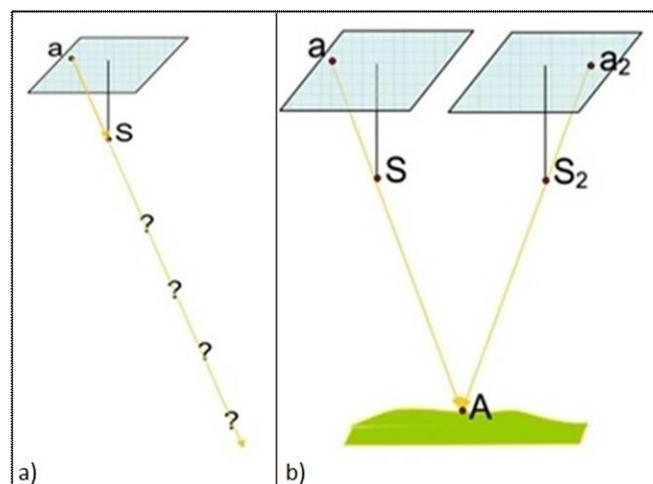


Figura 18. a) Haz perspectivo de una imagen. b) Intersección de dos haces, o rayos de proyección. Triangulación (Figura de GÓMEZ LAHOZ, 2010)

Cuando se conocen las coordenadas XYZ de un el objeto (A), se tiene una imagen fotográfica del mismo con un punto identificado sobre la misma (a) y se conocen los parámetros interiores característicos de la cámara (distancia focal), se puede determinar la orientación de la cámara. Para que ésta no sea relativa se necesita conocer las coordenadas de al menos 3 puntos en el terreno, que no tienen que estar en línea recta y que deben ser identificables en la fotografía (los llamados puntos de apoyo, o puntos de control en tierra en fotogrametría aérea). Este proceso se denomina **resección** (MOFFITT y MIKHAIL, 1980), que es el proceso de recuperación de la orientación y posición de la cámara fotográfica utilizada. La información resultante será la posición de la cámara (definida por 3 coordenadas) y su orientación (definida por 3 ángulos) (Figura 19).

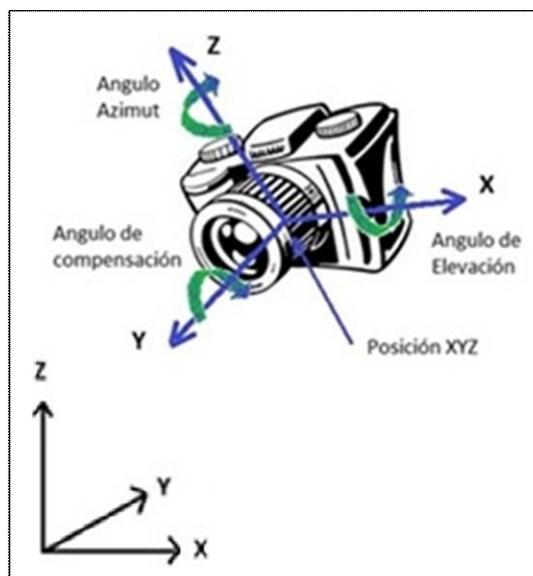


Figura 19. Posición y orientación de la cámara en un dado sistema de coordenadas.

Existe una forma de relacionar de manera simultánea los parámetros intrínsecos de la cámara (principalmente distancia focal); el proceso de triangulación para cada uno de los 3 puntos de apoyo seleccionados y la posición y orientación de la cámara para cada imagen obtenida (resección de las imágenes). Este procedimiento se denomina ajuste de paquete o "*Bundle adjustment*" que puede definirse como el problema de perfeccionar una reconstrucción visual para producir conjunta y óptimamente estimaciones de una estructura 3D y de los parámetros de visualización (posición de la cámara y/o calibración). Óptima significa que se encuentran las estimaciones del parámetro minimizando una función costo que cuantifica el error de ajuste del modelo; y conjuntamente, que la solución es al mismo tiempo óptima con respecto a ambas variaciones de la estructura y de la cámara. El nombre hace referencia a los "paquetes" ("*bundles*" en inglés) de rayos de luz que salen de cada punto 3D y convergen en el centro de cada cámara, los cuales son ajustados óptimamente con respecto a la posición de la cámara. (TRIGGS et al., 2000). El *Bundle adjustment* comprende la utilización de algoritmos

matemáticos que proporcionan las coordenadas XYZ de cada punto del objeto, las coordenadas XYZ y 3 ángulos de orientación para cada punto de la imagen y los parámetros de calibración de la cámara con sus correspondientes incertezas.

Históricamente, se consideran tres períodos en el desarrollo de la fotogrametría. Por un lado, la fotogrametría analógica, cuyo antecedente es la estereoscopia, que se desarrolla desde fines del s. XIX hasta 1960. En este caso los instrumentos utilizados eran aparatos que mediante sistemas ópticos o mecánicos (restituidores) permitían determinar en forma automática la intersección de los dos rayos perspectivas homólogos y contaban con un dispositivo de dibujo para representar la imagen 3D y un dispositivo de visión estereoscópica para visualizarla. El producto obtenido era una imagen fotográfica o un mapa, que se podía visualizar de manera estéreo. Posteriormente surgió la fotogrametría analítica (de 1960 a 1980, aproximadamente), basado en algoritmos matemáticos que reemplazaban los restituidores mecánicos u ópticos. Proporcionaba un resultado más rápidamente y con más detalle en formato CAD (programa de diseño asistido por computadora). Por último, se desarrolló la fotogrametría digital, donde las imágenes son adquiridas registrándolas en un sensor de tipo CCD y procesadas por una computadora. Mediante la visualización en una pantalla de las imágenes, un operador realiza el proceso de restitución introduciendo los puntos de intersección de los dos rayos perspectivas homólogos necesarios para realizar el proceso de orientación. La restitución puede ser un proceso iterativo generado por un operador o puede ser realizada en forma automática por correlación de imágenes.

3.1.2. Fotogrametría de visión computacional

Como se mencionó anteriormente, la fotogrametría actualmente es muy diferente a la de décadas pasadas. La principal razón es la influencia que ha tenido en su desarrollo la visión computacional. La visión computacional es el área de la ciencia que ha producido las tecnologías que posibilitan, por ejemplo, la unión de varias fotos en una sola panorámica, la detección de rostros, la autoconducción de automóviles de, o la coincidencia automatizada de huellas dactilares (HUANG, 1996; SZELISKI, 2010). Desde ya hace varias décadas el principal objetivo de la investigación en visión computacional ha sido "*Desarrollar... técnicas matemáticas para la recuperación de la forma tridimensional y la apariencia de los objetos en las imágenes*"⁷⁴

Notablemente esta descripción es casi la definición de la fotogrametría analítica y de la digital. De hecho, ciertas técnicas de procesamiento tales como "optimización global" que se

⁷⁴ SZELISKI, 2010, p. 3.

desarrollaron en la visión computacional, son esencialmente idénticas a los métodos de *Bundle Adjustment* utilizados tradicionalmente en la fotogrametría aérea.

Como se vio en la sección anterior la fotogrametría tradicional requería conocer ya sea la ubicación de los puntos clave en el objeto o la posición de la cámara. En la fotogrametría de visión computacional este procedimiento se resuelve con diversos algoritmos que, además de contar con el *Bundle Adjustment*, permiten calcular los puntos clave de coincidencia en las imágenes y los parámetros de la cámara. Este conjunto de algoritmos da lugar a la técnica llamada *Structure from Motion*, y muchos software de fotogrametría digital se basan en este concepto.

Actualmente se empieza a considerar a la fotogrametría de visión computacional como la etapa más reciente en la evolución histórica de la fotogrametría (VAN DAMME, 2015).

3.1.2.1. Fotogrametría digital con Structure from Motion

En los campos de la visión computacional y la percepción visual, *Structure from Motion* (SFM), refiere al proceso de encontrar la estructura tridimensional de un objeto a través de analizar señales de movimiento local en el tiempo (TORRES et al., 2012). Cuando los objetos de una escena son estáticos y lo que se mueve es la cámara fotográfica, el desplazamiento relativo que se observa en las imágenes refleja la estructura tridimensional del objeto. Esta técnica genera la imagen 3D a partir de una serie de fotografías o un video. Más precisamente, un sistema SFM toma como *input* un conjunto de imágenes y genera una nube de puntos (coordenadas 3D) de la escena, la posición desde la cual cada foto fue tomada y los parámetros ópticos de las cámaras. La nube de puntos está definida por coordenadas espaciales XYZ y por valores RGB. Estos permiten restituir la textura original.

Basándose en algoritmos de visión computacional la reconstrucción 3D de una escena podría resumirse en tres pasos: Detección de características claves en las imágenes, correspondencia de esas características entre todas las imágenes y la aplicación de algoritmos basados en *Bundle Adjustment*.

En visión computacional y procesamiento de imágenes el concepto de “característica” es usado para indicar la parte de la información que es relevante para resolver la tarea computacional relacionada con una determinada aplicación. Existen varios algoritmos de detección de características, pero los más populares son los basados en el llamado *Scale-invariant feature transform* (SIFT) (LOWE, 1999). Este algoritmo sirve para detectar y describir las características locales de las imágenes. Se utiliza para reconocer la misma característica entre diferentes vistas de un mismo objeto o escena. Con esas características se realiza la correspondencia entre las imágenes, a través de otro algoritmo (*Matching feature*). Este es un

simple algoritmo que intenta identificar una misma característica en todas las imágenes disponibles. Este proceso es necesario para la triangulación (ISHIKAWA y GEIGER, 1998).

En la sección anterior se decía que dadas dos o más vistas, un punto 3D puede ser reconstruido por triangulación. Sin embargo, cuando sólo se dispone de dos imágenes, los algoritmos pueden tener errores que hacen imposible la reconstrucción 3D. Para obtener una mejor precisión de deben usar más imágenes (TORRES et al., 2012; CORSINI et al., 2013).

El siguiente algoritmo utilizado basado en *Bundle Adjustment* es el *Multicore Bundle Adjustment* (WU et al., 2011), que crea una nube de puntos a partir de los puntos (las características) detectados en el paso anterior. En este paso se puede intuir la forma del objeto y disponer de la posición de las cámaras. Aquí cada imagen es alineada respecto a las demás. Esto se basa en el principio de la intersección de los rayos; utilizando por lo menos tres imágenes (en la Figura 4 se muestra una configuración con cuatro imágenes) con un punto de unión en común, un rayo se proyecta desde el punto focal de cada imagen, a través de los puntos de característica detectada. El lugar donde estos rayos se cruzan entonces determina la coordenada 3D de ese punto detectado (Figura 20).

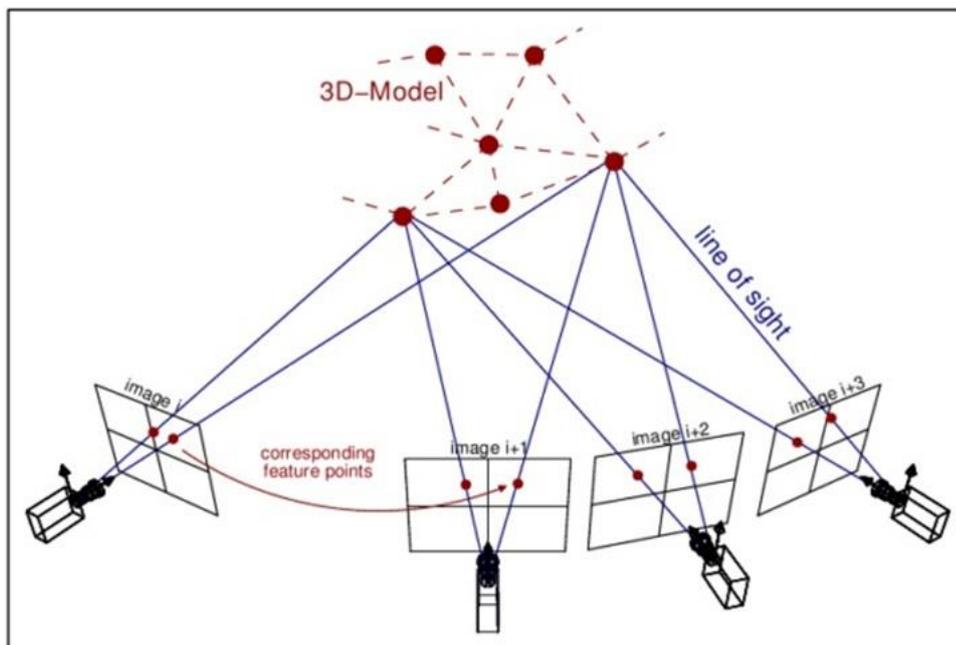


Figura 20. Proyección e intersección de los rayos correspondientes a cada *key point* para determinar la coordenada 3D de esa característica. (Imagen de VAN DAMME, 2015).

Finalmente, un último paso para la reconstrucción del objeto 3D es generar una nube de puntos más densa a partir de todos los datos anteriores, utilizando los algoritmos *Multi-View Stereo*⁷⁵,

⁷⁵ Multi-View Stereo (MVS) es el término general que se le da a un grupo de técnicas que utiliza la correspondencia estéreo como su principal señal y usa más de dos imágenes (FURUKAWA y HERNÁNDEZ, 2013).

con las *CMVS* y *PMVS2* (FURUKAWA y PONCE, 2007; FURUKAWA et al., 2010), que suelen ser utilizadas por muchos software de *Structure from Motion*.

La técnica de *Structure from Motion* ofrece ventajas frente a la fotogrametría tradicional. En lugar de tener que utilizar cámaras especiales pre-calibradas, es posible calibrar automáticamente cualquier cámara, simplemente usando características emparejadas detectadas en imágenes superpuestas. Otra ventaja es que en fotogrametría tradicional se debía tomar las fotos en un patrón fijo, ahora se pueden alinear automáticamente cualquier número de imágenes posicionadas al azar. Por último, en lugar de que el operador seleccione varias docenas de puntos en común en las fotos superpuestas, usando la detección de características, la computadora puede encontrar millones de puntos coincidentes en cuestión de minutos.

3.1.2.2. Instrumental, procedimientos y software.

La combinación de la fotogrametría digital con la técnica computacional *Structure from Motion*, es actualmente la herramienta más completa y la más utilizada para el registro en 3D mediante imágenes fotográficas.

La técnica no requiere que las imágenes sean tomadas por una cámara con características especiales. En principio se puede usar cualquier cámara digital siempre y cuando tenga la información EXIF (*Exchangeable Image File format*) que además de poseer la hora y fecha de la toma, incluye la configuración de la cámara (distancia focal, tamaño del sensor, e información que puede variar con cada imagen). Las imágenes tomadas deben tener alta resolución, para que una mayor cantidad de características puedan ser detectadas y diferenciadas y así lograr el mayor nivel de detalle en la imagen 3D final. Para esto hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las imágenes deben estar bien enfocadas, es decir deben ser nítidas;
- Se debe procurar mantener una alta profundidad de campo (menor apertura del diafragma, mayor profundidad de campo);
- Evitar luz de flash, ya que, de lo contrario, en cada toma significaría un cambio en la dirección de la luz. Es importante mantener una luz pareja y constante (se puede utilizar algún paraguas difusor, y no se debe mover la dirección de la luz durante las tomas);
- Mantener una ISO baja para contar con una mayor nitidez;
- Usar una distancia focal fija;
- No usar objetivos gran angular;

La cantidad de fotos que se debe tomar varía con la complejidad del objeto. Es importante mencionar en este punto que para que la técnica de SFM funcione bien, cada punto del objeto debe estar presente en al menos 3 o más imágenes. La clave entonces consiste en fotografiar diferentes posiciones alrededor del objeto, con una superposición de imágenes de más del 70%.

Una vez tomadas las fotos se debe aplicar a las mismas el algoritmo SIFT, que detecta todos los puntos con características en común (*key points*). Posteriormente usando los algoritmos de auto-calibración de la cámara, la computadora calculará los parámetros intrínsecos de la cámara usada para tomar las imágenes. Esta información es esencial con el fin de compensar cualquier posible distorsión de la lente y con el fin de determinar la posición del punto focal de cada imagen (donde todos los rayos convergen).

El paso siguiente es alinear cada imagen respecto a las demás. Cuando este proceso se repite para todos los puntos en el conjunto de datos, el resultado es una nube de puntos, que es una aproximación 3D de la escena u objeto real.

Este resultado, obtenido por *Structure from Motion*, puede ser procesado para crear una nube de puntos 3D todavía más densa. El proceso consiste en encontrar puntos de unión adicionales entre las imágenes. Dado que ahora, las posiciones originales de la cámara y la calibración son conocidas, la computadora puede calcular con precisión qué imágenes solapan dónde. La computadora buscará de nuevo características comunes pero esta vez usando otros algoritmos. Si se detectaron características adicionales en por lo menos 3 imágenes, pueden ser insertadas nuevamente en la imagen 3D usando el principio de intersección de rayos. Sin embargo, ahora, aunque un punto sea detectado en sólo dos imágenes, sus coordenadas 3D puede ser calculadas, ya que las posiciones de las dos imágenes son conocidas y la coordenada asociada con la profundidad puede ser determinada usando el principio de paralaje. Se obtiene de esta manera una nube de puntos mucho más densa.

Esta nube densa puede ser convertida en una malla poligonal, que es en general el producto final de un registro 3D. Una malla poligonal está compuesta por diversos tipos de elementos. Estos incluyen vértices, aristas, caras, polígonos y superficies (Figura 21).

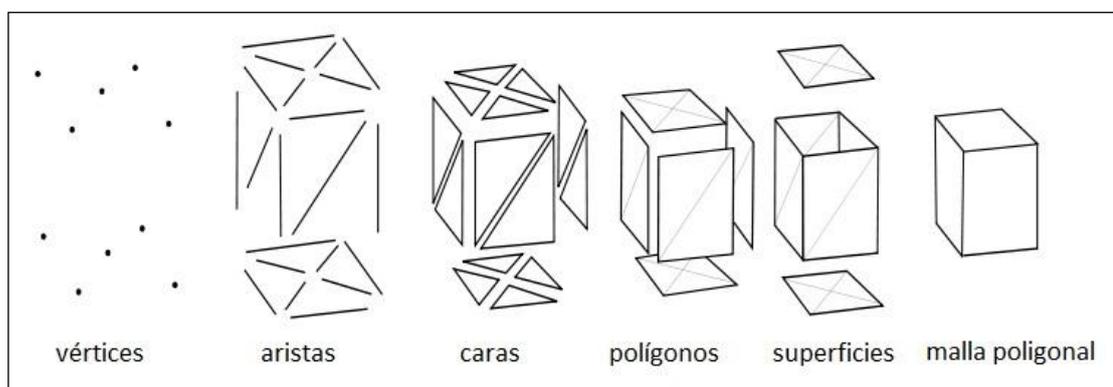


Figura 21. Elementos de una malla 3D.

Un vértice es un punto. Una arista (o borde) es un segmento que conecta dos vértices. Una cara es una superficie plana delimitada por bordes; por ejemplo, la llamada *triangle face* tiene tres aristas, y la *quad face* tiene cuatro aristas. Dado que el hardware GPU (unidad de procesamiento de gráficos) de las computadoras está basado en triángulos, siempre es mejor

utilizar caras de 3 aristas, ya que son más simples y el procesado es más rápido y flexible. Algunos sistemas de software utilizan el término polígono para definir un conjunto de caras contenidas en un mismo plano. Por último, las superficies, comúnmente llamadas grupos de suavizado, son grupos de polígonos. Estos polígonos aparentan formar superficies suaves. Son muy útiles para describir formas donde algunos polígonos están conectados gradualmente a sus vecinos y otros no lo están.

La mayoría de los formatos de malla también pueden contener alguna forma de coordenadas UV⁷⁶ que es una representación 2D de la malla “desplegada” para mostrar qué porción del mapa de textura bidimensional aplica a diferentes polígonos de la malla.

Las mallas poligonales se utilizan mucho en modelado 3D debido al uso de la subdivisión de la misma (en polígonos), lo que genera superficies fluidas y orgánicas⁷⁷ imitando las NURBS⁷⁸ que son otro sistema de generación de superficies no poligonales.

Por otro lado, existen los modelos sólidos CAD. Mientras que las mallas representan la superficie de un objeto (por dentro siempre es hueco), los modelos CAD representan volúmenes, es decir, modelos sólidos.

Cuando se reconstruye una malla 3D a partir de una nube de puntos, se puede utilizar algoritmos de reconstrucción de superficie, como por ejemplo el de Poisson (KAZHDAN et al., 2006).

Finalmente, las imágenes 2D originales pueden ser proyectadas en esa malla en un proceso de “mapeo de textura” (CALLIERI et al., 2008; CORSINI et al., 2009), para crear la textura final de la imagen 3D, que visualmente podría tener aún más detalle que la malla estructural (Figuras 22 y 23).

⁷⁶ De “UV mapping”. Es un proceso de modelado 3D de hacer una representación 2D de una superficie de modelo 3D. Este proceso proyecta un mapa de textura en el objeto 3D. Las letras “U” y “V” indican los ejes de la textura 2D porque “X”, “Y” y “Z” ya son usados para indicar los ejes del objeto 3D en el espacio modelo.

⁷⁷ Una forma orgánica es aquella que imita a la naturaleza en sus formas, es decir, usa líneas curvas mientras que las formas geométricas usan líneas rectas

⁷⁸ NURBS (acrónimo inglés de *non-uniform rational B-spline*) es un modelo matemático muy utilizado en la computación gráfica para generar y representar curvas y superficies. Son un nivel de sofisticación en el modelado 3D. Usando NURBS, una esfera será una esfera verdaderamente matemática.

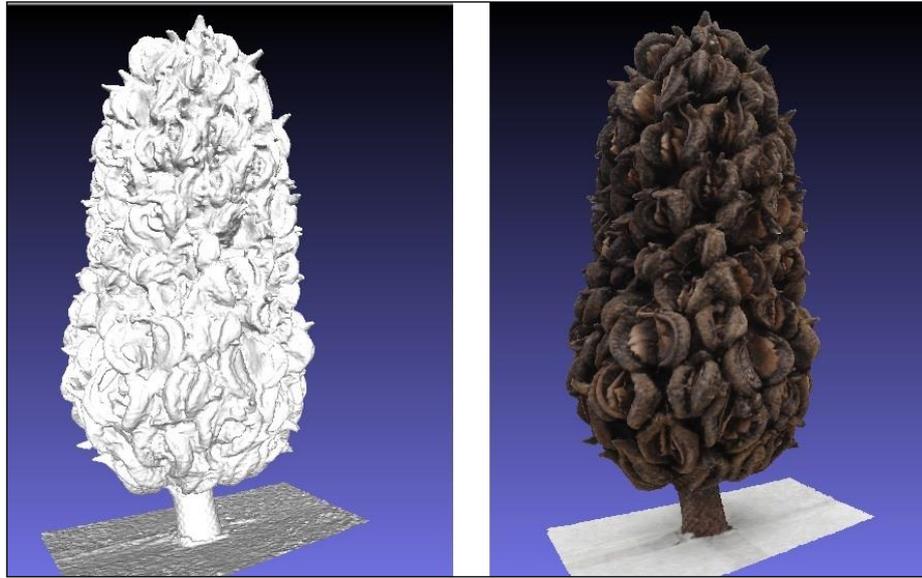


Figura 22. Imagen 3D de un piñón. A la izquierda, la malla solamente. A la derecha, la incorporación de textura.

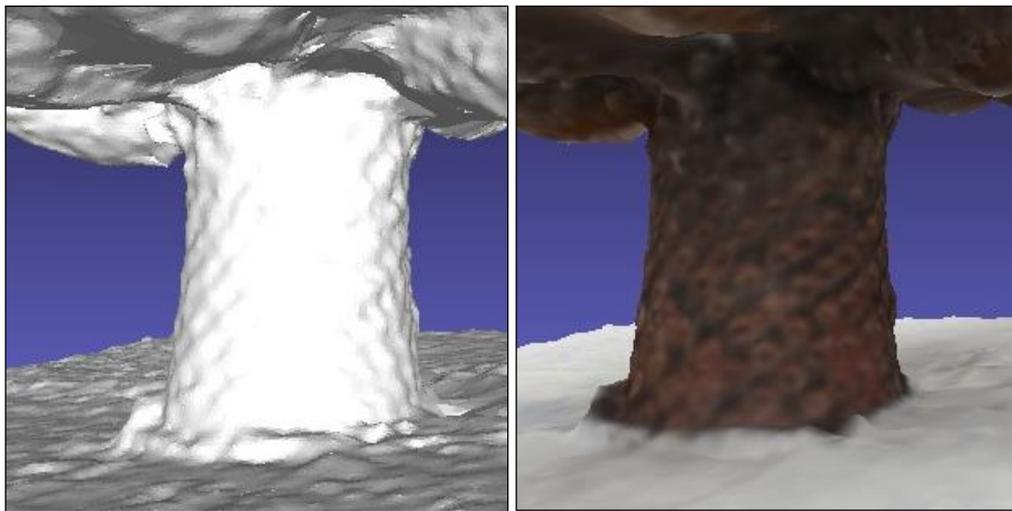


Figura 23. Detalle del tronco del piñón. En el modelo 3D con textura se observan mejor los pequeños círculos del tronco.

En cuanto al software actualmente existe una amplia variedad de programas y paquetes de códigos para SFM. La mayoría integran los algoritmos básicos de la técnica (la detección de características, el *Bundle Adjustment*, y el *Multi-View Stereo*) y son gratuitos y de código libre, permitiendo al usuario intervenir en los parámetros de reconstrucción de la escena u objeto 3D. Otros software son destinados a usuarios que no poseen conocimientos de computación o de procesamiento de imágenes, y estos suelen ser sistemas comerciales (los más completos) o gratuitos, que generalmente son aplicaciones online con creación de cuenta de usuario, que no permiten al usuario intervenir en la reconstrucción 3D.

Entre los software más populares empleados para Structure from Motion se pueden destacar; Bundler; PMVS2 (Patch-based Multi-View Stereo - version 2); CMVS (Clustering Views for

Multi-view Stereo; CMP-MVS (Multi-View Reconstruction Software); VisualSFM; Microsoft Photosynth; ARC3D; Autodesk 123D Catch; Insight3D; Agisoft PhotoScan; Photomodeler; Pix4D. En el apéndice 1 se presenta un breve resumen de las características de cada uno y sus principales ventajas y posibilidades.

Existen varios trabajos que realizan comparaciones entre los distintos software de SFM. WANG, 2011 por ejemplo compara Bundler, Bundler con PMVS2, ARC3D y su propio método SFM. Su conclusión es que ARC3D genera una salida entre un tamaño entre el 5% y el 20% de la nube de puntos devuelta por Bundler + PMVS2. Su método es de 2 a 5 veces más preciso que Bundler.

NEITZE y KLONOWSKI, 2011, compara Bundler, Bundler configurado para usar PMVS2, Microsoft Photosynth, ARC3D y Agisoft PhotoScan, usando 99 fotografías aéreas de una pequeña área. Demuestran que el peor resultado lo obtiene con ARC3D, que genera una cobertura de sólo la mitad de la escena. También concluyen que el desempeño de Bundler y Photosynth es bastante similar, y que Bundler con PMVS2 arroja resultados similares a los de PhotoScan, aunque el primero genera algunos agujeros pequeños que no aparecen en el segundo.

En el capítulo 6 de esta tesis se presentará un análisis comparativo entre Arc3D, 123D Catch, Photosynth y VisualSFM combinado con CMP-MVS.

3.1.2.3. Alcances y limitaciones de la fotogrametría digital con Structure from Motion

Una ventaja importante de la fotogrametría digital con Structure from Motion es que el tamaño de los objetos no es un condicionante, dado que con una misma cámara se puede fotografiar objetos pequeños o de gran tamaño.

El tiempo de registro y procesamiento y el costo requerido es una de las mayores ventajas que ofrece la fotogrametría digital frente a otras técnicas. Una cámara digital estándar y una computadora con un procesador y tarjeta gráfica que permita el uso de software de Structure from Motion, son actualmente razonablemente accesibles.

En cuanto a las limitaciones de la fotogrametría digital estas se relacionan principalmente con el tipo de material del que está constituido el objeto. Por ejemplo, no es una técnica adecuada para registrar objetos cuya secuencia de fotografías no tenga las suficientes características para realizar el *matching* de las imágenes (como amplias zonas completamente vacías de textura o trama o que sean de un solo color plano), o cuyas características no sean constantes en las fotografías (como las superficies cuya iluminación va cambiando para cada ángulo de la toma de la foto). En el capítulo 6 se abordarán experimentos con diversos materiales y tipos de objetos, para estudiar y definir estas limitaciones.

3.2. Técnicas de escaneo 3D

Otros métodos para obtener imágenes en 3 dimensiones son los que emplean escáneres. Utilizan una fuente de luz (coherente como el láser, o incoherente como franjas de luz blanca) que se proyecta sobre el objeto a digitalizar. Un sensor, típicamente una cámara CCD, registra la luz reflejada en la superficie del objeto. En la mayoría de los casos la información de profundidad es reconstruida por el principio de triangulación. Entre estos métodos, el escaneo láser es uno de los más usados actualmente (ROCCHINI et al., 2001; FOREST COLLADO, 2004). También puede reconstruirse la imagen 3D por la técnica de tiempo de vuelo. A continuación, se describirán ambos métodos.

3.2.1. Reconstrucción por Triangulación

3.2.1.1. Escáner láser por triangulación

Los escáneres láser por triangulación utilizan una línea de luz láser, horizontal o vertical que se proyecta sobre el objeto. El sensor CCD de una cámara, ubicada formando un ángulo con el láser, registra la luz reflejada (Figura 24). La línea laser se desplaza sobre el objeto (lo “barre” en general en la dirección perpendicular), En la CCD se obtiene un registro deformado de la línea (Figura 25). El procesamiento digital de este registro permite obtener las coordenadas espaciales del objeto.

Es importante mencionar que debido a las formas irregulares de los objetos escaneados es altamente probable que determinadas zonas la superficie del objeto se encuentren ocultas respecto de la posición del sistema de escaneo, haciéndolas invisibles para el recorrido del láser. Estas regiones se denominan zonas de oclusión. Por esta razón, y para completar el escaneo de la totalidad del objeto, es necesario rotar el mismo para cada barrido.

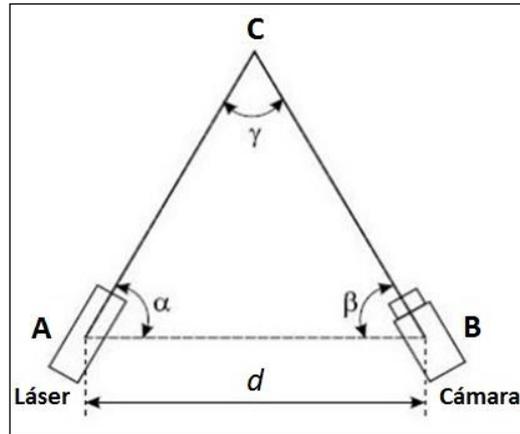


Figura 24. Principio de triangulación del escáner láser. Se puede calcular las coordenadas 3D de C si la longitud (d) entre la fuente láser y la cámara y los dos ángulos del triángulo son conocidos. Dependiendo de dónde incide el láser en la superficie del objeto, su reflexión aparecerá en posiciones diferentes en el sensor de la cámara (diferentes píxeles en una CCD).

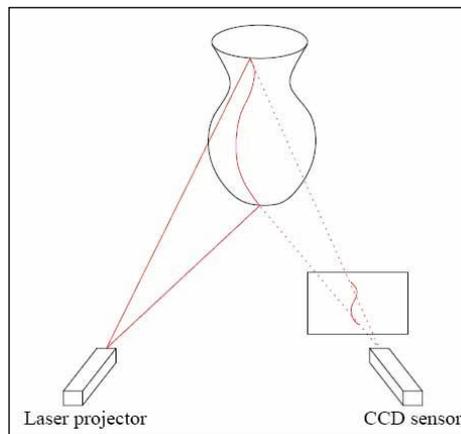


Figura 25. Escaneo láser 3D por triangulación. Un láser emite una fina línea sobre el objeto. El sensor CCD de una cámara registra la luz reflejada. A medida que la línea láser se desplaza sobre el objeto, se obtiene en la CCD un registro deformado de la línea. El procesamiento digital de este registro permite obtener las coordenadas espaciales del objeto. (Imagen de BERNARDI y RUSHMEIER, 2002.)

3.2.1.2. Escáner de luz estructurada por triangulación

Los escáneres de luz estructurada, utilizan un patrón de franjas de luz no coherente. En vez de proyectar sólo una línea en el objeto, como en el escaneo con láser, se utiliza una estructura de luz y sombras y se realiza el registro de todas ellas al mismo tiempo (Figura 26).

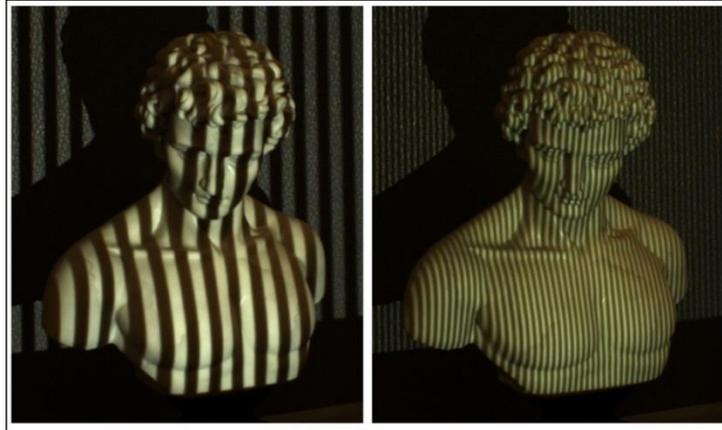


Figura 26. Proyección de patrón bidimensional de luz no coherente. (Imagen de TAUBIN y LANMAN, 2009)

El desplazamiento de cualquier raya puede ser directamente convertida en una coordenada 3D. Para este propósito, la identificación del patrón debe hacerse individualmente, por ejemplo, empleando el seguimiento o conteo de las rayas (método por reconocimiento de patrones). Otra posibilidad es proyectar la mitad del patrón en color blanco y la otra mitad en negro, resultando una secuencia binaria en código de Gray⁷⁹ (también es común el uso de colores) y asignar un valor a cada muestra codificada.

Además de las técnicas de reconocimiento y codificación de patrones también se usan técnicas para medir las variaciones de la anchura de las rayas que se generan en la superficie del objeto. La frecuencia y fase de estas tienen marcas de profundidad similar que pueden ser analizadas por la transformada de Fourier.

En muchas implementaciones prácticas, el análisis combina técnicas de reconocimiento de patrones, códigos de Gray y transformada de Fourier para una completa y precisa reconstrucción del objeto.

Existen numerosas técnicas de luz estructurada, clasificadas como secuenciales o de disparo único, como se ilustra en la figura 27. Si el objeto 3D que se quiere escanear es estático, y la aplicación no impone limitaciones estrictas sobre el tiempo de adquisición entonces se puede usar las técnicas de secuencia, las cuales a menudo resultan más confiables y con resultados más exactos. Sin embargo, si el objeto se mueve, se deberán utilizar las técnicas de disparo único para adquirir una imagen 3D instantánea de la superficie del objeto en una instancia particular. Cada técnica tiene sus propias ventajas y desventajas, dependiendo de la aplicación específica (GENG, 2011).

⁷⁹ El código binario reflejado o código Gray, nombrado así en honor del investigador Frank Gray, es un sistema de numeración binario en el que dos valores sucesivos difieren solamente en uno de sus dígitos.

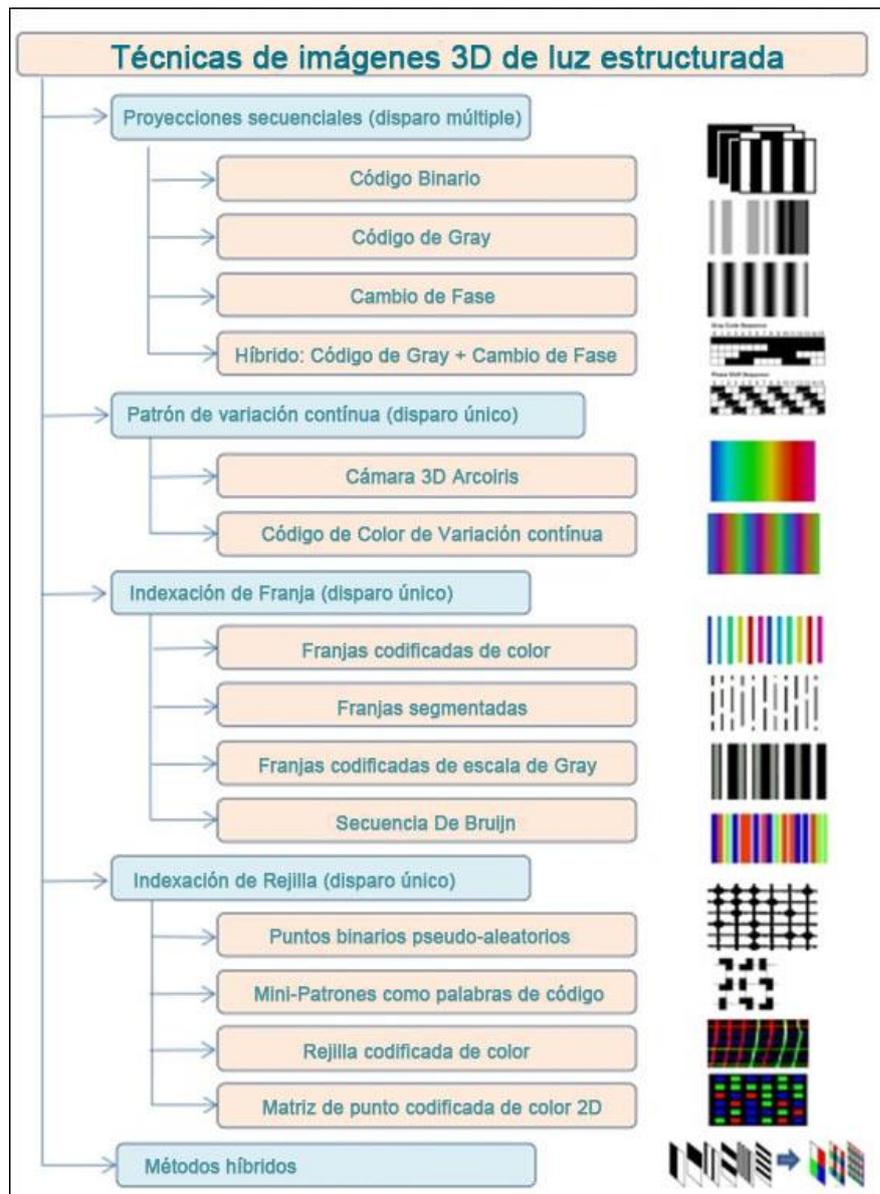


Figura 27. Técnicas de luz estructurada para adquisición de imágenes 3D. (Figura de GENGG, 2011)

La resolución del sistema está limitada por la longitud de onda de la luz y básicamente por la anchura y la calidad óptica de las rayas. Se puede mejorar reduciendo el grosor de las rayas, pero esto tendrá como limitación la resolución de la cámara (cantidad de píxeles en la CCD, enfoque etc.). Una forma de optimizar la resolución del sistema es proyectar sobre el objeto un patrón de franjas sinusoidal y utilizar el método llamado de cambio de fase (*phase shift method* en inglés) (GORTHI y RASTOGI, 2010). Este se basa en proyectar el patrón sinusoidal varias veces sobre el objeto, pero produciendo en cada oportunidad un corrimiento de las franjas (cambio de fase). Previamente, el sistema se calibra con un objeto plano ubicado a una distancia conocida, que se utilizará como referencia, de modo tal, que en cada proyección cada píxel de la cámara recibirá una señal del objeto que será registrada con una diferencia de fase respecto de la

referencia. La distancia del píxel de la cámara al plano de referencia está relacionada linealmente con el desfase y por tanto permite reconstruir la coordenada 3D del objeto.

3.2.2. Reconstrucción por tiempo de vuelo

Otro tipo de escáneres son los basados en tiempo de vuelo. Utilizan un pulso láser que incide sobre la superficie del objeto, un detector registra la luz reflejada y un sistema que mide el tiempo que tarda el pulso láser en llegar al objeto, reflejarse y alcanzar el detector. Dado que la velocidad de la luz es una constante conocida, la distancia entre el escáner y el objeto puede ser calculada midiendo el tiempo que transcurre entre emisión y recepción del pulso de luz.

El elemento clave en este tipo de scanner es la medida del tiempo. Cuando se escanean objetos pequeños (por ejemplo, del orden de unas decenas de centímetros, los tiempos son muy cortos típicamente del orden de los picosegundos, que requieren dispositivos de detección ultrarrápidos. En cambio, para grandes distancias, por ejemplo, entre 15 y 100 m, las medidas se pueden hacer con una electrónica convencional y por eso esta técnica es básicamente usada para realizar registro 3D de escenas de gran escala, como registros topográficos o geológicos. El dispositivo compuesto por un emisor láser pulsado y un sistema que permite determinar la distancia desde el emisor láser a un objeto o superficie se denomina LIDAR (un acrónimo del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), por eso a este tipo de scanner también se los llama LIDAR 3D scanning.

3.2.2. Instrumental, montaje y procedimientos

Existe una amplia variedad de equipos de escaneo 3D en el mercado actual (Tabla 2). Los precios varían mucho, desde los 2.000 a los 85.000 dólares dependiendo del rango de alcance, tamaño y tipo de objeto a escanear y la tecnología involucrada: láser, luz led, luz blanca, triangulación, tiempo de vuelo, etc. En general este tipo de sistemas comerciales no suelen estar al alcance de la mayoría de las instituciones culturales públicas, en particular los museos argentinos.

Empresa	Scanner	Comentarios	Precio
Next Engine			3230 USD
Zscanner (Z Corp)	Z600	usado en restauración	desde 28900 USD
	Z700		desde 41900 USD
	Z700 cx	usado en restauración	desde 51900 USD
	Z700 px		desde 76900 USD
	Z800		desde 51900 USD
eScan (3D Digital corp)	eScan		7,795 USD
Handyscan 3D	Uniscan	usado en restauración	30000 USD
	Gemini	usado en restauración	20000 USD
Konica Minolta	Virtuoso		desde 18000 USD
	Vivid 9i	muy usado en restauración	desde 49900 USD
	Range 5		desde 67900 USD
	Range 7		desde 79900 USD
3D Scanner Surphase	Surphaser 25HSX basis software	(para objetos grandes, 10 m distancia)	desde 94900 USD
Rapid Form	software	muy usado en restauración	desde 9900 USD
Steinbichler	Comet L3D-2MP	Blue Led	desde 51900 USD
	Comet L3D-5MP	Blue Led	desde 70900 USD
Mephisto	PicoScan		2175 USD
	Mephisto CX		1400 USD
	Mephisto EX		29900 USD
Scan3	FlexScan Core	sólo software	3100 USD
	FlexScan Pro	sólo software	3100 USD
	Geomagic Wrap		3900 USD
	HDI Advance R1		9200 USD
	HDI Advance R1 with Geomagic Wrap		13300 USD
	HDI Advance R2		13300 USD
	HDI Advance R2 with Geomagic Wrap		17400 USD
SCANNER 3D LASER ROLAND	LPX-1200DS		15995 USD
	LPX-600DS		12995 USD
	LPX-60DS		8995 USD
	LPX-1200DS	alquiler	336 USD/mes
	LPX-600DS	alquiler	273 USD/mes*
Artec 3D	Artec M		10900 USD
	Artec L		13900 USD
	Artec MHT		14900 USD
	Artec MH		10900 USD
	Artec S		10900 USD
Faro	lo comercializan en Argentina RUNCO y Mertind		entre 30000 y 60000 USD
Phoenix Aerial Systems	Phoenix SCOUT Unmanned Laser Scanning System		desde 54950USD

Tabla 2. Precios de los equipos comerciales más populares utilizados para escaneo 3D. Precios consultados en 2013.

3.2.2.1. Escáneres 3D de bajo costo

Existe una línea de escáneres manuales, portátiles y de bajo costo, que permiten una mayor flexibilidad del proceso de escaneo, por lo que pueden ser muy útiles en la conservación de objetos de pequeña escala. Requieren utilizar algunos procedimientos adicionales como por ejemplo determinar la posición y orientación del emisor láser respecto de la cámara. Para ello se suelen utilizar sensores ópticos a base de LED, sensores electromagnéticos, o brazos de posicionamiento mecánicos.

Uno de los sistemas comerciales de bajo costo y fácil empleo que brinda interesantes posibilidades para aplicaciones en objetos de pequeña escala es el desarrollado por la firma David Vision Systems de Alemania. Se trata de un software (David Laser Scanner⁸⁰) que utiliza una auto-calibración automática a tiempo real, de la posición del láser respecto de la cámara. El escaneo se puede hacer manualmente simplemente moviendo la línea láser a lo largo del objeto. Este sistema se puede utilizar con un simple puntero láser comercial, que mediante una lente cilíndrica proyecte una línea sobre el objeto a escanear (FRANKE et al., 2006).

El procedimiento para obtener una imagen 3D de un objeto comienza con una calibración que permite determinar los parámetros de la lente y la ubicación de la cámara relativa a los paneles del fondo. Estos son dos planos verticales posicionados a 90 grados uno del otro colocados detrás del objeto a escanear (Figura 28). Cuando se coloca el objeto, el plano láser intersecta dos elementos a la vez: la superficie del objeto y el patrón de referencia. La cámara debe estar ubicada de modo que pueda registrar la línea láser sobre el objeto y parte en cada uno de los paneles. Esto permite al software reconstruir el plano del láser proyectado. Luego, se registra la deformación de la línea láser sobre el objeto escaneado y el software lo traduce a coordenadas 3D (Figura 29). Para este proceso no se requiere un hardware específico, sino que el programa funciona con cualquier computadora standard.

La cámara debe haber sido calibrada para que sus parámetros internos y externos sean exactamente conocidos. En la configuración del David utilizan marcadores en el fondo y el método Tsai (TSAI, 1986) de calibración de la cámara. De esta manera, las coordenadas exactas de la estructura del fondo con respecto al sistema de coordenadas de la cámara se conocen implícitamente.

⁸⁰ <http://www.david-3d.com/en>

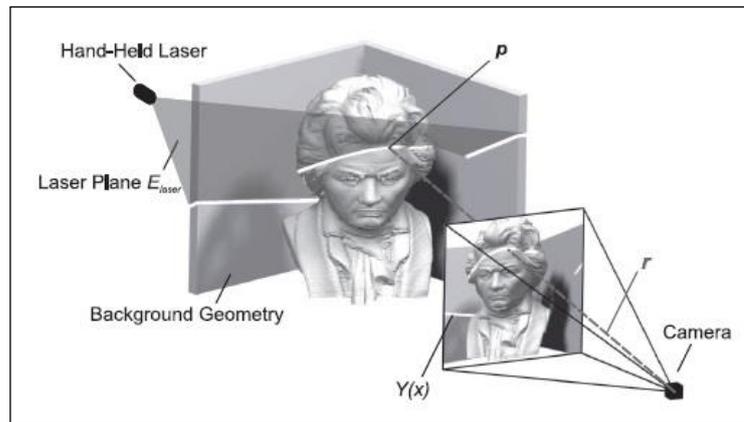


Figura 28. Configuración del sistema David Laser Scanner. (Imagen de FRANKE et al., 2006)

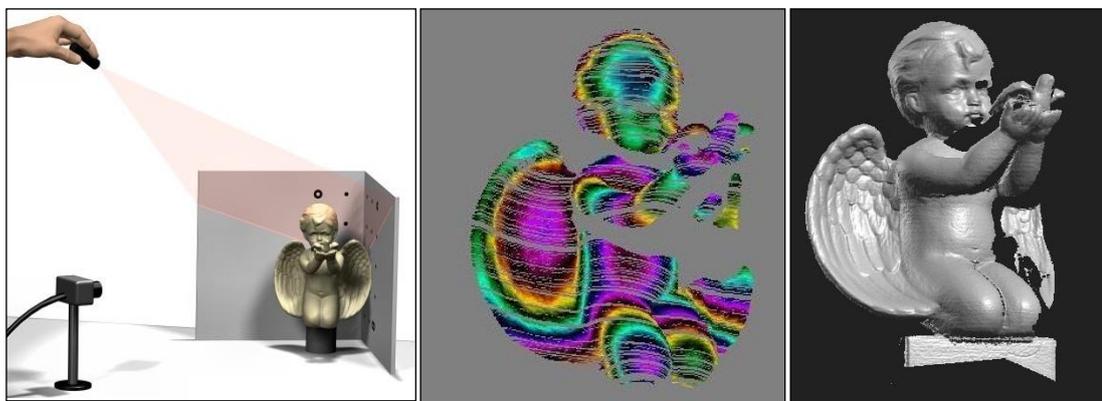


Figura 29. Proceso de escaneo laser con David 3D. (Imágenes extraídas del manual de usuario de David Laser Scanner)⁸¹

El software David Laser Scanner también se puede emplear para obtener registros 3D con luz estructurada incoherente en vez de un láser por ejemplo proyectando el patrón de franjas con un proyector de video (Figura 30). Registrando las deformaciones de las franjas el software brinda una malla 3D precisa de la superficie del objeto. La calibración es igual que para el caso del láser, pero el escaneo será más rápido, solo dura algunos segundos. En este caso los paneles de calibración pueden retirarse en el momento del escaneo.

⁸¹ http://wiki.david-3d.com/david3_user_manual/3d_laser_scanning



Figura 30. Configuración de sistema de escaneo por luz estructurada de David Laser Scanner. (Imagen extraída del manual de usuario de David Laser Scanner)⁸²

En este tipo de scanner se puede eliminar el fondo utilizado para calibración si se colocan la cámara y el proyector a distancias fijas. Una vez calibrado, si este conjunto se deja fijo, puede ser trasladado, logrando así poder contar con un escáner portátil

Cabe mencionar que el software David Laser Scanner completo tiene un precio accesible y que además se puede adquirir una versión gratuita limitada.

Existen otras opciones de bajo costo basadas en procedimientos similares que utilizan códigos abiertos. Una de ellas es la propuesta de Jean-Yves Bouguet y Pietro Perona (BOUGUET y PERONA, 1998) que se compone de 5 elementos: una cámara de video, una fuente de luz, un palo, dos superficies planas, y un tablero de ajedrez (Figura 31). El procedimiento consiste en calibrar primero el sistema generando una sombra plana del palo y moverlo de izquierda a derecha, mientras la cámara registra las imágenes para cada posición de esa sombra. Luego de haber hecho esta calibración de la cámara, la profundidad de cada pixel de la imagen puede ser reconstruida por triangulación, usando un procedimiento geométrico simple y librerías de códigos de procesamiento de imágenes (TAUBIN y LANMAN, 2009).

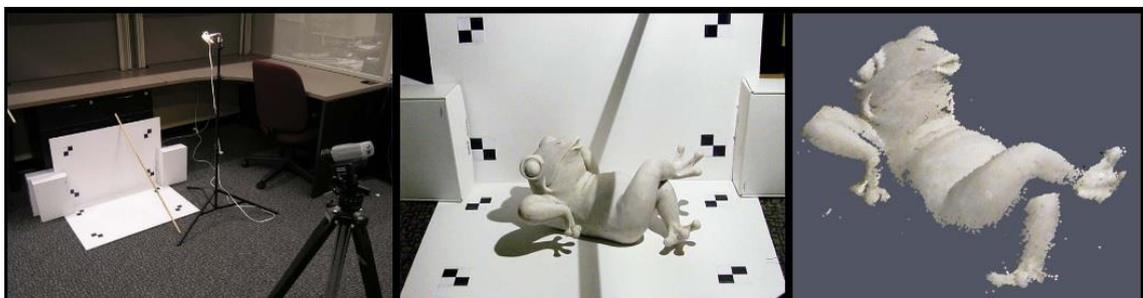


Figura 31. Configuración para escaneo 3D basado en el método de BOUGUET y PERONA, 1998, utilizado por TAUBIN y LANMAN, 2009.

⁸² http://wiki.david-3d.com/david3_user_manual/structured_light

3.2.3. Alcances y limitaciones de las técnicas de escaneo 3D

Además de la limitación del costo económico de los escáneres comerciales, otra limitación de las técnicas de escaneo en 3D es la complejidad instrumental de muchos de estos dispositivos. Por otro lado, si se quiere utilizar escáneres 3D para el registro de bienes culturales se debe considerar lo siguiente:

- **La posibilidad de portabilidad del instrumento.** Muchos escáneres comerciales son difíciles de trasladar o manipular y esto puede ser un problema para cierto tipo de piezas. Algunos son dispositivos estáticos en forma de caja donde se introduce el objeto dentro y se lo hace girar. Otros son manejados manualmente por medio de un brazo flexible, el cual contiene el emisor de luz y la detección por cámara.
- **Resolución:** la resolución de la imagen 3D respecto al objeto real varía de acuerdo al tipo de escáner y objeto en cuestión.
- **El tamaño de la malla 3D:** Los resultados obtenidos con escáneres 3D por lo general son conjuntos de mallas poligonales o de nubes de puntos que deben ser alineados y fusionados para formar el objeto completo. Estas mallas ya tienen de por sí un tamaño importante separadas, lo que significaría un gran tamaño en la imagen 3D final, superando los 30 GB en algunos casos (LEVOY et al., 2000).
- **Posibilidad de procesamiento en tiempo real:** las operaciones como la instalación, transferencia de datos y modelado, deberían hacerse paralelamente al escaneo, para poder verificar la calidad de las mediciones en el momento en que se adquieren y así minimizar los tiempos.

Las opciones gratuitas como las basadas en paneles de calibración y el uso de códigos abiertos, tienen ventajas en cuanto a costos, pero implican algunos conocimientos de programación en procesamiento de imágenes, formación poco común entre los profesionales de la conservación y restauración. En el desarrollo de esta tesis se ha experimentado con este tipo de escáneres llamados también “*do it yourself*”. Sin embargo, se comprobó la poca receptividad que puede llegar a tener en usuarios no calificados, además de que para lograr resultados aceptables se debe pasar por varios procesos de programación diferente. Tal sería el caso del sistema propuesto por Taubin y Lanman.

Al mismo tiempo, la dependencia de paneles de calibración implica limitaciones en el tamaño de los objetos a escanear, ya que deberán ajustarse a un espacio determinado.

Otra de las desventajas del escaneo frente a la fotogrametría digital, es que requiere más tiempo, dado que se necesita escanear las diferentes partes del objeto por vez, y luego unirlos en un todo. Tampoco garantiza que el alineamiento y fusión sea preciso. Las condiciones ambientales que se dan en el momento del escaneo láser o de luz estructurada pueden afectar los resultados

sin que el usuario se dé cuenta (cambios en la posición de los elementos del sistema por movimientos imperceptibles, diferentes intensidades de iluminación, etc). Esto no ocurre en la fotogrametría digital, ya que es más difícil cometer errores una vez que las condiciones de toma de fotografías ya fueron configuradas y testeadas.

Algunas propiedades ópticas específicas pueden crear problemas con los escáneres 3D de láser y de luz estructurada. Las superficies altamente reflectantes, como el metal pulido, pueden interferir en los registros. En la industria, estas superficies a veces están recubiertas con spray mate para reducir los reflejos. Las superficies muy oscuras también pueden ser problemáticas, así como los bordes afilados y los materiales translúcidos. Naturalmente, los objetos que cambian de forma cuando son manipulados son problemáticos con la mayoría de los sistemas de registro 3D. Los ejemplos incluirían aquellos que tienen partes móviles o ninguna estructura de soporte fija, tales como trajes, estructuras inflables, plumas, cabello y caucho.

Cuando se desea capturar el color, la iluminación ambiental adquiere un papel tan importante como en la fotografía. Mientras que la captura de datos sin información de color mejora con poca o ninguna luz ambiental, los datos de color requieren atención a la iluminación del objeto. El éxito de la captura del color depende todavía de la capacidad de controlar la luz ambiental y la luz direccional en un objeto durante la exploración, lo que puede ser difícil de manejar. (WACHOWIAK y KARAS, 2009).

3.3 Procesamiento de imágenes 3D

En procesamiento digital de imágenes aparecen dos conceptos que es importante tener en cuenta, el **modelado** y el **renderizado**. En el campo de los gráficos 3D por computadora, modelado 3D comprende la creación de una representación matemática digital de una escena/objeto (real o no) a través de un software especializado. Modelado sería entonces el proceso base involucrado en la adquisición de imágenes 3D, por ejemplo, con las técnicas descritas en la sección anterior. Sin embargo, el término “modelado” ha sido escogido en esta tesis para referir solo a los procesos que implican diseño o “creación” de mallas a partir de otras ya estandarizadas que brindan los software comerciales más conocidos, con el fin de construir nuevos objetos, sin pasar por la etapa de la adquisición de datos 3D de la realidad (por ejemplo, mediante escáneres o fotogrametría).

El renderizado es la aplicación de un conjunto de técnicas que, a partir de un modelo digital, permiten producir nuevas imágenes (estáticas o animaciones) y que además funciona como instrumento de comunicación.

Para ser más específico, el “*render*” es una imagen digital que se crea a partir de un modelo o escenario en 3D. Su objetivo es dar una apariencia realista al modelo desde cualquier perspectiva, simulando el comportamiento por ejemplo de luz, textura y materiales.

En esta tesis, las imágenes 3D utilizadas son representaciones del objeto real, por ejemplo, una obra de arte o un objeto de valor patrimonial. Como se verá en el capítulo 6 el “renderizado” se aplicó en algunos casos en la etapa de post-procesamiento de los datos adquiridos con las técnicas de registro 3D, para darle a los objetos digitalizados un adecuado contexto y aspecto.

Generalmente los resultados generados por las técnicas de escaneo láser y luz estructurada y por fotogrametría con Structure from Motion pueden ser mallas poligonales, es decir, superficies 3D, que pueden o no tener textura⁸³ incorporada, o también pueden ser nubes de puntos densas con valores RGB. Estos resultados necesitan ser “limpiados” del fondo y ruido, alineados para formar imágenes 3D completas (por ejemplo, el caso de varios escaneos de las distintas caras de un objeto, que al juntarlas forman el objeto completo) o procesados para generar mallas texturizadas más completas. El procesamiento de imágenes 3D cumple una función muy importante en el registro de objetos y obras ya que de ello depende su amplio abanico de aplicaciones: la conversión de formatos (PLY, OBJ, STL, VRML, XYZ, U3D, 3Ds, DAE, etc.) para su utilización e importación a otros programas de uso común (que pueden incluir páginas web de museos); el procesamiento de los datos para obtener más información, como por ejemplo, dimensiones del objeto, volúmenes, estudios de tensiones, o la edición de la imagen 3D para hacer réplicas a escala, soportes, contenedores y marcaje en el registro virtual. En general, las aplicaciones de software 3D utilizan mallas poligonales, superficies NURBS, o modelos CAD.

3.3.1 Software de procesamiento de imágenes 3D

El modelado en 3D y la edición de mallas son herramientas bastante comunes hoy día y el mercado de software ofrece una amplia variedad de soluciones para diferentes propósitos destinados a un público muy variado. Los sistemas de software comerciales más conocidos son 3D Studio™, Cinema4D™, Solidworks y Autodesk Maya™. En cuanto a los gratuitos más populares se encuentran el Blender, MeshLab y MeshMixer. Por otro lado, las colecciones de librerías para el procesamiento de imágenes cada vez son más, entre ellas están el PCL (*PointCloud Library*), ITK (*Insight Segmentation and Registration Toolkit*) y VXL (*Vision-something-Libraries*). Estas librerías de código abierto contienen algoritmos utilizados para el procesamiento de imágenes 3D.

⁸³ Textura en este caso se refiere al color original del objeto que incorporará la malla superficialmente.

Tal vez el software más utilizado para el procesamiento de los datos adquiridos con las técnicas de escaneo y fotogrametría con SFM sea el MeshLab (CIGNONI et al., 2008). Es un sistema de código abierto para procesamiento de imágenes, desarrollado por el ISTI-CNR de Pisa. MeshLab fue diseñado como una herramienta general para el procesamiento de mallas 3D. El objetivo fue crear un programa fácil de usar y versátil, especialmente para personas sin conocimientos avanzados de modelado 3D. Este programa está orientado principalmente al procesamiento de mallas y, en menor medida, a la edición y diseño, ya que existen muchos software que realizan estas funciones con mayor capacidad para procesar gran cantidad de datos. Permite además a usuarios avanzados, modificar los parámetros involucrados y ajustar algunas funciones. MeshLab se presenta como una aplicación de visualización de mallas, donde un objeto 3D, guardado en una variedad de formatos, puede ser cargado e inspeccionado interactivamente en una forma muy simple, con solamente arrastrar y hacer *click* en la propia malla. Este software soporta muchos formatos, incluyendo los más comunes. Una vez que la malla es importada el usuario puede trabajarla por medio de herramientas interactivas o usando filtros paramétricos que realizan tareas automáticas como suavizado, *re-meshing* (“re-mallado”) o simplificado. También se pueden importar múltiples mallas que pueden trabajarse separadas o conjuntamente, siguiendo un enfoque basado en capas. Entre las herramientas más llamativas de este programa se encuentra la interface de “Paint”, para seleccionar, suavizar y colorear las mallas; la herramienta de “*Measuring*”, que posibilita tomar medidas lineales entre dos puntos de la malla; la herramienta de “*Align*”, para colocar las mallas en el mismo espacio de referencia, muy útil para alinear escaneos; y las herramientas de reconstrucción de superficie. MeshLab ofrece tres algoritmos de reconstrucción de superficie. El primero es un filtro de triangulación interpolador basado en el algoritmo de Ball-Pivoting (BERNARDINI et al., 1999), que trata de construir una superficie conectando todos los puntos. Este tipo de algoritmo no funciona muy bien en presencia de datos con mucho ruido. Los otros dos algoritmos utilizan los datos de entrada para construir una representación implícita y luego “poligonalizarla” usando variantes de cubos (LORENSENW y CLINE, 1987). Uno de ellos está basado en el algoritmo de reconstrucción de superficie de Poisson (KAZHDAN et al., 2006). El otro, llamado *plymc* fue desarrollado en Visual Computing Lab (CALLIERI et al., 2003). *Plymc* es una extensión de la propuesta de CURLESS y LEVOY, 1996, que construye una superficie hermética sin orificios llenando todas las partes faltantes con una superficie de interpolación, pero no soporta la preservación del color. La propuesta de *plymc* preserva el color durante el proceso, pero deja las partes que no fueron muestreadas como áreas con orificios en la malla.

3.3.2. Color y Texturización de mallas

En algunos objetos no alcanza con representarlos por una imagen digital que solamente codifique las características de la forma. También se debe codificar el color y la reflectancia de la superficie. Usualmente estos datos están representados por un “mapa de textura” que le da al modelo un aspecto más realista. En la actualidad solamente algunos escáneres comerciales permiten la adquisición de color junto con los datos geométricos, produciendo mapas de distribución RGB. Además, la mayoría de los software para post-procesamiento, después de alinear y fusionar el conjunto de mapas de distribución, no permiten la producción de mallas a color. La información de color disponible a menudo es manejada simplemente integrando las imágenes RGB en una sola textura (cortando y pegando las partes de las fotos sobre la geometría). El mayor problema de este abordaje, dejando de lado la precisión del mapeo, es la discontinuidad del color (su intensidad o tonalidad) entre diferentes partes de la textura. Esta discontinuidad es originada por las condiciones de iluminación no uniformes mientras se muestrea el color reflejado: los mapas de distribución se toman mediante la modificación de la posición relativa entre el scanner y el objeto (y consecuentemente la iluminación) (CALLIERI et al., 2002).

Uno de los software libres de procesamiento de imágenes, usado para realizar el proceso de texturizado en la malla final de una forma muy pareja es el *Texture Stitcher* (CHUANG et al., 2009). Dada la malla base completa (el resultado de la alineación y fusión de varios escaneos, sin textura) y un conjunto de escaneos texturizados (mallas texturizadas) se define un campo de gradiente de color sobre la malla base, se calcula su divergencia, y se resuelve un sistema de Poisson para obtener el campo de color que mejor se ajuste a los gradientes.

En esta tesis, en las secciones de experimentación, se utilizará este software para resolver los problemas de texturización.

3.3.3. Incorporación de registros 3D en la web: “3DHOP”

Los navegadores web más importantes desarrollados en los últimos años cuentan con soporte gráfico 3D. Sin embargo, definir una escena 3D dentro de una página web no es tan sencillo como diseñar una página web. Se han creado muchas aplicaciones para resolver este problema, pero, por lo general, todo estos software se dirigen a crear juegos 3D en línea, por lo tanto, son útiles si se desea visualizar geometrías simples, pero no son capaces de manejar mallas densas (como las obtenidas por un escáner 3D).

Una solución es la que ofrece el software 3DHOP, diseñado por el Visual Computing Lab (POTENZIANI et al. 2014). Es una herramienta gratuita para la creación de presentaciones multimedia de registros 3D de objetos patrimoniales. Diseñado para la Web, también puede

trabajar localmente en cualquier dispositivo equipado con un navegador común (soluciones de escritorio, *kioks* de museos, etc.). Permite gestionar una visualización interactiva de uno o más modelos 3D, incrustado en un escenario virtual.

Entre sus principales características se destacan: es fácil de usar y está orientado a diseñadores Web; no se requieren conocimientos particularmente CG y es fácil de aprender; es flexible y portable, funciona en todos los exploradores principales (Chrome, Firefox, Opera e Internet Explorer) para Windows, Mac y Linux, sin necesidad de usar *plug-ins*; y está diseñado para 3D de alta resolución gracias al enfoque multirresolución que permite la exploración de modelos muy grandes (millones de triángulos) también en el entorno online.

El visualizador de este software, llamado 3DHOP Viewer, fue diseñado como un elemento HTML, usando los lenguajes JavaScript y HTML. Incorpora la visualización interactiva de modelos 3D en una página Web explotando el elemento CANVAS proporcionado por HTML5. Los formatos soportados incluyen archivos PLY y NEXUS, utilizados respectivamente para los modelos de resolución 3D fijos y de resolución múltiple.

3DHOP puede manejar tres tipos de geometrías diferentes: modelos 3D de resolución simple (menos de 1 Mb); modelos 3D de alta resolución (1-100 millones de triángulos), utilizando antes la conversión al formato NXS; y nubes de puntos (1-100 millones de vértices), también convertidos al formato de multirresolución NXS. Este software sólo soporta mallas con color *per-vertex*, es decir, mallas donde el color está codificado en el vértice, a diferencia de las mallas con textura. A la vez, las normales de los vértices deben ser incluidas en el archivo.

Entre los proyectos que se hicieron con 3DHOP para publicación de patrimonio cultural en la Web se encuentran el proyecto MuSA⁸⁴ en el Museo dei Bozzeti, Pietrasanta, Italia (Figura 32) y la visualización de restauraciones del Templo de Luni⁸⁵ (Figura 33), entre otros.

⁸⁴ http://3dhop.net/demos/musa/index_musa.html

⁸⁵ http://3dhop.net/demos/luni/index_luni.html

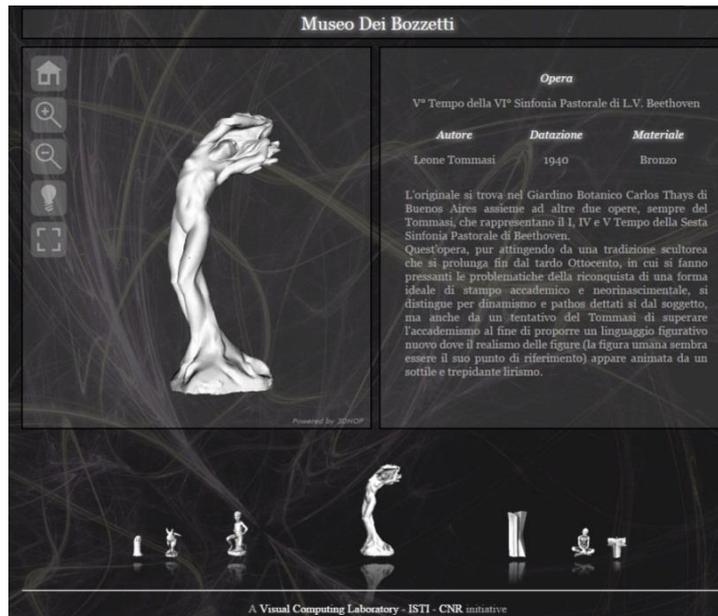


Figura 32. Visualización de una obra del museo Dei Bozzetti, Pietrasanta, Italia, en 3DHOP. A la izquierda, hay cinco botones para interactuar con la imagen 3D de la escultura. También se utiliza el mouse para desplazar y rotar el modelo.

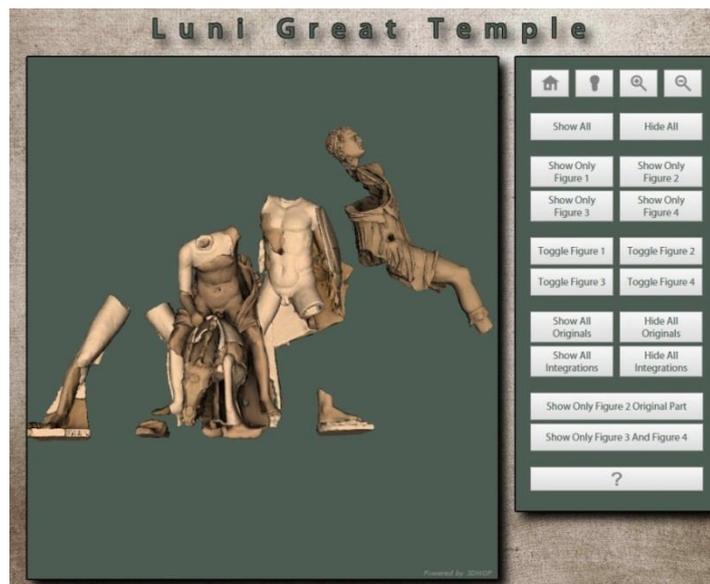


Figura 33. Visualización de un grupo escultórico en 3DHOP. Los botones interactivos que aparecen en pantalla permiten diferenciar las partes originales de las reconstrucciones, así como un personaje de otro.

3.4. Referencias

ALBY, E. et al. “Low cost solutions for dense point clouds of small objects: Photomodeler scanner vs. David Laserscanner,” 22nd CIPA Symposium, October 11-15, 2009, Kyoto, Japan.

BERNARDI, F. y RUSHMEIER, H. “The 3D Model Acquisition Pipeline” en Computer Graphics Forum, Vol. 21, No. 2, pp. 149-172. 2002.

BERNARDINI F. et al. “The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction”. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 5, 4 (Oct.-Dec. 1999), 349–359.

BLAIS, F. 2004. Review of 20 years of range sensor development. Journal of Electronic Imaging, 13(1): 231–243

BOUGUET, J.Y. y PERONA, P. “3D Photography on Your Desk”. In Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision (ICCV '98). IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 43-.1998.

CALLIERI, M. et al. “Reconstructing textured meshes from multiple range + rgb maps State of the Art,” 7th Int. Fall Work. Vis. Model. Vis., pp. 419–426, 2002

CALLIERI, M. et al.: “VCLab’s tools for 3D range data processing”. In VAST 2003 (Bighton, UK, Nov. 5-7 2003), D. Arnold A. C., Niccolucci F., (Eds.), Eurographics, pp. 13–22, 2003.

CALLIERI, M. et al. “Masked Photo Blending: mapping dense photographic dataset on high-resolution 3D models”. Computer and Graphics, vol 32 (4), pp. 464-473. 2008.

CALLIERI M. et al. “Modelli digitali 3D per il supporto al restauro: riassetto digitale e ricostruzione virtuale” En: Lucia Arbace, Elisabetta Sonnino (Eds.) La madonna di Pietranico: Storia, restauro e ricostruzione di un'opera in terracotta. Pescara: Edizioni ZIP, p.p. 74-82. 2011.

CANO et al. “Uso de escáner láser 3D para el registro del estado previo a la intervención de la Fuente de los Leones de La Alhambra” Virtual Archaeology Review (ISSN: 1989-9947) 05/2010; 1(2):89-94.

CHUANG, M. et al. “Estimating the Laplace-Beltrami Operator by Restricting 3D Functions” In: 09 Proceedings of the Symposium on Geometry Processing. Pages 1475-1484. Berlin, Germany, July 15 - 17, 2009.

CIGNONI, P. et al. “MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool”. Eurographics Italian Chapter Conference, Salerno, Julio 2008.

CORSINI, M. et al. “Image-to-Geometry Registration: a Mutual Information Method exploiting Illumination-related Geometric Properties”. Computer Graphics Forum, vol. 228 (7). 2009.

CORSINI, et al. “Fully automatic registration of image sets on approximate geometry” International Journal of Computer Vision, 102(1-3), 91–111. 2013.

CURLESS, B. y LEVOY, M. “A volumetric method for building complex models from range images”. In Comp. Graph. Proc., Annual Conf. Series (SIGGRAPH 96) ACM Press, 1993, pp. 303–312.

- DOCCI, M. y MAESTRI, D. “Manuale di rilevamento architettonico e urbano”. Collana: Grandi Opere. Editori Laterza. 2015.
- FOREST COLLADO, J. “New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners” Ph.D. thesis, Universitat de Girona, p. 150. 2004.
- FRANKE et al. “Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach” (Eds.): DAGM 2006, LNCS 4174, pp. 718–728, 2006, Springer Berlin Heidelberg 2006.
- FURUKAWA, Y. et al. “Clustering view for multi-view stereo”. Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 13–18 June, San Francisco, USA, pp. 1434–1441. 2010.
- FURUKAWA, Y. y HERNÁNDEZ, C. “Multi-View Stereo: A Tutorial. Foundations and Trends”. En: Computer Graphics and Vision, vol. 9, no. 1-2, pp. 1–148, 2013.
- FURUKAWA, Y. y PONCE, J. “Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis”. Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 17–22 June, Minneapolis, USA, pp. 1–8. 2007.
- GALANTUCCI, L.M. et al. “A powerful scanning methodology for 3D measurements of small parts with complex surfaces and sub millimeter-sized features, based on close range photogrammetry”, Precision Engineering, Disponible online, 7 August 2015, ISSN 0141-6359, <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.07.010>.
- GENG, Jason. “Structured-light 3D surface imaging: a tutorial” Advances in Optics and Photonics. Vol. 3, Issue 2, pp. 128-160. 2011.
- GÓMEZ LAHOZ, Javier “Introducción a la fotogrametría digital: el método general de la fotogrametría digital” Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Escuela Politécnica Superior de Ávila. 2010
- GORTHI S.S. y RASTOGI, P. “Fringe projection techniques: whither we are?” Opt. Lasers Eng. 48(2), 133–140. 2010.
- HUANG, T. “Computer Vision : Evolution And Promise”. 19th CERN School of Computing, Egmond aan Zee, The Netherlands, 8 - 21 Sep 1996, pp.21-25 (CERN-1996-008). 10.5170/CERN-1996-008.21.
- ISHIKAWA, H. y GEIGER, D. “Occlusions, discontinuities, and epipolar lines in stereo”. En Fifth European Conference on Computer Vision (ECCV '98), 2-6 June 1998, Freiburg, Germany, 1998
- KAZHDAN, M. et al. “Poisson Surface Reconstruction”. Eurographics Symposium on Geometry Processing. K. Polthier & A. Sheffer, eds. 2006.
- LAMBERS, K. et al. “Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modeling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru” En: Journal Archaeol. Sci. 2007, Vol 34, p.p. 1702-1712
- LEVOY, M. et al. “The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues” En: Proc. SIG-GRAPH 00, Computer Graph. Proc., Annu. Conf. Ser., New Orleans, Louisiana, 2000, p.p. 131-144.

- LORENSENW. E. y CLINE H. E. "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm". In ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 87 Proceedings) (1987), vol. 21, pp. 163–170
- LOWE, D. G. "Object recognition from local scale-invariant features". Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 1999. pp. 1150–1157.
- MOFFITT, F.H. y MIKHAIL, E.M. "Photogrammetry." 3rd Ed. Harper & Row, Inc. N.Y., U.S.A. 1980.
- PANKAJ, Dhanya S. "A Review of 3-D Imaging Techniques and Products" Journal of Innovation in Computer Science and Engineering. Vol.3(2), Jan - Jun 2014 @ ISSN 2278 – 0947
- POTENZIANI, M. et al. "An Advanced Solution For Publishing 3D Content On The Web" MWF2014: Museums and the Web, Florence, 2014.
- REMONDINO, F. "IMAGE-BASED 3D MODELLING : A REVIEW," vol. 21, no. September, pp. 269–291, 2006.
- REMONDINO, F. et al. "State of the art in high density image matching". The Photogrammetric Record, 29(146), 144-166. 2014.
- ROCCHINI, C. et al. "A low cost 3D scanner based on structured light," Comput. Graph. Forum, vol. 20, no. 3, pp. 299–308, 2001.
- SAMAAN, M. et al. "Close-Range Photogrammetric Tools for Small 3D Archeological Objects," Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. Vol. XL-5/W2, vol. XL, no. September, pp. 2–6, 2013.
- SANSONI, G. et al. "State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation," Sensors, vol. 9, no. 1, 2009, pp. 568–601.
- SCHAICH, M. "Combined 3D Scanning and Photogrammetry Surveys with 3D Database Support for Archaeology & Cultural Heritage. A practice report on ArcTron's Information System aSPECT3d," no. 2012, pp. 233–246, 2013.
- SZELISKI, R. "Computer vision: algorithms and applications" .Springer Science & Business Media. 2010.
- TARGOWSKI, P. et al. "Optical coherence tomography in art diagnostics and restoration" Applied Physics A 92 (1), 1-9 .2008
- TAUBIN, G. y LANMAN, D. "Build your own 3D scanner: optical triangulation for beginners". In ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Courses (SIGGRAPH ASIA '09). ACM, New York, NY, USA, Article 2, 94 pages. 2009.
- THESSALONIKI, G. "Capturing the Past and Present: Tools and Methodologies for 3D Modeling of Small Objects," Int. CIPA Symp., pp. 3–8, 2009.
- TORRES, J.C. et al. "Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio," Virtual Archaeol. Rev., vol. 1, 2010. pp. 51–54
- TORRES, J.C. et al., "3D Digitization using Structure from Motion," CEIG - Spanish Comput. Graph. Conf., pp. 1–10, 2012

- TRIGGS et al. "Bundle Adjustment — A Modern Synthesis," *Vis. algorithms theory Pract. S*, vol. 34099, pp. 298–372, 2000
- TSAI, R.Y. "An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision". In: *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*. (1986) 364–374
- VAN DAMME, T. "Computer Vision Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording," University of Southern Denmark, 2015.
- VÁZQUEZ-ARELLANO, M. et al. "3-D Imaging Systems for Agricultural Applications — A Review," *Sensors* 2016, 16, 618.
- WACHOWIAK, M.J. y KARAS, B.V. "3D Scanning And Replication for Museum AND Cultural Heritage Applications," *J. Am. Inst. Conserv.*, vol. 48, no. 2, pp. 141–158, 2009.
- WANG Y.F. "A Comparison Study of Five 3D Modeling Systems Based on the SfM Principles. Technical Report", TR 2011- 01. Tech. rep., Visualsize Inc., 2011
- WEI, O.C. et al. "3D Documentation and Preservation of Historical Monument Using Terrestrial Laser," *Science*, vol. 10, no. 1, pp. 73–90, 2010
- WEI, W. et al. "Three dimensional documentation of two dimensional works of art" En: Salimbeni, Renzo; Pezzati, Luca (Eds) 2005, *Optical Methods for Arts and Archaeology. Proceedings of the SPIE*, Nro 5857, p.p. 52-61.
- WU et al. 2011. "Multicore bundle adjustment". *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2011 IEEE Conference on. 20-25 June 2011. Providence.
- YANAGI, H. y CHIKATSU, H. "3D modeling of small objects using macro lens in digital very close range photogrammetry," *ISPRS Arch*, 38, 2010, p.p. 617-622.

Capítulo 4

EL REGISTRO 3D EN LA DOCUMENTACIÓN Y CONSERVACIÓN DE ARTE CONTEMPORÁNEO

En el capítulo 1 se mencionó que el arte contemporáneo tiene diversos tipos de desarrollo que se expresa en temáticas, corrientes y técnicas empleadas. En esta tesis solo se abordará el registro de piezas de arte de instalación y de Media Art, que, como ya se explicó, es el tipo de obra que más dificultades presenta al momento de su conservación, documentación y exhibición. Por lo tanto, en el presente capítulo se presentarán y analizarán los últimos avances sobre documentación de arte de instalación y Media Art.⁸⁶

A pesar de que la tecnología computacional ha hecho importantes aportes al registro del aspecto tridimensional y espacial de un objeto (TORRES et al., 2010; DELLEPIANE y CALLIERI, 2011), todavía existe una gran brecha entre los experimentos realizados con objetos simples y la implementación práctica en obras de arte de instalación. La tridimensionalidad y las relaciones obra-espacio y obra-espectador son, como se mencionó en el capítulo 1, un aspecto esencial a tener en cuenta en la descripción y documentación de obras de instalación. En este sentido podemos afirmar que las técnicas de registro 3D y el procesamiento de imágenes permiten el acceso virtual y la reconstrucción de instalaciones artísticas. Esto no solo posibilita al público y a los investigadores tener una experiencia más intensa de la obra, de la intención del artista y de su significado, sino además brinda la posibilidad de visualización virtual tridimensional para fines de “re-creación”, reinstalación y conservación. Sin embargo, las opciones de virtualización y de “recreación”⁸⁷ podrían ser muy diferentes dependiendo del objeto y la intención del artista. Una forma de establecer criterios para este fin puede ser mediante el empleo de cuestionarios dirigidos al artista y al conservador y por qué no también al público.

⁸⁶ La información descripta está basada en la interacción académica en una visita a la ciudad alemana de Karlsruhe, en particular al *Zentrum für Angewandte Kulturwissenschaft und Studium Generale (ZAK)* perteneciente al *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. Asimismo, se interactuó con el *Intelligent Sensor-Actuator-Systems Laboratory (ISAS)*, también perteneciente al *KIT*. Ambas instituciones trabajan en conjunto en el proyecto *e-Installation*, el cual será explicado en profundidad en este capítulo.

⁸⁷ Utilizaré la palabra “recreación” como traducción del inglés de “re-enactment” que utiliza MUÑOZ MORCILLO et al. 2016, p. 5. “(...) *in an e-Installation there is no simulation but rather a realistic interaction with a “living document” that re-enacts all features of the real artifact*”.

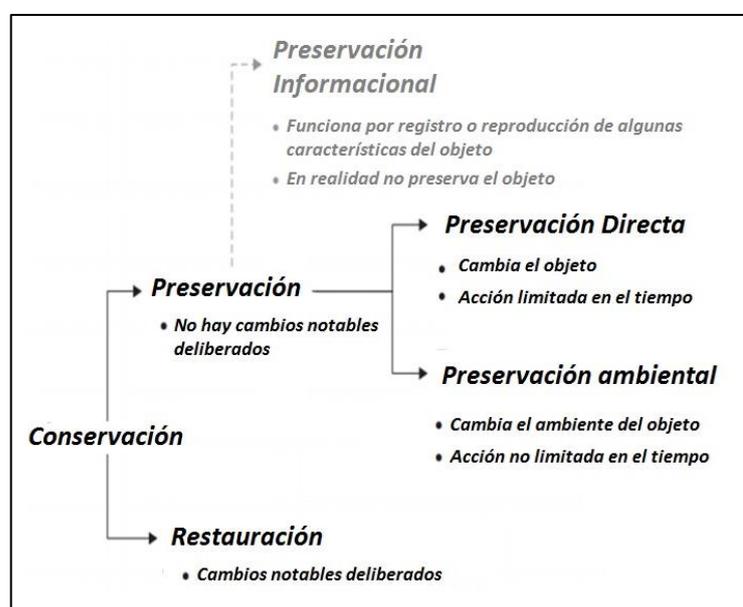
Por otro lado, las tecnologías de modelado 3D, de reconstrucción 3D (con fotogrametría con SFM y escaneo láser o de luz estructurada, por ejemplo) y de telepresencia podrían hacer una contribución importante a la conservación de Media Art. Los materiales, los componentes digitales de software y señales audiovisuales, los patrones cinéticos y de interacción que constituyen una instalación de Media Art podrían ser virtualizados en una imagen 3D dinámica e interactiva, permitiendo un nuevo método de documentación que brinde el acceso por telepresencia a obras de arte raramente exhibidas o destruidas, guardando el nivel de experiencia sinestésica (MUÑOZ MORCILLO et al., 2016). En otras palabras, el concepto de instalación virtual en 3D aportaría una solución a la conservación, documentación y exhibición de las instalaciones y, además, harían al Media Art accesible en cualquier lugar. Sería una experiencia realista de las instalaciones que de otra manera el público no podría apreciar. Esto involucra la digitalización y la recreación virtual de la obra, impactando en los conceptos de autenticidad que se tenían hasta ahora en la conservación de obras de arte y el uso de telepresencia como una herramienta de creación de arte.

El *Centre for Cultural and General Studies* (ZAK) y el *Intelligent Sensor-Actuator-Systems* (ISAS), ambos institutos pertenecientes al *Karlsruhe Institute of Technology* (KIT), han aportado significativos avances al campo de la documentación de obras de arte de instalación y arte efímero, mediante el uso de imágenes 3D y técnicas inmersivas de realidad virtual. El objetivo principal de sus investigaciones fue diseñar un nuevo método de documentación sinestésica para obras de arte de nuevos medios en riesgo, bajo la perspectiva de la "preservación informacional" (MUÑOZ VIÑAS, 2003). Para este propósito, han utilizado tecnologías avanzadas de modelado 3D y de telepresencia, que permiten una experiencia de inmersión realista. La publicación del trabajo "*e-Installation: Synesthetic Documentation of Media Art via Telepresence Technologies*" (MUÑOZ MORCILLO et. al, 2016) fue un primer paso para mejorar la documentación del Media Art no sólo con fines de re-creación, sino también para permitir el acceso permanente a la obra virtualizada. De esta manera, se superan las limitaciones de los métodos tradicionales de documentación audiovisual, como el vídeo o la fotografía. Los objetivos dentro del campos de investigación involucrados (Conservación de Media Art, Reconstrucción y Modelado 3D y Telepresencia) incluyen el avance de la documentación del Media Art a un nivel sinestésico y el desarrollo de mejores técnicas para la representación de inmersión e interacción.

En este sentido, resulta pertinente para esta tesis adoptar el concepto de *e-Installation*, así como la metodología desarrollada por el ZAK y el ISAS.

En el capítulo 1 ya se mencionaba el concepto de "preservación informacional". Muñoz Viñas hace distinción entre los conceptos de conservación y conservación informacional (Cuadro 1). La restauración muchas veces se aplica sobre objetos que tienen valor documental, pero no

valor simbólico o historiográfico en el objeto mismo, sino la información que fue *registrada* sobre ellos. A estos objetos Viñas los llama “objetos de conservación informacional”. Por otro lado, el desarrollo de nuevos soportes de la información ha permitido la aparición de sistemas viables de conservación informacional que no requieren la conservación del objeto.; se puede, por ejemplo, digitalizar una obra y conservarla en forma *virtual* en discos rígidos, CDs, etc. Por mucho tiempo, la restauración informacional ha sido competencia del restaurador *tradicional* (es decir, del restaurador de objetos). Las técnicas de conservación informacional se han vuelto útiles en el caso de documentos de valor historiográfico: por ejemplo, la sustitución de objetos por réplicas, como la cueva de Altamira en España, o la frecuente digitalización de documentos en archivos históricos para que el usuario no necesite manipular el original.



Cuadro 1. Clasificación de las actividades de la Conservación. (Esquema extraído de MUÑOZ VIÑAS, 2005).

Pero la conservación informacional no coincide con el concepto de Conservación, dado que los objetos no son simbólicos, sino más bien tienen una utilidad de documentación. Fotografiar, fotocopiar o escanear un documento no equivale a conservarlo o restaurarlo, sino a conservar su contenido, su información; pero esto no es propiamente restauración.

Como conclusión, se podría situar a la documentación/exhibición mediante técnicas de realidad virtual (las *e-Installations*) en esta categoría, la de conservación informacional; por lo tanto, las *e-Installations* no conservan a la obra de arte en sí misma (MUÑOZ MORCILLO et al., 2016). Sin embargo, podrían considerarse como un método de migración.

4.1. El “modelado” como complemento y alternativa del registro 3D

En algunos trabajos se ha puesto de manifiesto algunas limitaciones de las técnicas de registro 3D, como la fotogrametría y el escaneo, para su aplicación en cierto tipo de objetos (BRUNIER et al., 2015; SANSONI et al., 2009; MICHELETTI et al., 2015). En particular los realizados con materiales que reflejan la luz o son muy transparentes.

Esto podría representar un problema en obras de arte contemporáneo como instalaciones realizadas con objetos de metal, con componentes mecánicos, o realizadas con cierto tipo de resinas sintéticas. Por otra parte, los espacios vacíos y la relación entre objetos dispuestos en una escena y sus distancias también pueden ser un problema para el registro 3D. Asimismo, elementos como luz, sonido, video y componentes electrónicos que pueden estar visibles o invisibles dentro de estructuras, como en el caso de instalaciones de Media Art, también representan un problema a tener en cuenta. Todas estas posibles situaciones representan limitaciones para el registro 3D cuando se utiliza fotogrametría o escaneo laser o con luz estructurada.

Estas situaciones han dado lugar a la necesidad de responder cuestiones tales como: cuando se utiliza un componente eléctrico industrial ¿Es importante mantener la forma exacta? ¿Cómo se hace para registrar en una imagen 3D una iluminación, sonido, movimiento, el efecto de la gravedad o líquidos? ¿Cómo se hace para registrar un objeto transparente?

Estas son algunas de las nuevas preguntas que plantean la documentación de obras de arte contemporáneo y obligan a pensar en soluciones que vayan más allá del registro estático y permitan interactuar con la materialidad de una manera virtual.

Los criterios de modelado y/o reconstrucción 3D de una obra deben definirse antes de encarar cualquier proyecto de digitalización. En las obras de arte contemporáneo abundan muchos componentes diversos, y cada uno tiene un aspecto diferente para documentar o exhibir: podría ser su materialidad, su movilidad, su visibilidad o su funcionalidad, como, por ejemplo, la presencia de cables y circuitos, o los entornos intencionalmente creados por el artista. En el caso del registro 3D de componentes industriales, una posible respuesta es el modelado.

El modelado 3D permite reemplazar el registro por técnicas constructivas controladas por el diseño por computadora. El modelo 3D es un archivo que contiene dos tipos de información: la geometría (forma del objeto) y los atributos de la superficie (la apariencia de un determinado material: vidrio, madera, plástico, etc.). Uno de los software más completos para realizar modelado 3D es Blender. Es un software libre de gráfica computacional que contiene funciones para modelar cuerpos en 3 dimensiones, texturizar, animar y renderizar.

Antes de empezar a modelar un objeto en 3D, se debe contar con la documentación sobre él: imágenes, descripciones, medidas, forma, etc. También es importante contar con una estrategia

de acción. Muchas veces es difícil definir qué elementos deberán aparecer en el registro 3D. Por ejemplo, las partes funcionales, tales como el suministro de energía, no juegan un papel tan importante en la lectura de la obra, aunque podría haber casos en los que el artista quiera subrayar estos aspectos técnicos. De aquí se desprende la pregunta de si la transformación de una obra con funcionamiento analógico a su modelo digital no produce otra clase diferente de obra artística. Estas preguntas y debates deberían ser tratadas en una instancia previa, no sólo con el artista, sino con los demás agentes involucrados en el proceso de conservación: el conservador, el restaurador, el museólogo, el público, etc. Una forma de acercarse a una “legibilidad” (MUÑOZ VIÑAS, 2003) adecuada podría ser mediante la utilización de cuestionarios como el ya mencionado de Jon Ippolito.

Asimismo, es importante definir cuáles son los elementos de la obra que deben ser reproducidos con alta precisión, como por ejemplo sus colores, texturas y deterioros. Esto determinará si un objeto deberá ser modelado con técnicas de modelado 3D o “registrado” con las técnicas de adquisición de imágenes (fotogrametría o escáneres).

También se debe decidir en cuantos modelos puede dividirse el mismo objeto. Por ejemplo, una lámpara podrá estar formada por el pie, la bombilla y la pantalla. En otro tipo de objetos, como los de formas orgánicas, habrá que mantener cierta continuidad en algunas zonas. Por ejemplo, en el modelado del cuerpo de un animal, o de partes del cuerpo humano, donde cada parte podrá ser considerada como modelos separados (un brazo o una pierna que tienen diferentes comportamientos o movimientos), todos deberán estar perfectamente unidos sin que se noten discontinuidades. Para modelar la geometría del objeto se pueden utilizar estructuras predefinidas (formas ya armadas disponibles en los software de diseño 3D), mallas poligonales, NURBS, subdivisión de superficies, etc. También existen métodos que facilitan el modelado de los objetos simétricos, como la construcción por espejo y la repetición de las partes. Otro criterio a tener en cuenta es el nivel de detalle del objeto. Se puede ahorrar tiempo de modelado si se utilizan pocos polígonos en objetos que no presentan detalles en su superficie. Por último, es muy útil contar con “apoyos”. Esto es la creación de una imagen 2D de fondo como guía para la construcción de la silueta del objeto, y por el método de extrusión se puede ir generando la profundidad.

La simulación del comportamiento de la luz es uno de los factores más importantes para conseguir el efecto de apariencia real de un objeto. Conociendo las características geométricas y las propiedades ópticas de los materiales, es posible simular fenómenos tales como la reflexión y propagación de la luz en una escena. Generalmente hay dos métodos para trabajar estos efectos: el local donde la luz únicamente interactúa con las superficies; y el método global, que trata de calcular todas las interacciones (rebotes) de la luz con las superficies de la escena. La figura 34 muestra un ejemplo de escena renderizada con iluminación local y global. La segunda, además de incorporar la iluminación directa que proviene de la primera interacción de las

partículas de luz con las superficies, incorpora la iluminación indirecta reflejada por otras superficies existentes en la escena.

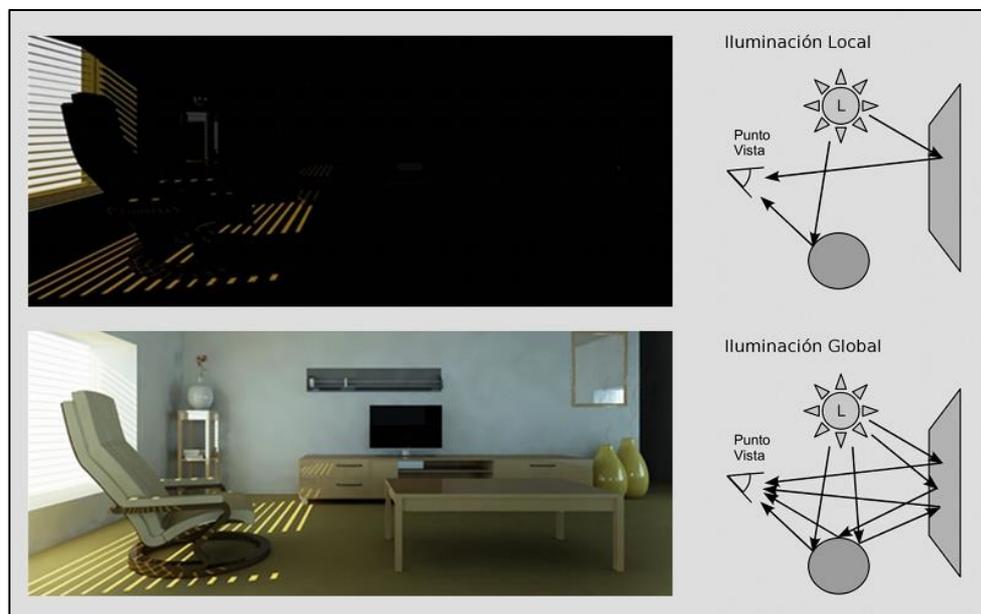


Figura 34. Escena renderizada con iluminación local e iluminación global.

Algunos software de modelado 3D poseen más opciones para la iluminación global, como el método de Radiosidad⁸⁸ y el método de *Ambient Occlusion*⁸⁹.

Además de los modelados para la interacción de la luz con los objetos, están los que tienen tipos de luz. Estos incluyen opciones tales como luz solar, luz artificial de una lámpara, luz concentrada, luz de área, etc. Cada uno de estos tipos de luz tienen propiedades que aportarán a la escena u objeto una sensación de realismo o de emoción particular.

Antes de modelar la iluminación, se requiere dar a las superficies de los objetos virtuales las propiedades que determinaran el comportamiento de la luz, como su textura. Esto es lo que se

⁸⁸ En la técnica de Radiosidad (*Radiosity*) se calcula el intercambio de luz entre superficies difusas. Esto se consigue subdividiendo el modelo en pequeñas unidades denominadas parches, y éstos a su vez en otras unidades más pequeñas, elementos, que serán la base de la distribución de luz final. El modelo básico de radiosidad calcula una solución independiente del punto de vista. Sin embargo, el cálculo de la solución es muy costoso en tiempo y en espacio de almacenamiento. No obstante, cuando la iluminación ha sido calculada, puede utilizarse para renderizar la escena desde diferentes ángulos, lo que hace que este tipo de soluciones se utilicen en visitas interactivas y videojuegos en primera persona. (<http://www.esi.uclm.es/www/cglez/fundamentos3D/05.04.Radiosidad.html>).

⁸⁹ La Oclusión Ambiental (*Ambient Occlusion*) simula la iluminación global "blanda", teniendo en cuenta la cantidad de cielo (que se asume como fuente de luz) visible desde un punto dado. Esto se logra de hecho, emitiendo rayos desde cada punto visible, y contando cuántos de ellos logran alcanzar el cielo, y cuántos, por el contrario, son bloqueados por objetos. La cantidad de luz sobre el punto es entonces proporcional al número de rayos que han "escapado" y han alcanzado el cielo. Se dispara una hemi-esfera de rayos-sombra. Si un rayo pega contra una cara (es ocluido) entonces el rayo es considerado "sombra", de otro modo se lo considera "luz". La relación entre la cantidad de rayos "sombra" y "luz", define cuán brillante será el pixel.

https://wiki.blender.org/index.php/Doc:ES/2.4/Manual/Lighting/Ambient_Occlusion).

denomina “shader”. Entre los *shaders* más conocidos están los especulares y los difusos (Figura 35).

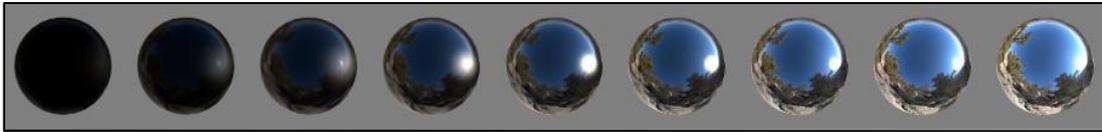


Figura 35. Este gráfico muestra valores especulares y de suavidad para un mismo material.⁹⁰

4.2. El uso de la Realidad Virtual

La Realidad Virtual puede definirse como una tecnología compleja que aprovecha otras tecnologías (como la informática, los gráficos 3D, la robótica, etc.) con el fin de crear un ambiente digital en el que los usuarios se sientan completamente inmersos y con el que puedan interactuar. La VR es hoy en día una tecnología madura, que se utiliza cada vez más en sectores específicos, debido a sus características únicas en términos de inmersión e interacción. CARROZZINO y BERGAMASCO, 2010, proponen definir *inmersión* como la sensación física de estar en un espacio virtual. Por lo general, esto se consigue por medio de las interfaces sensoriales que "rodean" al usuario. Por otro lado, *interacción* está relacionada con la capacidad de usuario de modificar el medio ambiente virtual y recibir una retroalimentación a su comportamiento. Tanto la inmersión e interacción coinciden a dar cuenta de lo que es uno de los principales objetivos de una experiencia virtual: *presencia*, es decir, la creencia de estar de manera real en un espacio virtual.

Hay varias formas posibles de construir un sistema de VR, cada una caracterizada por el tipo de dispositivos, el espacio de trabajo del usuario y los niveles provistos de inmersión, interacción y presencia. En la VR inmersiva, los tres componentes están sustancialmente presentes. Algunas de las características comúnmente disponibles son: la perspectiva dinámica visual basada en movimientos de la cabeza del usuario, la visión estereoscópica, la retroalimentación acústica, la interacción realista con el medio ambiente por medio de interfaces para la manipulación, operación y control y la retroalimentación háptica y (menos frecuente) de movimiento. La *Desktop VR* (de escritorio) puede ser considerada como un subconjunto de VR inmersiva, donde se utilizan componentes de escritorio (por ejemplo, monitores, mouse, joystick, teclado, etc.). Aunque limitado, este tipo de sistemas representa, para muchas personas, la única posibilidad, dada la relación costo-efectividad de acceder a las aplicaciones de realidad virtual.

⁹⁰ <https://docs.unity3d.com/Manual/StandardShaderMaterialParameterSpecular.html>

La tecnología de Realidad Virtual es conocida en diversos campos, como en medicina, en la industria y más recientemente en los videojuegos. En últimos años, la VR está teniendo una alta receptividad en el campo del Patrimonio Cultural y se la está aplicando en un número creciente de aplicaciones. En este campo, la VR constituye un medio para reconstruir obras de arte o ambientes artísticos/históricos que el tiempo puede haber destruido o dañado (SIDERIS, 2006; BAWAYA, 2010). Además, siendo una tecnología muy atractiva, la VR es hoy cada vez más utilizada como herramienta para educación, divulgación o narración de cuentos. En estos casos la información no está mediada por códigos lingüísticos, sino que se transmite principalmente por retroalimentación sensorial (imágenes, sonidos, etc.) y por lo tanto es fácil de entender incluso por usuarios no especializados. (MAGNENAT-THALMANN y PAPAGIANNAKIS, 2005; Di BLAS y POGGI, 2006)

Sobre la base de lo que hasta ahora se ha expuesto, puede parecer que la relación entre VR y Patrimonio Cultural está más que consolidada y que las instituciones culturales, principalmente museos, aprovechan adecuadamente el potencial de esta tecnología. Pero si bien este es el caso de muchos museos interactivos de ciencia, no ocurre lo mismo con los museos tradicionales, que son menos propensos a abrirse a las tecnologías de VR, con excepción parcial de los museos de arte contemporáneo. En algunos casos, la Multimedia juega un rol importante en combinación con los registros 3D (LEVOY, 2010) o también las interfaces multimodales (PETRIDIS et al., 2006). Sin embargo, por lo general, carecen de características de inmersión. Por otro lado, en algunos museos de arte contemporáneo, la VR se utiliza a menudo como un medio para producir nuevas formas de arte en lugar de comunicar obras de arte existentes; es decir, el componente de realidad virtual es parte de la obra y no parte de las estrategias de documentación o exhibición.

En la actualidad existe un gran número de experiencias culturales inmersivas, que utilizan múltiples recursos de modelado como los mencionados y dispositivos de hardware específicos, como anteojos 3D, cascos de visión estereoscópica y sistemas de seguimiento de posición, como el Oculus Rift^{TM91} y el Kinect^{TM92}, dentro de los más actuales y populares.

El *Intelligent Sensor-Actuator-Systems Laboratory* (ISAS), por ejemplo, investiga la telepresencia a través de un sistema llamado "*Holodeck*" (Figura 36), que consta de una red de sensores, un servidor de renderización, equipos de visualización, y un dispositivo háptico. Para la red de sensores, se utiliza un conjunto de dispositivos de Microsoft Kinect interconectados con el fin de capturar la información de profundidad del escenario completo de telepresencia en tiempo real (FAION et al., 2012) (Figura 37). Adicionalmente, el ISAS ha desarrollado una modificación del hardware de estos sensores con el fin de minimizar interferencia. El servidor

⁹¹ <https://www.oculus.com/en-us/>

⁹² <https://dev.windows.com/en-us/kinect>

de renderización es una estación de trabajo encargada del procesamiento de los datos del sensor, del seguimiento del usuario y de renderizar la escena virtual. El equipo de visualización consiste en un HMD⁹³, ya sea un Oculus Rift DK1 o un zSight, que muestra la escena renderizada (datos visuales y acústicos) para el usuario de telepresencia. El HMD está equipado con un IMU⁹⁴ que permite captar la orientación de la cabeza. Por último, el dispositivo háptico es una interfaz háptica semi-móvil que permite al usuario interactuar con el mundo virtual a través de recorridos definidos, imitando paredes y obstáculos. Para posibilitar la experiencia en entornos de rango extendido, por ejemplo, en un campo sin obstáculos se suele utilizar una técnica llamada “*motion compression*”. Ajusta el *input* visual del HDM para guiar al usuario por un camino transformado, que no es el que percibe el usuario (NITZSCHE et al., 2002). Por ejemplo, si el recorrido predicho es una línea recta en el entorno virtual, el algoritmo guiaría al usuario en un recorrido circular dentro del *Holodeck*.



Figura 36. Holodeck, sistema de telepresencia, en el *Intelligent Sensor-Actuator-Systems Laboratory* (ISAS).



Figura 37. Uno de los cuatro dispositivos de Microsoft Kinect interconectados con el fin de capturar la información de profundidad del escenario completo de telepresencia en tiempo real.

⁹³ HMD: del inglés *head-mounted display* (pantalla montada sobre la cabeza).

⁹⁴ IMU: del inglés *inertial measurement unit* (unidad de medición inercial) es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos.

Estos entornos de telepresencia ofrecen una gama aún más amplia de aplicaciones 3D. En el campo de la documentación de arte, la interfaz háptica puede contribuir al registro de arte interactivo, lo que no sería factible sin esta tecnología. Este sistema de telepresencia fue utilizado en la obra “*10.000 moving cities - same but different*” (versión 3 digitalizada) de Marc Lee, una instalación net interactiva con telepresencia, exhibida en el ZKM (Figura 38). Los visitantes pueden seleccionar e interactuar con cualquier ciudad del mundo usando gafas de datos como interfaz digital en un sistema de realidad virtual. Usando un dispositivo Oculus Rift que cuelga del techo, el usuario puede caminar libremente dentro de un espacio de 6x6 m. En la entrada, hay una base con un interruptor de acoplamiento para propósitos de calibración y usabilidad. Los visitantes pueden tomar y depositar las gafas en este punto antes y después de usarlas. Las personas paradas fuera de la instalación también pueden ver la perspectiva del usuario en la proyección en la pared. El sonido es transmitido por un sistema de sonido 5.1, y cuatro Kinects localizan la posición del usuario y la transmiten al Unreal Engine⁹⁵, que teletransporta al usuario a las ciudades deseadas. El contenido generado por el usuario vinculado a la ciudad seleccionada, tal como noticias recientes, tweets, imágenes, vídeos y mensajes de redes sociales, se busca en tiempo real y se muestra como un collage en movimiento sobre las fachadas de un entorno urbano abstracto. A través de este tipo de realidad virtual paradójica que obtiene su información audiovisual del mundo real, el visitante descubre las diferencias locales, culturales y lingüísticas, así como las similitudes de la globalización. Dado que los datos de Internet cambian constantemente, cada solicitud crea nuevas representaciones del mundo como resultado de la relación entre las decisiones de los visitantes y la matriz digital. En este sentido, la obra explora cómo la globalización crea "lugares sin una identidad local" - tal como se describe en el ensayo de Marc Augé *Non Lieux* (1992)-, y estimula una actitud reflexiva apoyada en una nueva “confrontación de inmersión” con la sociedad digital de nuestro tiempo.



Figura 38. “*10.000 moving cities - same but different*”. 2015/2016 (Version 3). Espacio de 6 x 6 x 4m. ZKM | Center for Art and Media Karlsruhe. Izquierda: usuario con casco de realidad virtual, y una pantalla atrás que proyecta lo que el usuario está viendo. Derecha: lo que el usuario ve.

⁹⁵ Unreal Engine es un motor de juego de PC y consolas creados por la compañía Epic Games. <https://www.unrealengine.com/>

4.2.1. La e-Installation

Muñoz Morcillo clasifica a *la e-Installation* como un nuevo método de documentación sinestésico que contribuye a la conservación de Media Art. El término hace analogía a la idea de “e-Book” como la versión electrónica de un libro real. Una e-Installation es una obra de Media Art virtualizada que reproduce todos los niveles de sinestesia, interacción y significado de la obra, utilizando tecnologías avanzadas de modelado 3D y de telepresencia con un alto nivel de inmersión, permitiendo la re-creación de obras de Media Art que ya no son operables o raramente se exhiben (MUÑOZ MORCILLO et al., 2016).

A continuación, se describe en detalle uno de los casos de virtualización más completos realizados hasta la fecha, que se tomará como referencia para el trabajo realizado en esta tesis. Se trata de la obra *Versailles Fountain* (1992) de Nam June Paik (Figura 39), realizado por estudiantes del ISAS para el proyecto “e-Installation” (ZHENG et al., 2014). La elección de la obra, perteneciente al ZKM, se basó en el carácter efímero de la misma y en el hecho de que estaba integrada por componentes dinámicos e interactivos.



Figura 39. Nam June Paik., “Versailles Fountain”, 1992. Foto: EnBW / Steffen Harms © ZKM

El proceso de modelado 3D para “Versailles Fountain” se dividió en diferentes etapas. Primero todos los objetos se midieron *in situ* manualmente, y a través de este relevamiento se pudo hacer el modelo 3D a escala 1:1, lo cual facilita la integración de los objetos después. En esta fase inicial fue muy importante y necesario fotografiar todos los elementos de la obra, ya que al final para texturizar los modelos se utilizaron estas fotos de alta resolución. El paso siguiente fue modelar todos los objetos de la obra y la estructura del fondo, los televisores y los tubos

fluorescentes de acuerdo a las mediciones hechas previamente. Se realizó también una estructura básica del piso, paredes, pilares y techo (Figura 40). Para este fin se eligió el programa Blender que, además, posee paquetes con interfaz de telepresencia. Asimismo, Blender trabaja con mallas poligonales, lo que significa una compatibilidad con varios programas de reconstrucción 3D que se basan en fotogrametría con Structure from Motion. Para hacer la mayoría de los elementos, se comenzó editando mallas preexistentes, como cubos, para transformarlas en polígonos más complejo, que luego pudieron ser suavizados hasta lograr las formas más parecidas al objeto real.

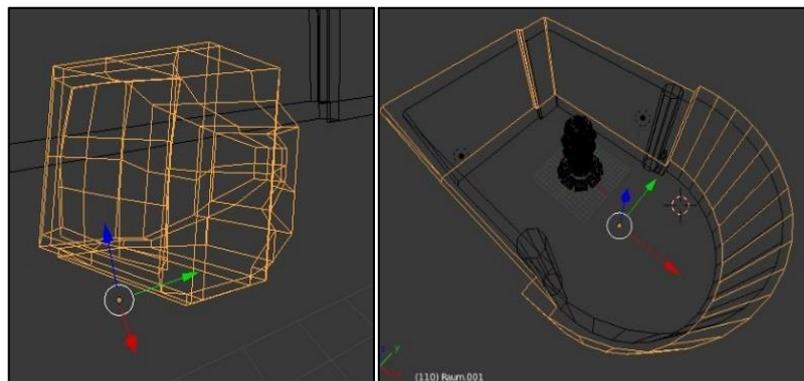


Figura 40. Izquierda: Modelado de televisor en Blender. Derecha: Modelado del entorno de la obra en Blender.

Luego, a los modelos se les añadió el material y la textura (Figura 41). Esta última, sacada de las fotografías, se aplicó mediante métodos de desenvolvimiento y mapeo UV (*UV unwrapping* y *UV mapping*). Por último, todo se unió en un modelo final, con la obra completa en el entorno (Figura 42).

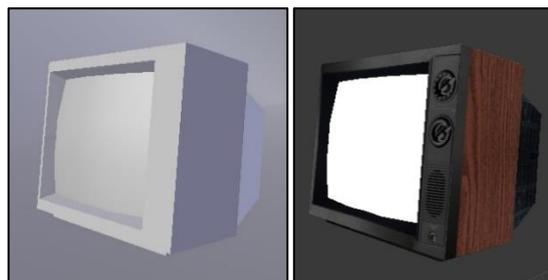


Figura 41. Izquierda: Modelo del televisor con material. Derecha: Modelo del televisor con textura. Visualización en Blender.

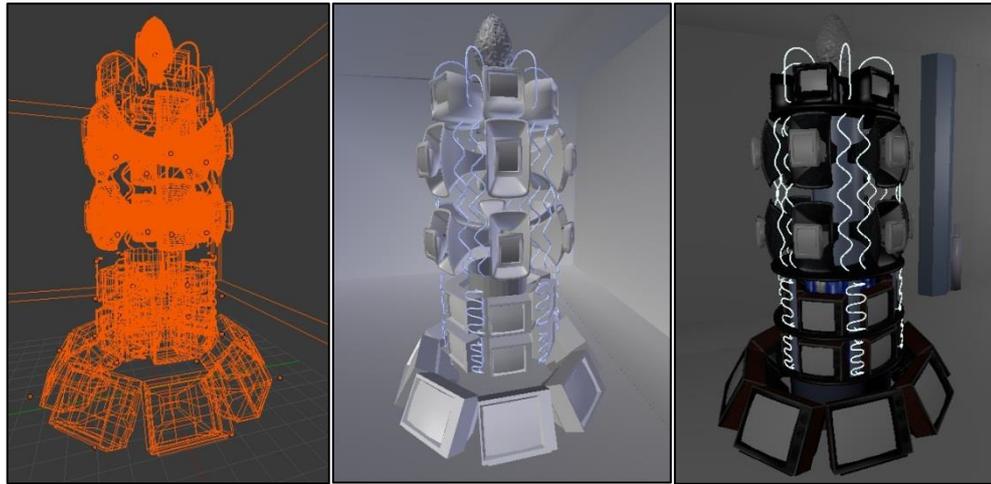


Figura 42 Los pasos del modelado de la obra completa. Visualización en Blender.

Cabe destacar la simplicidad con la que se modelaron los componentes de la obra, procurando utilizar pocos vértices para no cargar tanto al tamaño del archivo final. También se optó por utilizar un único modelo para todos los monitores del mismo tipo, ahorrando tiempo y trabajo, puesto que estos elementos no tienen identidad formal propia en la obra, sino que funcionan conceptualmente.

Para el registro 3D de texturas y formas orgánicas más reales se utilizó la técnica de fotogrametría digital con Structure from Motion y los software VisualSFM y MeshLab. Sin embargo, la obra entera no era adecuada para aplicarle esta técnica, por ser muy simétrica y también contar con elementos muy reflectantes. Con SFM sólo se pudo procesar la mitad de la obra. No obstante, la piña de la parte superior de la obra sí pudo ser reconstruida utilizando esta técnica (Figura 43). Modelar cada detalle de su superficie en Blender habría llevado mucho tiempo, pero con este software se pudo simplificar la malla proporcionada por VisualSFM.

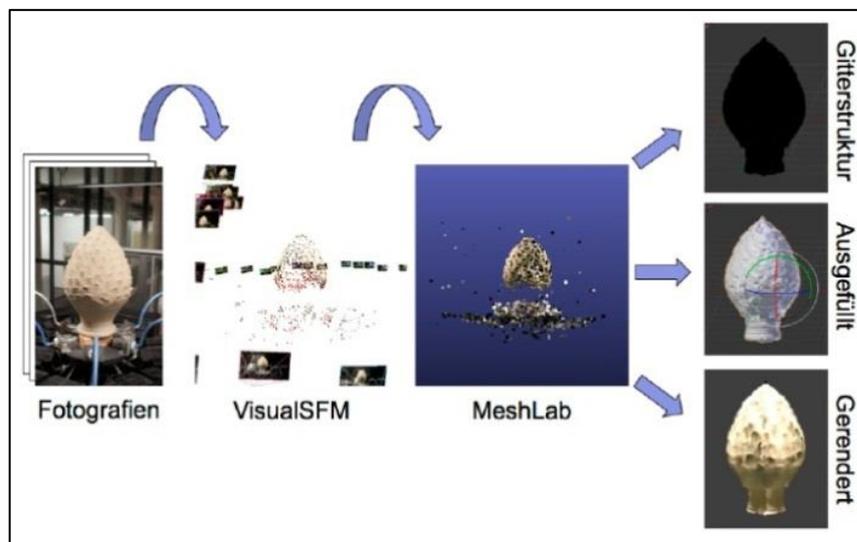


Figura 43. Pasos para aplicar fotogrametría a la escultura de piña. Imagen extraída de ZHENG, 2014

Una vez que se obtuvo el modelo se trabajó en la telepresencia. Hay dos elementos básicos que contribuyen a la sensación de telepresencia: El entorno y la visualización que recibe el espectador. El espacio dentro del cual tiene lugar la telepresencia es detectado por varias cámaras, para determinar la posición actual del espectador, así como su orientación. En este caso se utilizaron cámaras de Microsoft Kinect, además del registro de una imagen a color y una imagen de fondo de la escena actual. Asimismo, se usó la técnica *motion compression* explicada previamente, a fin de que el usuario pueda desplazarse a cualquier lugar en el mundo virtual sin tener que abandonar el entorno de telepresencia. Para la inmersión del espectador en el mundo virtual se utilizó un HMD que consistió en gafas estereoscópicas que permiten percibir una imagen tridimensional. Todo el sistema se procesó en el motor de videojuegos Unreal Engine, donde además se sumaron los elementos audiovisuales, como los videos que proyectan los televisores y el sonido que se percibe cuando el espectador se acerca a la obra en la realidad (Figuras 44 y 45). La versión digitalizada de la obra también puede verse en una PC sin necesidad de utilizar las gafas.

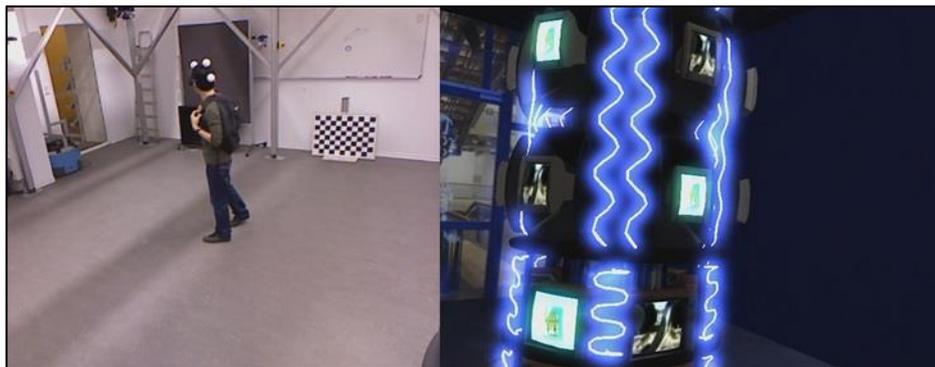


Figura 44. Tour virtual de la obra “Versailles Fountain” en el Holodeck del ISAS. Extraído de la web del KIT⁹⁶



Figura 45. Visualización en PC de la e-installation “Versailles Fountain” realizada con Unreal Engine.

⁹⁶ <http://e-installation.forschung.kit.edu/26.php>

4.2.1.1. El caso de la obra “Kaleidophonic Dog”

Otra obra que el equipo de e-Installation (ZAK-ISAS) ha estado digitalizado es la obra “Kaleidophonic Dog” (1967) del artista Stephan von Huene (1932-2000) (Figura 46).

Stephan von Huene hizo uso de los avances tecnológicos de su tiempo para construir sus propias máquinas. Entre 1964 y 1970, Stephan von Huene diseñó sus primeras esculturas sonoras, basadas en investigaciones de instrumentos acústicos musicales, pianos mecánicos, máquinas de disco y órganos. También utilizó, en obras posteriores, programas electrónicos, jugando un papel el estudio de la teoría de la comunicación y su aplicación en la obra artística.

La técnica fue para Stephan von Huene mucho más que un simple medio para un fin.



Figura 46. Kaleidophonic Dog (1967), de Stephan von Huene. Madera, cuero, metal, sistema ordenador (primera versión fue usando cintas perforadas), sistema neumático, silbatos, percusión. 190 x 61 x 56 cm. Los Ángeles County Museum.

La obra “Kaleidophonic Dog” es una escultura cinética y sonora. *“Un perro está tumbado sobre su espalda con partes de él en movimiento, acompañados de sonidos de un tambor de madera, 8 tubos de órgano y un xilófono. Utilizados en la máquina son cinco loops de cintas de 2 pulgadas perforadas con programas que se mueven a lo largo de un dispositivo de barra de seguimiento. El sistema neumático provoca que las partes se muevan y el tambor, tubos de órgano y xilófono produzcan sonidos”*⁹⁷

Gracias a la restauración del Kaleidophonic Dog en 2015 por el fotógrafo y físico Werner W. Lorke salió a la luz que Stephan von Huene había recreado su obra sustituyendo el sistema original de válvulas por un control fotoeléctrico y las cintas por memorias EPROMs

⁹⁷ Newmark, 1972, p. 69.

programadas en 1983 (figura 47 y 48). Este es un claro ejemplo de migración realizado por el propio autor de la obra (MUÑOZ MORCILLO, 2016).

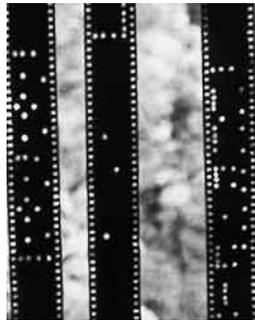


Figura 47. Cinta perforada para programar “Kaleidophonic Dog”



Figura 48. Oscilador y EPROMS en el interior de “Kaleidophonic Dog”, desde 1983.

Antes de realizar la digitalización de esta obra se entrevistó a los distintos actores que participaron en la conservación de la obra: el teórico del arte y de la e-Installation J. Muñoz Morcillo, la viuda esposa del artista Petra Kipphoff von Huene, y el restaurador que restauró la obra por última vez, Werner W. Lorke. En las entrevistas se buscó conocer el significado de la obra; los materiales que la componen; el impacto en el observador; el software utilizado; los cambios que generó pasar de cintas perforadas a una versión con EPROMS; detalles de la documentación existente si es que la hubo; materiales o piezas de hardware que podrían eventualmente ser reemplazados por nuevos sin perturbar la originalidad del sonido; su funcionamiento mecánico y muchas otras cuestiones que hacen al conocimiento de la intención del artista y el significado de la obra. También se plantearon preguntas acerca del grado de autenticidad que se puede esperar de una versión virtual, la originalidad de los colores en el modelo virtual, el rol del observador en la virtualización, etc. Las respuestas a estas preguntas fueron claves para realizar el diseño, modelado y virtualización de la obra completa.

Una de las tantas investigaciones que hizo el equipo de Muñoz Morcillo respecto al Kaleidophonic Dog, fue sobre la codificación de información contenida en las EPROMS, en código binario, que accionan cada uno de los instrumentos. Luego de descifrar cada movimiento y conocer el tipo de secuencia de los distintos sonidos, los practicantes del proyecto armaron un

código en Python basándose en el código original para ser implementado en Unreal Engine, el motor de juegos elegido para hacer la virtualización de la obra. Esta virtualización encajaría en la categoría de emulación porque se logra mantener el código original.

4.2.2. El motor de juegos como herramienta de diseño en e-Installations

Una *e-Installation* tiene características muy similares a los juegos de computadora, porque posee elementos físicos digitalizados, contenido audiovisual y elementos cinéticos e interactivos. Por lo tanto, la creación de *e-Installations* puede describirse de acuerdo a estos componentes. En el ejemplo anterior, se mostró el modelado y reconstrucción 3D para elementos físicos estáticos. Pero el mayor desafío es la reconstrucción de los elementos cinéticos e interactivos de la obra, para los cuales no hay protocolos de digitalización estandarizados. A veces las obras tienen objetos que se mueven, agua, luz, reflexiones, sonido, video, etc. Y muchas de estas cosas también interactúan con el espectador, lo que lleva a la necesidad de crear *avatars* para incorporar al espectador en la obra.

Una solución a todas estas cuestiones es la utilización de motores de juegos, ya que soportan elementos modelados o reconstruidos digitalmente y, a la vez, elementos audiovisuales, cinéticos e interactivos. El producto final de la integración de todos estos elementos es una aplicación interactiva, que permite al usuario visualizar y percibir toda la obra de forma muy realista, pero como un espectador virtual. Estos software permiten crear escenas que contienen objetos o personajes previamente modelados o reconstruidos con las técnicas ya mencionadas. Para que parezcan más reales se los puede renderizar respetando, por ejemplo, una iluminación, los reflejos, sombras, o la gravedad de manera muy fidedigna a la realidad observada. También permiten, por ejemplo, incorporar *avatars* o incluso jugadores (actores, participantes) en primera persona. Estos jugadores también pueden tener su propia materialidad, lo que les permite colisionar con otros elementos de la escena. Las relaciones entre cada elemento se programan, por ejemplo, considerando leyes físicas o sensores de movimiento, entre otras cosas. Entre los motores de juegos gratuitos que se pueden utilizar para integrar todos los elementos de una *e-Installation* y además programar la interacción con la obra, se destacan el Unreal Engine y el Unity. Ambos software tienen la compatibilidad con el uso de dispositivos HDM, como el Oculus Rift y sensores como cámaras Kinect. Tal vez el más completo de ambos software sea el Unreal Engine. Su desventaja es que requiere un hardware más específico de computadora para que funcione sin problemas. Además, es más difícil de utilizar porque tiene muchos códigos de programación, lo que hace que se requiera un conocimiento específico para emplearlo. Unity, por otro lado, es una buena opción para cualquier usuario que quiera incursionar en la creación de escenas interactivas y realidad virtual, sin necesidad de tener conocimientos básicos de

programación. Además, Unity tiene, en su sitio web oficial, documentación y tutoriales para diseñar una extensa cantidad de aplicaciones y tipos de proyectos.

Unity está disponible como plataforma de desarrollo para Microsoft Windows, OS X y Linux, y permite crear juegos para Windows, OS X, Linux, Xbox 360, PlayStation 3, Playstation Vita, Wii, Wii U, iPad, iPhone, Android y Windows Phone. Gracias al *plug-in* web de Unity, también se pueden desarrollar videojuegos de navegador para Windows y Mac. Otra de las cosas útiles de Unity es que puede usarse junto con varios formatos 3D como 3ds Max, Maya, Softimage, Blender, Modo, ZBrush, Cinema 4D, Cheetah3D, Adobe Photoshop, Adobe Fireworks y Allegorithmic Substance. Los cambios realizados a los objetos creados con estos productos se actualizan automáticamente en todas las instancias de ese objeto durante todo el proyecto sin necesidad de volver a importarlos manualmente.

El motor gráfico utiliza Direct3D (en Windows), OpenGL (en Mac y Linux), OpenGL ES (en Android y iOS), e interfaces propietarias (Wii). Tiene soporte para mapeado de relieve, de reflexión, mapeado por paralaje, oclusión ambiental, mapeado de sombras, render a textura y efectos de post-procesamiento en pantalla completa.

El *scripting* viene a través de Mono, la implementación de código abierto de .NET Framework. Los programadores pueden utilizar UnityScript, C# o Boo (que tiene una sintaxis inspirada en Python). A partir de la versión 3.0 de Unity se añadió una versión personalizada de MonoDevelop para la depuración de scripts.

4.2.3. Sensores y dispositivos HMD

La utilización de *avatars* es necesaria cuando las obras requieren la presencia del espectador como parte de la misma. Las e-Installations pueden ser creadas para ser visualizadas en la pantalla de la computadora o para ser percibidas en sistemas de telepresencia. En el caso de las aplicaciones donde se visualiza la obra en la pantalla de la PC y con control desde esta, se podría usar un avatar genérico. Pero cuando se utiliza el sistema de telepresencia, se pueden usar sensores RGB que capten la apariencia y movimientos del usuario a la vez que reciben información del sensor de profundidad (Figura 49).

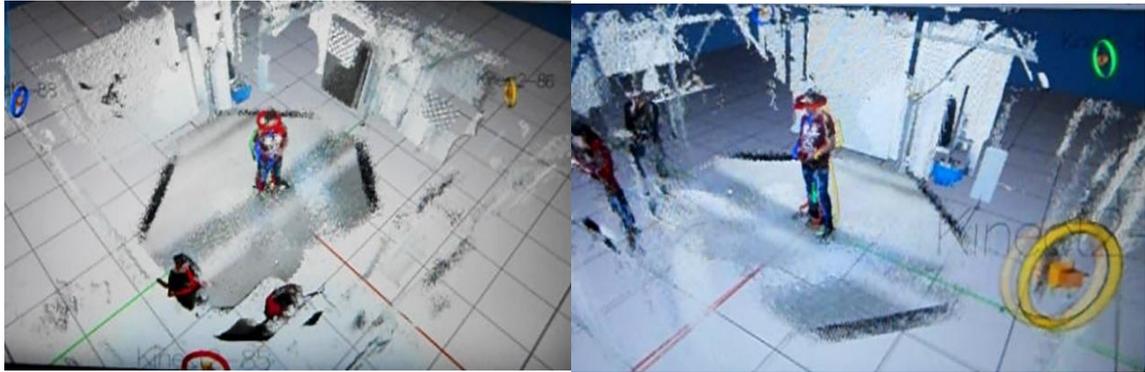


Figura 49. Visualización en PC del sistema de sensores de movimiento, desarrollado por el ISAS. Hay 4 colores diferentes para cada dispositivo, y cada uno detecta movimientos de la figura humana (rojo, azul, amarillo y verde)

Una forma en la que el espectador puede interactuar en primera persona es a través de cascos de realidad virtual, también llamados gafas de realidad virtual o HMD. El dispositivo se parece a un casco y permite reproducir imágenes creadas por computadora sobre una pantalla muy cercana a los ojos o proyectando la imagen directamente sobre la retina del ojo. En este segundo caso el casco de realidad virtual recibe el nombre de monitor virtual de retina. Debido a su proximidad con los ojos el casco de realidad virtual consigue que las imágenes visualizadas resulten de mayor tamaño que las percibidas por pantallas normales y permiten incluso englobar todo el campo de visión del usuario. Gracias a que el casco se encuentra sujeto a la cabeza, éste puede seguir los movimientos del usuario, consiguiendo así que éste se sienta integrado en los ambientes creados por la computadora.

Existen dos tipos de cascos de realidad virtual. Por un lado, los cascos o gafas de realidad virtual propiamente dicha, que ocupan el campo de visión del usuario de modo que éste no tiene percepción del entorno que lo rodea. Estos dispositivos, permiten una completa inmersión del espectador en una realidad virtual. Por otro lado, los cascos o gafas de realidad aumentada, que permiten al usuario ver todo el entorno que lo rodea e introducen en éste objetos virtuales o información.

Los dispositivos HDM también operan de diversas maneras: por un lado están las carcasas, que no tienen pantalla propia pero albergan un teléfono móvil que reproducirá las imágenes, por ejemplo Google Cardboard⁹⁸ y Samsung Gear VR⁹⁹; por otro lado, están los que incluyen pantalla propia y sensores, pero que necesitan conectarse a una computadora para recibir las imágenes, por ejemplo Oculus Rift y PlayStation VR¹⁰⁰; y por último, están las gafas virtuales que incluyen todo en uno, como por ejemplo Microsoft HoloLens¹⁰¹.

Algunas características que poseen las gafas de realidad virtual importantes de mencionar son:

⁹⁸ <https://www.google.com/get/cardboard/>

⁹⁹ <http://www.samsung.com/global/galaxy/wearables/gear-vr/>

¹⁰⁰ <https://www.playstation.com/en-au/explore/ps4/features/playstation-vr/>

¹⁰¹ <https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us>

- Seguimiento de orientación (*head tracking o rotational tracking*): mediante sensores internos el HMD detecta hacia dónde está orientada la cabeza del usuario.
- Seguimiento de posición (*positional tracking*): también conocido como posicionamiento absoluto, se logra mediante un sensor externo que detecta dónde está situada exactamente la cabeza del usuario y cualquier cambio que se produzca en esa posición. Es una característica que solo incorporan los HMD más avanzados.
- Visión estereoscópica: característica presente en casi todos los aparatos de realidad virtual, que mostrando una imagen ligeramente diferente a cada ojo permite visualizar el entorno en tres dimensiones.

4.3. El uso de Realidad Aumentada

La realidad aumentada es una vista en vivo de un entorno físico y real, cuyos elementos están aumentados en el sentido de que hay agregados virtuales a la escena, como sonido, video, gráfico o datos GPS, generados por un estímulo sensorial. Está relacionada con el concepto más general llamado Realidad Mediada, en la cual una vista de la realidad es modificada por una computadora. Permite ampliar y eventualmente mejorar la percepción que uno tiene de la realidad (GRAHAM et al., 2012), a diferencia de la realidad virtual que reemplaza el mundo real con uno simulado. En AR, la “aumentación” se da en tiempo real y en un contexto consistente con los elementos del entorno. La combinación de AR con otras tecnologías como, por ejemplo, visión computacional y reconocimiento de objetos, permite lograr que la información del mundo real que rodea al usuario se convierta en interactiva y manipulable digitalmente. En otras palabras, la idea básica de un sistema de AR es aumentar la percepción y mejorar la interacción del usuario con el mundo real a través de un suplemento de objetos 3D virtuales que parecen coexistir en el mismo espacio que el mundo real. Los sistemas de AR comparten las siguientes características (AZUMA et al., 2001):

- Mezcla lo real y lo virtual, en un ambiente real;
- La Interacción del usuario con su entorno es en tiempo real;
- Hay un ajuste consistente (Registration¹⁰²) en 3D entre los objetos reales y los virtuales.

Algunas aplicaciones de AR también requieren remover objetos reales del ambiente, además de añadir objetos virtuales.

¹⁰² *Registration*. Refiere a la alineación precisa entre objetos reales y virtuales. Sin una “registración” precisa, la ilusión de que el objeto virtual existe en el entorno real se ve gravemente comprometida (AZUMA et al., 2001)

Los elementos de hardware que se requieren para AR son: procesadores, pantallas, sensores, etc. Muchos smartphones y tablets contienen estos elementos, los cuales a menudo incluyen una cámara y un sensor MEMS como acelerómetros, giróscopos, GPS y brújulas, convirtiéndolos en plataformas de AR (METZ, 2012).

Los software que se emplean deben poder derivar las coordenadas del mundo real a partir de las imágenes obtenidas con una cámara de video. Este proceso se llama registro de la imagen, y utiliza diferentes métodos de la visión computacional, en su mayoría relacionados con el *video tracking* (seguimiento de video). Es interesante mencionar que muchos de los métodos de visión computacional aplicados a AR se heredaron de la odometría visual. Usualmente estos métodos consisten en dos partes:

En primer lugar, detectar puntos de interés, marcadores de referencia o de flujo óptico en las imágenes de la cámara. Se utilizan métodos de procesamiento de imágenes para detección de características. Lo segundo es recuperar un sistema de coordenadas del mundo real de los datos obtenidos en la primera etapa. Algunos métodos suponen objetos con geometría conocida (o marcadores de referencia) presentes en la escena. En estos casos, la estructura 3D del objeto debe ser calculada de antemano. Si parte de la escena es desconocida, se utiliza Localización Y Mapeado Simultáneos (SLAM, en inglés) para mapear las posiciones relativas. Si no se posee información sobre la geometría de la escena, se usan métodos de *Structure From Motion* como *Bundle Adjustment*.

En los últimos años emergieron varios kits de software para desarrollar aplicaciones de AR (los llamados SDK). Algunos SDK como CloudRidAR (HUANG et al., 2014) utilizan la nube para hacer el procesamiento y poder así utilizar AR en teléfonos celulares. Otros SDK son los ofrecidos por Vuforia¹⁰³, ARToolkit¹⁰⁴, Catchoom CraftAR¹⁰⁵, Mobinett AR¹⁰⁶, Wikitude¹⁰⁷, Blippar¹⁰⁸ y Layar¹⁰⁹.

Las aplicaciones de AR se basan en el reconocimiento de objetos e imágenes. El reconocimiento de objetos permite detectar y localizar los objetos 3D. Puede ser usado para construir experiencias interactivas con objetos 3D como, por ejemplo, aumentar un juguete para “traerlo a la vida”, solapar un manual de usuario encima de un aparato electrónico, o guiar a un empleado nuevo en el entrenamiento para un dispositivo del lugar de trabajo.

La aplicación más simple es desbloquear contenido virtual cuando un producto es reconocido. Los llamados “*targets*” (objetivos) para ese reconocimiento pueden ser imágenes planas u

¹⁰³ <https://www.vuforia.com/>

¹⁰⁴ <https://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

¹⁰⁵ <http://catchoom.com/product/craftar/augmented-reality-and-image-recognition/>

¹⁰⁶ <http://www.mobinett.com/portfolio/miar-augmented-reality-sdk-ios-android/>

¹⁰⁷ <http://www.wikitude.com/>

¹⁰⁸ <https://blippar.com/es/>

¹⁰⁹ <https://www.layar.com/>

objetos reales más complejos. Para que funcione correctamente, los objetos físicos deben ser opacos, rígidos y contener ninguna o pocas partes en movimiento. La superficie del objeto debe tener características basadas en contrastante. No se admiten objetos flexibles o deformados. Los objetos que tienen miembros articulados no se consideran como objetos enteros. Algunos buenos ejemplos que utiliza el software Vuforia son figuras y vehículos de juguete. Por otro lado, los localizadores de imagen de Vuforia SDK no necesitan regiones especiales en blanco y negro ni códigos como QR para hacer el reconocimiento. Detectan las características que se encuentran de forma natural en la propia imagen, comparando estas características con un *target* conocido que se encuentra en la base de datos. Una vez que se detecta la imagen *target*, el SDK localizará la imagen siempre y cuando esté en el campo de visión de la cámara, aunque sea parcialmente. Incluso se puede reconocer texto en las imágenes.

Vuforia también puede integrarse a algunos motores de juegos como Unity, a través de la extensión para éste (Figura 50) y también es compatible con dispositivos ópticos y de video como Samsung Gear VR, Google Cardboard, ODG R-6 & R-7 y Epson Moverio BT-200.

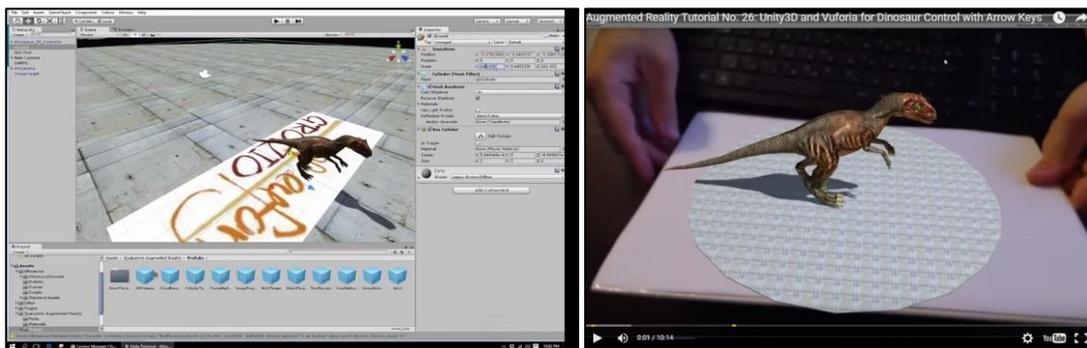


Figura 50. Imagen 3D de un dinosaurio sobre una imagen target con texto (Imagen de YouTube. Edgaras Art: “Augmented Reality Tutorial No. 26: Unity3D and Vuforia for Dinosaur Control with Arrow Keys”)

4.4. Referencias

AZUMA, R. et al. "Recent Advances in Augmented Reality Computers & Graphics" IEEE Computer Graphics and Applications . Volume 21 Issue 6, November 2001, pp. 34-47.

BAWAYA, M. "Virtual Archaeologists Recreate Parts of Ancient Worlds", Science, 8 January 2010, vol. 327, p. 140.

BRUNIER, G. et al. "Structure-from-Motion photogrammetry for high-resolution coastal and fluvial geomorphic surveys" vol.22 - n° 2, 2016: Proceedings of the 16th Young Geomorphologists Days, Nantes, 29-30 January, 2015.

CARROZZINO, M. y BERGAMASCO, M. "Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums" Journal of Cultural Heritage 11, 2010, pp. 452-458

DELLEPIANE, M. y CALLIERI, M. "Using Digital 3D Models for Study and Restoration of Cultural Heritage Artifacts," Digit. Imaging, 2011, pp. 1–29.

Di BLAS, N. y POGGI, C. "3D for Cultural Heritage and Education: evaluating the impact, in: J. Trant and D. Bearman (Eds.), Museums and the Web 2006: Proceedings, Toronto: Archives & Museum Informatics, 2006.

Edgaras Art "Augmented Reality Tutorial No. 26: Unity3D and Vuforia for Dinosaur Control with Arrow Keys". YouTube, publicado el 21 de julio de 2015. Visto el 28/03/2016. <https://www.youtube.com/watch?v=3Rt4GiYwRjw>

FAION, F. et al. "Intelligent Sensor-Scheduling for Multi-Kinect-Tracking". In: Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012). Vilamoura, Algarve, Portugal, Oktober 2012.

GRAHAM, M. et al. "Augmented reality in urban places: contested content and the duplicity of code." Transactions of the Institute of British Geographers, 2012. DOI: 10.1111/j.1475-5661.2012.00539.x 2012.

HUANG, Z. et al. "CloudRidAR: A Cloud-based Architecture for Mobile Augmented Reality" MARS '14 Proceedings of the 2014 workshop on Mobile augmented reality and robotic technology-based systems. 2014, 29-34

LEVOY, M. "An interactive kiosk for the tribune del David", November 15, 2002. Disponible en: <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/kiosk/kiosk.html>

MAGNENAT-THALMANN, N. y PAPAGIANNAKIS, G. "Virtual worlds and augmented reality in Cultural Heritage applications" International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Ascona, Switzerland, 2005.

METZ, Rachel. "Augmented Reality Is Finally Getting Real" Technology Review, 2 de Agosto de 2012.

MICHELETTI et al. "Structure from Motion (SfM) Photogrammetry". Geomorphological Techniques, Chap. 2, Sec. 2.2 (2015)

MUÑOZ MORCILLO, J. et al. "e-Installation: Synesthetic Documentation of Media Art via Telepresence Technologies, En: Boştenaru Dan, Maria; Crăciun, Cerasella (eds.): Space and

Time Visualisation. Springer Nature, 2016, pp. 173-191.

MUÑOZ MORCILLO, J. “Elektronik als Schöpfungswerkzeug. Die Kunsttechniken des Stephan von Huene (1932-2000)”. Transcript-Verlag Bielefeld, erscheint voraussichtlich, August 2016.

MUÑOZ-VIÑAS, S. Teoría contemporánea de la Restauración. Madrid: Editorial Síntesis, 2003.

MUÑOZ-VIÑAS, S. Contemporary Theory of Conservation. Routledge, 2005.

NEWMARK, Dorothy. “An interview with Stephan von Huene on his audio-kinetic sculptures”. Leonardo, Vol. 5, p. 69. Gran Bretaña: Pergamon Press, 1972.

NITZSCHE, N. et al. “Extending Telepresent Walking by Motion Compression” SFB-Aussprachetag Human Centered Robotic Systems (HCRS 2002), pp. 83-90, Karlsruhe, Germany, December 2002.

PETRIDIS, P. et al. “The EPOCH Multimodal Interface for Interacting with Digital Heritage Artefacts”, Lecture Notes in Computer Science, Interactive Technologies and Sociotechnical Systems, (2006) pp. 408–17.

SANSONI, G. et al. “State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation,” Sensors, vol. 9, no. 1, 2009, pp. 568–601.

SIDERIS, A. “A Virtual Cradle for Democracy: Reconstructing the Ancient Agora of Athens”. Proceedings of the International SEEArchWeb Conference, Thessaloniki, September 2006.

TORRES, J.C. et al. “Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio,” Virtual Archaeol. Rev., vol. 1, 2010. pp. 51–54

ZHENG, X. et al. “Praktikum Anthropomatik praktisch erleben Intelligente Sensor-Aktor-Systeme (ISAS), Karlsruher Institut für Technologie” (trabajo práctico de estudiantes), 2014.

Capítulo 5

MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Objetos y obras utilizados para el registro en 3D

Los objetos y obras que se utilizaron en esta tesis para realizar los registros en 3D son nombrados a continuación y clasificados según tipo de material, colección, y valor patrimonial.

Objetos de diversos materiales y tamaños

En un primer abordaje al procedimiento, alcance y limitaciones de las técnicas de registro 3D, se utilizaron objetos de diverso tipo y materiales. En este primer acercamiento a las técnicas, no fue necesario aplicarlas en objetos patrimoniales. Estos objetos comprenden: molduras arquitectónicas en yeso, porcelanas, fragmentos de vasijas, huesos y libros. Por otro lado, se adquirió experiencia en la aplicación de las técnicas en habitaciones enteras y monumentos ubicados en espacios públicos (como fuentes, esculturas en cementerios y placas conmemorativas en paredes de espacio público.)

Obras de arte tradicional

La selección de obras de arte tradicional fue realizada en base a los materiales que la componen y el tipo de institución que la alberga. Esta selección fue hecha tomando cierto criterio en cuanto a materiales y tamaños y comprendió:

- Escultura peruana Pre-Inca de terracota (5,2cm x 4,6cm x 4,2 cm).
- Cinco obras en yeso, pertenecientes al Área de Museo, Exposiciones y Conservación de la Secretaría de Extensión de la Facultad de Bellas Artes, Universidad Nacional de La Plata (FBA-UNLP). Son calcos de monumentos-relieves y esculturas medievales franceses (Tabla 3).
- Escultura de mármol, titulada “Figura reclinada” (54 x 85 x 45 cm) del artista Naum Knop. Colección del Palais de Glace de Buenos Aires
- Escultura de bronce titulada “Figura” (175 x 40 x 55 cm) de Aurelio Macchi. Colección Palais de Glace de Buenos Aires.
- Placa conmemorativa de bronce a Lucio Correa Morales, del cementerio de Recoleta
- Escultura de la tumba de Rufino Elyzalde, del Cementerio de Recoleta.

- Instrumento musical (un arpa de 1 m de altura aprox.) de la colección del Museo de Instrumentos Musicales “Emilio Azzarini”, de la Universidad Nacional de La Plata.
- Dos placas arqueológicas de cobre (6 x 4 cm aprox.), pertenecientes al Museo del Hombre y su Entorno, en Caleta Olivia, Santa Cruz.

Nombre de la obra	Medidas	Técnica
La vendimia	77 x 39 x 7 cm	Calco con bajo relieve en yeso.
El Segador	77 x 39 x 7 cm	Calco con bajo relieve en yeso.
El invierno	57 x 46 x 16 cm	Calco con bajo relieve en yeso.
Capitel con Figura	52 x 55 x 34 cm	Calco en yeso.
Capitel con animales fantásticos	57 x 57 x 43 cm	Calco en yeso.

Tabla 3. Obras seleccionadas del Área de Museo, Exposiciones y Conservación de la Secretaría de Extensión de la Facultad de Bellas Artes, Universidad Nacional de La Plata.

Obras de arte contemporáneo

Las obras de arte contemporáneo seleccionadas son básicamente instalaciones y obras realizadas con materiales efímeros. Según el siguiente detalle:

- Instalación “Días de mar”, de Dani Lorenzo. Premio Cámara de Diputados Adquisición Florencio Molina Campos 2013. Colección Museo Provincial Emilio Pettoruti. Esta instalación consta de una superficie cuadrada de madera, y un ladrillo azul “Lego” en el centro de la madera. Además, posee un reflector que proporciona iluminación y que es parte de la obra.
- Instalación “Insolada”, de Joaquín Boz. Se trata de una Instalación de cortinas de papel secante de diferentes gramajes sometidas al efecto del aceite y del tiempo. Exhibida en Espacio CheLA por Proyecto Móvil¹¹⁰.
- Técnica mixta “Planta trama trampa-miento” (100x70 cm). Materiales: textil, alambre y cartón. Colección Palais de Glace de Buenos Aires.
- Réplica de escultura perteneciente a la obra de Ottmar Hörl “Welcome Zwerg” (1998), de material plástico y superficie dorada (37 x 15 x 13 cm).
- Obra escultórica “Puentes de otoño” de Natalia Abot Glenz. Se trata de una composición de tres esculturas abstractas de hierro fundido y patinado.

¹¹⁰ CheLA (Centro Hipermediático Experimental Latinoamericano) es un espacio físico y cultural independiente dedicado a procesos de investigación, experimentación y producción que conjuguen creatividad, comunidad y tecnología, inaugurado en el año 2003. <http://chela.org.ar/>
Móvil es una organización iniciada por Alejandra Aguado y Solana Molina Viamonte dedicada a la producción y exhibición de arte contemporáneo con especial interés en la experimentación y en acercar la práctica emergente a públicos diversos.

5.2. Instrumental y técnicas empleadas

Se utilizaron las técnicas del escaneo con láser, escaneo con luz estructurada y fotogrametría digital con Structure from Motion. Los fundamentos de estas técnicas fueron explicados en el capítulo 3. A continuación se describirá un detalle del instrumental empleado en cada una de ellas

5.2.1. Escaneo láser

La figura 51 muestra el típico montaje y los elementos utilizados para realizar el escaneo laser. Una combinación de un laser de diodo con emisión en el rojo a 650nm (marca Max Power modelo HLM1230 Clase IIIa Laser Product) de 5mw de potencia, y una lente cilíndrica generan un plano de luz que intercepta el objeto a escanear. Para capturar las imágenes se utilizó una cámara Thorlabs 1645c con resolución de 1280x1024 px. La calibración de la cámara y la posición del láser se realizó utilizando los patrones de calibración del software David Laser Scanner, impresos a escala de 55 m, acorde al tamaño de la escultura dispuestos a 90° uno del otro. El objeto fue colocado en el ángulo que forma la intersección de los dos patrones de calibración. El láser se colocó a unos 25 cm de distancia del objeto. El grosor de la línea proyectada sobre el objeto fue menor a 1 mm. El ángulo de intersección entre el rayo láser y el eje de la cámara fue de 30°. La línea láser se movió con un motor de paso de 2,5 μm de resolución y las imágenes fueron capturadas a 10 fps. El software empleado fue el David Laser Scanner que, como se explicó en el capítulo 3, tiene la ventaja de la auto-calibración en tiempo real.

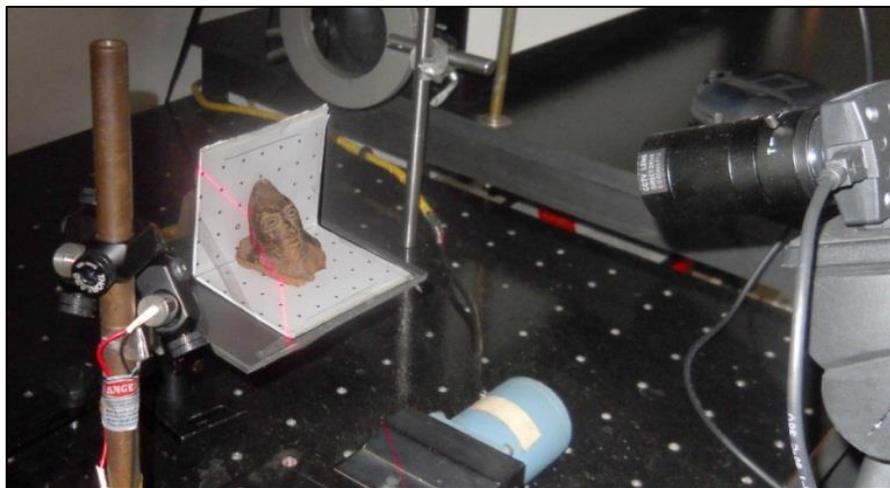


Figura 51. Configuración utilizada para escaneo con láser. Fotografía tomada en el LALRL-CIOp.

5.2.2. Escaneo con luz estructurada

La figura 52 muestra un detalle del montaje empleado para el escaneo con luz estructurada. En este caso un proyector Epson PowerLite 52c de 1200 lúmenes es enfocado con una lente convexa para trabajar a una distancia de unos 20 cm, y colocado a la derecha de la cámara, a 25° . La cámara y los paneles de calibración fueron los mismos que se emplearon para el escaneo con láser, pero, en este caso, se realizó una proyección de diferentes patrones para calibrar el sistema, también proporcionados por el software David. Luego se procedió a proyectar la secuencia de franjas en el objeto. El número de patrones de franjas fue de 58 y el tiempo entre cada proyección subsiguiente fue de 1s.

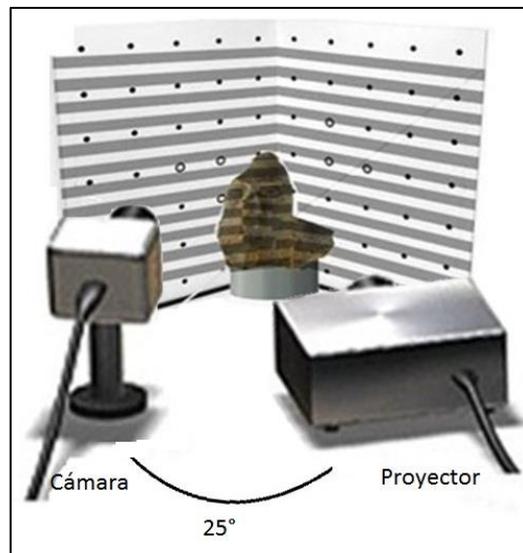


Figura 52. Dibujo de la configuración utilizada para escaneo con luz estructurada.

5.2.3. Fotogrametría digital con Structure from Motion (SfM)

En todos los casos las fotografías se tomaron en un amplio rango de orientaciones y posiciones, cuyo solapamiento fue mayor al 70%.

Se utilizaron cuatro cámaras según el siguiente detalle:

Nikon Coolpix L22, con enfoque automático, y una distancia focal fija. Utilizada para la fotogrametría digital de objetos no patrimoniales pertenecientes al LALRL-CIOp y para la escultura de terracota y los calcos de yeso del museo de FBA-UNLP. En algunos casos las tomas se realizaron con luz natural y homogénea, en un espacio abierto y con día nublado, mientras que en otros fueron en ambientes cerrados con luz artificial. También se utilizó esta cámara para fotografiar las obras pertenecientes al Cementerio de Recoleta.

Nikon 300D con lente Nikor 50 mm. Las imágenes de las obras pertenecientes al Palais de

Glaces fueron tomadas por un fotógrafo de la institución, en una sala del museo disponible para este fin. Se procuró mantener una ISO baja para evitar ruido (200 ISO), diafragma f/11, y manteniendo la distancia focal fija. La iluminación fue difusa y pareja, utilizando 2 flashes de estudio con paraguas, para que las imágenes estuvieran bien enfocadas y nítidas.

Canon T2i, con lente Canon 18-55 mm. Esta cámara fue utilizada para tomar las imágenes de una de las esculturas “Puentes de otoño” (de Natalia Abot Glenz) y para las instalaciones “Días de mar” (Museo Provincial Emilio Pettoruti) e “Insolada” (cheLa-Móvil). Estas tres obras fueron fotografiadas en interiores con iluminación artificial. También se la utilizó para fotografiar un instrumento musical del Museo Azzarini, un arpa de madera.

Nikon d3200 con lente Nikon 18-55 mm. Esta cámara se utilizó para fotografiar la réplica de la escultura de la instalación “Welcome”.

Por último, se usó un **microscopio WILD M5A 20X** para hacer micro-fotogrametría.

5.2.4. Realidad virtual

Las escenas de realidad virtual fueron compiladas para PC y para Android, utilizando el SDK de Android. Las aplicaciones creadas son aptas para utilizar un dispositivo HMD como Oculus Rift o un Cardboard de Google. Además, pueden ser utilizadas en smartphones que tengan sistema Android y que cuenten con *gyro-sensor*.

5.2.5. Realidad aumentada

Las imágenes *target*, en formatos de 512 x512, fueron impresas en papel.

Las escenas creadas fueron también compiladas para Android utilizando el SDK, y se pueden utilizar en cualquier Smartphone actual con sistema Android.

5.2.6. Hardware

El hardware usado para el escaneo con láser y con luz estructurada fue un sistema 32 bit, con procesador Intel® Core™2 Duo CPU T5870 @ 2.00GHz y 2 GB de RAM.

Para aplicar la técnica de Structure from Motion, realizar distintos procesamientos de las imágenes 3D y realizar aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada se utilizó un sistema 64 bit con procesador Intel® Core™ i7-4770 CPU @ 3.40 GHz, equipado con una placa de video NVIDIA GeForce GTX 760 con 2GB GDDR5, soporte CUDA y 8 GB de RAM.

5.3. Software utilizados

El criterio para la selección de los software empleados, dado que hay muchísimos a disposición en Internet y en el mercado, fue, por un lado, que fueran los más usados por usuarios no especializados en visión computacional. Por otro lado, que fueran gratuitos y/o basados en software libre.

Sobre esta base, para fotogrametría con *Structure from Motion* se eligieron los siguientes software: **Arc3D**, **Autodesk 123D Catch**, **Photosynth** y **Photosynth Toolkit** y **VisualSFM** con **CMVS** y **CMP-MVS**. Para el procesamiento de imágenes se utilizaron: **MeshLab**, **MeshMixer**, **Blender**, **Texture Stitcher** y **CloudCompare**

En particular, MeshLab fue usado para generar mallas texturizadas de nubes de puntos densas y también para el alineamiento de mallas. En algunos casos se utilizó el filtro de *Poisson* y el filtro *VCG Reconstruction*, un algoritmo provisto por MeshLab, para la instancia de reconstrucción de superficie. También se utilizó MeshLab para escalar, tomar medidas virtualmente y editar las imágenes 3D.

MeshMixer fue utilizado para “esculpir”, rellenar y suavizar mallas. También para realización de modelos aptos para impresión 3D, negativos para la construcción de moldes y contenedores, y calcular el volumen y el equilibrio de una pieza.

Se empleó Blender para texturizar mallas y renderizar las escenas mediante incorporación de luces y acabados en la superficie. También se lo utilizó para realizar el modelado 3D.

Texture Stitcher fue utilizado para suavizar la transición de diferentes texturas en las mallas.

Por último, CloudCompare fue usado para hacer cálculos de diferencias entre mallas y entre nubes de puntos.

Para crear modelos 3D compatibles con sitios Web se empleó **3DHOP**

Para convertir el modelo 3D al formato de multirresolución NXS se utilizó **Nexus**, una herramienta disponible gratuitamente en la página web de 3DHOP.

El navegador de Chrome de Google permitió evitar instalar un servidor Web cargando páginas directamente desde la PC local; para ello se lo debió configurar previamente. Una vez hecho todo esto, en la página HTML que trae 3DHOP como ejemplo, se procedió a reemplazar el modelo de ejemplo por el del formato NXS.

Para realizar aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada se utilizó el motor de juegos **Unity 3D**.

Augmented Reality SDK de **Vuforia** fue el software utilizado para utilizarlo en conjunto con Unity 3D en las aplicaciones de realidad aumentada.

Capítulo 6

RESULTADOS

6.1. Estudio comparativo de las técnicas Fotogrametría con SFM, Escaneo Láser y Escaneo con Luz Estructurada

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo se realizó el registro 3D de una pequeña escultura de terracota, con las tres técnicas más utilizadas en el ámbito del patrimonio cultural, a saber: fotogrametría digital con Structure from Motion, escaneo láser y escaneo con luz estructurada. La elección de esta pieza se debió a que su material es opaco y su superficie tiene desgastes y relieves milimétricos, apropiados para ser registrados en una imagen 3D de alta resolución.

Además de comparar las técnicas entre sí, sus procedimientos y resultados, también se compararon cuatro software gratuitos de Structure from Motion, donde se evaluó el tiempo de procesamiento, la calidad de la malla, la textura de la imagen 3D final y la resolución alcanzada. Por último, se aplicó micro-fotogrametría para evaluar sus posibilidades para el registro de deterioros muy pequeños.

En todos los casos, la resolución de la imagen 3D fue determinada comparando la distancia entre dos puntos de la imagen 3D, con la medida correspondiente en el objeto real.

6.1.1. Registro 3D realizado con fotogrametría digital con SFM

6.1.1.1. Adquisición de las fotografías

Las imágenes fueron tomadas con una cámara Nikon Coolpix L22 (lente NIKKOR 3.6x, f3.1-6.7, 37-134mm, equivalente a 35mm), con enfoque automático, utilizando una distancia focal fija de 35 mm para todas las tomas. La configuración de la cámara fue de 80 ISO, f/3.1 y 1/160s. Se movió la cámara alrededor del objeto fotografiado en un amplio rango de orientaciones y posiciones. Las imágenes fueron obtenidas en formato JPG con dimensiones de 4000x3000 px y 300 ppp de resolución (Figura 53).



Figura 53. Parte del conjunto de imágenes utilizadas para el registro 3D realizado utilizando fotogrametría con Structure from Motion. Las imágenes fueron tomadas al aire libre y con luz homogénea.

Para optimizar la resolución de las imágenes y la correspondencia (el “*matching*”) de las características, se decidió utilizar como primer criterio la condición de que el objeto completo llene el espacio del encuadre de la foto.

El número de fotos que se requiere para el registro 3D dependerá de la calidad y resolución deseada y estará relacionado con el grado de solapamiento de las imágenes. Un criterio habitualmente utilizado es que, independientemente del tamaño del objeto, se requiere un mínimo de 70%¹¹¹ de solapamiento entre imágenes adyacentes. Por tanto, el número de fotos mínimo que se requiere para mantener este nivel de superposición en un objeto simple como un cubo o un cilindro, es de 8 fotos (Figura 54). Este es el número de imágenes mínimo que se debe tomar en un solo recorrido (para registrar un solo plano de la geometría del objeto).

Para completar la totalidad de la geometría 3D será necesario cambiar el ángulo de la cámara y añadir dos nuevos recorridos, para poder registrar la parte superior e inferior del objeto. Por lo tanto, el número mínimo de imágenes que se requerirían para cubrir un objeto de forma simple sería 24.

¹¹¹ Casi todas las guías de los software para Structure from Motion, así como en los foros de discusión en Internet recomiendan este porcentaje de superposición de las fotos.

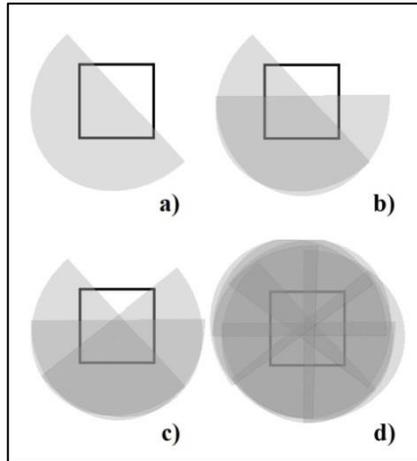


Figura 54. Número mínimo de fotos que se requiere para registrar un solo plano de un objeto simple (cubo) con 70 % de solapamiento. a) El área gris muestra la cobertura de una sola fotografía. b) El área más oscura muestra el solapamiento entre la imagen 1 y la imagen 2. c) Solapamiento de 3 imágenes. d) Solapamiento de 8 imágenes cubriendo la totalidad del objeto con 70% de superposición entre ellas

En un objeto más complejo que contiene relieves, el número de fotos requerido deberá ser mayor a 24. Para definirlo en el caso estudiado de la escultura de terracota se procesaron diferentes conjuntos de imágenes (37, 32, 27, 19 y 7) con el software VisualSFM + CMVS, disminuyendo el solapamiento. La figura 55 muestra los resultados obtenidos. Puede verse que, 32 imágenes fue el mínimo requerido para obtener una nube de puntos suficientemente densa. Aumentar el número de imágenes por encima de este valor solo mejoró muy levemente la densidad de la nube.

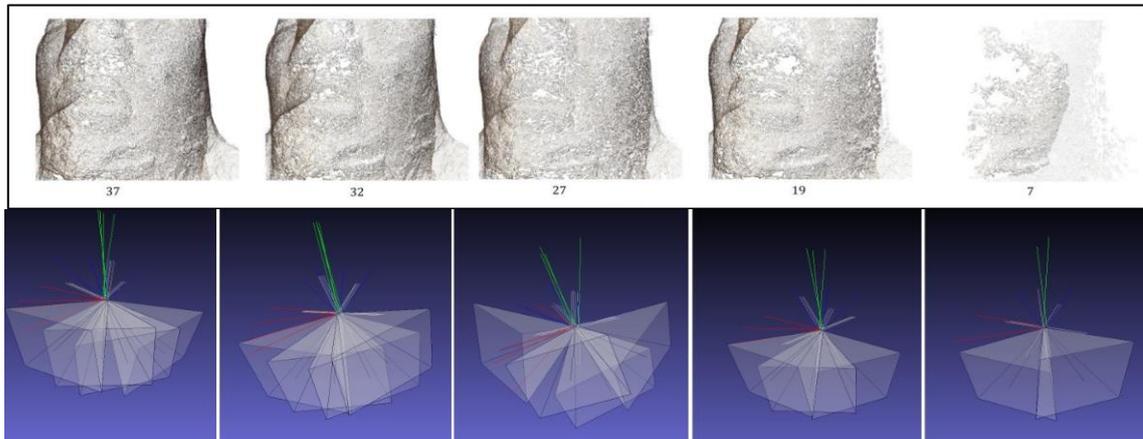


Figura 55. Nubes de puntos generadas por VisualSFM + CMVS con diferentes conjuntos de imágenes para determinar el solapamiento requerido para alcanzar una nube de puntos suficientemente densa. La cantidad de imágenes en cada conjunto procesado fue respetivamente 37, 32, 27, 19 y 7. Arriba se observan las nubes de puntos para un área determinada de la escultura. Abajo se representa el solapamiento de imágenes para esa área, cuya orientación y posición de cámaras se visualizan en MeshLab.

Sobre esta base para el registro 3D final de la escultura de terracota se usaron 40 fotos, más que suficientes para cubrir todos los detalles sobresalientes de la escultura.

6.1.1.2. Comparación y evaluación de software de SFM

El conjunto de 40 fotos registradas fue *input* en cada software de SFM.

La imagen 3D obtenida con Arc3D fue fácil de procesar. Esto es una ventaja de esta aplicación respecto a muchos software de reconstrucción 3D, cuya instalación y operación no son triviales. En este sentido, Arc3D generó automáticamente una malla texturizada, sin necesidad de utilizar hardware especial. Sin embargo, en este caso, los resultados mostraron mallas con un fondo adherido a la malla principal y una textura despareja. Luego de limpiar el fondo con MeshLab, se obtuvo una malla incompleta con una resolución no mejor que 2 mm (Figura 57a). Otro problema de usar esta aplicación es que como el usuario no puede intervenir en el proceso de reconstrucción, no se puede controlar la correspondencia de las características ni la generación de la nube de puntos.

Con Autodesk 123D Catch se obtuvo una malla con una textura regular y una resolución no mejor que 1.5 mm (Figura 57b). El tiempo requerido para el procesamiento online fue de solo 15 minutos. En 123D Catch, como usuario no se puede intervenir en el proceso de reconstrucción, excepto en mejorar la correspondencia de las características entre las imágenes que no fueron alineadas en un proceso previo. Sin embargo, para este caso no fue necesario corregir este problema.

Los resultados obtenidos con Photosynth y VisualSFM + CMVS fueron nubes de puntos en vez mallas. La nube de puntos obtenida con Photosynth fue de menor resolución (6.815 puntos luego de la limpieza con MeshLab) que la obtenida con VisualSFM + CMVS (307.600 puntos luego de la limpieza con MeshLab). Ambas nubes de puntos fueron convertidas a mallas utilizando el filtro de Poisson (Figura 56). Los parámetros que se utilizaron para aplicar este filtro fueron: Profundidad *Octree*¹¹²: 11; y *Solver Divide*¹¹³: 11. El resto de los parámetros (*Samples per Node*¹¹⁴, y *Surface offsetting*¹¹⁵) fueron dejados por defecto en el software MeshLab (valores 1).

¹¹² Mientras más alto sea el valor elegido para la Profundidad *Octree* más detallado será el resultado. Esto se debe a que cuanto más profundo es el algoritmo de los cubos de marcha, más fina es la granularidad del *voxelgrid*. Por lo tanto, más alta es la cantidad de vértices de la malla generada.

¹¹³ *Solver Divide* especifica la profundidad a la cual un *solver* de bloque Gauss-Seidel es usado para resolver la ecuación Laplaciana.

¹¹⁴ *Samples Per Node*: Especifica el número mínimo de puntos de muestra que deberían caer dentro de un nodo *Octree*, ya que la construcción *Octree* se adapta a la densidad de muestreo. Para los datos sin ruido: [1.0, 5.0]. Para los datos con ruido: [15.0, 20.0]

¹¹⁵ *Offset*: un valor de compensación. Si se establece en 1 no hay compensación.



Figura 56. Reconstrucción de la superficie con el filtro de Poisson a partir de las nubes de puntos obtenidas con Photosynth (arriba) y VisualSFM + CMVS (abajo)

Como resultado final, la malla obtenida de la nube generada por Photosynth tuvo una baja resolución (~ 1 cm) sin ningún detalle (Figura 57c). Por otro lado, la malla obtenida por la nube de VisualSFM + CMVS tuvo una mayor resolución (~ 1 mm) pero con una superficie granulada (Figura 57d). Finalmente, la malla generada con VisualSFM + CMP-MVS obtuvo la máxima calidad sin ningún granulado o deformación en su superficie (Figura 57e). La resolución de la imagen 3D obtenida con VisualSFM + CMP-MVS fue entre 200-400 μm dependiendo de la región del objeto (Figura 61a).

Además, con este software la malla obtenida tiene textura y vértices coloreados, lo cual mejora la resolución visual (Figura 57f). El proceso de CMP-MVS para las 40 imágenes tomó media hora aproximadamente, usando el hardware mencionado en el capítulo anterior. La nube de puntos obtenida con CMP-MVS consistió en 2.045.825 puntos luego de la limpieza en MeshLab. Esta malla fue la seleccionada para hacer las comparaciones con las demás técnicas de registro 3D.

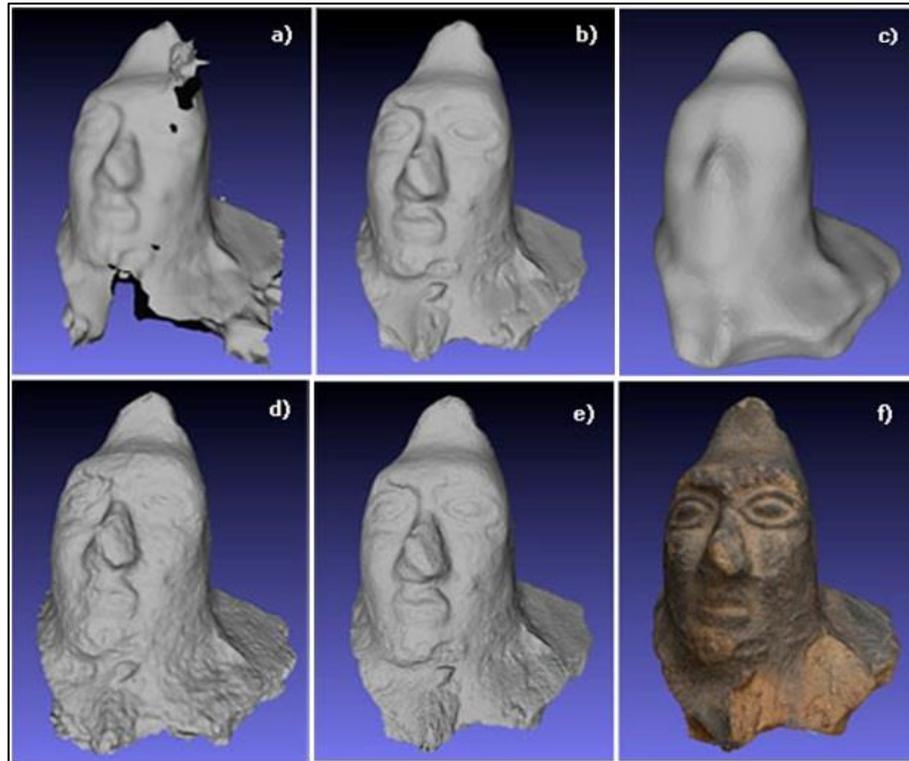


Figura 57. Comparación de mallas obtenidas con diferentes software de Structure from Motion. a) Arc3D. b) Autodesk 123D Catch. c) Photosynth. d) VisualSFM + CMVS. e) VisualSFM + CMP-MVS. f) Malla texturizada obtenida con VisualSFM + CMP-MVS.

Es importante mencionar que VisualSFM puede procesar un mayor número de imágenes comparado con los otros software. Otra ventaja de este programa es que el usuario puede participar en la correspondencia de características, usando su propia secuencia de pares, o usando sus propios códigos detectores de características. También pueden ajustarse los parámetros de velocidad de procesamiento.

6.1.2. Registro 3D realizado con escaneo láser y escaneo con luz estructurada

En el caso del escaneo láser, el barrido de la línea láser y la cámara se mantuvieron fijos y la escultura fue rotada para cada nuevo escaneo. Se realizaron 25 escaneos (4-5 min de duración cada uno), que luego fueron alineados y fusionados con el programa David Laser Scanner.

En un primer experimento se realizó el escaneo con el láser manejado a mano, obteniéndose imágenes 3D de buena calidad, pero en algunas regiones aparecieron finas líneas verticales relacionadas al barrido de la línea laser. Se comprobó que este efecto se produce cuando la velocidad de adquisición de imágenes es menor que la velocidad del barrido de la línea. Para eliminar este problema en un segundo experimento se utilizó un motor paso a paso.

En la figura 58, se observa el mapeo de profundidad en el tiempo realizado en estas conciciones

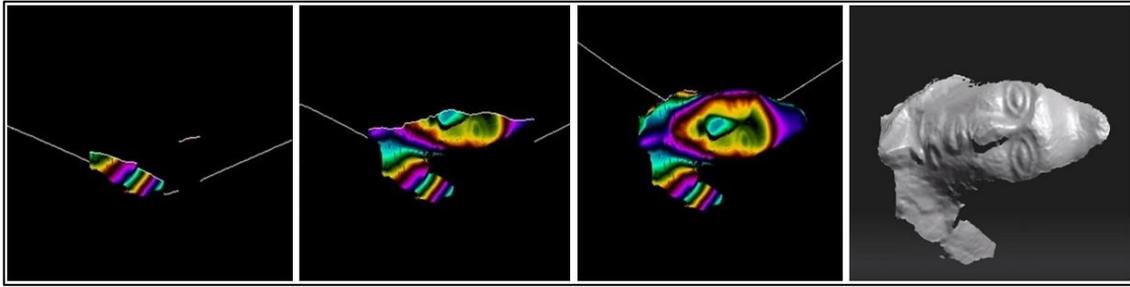


Figura 58. Escaneo láser de una escultura de terracota. Barrido de la línea láser en función del tiempo generando el mapeo de profundidad. El último cuadro representa la malla poligonal obtenida del escaneo.

El registro 3D mediante escaneo con luz estructurada se realizó utilizando un tiempo entre cada proyección de franjas de 1s, adquiriendo un total de 27 escaneos (Figura 59), los cuales también fueron alineados y fusionados usando David Laser Scanner (Figura 60).

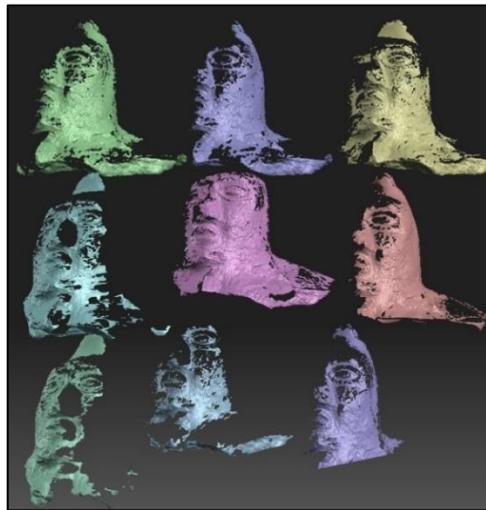


Figura 59. 9 de los 27 escaneos de una escultura de terracota realizados con luz estructurada.

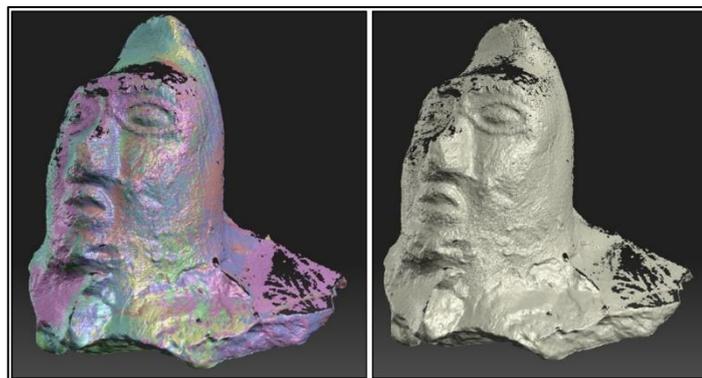


Figura 60. Alineamiento y fusión de escaneos obtenidos con luz estructurada usando el software David Laser Scanner.

La resolución de las imágenes 3D obtenidas tanto con el escaneo láser (Figura 61b). como con el realizado con luz estructurada (Figura 61c) fueron de entre 200 y 400 μm , dependiendo de la región de objeto. Esta resolución fue del mismo orden que la obtenido con fotogrametría digital.

El tiempo requerido para limpiar, alinear y fusionar todos los escaneos fue de una hora aproximadamente, usando los software David Laser Scanner y MeshLab.

La figura 61 muestra un detalle de las imágenes 3D obtenidas con las tres técnicas estudiadas.

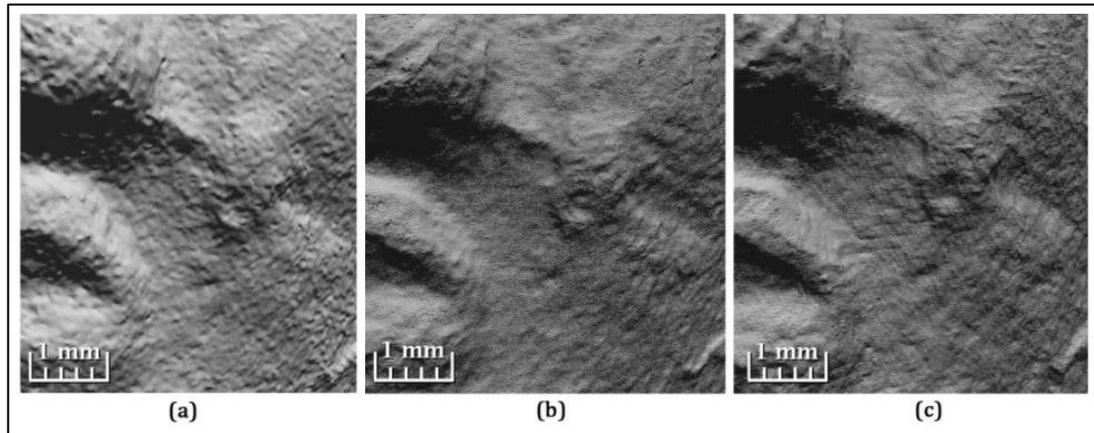


Figura 61. Detalle de la escultura en la imagen 3D obtenida con: (a): VisualSFM + CMP-MVS; (b): Escaneo de luz estructurada; (c): Escaneo con láser

6.1.3. Análisis de la deformación de las imágenes 3D

Para estimar la posible deformación de la imagen 3D obtenida con cada técnica se realizaron dos tipos de análisis. Por un lado, se comparó la distancia entre dos puntos en las imágenes con respecto a la obtenida en el objeto real. Este procedimiento se realizó con pares de puntos en diferentes zonas de objeto. Los resultados mostraron que las imágenes obtenidas con fotogrametría digital y escaneo con luz estructurada tenían una exactitud promedio del 99.7% en cualquier dirección. Para el escaneo con láser se obtuvo una exactitud promedio menor, del 96.2% en la dirección horizontal (eje de los ojos) y 99.2% en la dirección vertical (perpendicular a la dirección del barrido del láser).

Tomando en cuenta este resultado, se realizó un segundo análisis usando el software CloudCompare. Se seleccionó una región de 2 cm x 1 cm correspondiente a una parte del ojo y de la mejilla izquierda para observar posibles deformaciones en las imágenes. Primero, las mallas fueron alineadas utilizando la herramienta en MeshLab del método de ICP (LEVOY y RUSINKIEWICZ, 2001). Las mallas alineadas fueron convertidas en nubes de puntos con CloudCompare. Luego, se realizó un nuevo alineamiento con este software. Una vez que las nubes de puntos estuvieron bien superpuestas, el siguiente paso fue computar las distancias entre cada par de nubes de puntos. Se realizó un modelado local en Cloud Compare, para obtener una mejor estimación de la distancia. En este caso, se eligió utilizar el modelo local

Cuadrático¹¹⁶. En la figura 62 se muestra la comparación de las escalas de colores de los campos escalares para los tres pares de nubes de puntos.

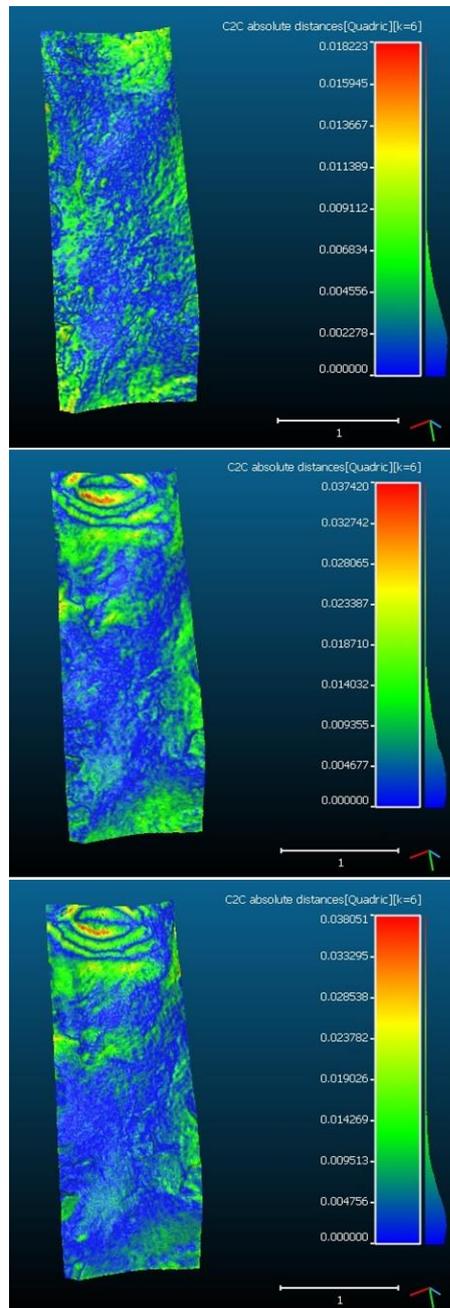


Figura 62. Comparación de las escalas de colores de los campos escalares para los tres pares de nubes de puntos. De arriba a abajo: imagen 3D obtenida por fotogrametría digital, comparada con el escaneo de luz estructurada; imagen 3D obtenida con fotogrametría digital, comparada con escaneo laser; imagen 3D obtenida con escaneo laser, comparada con el de luz estructurada. El color rojo indica que hay mayor diferencia en el par de nube de puntos y el color azul indica una diferencia menor.

Como puede verse, al comparar las imágenes obtenidas con fotogrametría digital y con escaneo con luz estructurada, casi no se observa diferencia. Por el contrario, comparando las imágenes del escaneo con láser con respecto a las del de luz estructurada y fotogrametría digital se

¹¹⁶ Del inglés Quadric local model (formalmente llamado 'Height function').

observan diferencias importantes que pueden afectar la medición de las distancias. Estos resultados son consistentes con las mediciones discutidas en la primera parte de esta sección.

6.1.4. Microfotogrametría 3D con SFM

Una ventaja de la fotogrametría digital respecto al escaneo con láser o con luz estructurada es que es muy fácil de optimizar la resolución de la imagen 3D usando imágenes magnificadas obtenidas con una cámara con una lente macro o un microscopio (TIANO et al., 2008; YANAGI y CHIKATSU, 2010).

Con el objetivo de registrar en 3D el grado de deterioro de la escultura de terracota consistente en un pequeño agujero de unos 700 μm de diámetro, se tomó un nuevo conjunto de fotos usando un microscopio 20X. Se tomaron 15 imágenes con un solapamiento de más del 80%. La imagen 3D obtenida se muestra en la figura 63a y 63b. La figura 63c muestra el mismo detalle pero, en este caso, las fotografías fueron tomadas sin magnificación óptica.

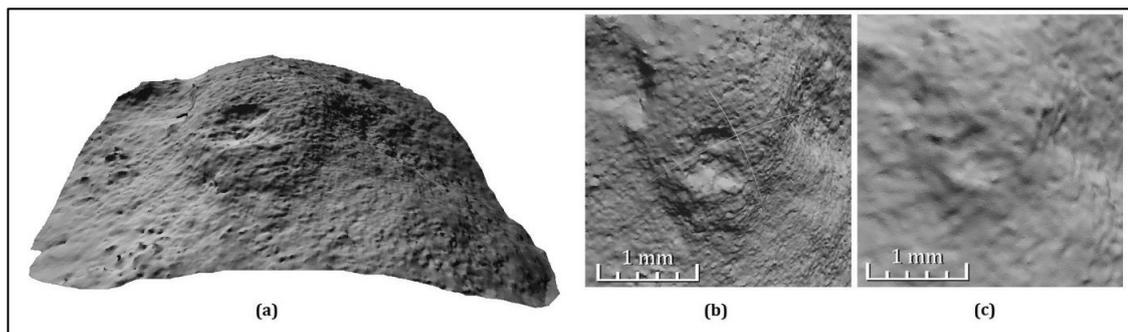


Figura 63. a) y b) Imagen 3D de un deterioro de la escultura de terracota obtenida con microfotogrametría 3D con SFM a partir de fotos tomadas con microscopio 20X. c) El mismo detalle obtenido con fotogrametría digital con SFM sin magnificación óptica.

Puede observarse claramente cómo se mejora la resolución y se obtiene una mejor calidad de la imagen 3D que permite visualizar detalles del objeto.

6.1.5. Discusión y conclusiones

Se obtuvieron imágenes 3D de una escultura de terracota pequeña utilizando escaneo de luz estructurada, escaneo laser, fotogrametría digital y software gratuito de procesamiento de imágenes. Con las tres técnicas se logró obtener una resolución de entre 200 y 400 μm , dependiendo de la región del objeto, Estos valores representan una resolución del orden del 0.06% de la máxima dimensión del objeto.

La combinación de VisualSFM y CMP-MVS resultó ser el software que mejor generó una malla texturizada y completa, de alta resolución, en comparación a Arc3D, Photosynth y 123D Catch.

Como se mencionaba en el capítulo 3, la limitación de usar escáneres comerciales está en el costo de los equipos y la complejidad de su uso. Sin embargo, como fue demostrado en este trabajo, un software de bajo costo como lo es David Laser Scanner, combinado con un software de procesamiento de imágenes como MeshLab, ofrece soluciones prácticas al momento de escanear objetos simples y de superficies opacas.

La tabla 4 resume la comparación de las tres técnicas usadas en este trabajo, en términos del software utilizado, requerimientos, costo, calidad y resolución.

La fotogrametría digital con VisualSFM + CMP-MVS tiene importantes ventajas sobre los métodos de escaneo 3D. Es más barata, más fácil de utilizar y todo el proceso para producir una malla 3D texturizada toma menos tiempo. El instrumental requerido es sólo una cámara fotográfica convencional y una computadora, elementos accesibles para cualquier institución museística estatal. Sin embargo, como también ocurre con las técnicas de escaneo, si las mallas obtenidas no resultan de buena calidad, ya sea por tener faltantes, deformaciones o imperfecciones en los colores, se deberán aplicar técnicas de procesamiento de imágenes para mejorar la textura, limpiarlas o alinearlas, involucrando cierto tipo de conocimiento en procesamiento de imágenes.

Otra ventaja de la fotogrametría digital es su variante de micro-fotogrametría, utilizando un microscopio para registrar dimensiones micrométricas. Aunque se sabe que el escaneo con láser y con luz estructurada puede combinarse con microscopía, la configuración usada para realizar esta tarea es muy compleja y difícil de manejar.

Técnica	Software	Tipo de producto	Requerimientos adicionales	Costo	Calidad de los resultados	Resolución de la nube de puntos / malla
Fotogrametría digital con Structure from Motion	Arc3D	malla texturizada	no	no	Pobre. Malla incompleta, textura despareja.	2 mm
	Autodesk 123D Catch	malla texturizada	no	no	Buena. Malla completa con textura regular.	1.5 mm
	Photosynth	nube de puntos	La imagen 3D necesita reconstrucción de superficie.	no	Muy pobre, sin detalle de la superficie.	6.815 puntos luego de la limpieza
	VisualSFM + CMVS	nube de puntos	Hardware de alto rendimiento para el procesamiento de imágenes. La imagen 3D necesita reconstrucción de superficie.	no	Buena, pero con una superficie granulada.	307.600 puntos luego de la limpieza
	VisualSFM + CMP-MVS	malla con textura y malla con vértices de color	Hardware de alto rendimiento para el procesamiento de imágenes.	no	Muy buena.	2.045.825 puntos luego de la limpieza
	David-Laserscanner	malla (también tiene la posibilidad de texturizarla)	Instrumental específico y pre-configurado. Alineamiento de las mallas.	bajo	Buena, pero con algunas líneas verticales relacionadas con el barrido de la línea láser cuando se la maneja a mano.	200-400 µm
Escaneo con Láser	David-Laserscanner	malla (también tiene la posibilidad de texturizarla)	Instrumental específico y pre-configurado. Alineamiento de las mallas.	bajo	Muy buena.	200-400 µm

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos con fotogrametría digital, escaneo laser y escaneo de luz estructurada.

La calidad de la superficie de la imagen 3D puede variar con cada técnica. En el caso del escaneo con láser depende de la calidad de la línea y la velocidad del barrido. El alineamiento y la fusión de mallas también son factores importantes que determinarán la calidad de la imagen 3D final, siendo también relevante en el escaneo de luz estructurada. Una mala alineación de los escaneos y su posterior fusión afectará la exactitud de la imagen 3D y se manifestará en errores en las mediciones.

Otro elemento importante a tener en cuenta es el tamaño de los paneles de calibración. Es muy importante utilizar paneles de escala similar al objeto, dado que de esto dependerá la resolución alcanzada en la malla 3D final. Por otro lado, la fotogrametría digital con *Structure from Motion* logra el mismo orden de resolución si el solapamiento de las imágenes es suficiente para alcanzar nubes de puntos densas y esto dependerá del número de fotos tomadas.

En el caso del escaneo con luz estructurada y fotogrametría digital casi no se observaron deformaciones comparando ambas imágenes. Por el contrario, el escaneo con láser produjo una deformación de la imagen que puede afectar futuras mediciones. Es importante mencionar que en fotogrametría digital a veces puede aparecer una mínima deformación del modelo 3D respecto al objeto real debido a la distorsión de la lente o a errores en el software. Una solución que ofrece mayor exactitud es utilizar sistemas de referencia espacial, como las estaciones totales o los sistemas GPS, los cuales permiten calcular las coordenadas en campo y transmitir las en forma digital a los programas de procesamiento de imágenes empleados luego para la visualización de las medidas del objeto digitalizado. Sin embargo, estos métodos son más útiles en el registro 3D a gran escala, como formaciones geológicas o yacimientos arqueológicos, que en el registro de objetos de escala más chica, como las piezas de museo u obras de arte que por lo general no llegan a superar los 2 m de largo.

El uso de fotogrametría con *Structure from Motion* para el registro de objetos con resolución milimétrica y sub-milimétrica ha sido escasamente reportado en la literatura. Esto posiblemente sea debido a que es mucho más complejo obtener un buen conjunto de imágenes 2D a un corto alcance. Cuanto menor es la distancia al sujeto que se enfoca menor es la profundidad de campo. Existen soluciones para este problema. Una posibilidad es utilizar un diafragma más cerrado, pero como esto implica perder iluminación, se requiere ajustar el tiempo de exposición y sacar la foto con trípode. Otra opción es utilizar *focus stacking*, una técnica de procesamiento de imágenes que consiste en combinar múltiples imágenes tomadas con diferentes enfoques en una única imagen con mayor profundidad de campo, donde todo el objeto está enfocado.

Como conclusión, las tres técnicas involucran mayor o menor costo, tiempo de ejecución, complejidad en el procesamiento de imágenes y diferentes grados de entrenamiento.

6.2. Procesamiento de registros 3D

Los registros 3D obtenidos por cualquiera de las técnicas mencionadas en la sección anterior pueden ser utilizados como producto final o pueden ser procesados para realizar por ejemplo estudios específicos de la pieza, monitorear en el tiempo su estado de conservación o diseñar soportes de exhibición. En estos casos se requiere emplear software y técnicas de procesamiento de imágenes 3D. A continuación, se mostrarán algunos ejemplos.

6.2.1 Alineación de mallas texturizadas

Un problema que se presenta muchas veces es la necesidad de realizar el registro 3D por partes, por ejemplo, cuando el objeto es complejo y se desea un detalle de ciertas zonas, o cuando la forma del objeto o las condiciones del espacio donde se encuentra lo requieren. Este fue el caso de la escultura de terracota descrita en la sección anterior. El registro se realizó en tres partes, usando VisualSFM + CMP-MVS y diferentes conjuntos de fotos, generando tres mallas coloreadas diferentes

Para reconstruir la escultura en su totalidad, primero se realizó un alineamiento de las mallas, es decir, que se cambió la posición de dos de ellas para ubicarlas en concordancia con la restante elegida como referente. Para realizar este alineamiento se utilizó la herramienta de MeshLab de correspondencia de puntos (Point Based Glueing) y, luego de ese alineamiento inicial, se lo optimizó con el algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*). El error del alineamiento global calculado por MeshLab fue de 0.0010. Una vez orientadas las mallas. Después, se aplicó el filtro VCG de reconstrucción de superficie para generar una única malla de alta resolución, producto de las anteriores (Figuras 64 y 65).

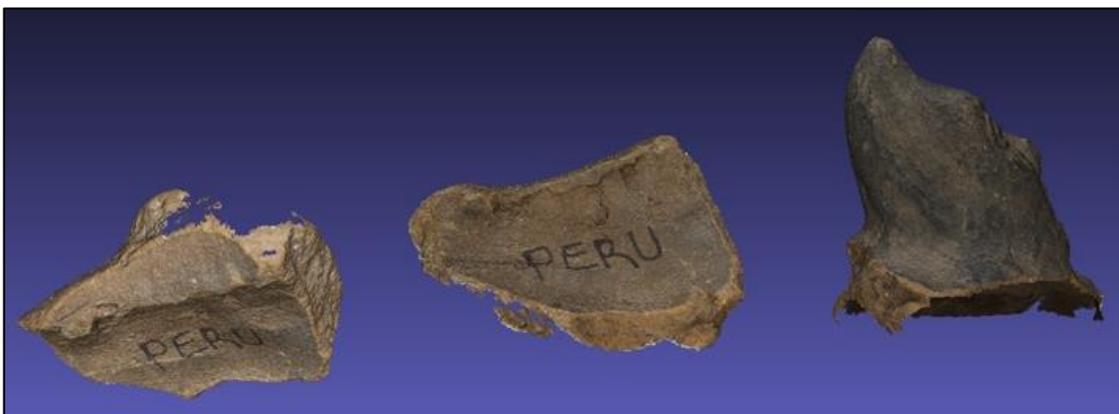


Figura 64. Mallas texturizadas creadas con VisualSFM + CMP-MVS, correspondientes a diferentes partes de la escultura de terracota.

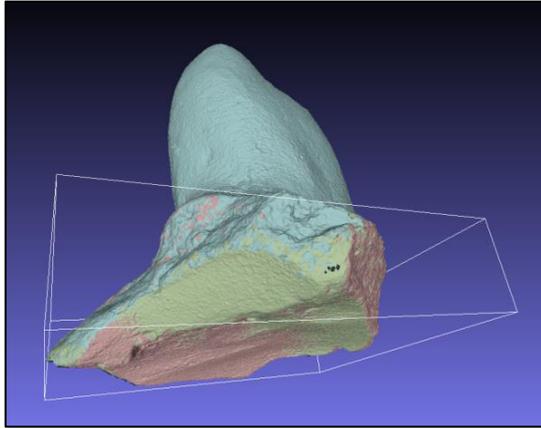


Figura 65. Alineamiento de las tres mallas, representadas con diferentes colores.

A pesar de que la malla 3D obtenida por la reconstrucción por el método VCG resultó ser muy satisfactoria en términos de resolución y precisión, al transferirle el color desde las mallas originales implicó que ésta no quedara de un color parejo. Esto se debe a una variación en la iluminación empleada en las tomas de cada una de las partes del objeto que, al combinarlas en una única malla se produjo una discontinuidad del color en la transición de las mallas (Figura 66a). Para resolver este problema, las tres mallas a color originales y una nueva que resultó de la fusión de las anteriores, obtenida con el filtro de Poisson, se procesaron con en el software Texture Stitcher. El producto obtenido fue la malla texturizada con una suave transición de color mostrada en la figura 66b.

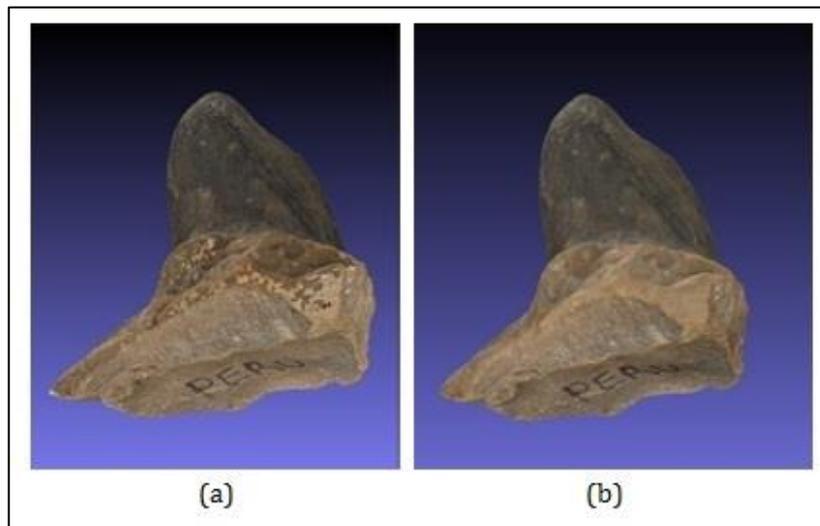


Figura 66. a) Reverso de la imagen 3D de la escultura, donde se observa una discontinuidad en la textura. b) La misma imagen 3D luego de procesarla con el software Texture Stitcher.

6.2.2. Efectos para visualización

La posibilidad de asignarle propiedades a los materiales que componen las mallas poligonales permite utilizar distintos efectos para la visualización de la imagen 3D. Algunos de los más útiles podrían ser la visualización transparente y la iluminación con efecto microscopio electrónico. La Figura 67 muestra la imagen 3D de la escultura de terracota visualizada con dos efectos generados con herramientas de MeshLab. A la Izquierda una visualización trasparente producida con el *shader* “x-ray” y a la Derecha dos visualizaciones con el *shader* “microscopio electrónico” y con distintas direcciones de luz. Es interesante mencionar que la dirección de la luz se puede controlar para simular una iluminación rasante, usada para observar mejor el relieve de una pieza.

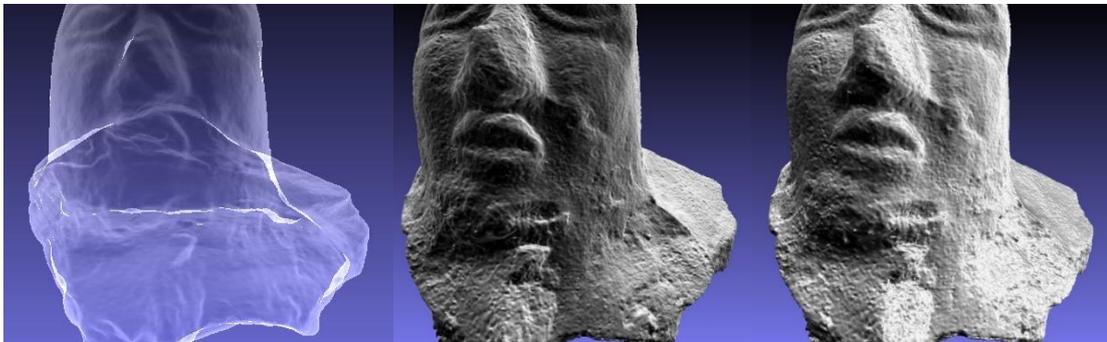


Figura 67. Escultura de terracota. Izquierda: visualización trasparente en MeshLab generada con *shader* “x-ray”. Derecha: visualización con dos direcciones de luz y utilizando el *shader* “microscopio electrónico” también de MeshLab.

6.2.3 Cálculos de volumen

Teniendo el registro 3D de una pieza resulta sencillo calcular el volumen de la misma o el de alguna de sus partes, por ejemplo, utilizando el software de MeshLab. Para ello se debe convertir primero la imagen 3D a un archivo “de sólido” como por ejemplo el STL, o simplemente aplicarle un filtro de Poisson para lograr que la malla sea “watertight” (impermeable). Luego se puede usar la herramienta “Quality, Measure and computation->Compute Geometric Measures” y mirar los resultados en la ventana de la consola.

Es importante aclarar que la mayoría de los formatos 3D no poseen unidades, es decir, son sólo coordenadas 3D en el espacio. Si se calcula el volumen de un cubo de lado 1 (lo que sea que 1 signifique), se obtienen un volumen de 1. Por lo tanto, es importante asignarles un valor de referencia a las medidas, ya sean de longitud, volumen o superficie.

El cálculo de volumen de la escultura de terracota arrojó un valor de 22.4 cm^3 . Meshlab también calcula la superficie del objeto, en este caso es de 53.6 cm^2

Para comprobar que estos resultados son correctos se realizó el mismo cálculo con el programa MeshMixer con la herramienta *Analysis/Stability*, arrojando el mismo resultado.

6.2.4. Diseño de soportes y réplicas

La creación de soportes de exhibición o embalaje requiere diseñar o calcular los espacios negativos de un objeto. Para ejemplificar un caso se decidió utilizar MeshMixer. Se parte de un modelo sólido en formato STL. Luego se añade lo que sería la forma base del molde negativo, que podría ser una malla primitiva como un cubo. Se lo escala y se lo coloca superpuesto a la sección del objeto a la que se le realizará el negativo. La malla del molde también debe ser convertida a sólida. Luego se aplica la herramienta “*Boolean Difference*”¹¹⁷ para sustraer el espacio que ocupaba el objeto en el cubo. Es importante previamente realizar modificaciones en la malla del objeto a fin de que el resultado del espacio vacío generado sea un poco más grande que el objeto mismo. Hay que calcular al menos 1mm de espacio para evitar errores. Además, las protuberancias deben ser simplificadas a fin de que al “encastrar” el objeto en el cubo no se generen trabas al momento de extraerlo del mismo. El mismo procedimiento para el diseño de moldes puede ser realizado en Blender usando el modificador booleano (Figura 68). Por último, se procede a la impresión del molde.

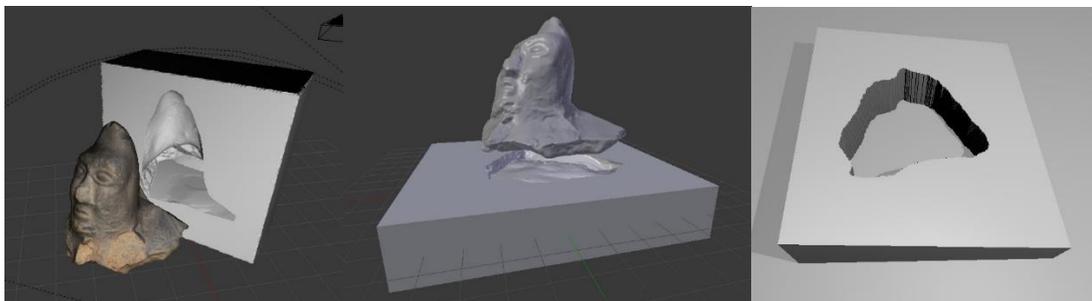


Figura 68. Modelado de piezas en negativo para la construcción de moldes o de soportes de exhibición.

Por otro lado, para construir una réplica de la escultura se utilizó el mismo modelo de la escultura en formato STL y se lo imprimió con una impresora 3D abierta en PLA (ácido poliláctico), manteniendo las medidas exactas de la escultura. Se usó un pico de 1 mm de diámetro y un espesor entre capas de 300 μm . El tiempo de la impresión fue de 3 horas aproximadamente. La figura 69 muestra la impresión terminada y comparada con el original.

¹¹⁷ Las operaciones booleanas son métodos para combinar o sustraer objetos sólidos de cada uno para crear una nueva forma.



Figura 69. Izquierda: Impresión 3D de la escultura de terracota. Derecha: Escultura original.

6.3. Influencia de las características del objeto en el registro 3D realizado con fotogrametría digital

Se evaluó la influencia de las características del objeto, particularmente las propiedades ópticas de su superficie, la textura (rugosidad, relieve, etc.) y su morfología, en el registro 3D realizado con fotogrametría digital con SFM.

En todos los casos se utilizaron conjuntos de fotos de alta resolución y una suficiente superposición entre las imágenes. Además, se mantuvo una iluminación homogénea, ya sea para los registros en espacios abiertos o en ambientes cerrados.

Se realizaron pruebas con objetos de yeso, cartón, piedra, porcelana esmaltada, metal y plástico, con superficies opacas, rugosas, lisas, entramadas, pulidas y brillantes. Se observó que, en objetos de yeso, mármol, piedra y cemento, cuando las superficies son rugosas o no están pulidas, las imágenes 3D producidas son de muy buena calidad. Esto significa que las mallas 3D obtenidas fueron completas y sin que se observaran deformaciones. Además, se obtuvieron mallas 3D únicas, esto es, sin dividirse en otras mallas secundarias con “*clusters*” (o racimos) que a veces se pueden generar debido a la falta de correspondencia entre las características de algunas imágenes. Las figuras 70,71 y 72 muestran algunos ejemplos.



Figura 70. Izquierda: Fotografía de la escultura de piedra de la tumba de Rufino de Elizalde, Cementerio de la Recoleta. Derecha: La imagen 3D final, realizada con 115 fotografías y visualizada en MeshLab.



Figura 71 Izquierda: Fotografía de un fragmento de una moldura arquitectónica de cemento. Derecha: La imagen 3D final, realizada por 33 fotografías, visualizada y editada en MeshLab.



Figura 72: Izquierda: Fotografía de un fragmento de una moldura arquitectónica de yeso patinada con pigmentos marrones y dorados. Derecha: La imagen 3D final, realizada con 22 fotografías, visualizada y editada en MeshLab

La figura 73 presenta un ejemplo de la aplicación de la técnica a un objeto reflectante, en este caso un tazón realizado en porcelana esmaltada. Como puede verse, la imagen 3D generada con fotogrametría resulta distorsionada en sus bordes y con faltantes en el interior del tazón. Esto es debido a que a medida que se tomaron las fotos, la luz reflejada iba cambiando continuamente en esa región del objeto, que es cóncava.



Figura 73: Izquierda: Fotografía de un tazón realizado en porcelana esmaltada. Derecha: Imagen 3D final obtenida con 34 fotos, visualizada y editada en MeshLab.

Para explorar la aplicación de la técnica en objetos de metal y de poco espesor se probó la realización de imágenes 3D de un conjunto de placas arqueológicas de cobre pertenecientes al Museo del Hombre y su Entorno, en la Provincia de Santa Cruz, provenientes de un enterramiento en la costa de dicha provincia¹¹⁸. Para realizar el registro 3D se construyeron mallas del anverso y el reverso, por separado, dado que el grosor de la pieza era muy fino y esto dificultaba el *matching* de características en el pasaje de un lado al otro. La figura 74 (a la derecha) muestra la imagen 3D de la cara más opaca, que tenía corrosión y suciedad, mientras que la de la figura 75 (a la derecha) muestra la correspondiente imagen 3D de la cara más brillante. Puede verse que en este caso la imagen presenta deformaciones en la geometría y en la textura, por lo que no se pudo completar el registro 3D de la pieza completa.



Figura 74. Izquierda: Fotografía de una placa arqueológica de cobre con corrosión en la superficie. Derecha: Imagen 3D final realizada con 20 fotos y visualizada en MeshLab.

¹¹⁸ Ver más detalles en Materiales y Métodos



Figura 75. Izquierda: Fotografía de la misma placa arqueológica de la figura 20, pero de su reverso, que es más brillante y con menos corrosión y suciedad. Derecha: Imagen 3D final, tomada con 20 fotos y visualizada en MeshLab.

Cuando se aplicó el mismo procedimiento a otra placa cuyas caras tenían muy poca reflectividad, las mallas obtenidas del anverso y el reverso resultaron bastante completas y se pudieron unir sin problemas, obteniéndose, como muestra la Figura 76, una imagen final con las técnicas de alineamiento y fusión de MeshLab. Sin embargo, el proceso fue muy largo y complicado y el resultado no permitió fusionar los bordes respetando el objeto real (Figura 77)



Figura 76. Imágenes 3D texturizadas del anverso y reverso de una placa arqueológica metálica con corrosión. Ambas editadas con MeshLab.

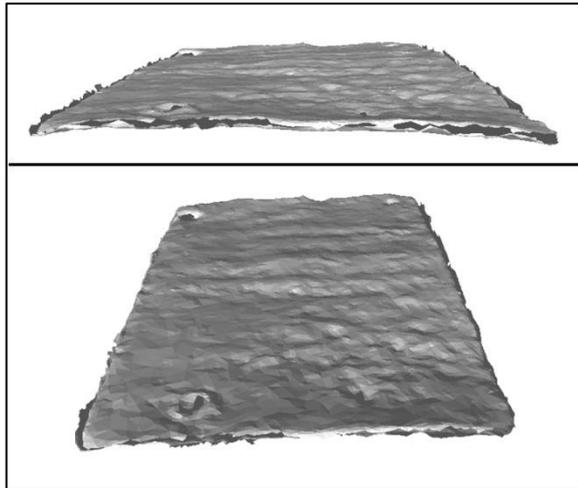


Figura 77. Alineación de ambas mallas 3D. Se observan faltantes en los bordes.

La Figura 78, a la derecha, muestra otro ejemplo de como la disminución de la reflectividad de la superficie por corrosión favorece la reconstrucción de la imagen 3D de objetos metálicos. En este caso se trata de una placa conmemorativa de bronce.



Figura 78. Izquierda: Fotografía de la placa de bronce en conmemoración a Lucio Correa Morales, Cementerio de la Recoleta. Derecha: La imagen 3D final, visualizada en MeshLab.

Por otro lado, se exploró la aplicación de la técnica en objetos compuestos por entramados pequeños realizados en diferentes materiales. Para ello se eligió la obra “Planta trama trampamiento”, realizada con una técnica mixta y compuesta por un cilindro de cartón pintado con color verde agua muy claro y unos resortes de metal pintados, que están ubicados en la parte superior, que generan formas orgánicas. El resultado fue una imagen 3D incompleta en la zona del cilindro, debido a que su textura era muy lisa y de un color plano, sin ninguna trama (Figura 79)



Figura 79. Izquierda: Fotografía de la obra “Planta trama trampa-miento”. Derecha: La imagen 3D realizada con 132 fotos y visualizada en MeshLab.

La parte superior de los resortes sí se observa en la imagen 3D. Sin embargo, cuando se visualiza la malla sin textura (el color) los detalles y los alambres individuales no se notan, agrupándose en formas gruesas que nada tienen que ver con las formas originales (Figura 80).

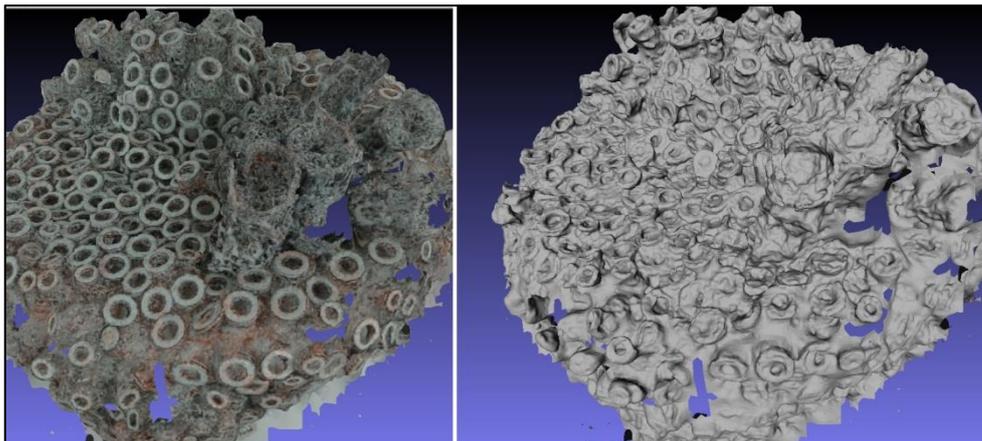


Figura 80. Izquierda: Imagen 3D con textura de la parte superior de la obra “Planta trama trampa-miento”. Derecha: Misma imagen 3D, pero sin textura.

La figura 81 muestra el registro 3D de una escultura de plástico dorado brillante. El software de SFM permitió obtener varias mallas incompletas y distorsionadas (9 en total). La causa de esto es la superficie reflectante del objeto, donde la luz reflejada es diferente para cada toma de fotografía.



Figura 81. Izquierda: Fotografía de una réplica de la escultura de la obra “Welcome”. Derecha: algunas de las mallas 3D, realizadas con 42 fotos, visualizadas y editadas en MeshLab.

Por último, se intentó realizar el registro 3D de la instalación “Insolada” en la sala de exhibición de la misma (Figura 82). La instalación se compone de módulos similares: una estructura metálica de la que cuelga un papel blanco que en su parte inferior se impregna en un recipiente con aceite. En este caso se realizaron varios intentos, pero no se logró obtener una malla. Esto se debió a que el objeto tenía un elemento plano y sin trama: el papel blanco. Además, el líquido no permitía realizar fotografías sin reflejos en esa parte de la obra.



Figura 82. Fotografía de uno de los módulos de la obra “Insolada”, de Joaquín Boz.

Se probó la técnica en otro objeto que fuese plano y blanco, una tapa de caja de cartón, y el resultado fue una malla muy incompleta (Figura 83). La misma tapa fue pintada con crayones

de colores y se repitió el procedimiento con SFM. En este último caso, la imagen 3D obtenida resultó completa (Figura 84)

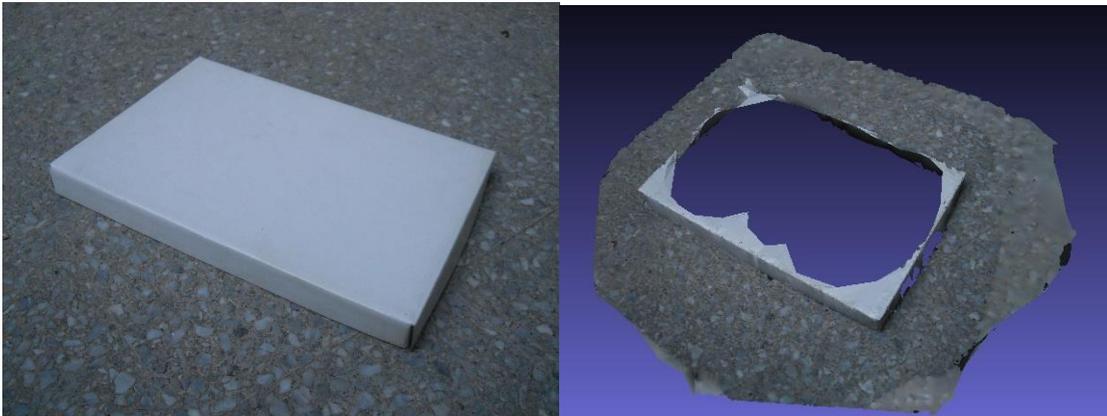


Figura 83. Izquierda: Fotografía de una tapa de caja de cartón totalmente blanca. Derecha: La imagen 3D realizada con 10 fotos y visualizada en MeshLab.

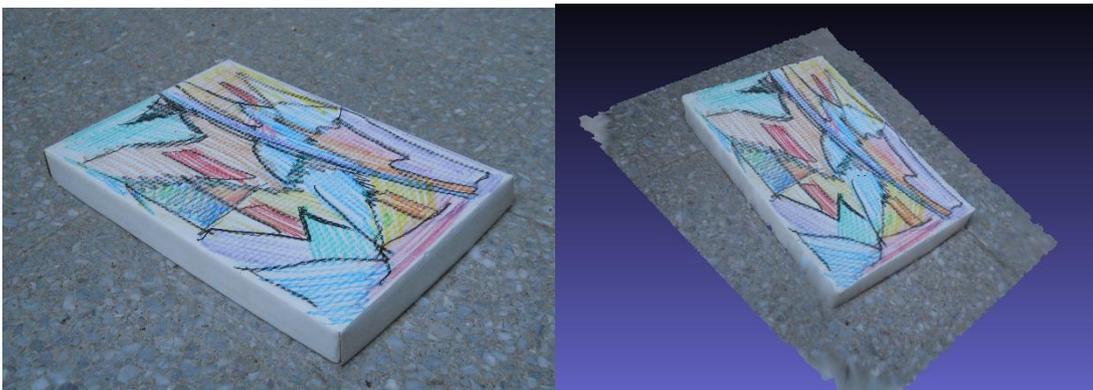


Figura 84. Izquierda: Fotografía de una tapa de caja de cartón pintada con crayones de colores. Derecha: La imagen 3D realizada con 10 fotos y visualizada en MeshLab.

6.3.1. Discusión y conclusiones

Después de evaluar los registros 3D obtenidos en objetos con superficies de diferentes características, se pudo comprobar que, independientemente del material, en objetos con superficies altamente reflectantes, como los realizados en porcelana esmaltada, metales pulidos o plástico brillante, la técnica de fotogrametría digital tiene importantes limitaciones. Tampoco resultó adecuada esta técnica para registrar objetos muy finos en los que se pretenda registrar ambas caras del mismo, entramados pequeños y áreas planas de un solo color. En todos estos casos se obtienen mallas 3D incompletas, con deformaciones, o con varios *clusters* generados debido a la falta de correspondencia entre las características de algunas imágenes, afectadas por los reflejos de la luz. En algunos casos se detectó variaciones en la textura (color) del objeto.

Una posible solución para el caso de objetos muy brillantes, translucidos o muy oscuros es aplicar una capa fina de polvo o pintura en aerosol que puede ser removida fácilmente con pincel o con una esponja con agua. Esta cobertura proporciona al objeto un acabado blanco opaco que permite la aplicación de la técnica sin inconvenientes. Sin embargo, dado que esta solución altera el estado de la pieza, no es recomendable cuando se trata de objetos con valor patrimonial.

Otra opción es utilizar filtros polarizadores durante la adquisición de las fotos y procesamiento digital con *HRD imaging*¹¹⁹. Este abordaje apunta a mejorar la correspondencia de las imágenes durante el proceso de SFM para los casos en que los objetos son muy reflectantes o muy oscuros (GUIDI et al., 2014).

En el caso de objetos planos y sin trama, las mallas resultan incompletas o directamente no se generan porque los valores de píxel en la foto son similares entre sí y varían suavemente, lo que genera que el algoritmo SIFT deseche estas regiones (características) para la detección (ZHANG y WANG, 2012). La idea del SIFT es calcular dos gradientes en el *key point*, perpendiculares entre sí. De esta manera, una región plana tendrá bajo gradiente en ambas direcciones, un borde tendrá un gradiente alto en sólo una de las dos direcciones (la perpendicular al borde), y una esquina tendrá alto gradiente en ambas, lo que resultará un buen candidato para ser un *key point*. Una posible solución para emplear la técnica de fotogrametría con SFM en este tipo de superficies es proyectar patrones de ruido sobre el objeto simultáneamente con el registro fotográfico (IOANNAKIS et al., 2015). No obstante, esta solución requiere de un montaje especial con proyectores, discos giratorios, computadora e iluminación controlada.

6.4. Aplicaciones de la Fotogrametría digital con SFM a obras de arte y colecciones de museos argentinos

En esta sección se muestran las aplicaciones de la fotogrametría digital con SFM realizadas en esta tesis, a obras y colecciones pertenecientes a museos de la Argentina.

¹¹⁹ Imágenes de alto rango dinámico (High Dynamic Range en inglés, o HDR). Son un conjunto de técnicas que producen imágenes con un rango mucho mayor de luz y color que las imágenes convencionales.

6.4.1. “Figura reclinada” de Naum Knop

Para el registro 3D de la obra de Naum Knop, en lugar de mover la cámara alrededor de la escultura, se optó por utilizar un disco giratorio diseñado para las medidas de esta escultura, donde se marcaron los ángulos de rotación, aproximadamente cada 23°. De esta manera, fue posible hacer girar la pieza y mantener la cámara fija (Figura 85). Se colocó además un fondo de color blanco, para evitar “contaminar” la escena a fotografiar y reflejar mejor la luz. Se tomaron 116 imágenes en formato TIFF, que luego fueron pasados a JPG con resolución 4288x2848 px.



Figura 85. Parte del conjunto de 116 fotografías que se tomaron de la escultura “Figura reclinada” de Naum Knop. Se observa en ellas el disco giratorio construido para rotar la escultura en cada toma.

Luego de aplicar los procesos involucrados en el software de SFM el producto generado fue una nube de puntos 3D, de baja densidad, donde ya se intuye la forma de la escultura (Figura 86).

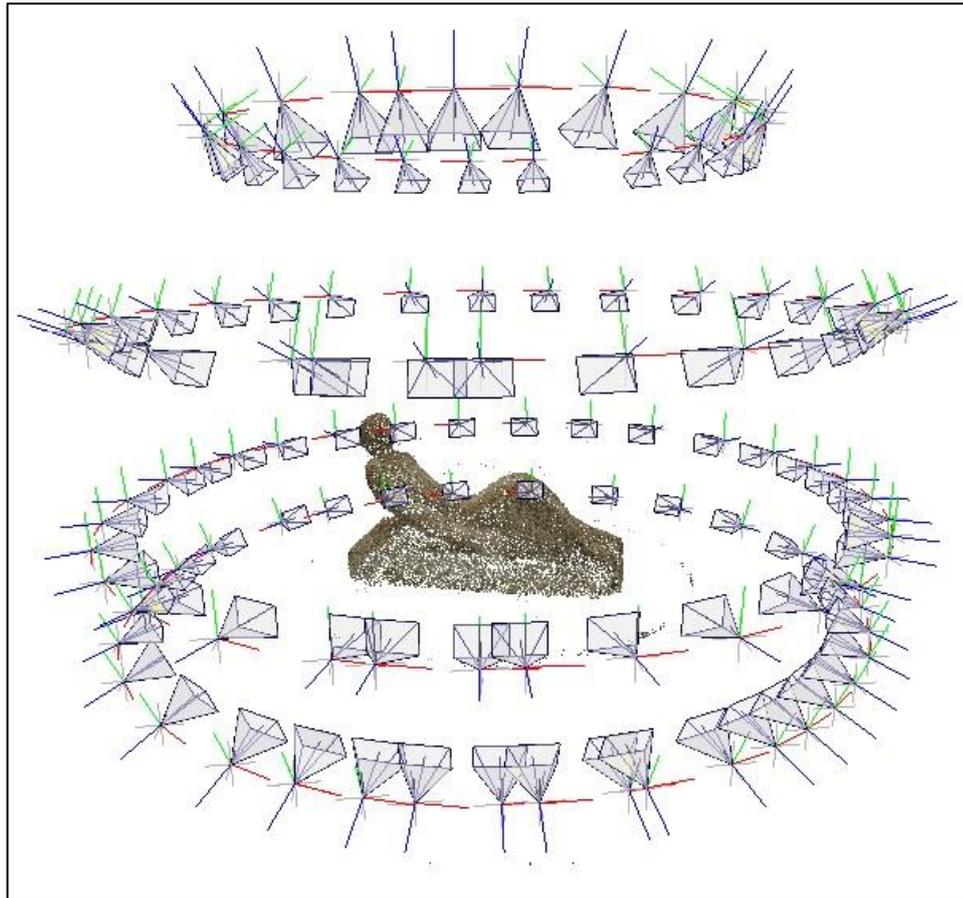


Figura 86. Posiciones de la cámara en el registro de la escultura, en el centro se observa la nube de puntos generada.

Esta nube pudo hacerse mucho más densa con las herramientas CMVS incorporadas en el VisualSFM como se muestra en la figura 87.



Figura 87. Nube de puntos densa, generada con CMVS. La imagen de la izquierda permite observar todavía unas líneas blancas en las piernas de la figura.

El resultado fue una nube con 1.303.925 puntos que contenía además información del fondo (Figura 88 izquierda). Esta nube de puntos densa fue luego convertida a una malla con textura usando el filtro de Poisson y herramientas de texturización del MeshLab. Sin embargo, este proceso fue bastante complejo, requirió de mucho tiempo y el resultado no fue satisfactorio. Esto es debido al hecho de que la nube de puntos densa obtenida tenía gran cantidad de vértices de color claro correspondientes a los reflejos que tenía el objeto en el momento de la adquisición de las imágenes (Figura 87 derecha), junto con pequeñas áreas sin puntos. Para optimizar el resultado, en lugar de usar CMVS, se eligió usar CMP-MVS, que permite tratar los problemas de reflejos en la superficie de la obra. Este software es muy apropiado para obras como esta, que son de mármol claro con una trama heterogénea, ya que realiza muy bien la correspondencia de las características sin que interfieran los reflejos de la luz de las partes más pulidas. El procesamiento con CMP-MVS llevó aproximadamente 1 hora y media. Una vez generada la imagen 3D como una malla coloreada, fue necesario editarla con MeshLab para eliminar las partes que no pertenecían al modelo (Figura 88).

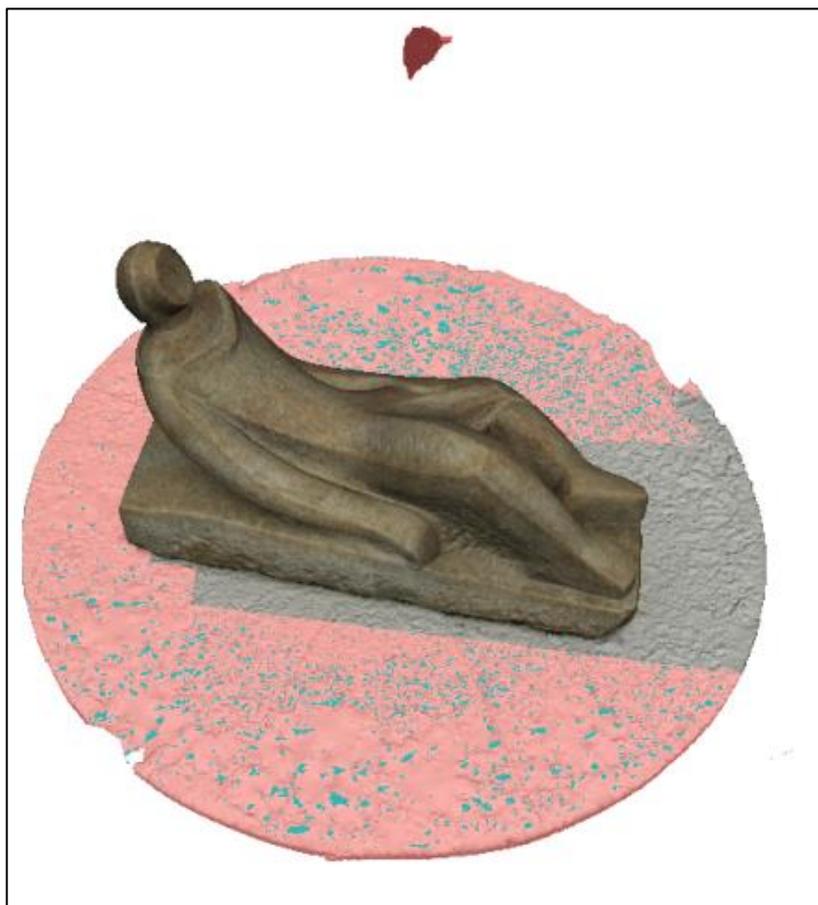


Figura 88. Edición de la malla texturizada con MeshLab. Las caras y vértices que no pertenecían al modelo fueron removidas usando herramientas de selección (se ve en color rosado)

El resultado, obtenido con CMP-MVS y editado con MeshLab, es una malla en formato PLY con información de color en los vértices (*color per vertex*). Tiene 250785 vértices, 499999

caras y un tamaño de 116 Mb (Figura 89). La resolución de la imagen 3D es de 1 mm aproximadamente (0.1% de la máxima dimensión del objeto), lo que resultó ser suficiente para el objetivo de la institución: el registro para inventario y difusión de la escultura al público mediante su página web.



Figura 89. Imagen 3D final de la obra “Figura reclinada”. Izquierda: malla obtenida. Derecha: malla visualizada como *color per vertex*.

La imagen 3D obtenida por SFM no tiene escala real como en la fotogrametría tradicional, que utiliza puntos de control, o los sistemas de escáner laser que utilizan dispositivos para georreferenciación. Para poder asignarle una escala real y así poder tomar medidas reales virtualmente, se utilizó una regla colocada apropiadamente en una parte de la escultura, que luego sirvió para ajustar la escala de la imagen 3D utilizando MeshLab.

La imagen 3D final completa se visualiza en MeshLab. Esta imagen tiene la posibilidad de rotar o acercar el objeto, tomar medidas libremente y editar los colores, las texturas y la geometría (Figuras 90 y 91). Para tomar medidas se utilizó la herramienta “medir”, que permite obtener el valor de la distancia entre dos puntos seleccionados. Lo destacable de esta herramienta es que las mediciones no están afectadas por la forma del objeto; esto significa que las mediciones pueden atravesar el objeto. Por otra parte, lo que respecta a la edición de colores y la geometría de la malla, se utilizó la herramienta “Paint” para colorear y marcar la superficie de la malla en las zonas deseadas con el fin de simular un mapeo. Esta posibilidad de intervención en la imagen 3D permitió que pueda ser utilizada en el Palais de Glace para crear futuros mapeos de deterioros o de restauraciones de la pieza.



Figura 90. Proceso de toma de medidas reales en el modelo virtual usando MeshLab.

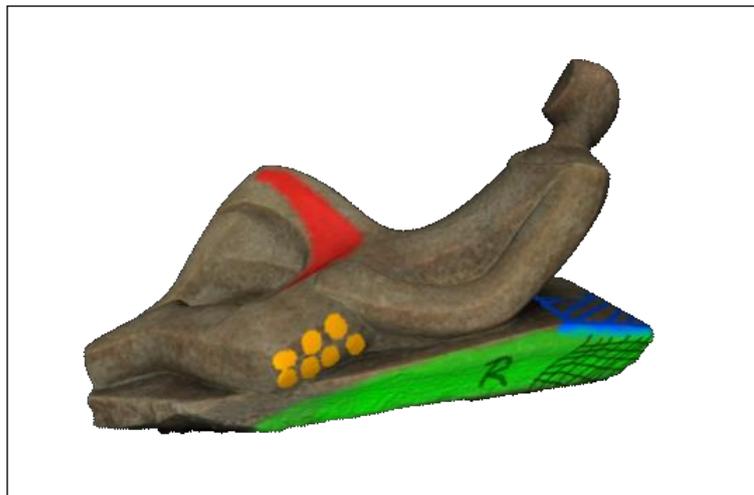


Figura 91. Superficie coloreada de la imagen 3D, editada con MeshLab, para crear mapeo.

6.3.1.1. Adaptación de la imagen 3D a un formato para su uso en internet

La imagen 3D de “Figura reclinada” fue incorporada en una página web de HTML. Para ello primeramente se procedió a convertir la imagen 3D al formato de multiresolución NXS, usando la herramienta de conversión Nexus. El navegador de Chrome de Google permitió evitar instalar un servidor Web cargando páginas directamente desde la PC local; para ello se lo debió

configurar previamente. El segundo paso fue reemplazar el modelo de ejemplo proporcionado por 3DHOP en la página HTML por el archivo 3D de la obra de Knop.

La imagen 3D puede visualizarse en Chrome, arrastrando el archivo HTML hacia él. También es posible hacer zoom y manipularlo para ser visto en diferentes posiciones (Figura 92). Otras herramientas que brinda 3DHOP son la incorporación de “hotspots” y una herramienta de medición de distancias. A veces puede ser muy útil colocar elementos “clickeables” de interés específico en algún lugar de la escena y vincularlos con determinados contenidos de información presentes en la página HTML. Con el fin de satisfacer esta necesidad, 3DHOP proporciona una forma de crear puntos de acceso geométricos (llamados *hotspots*) y una serie de eventos para detectar el *click* del usuario sobre la imagen 3D.

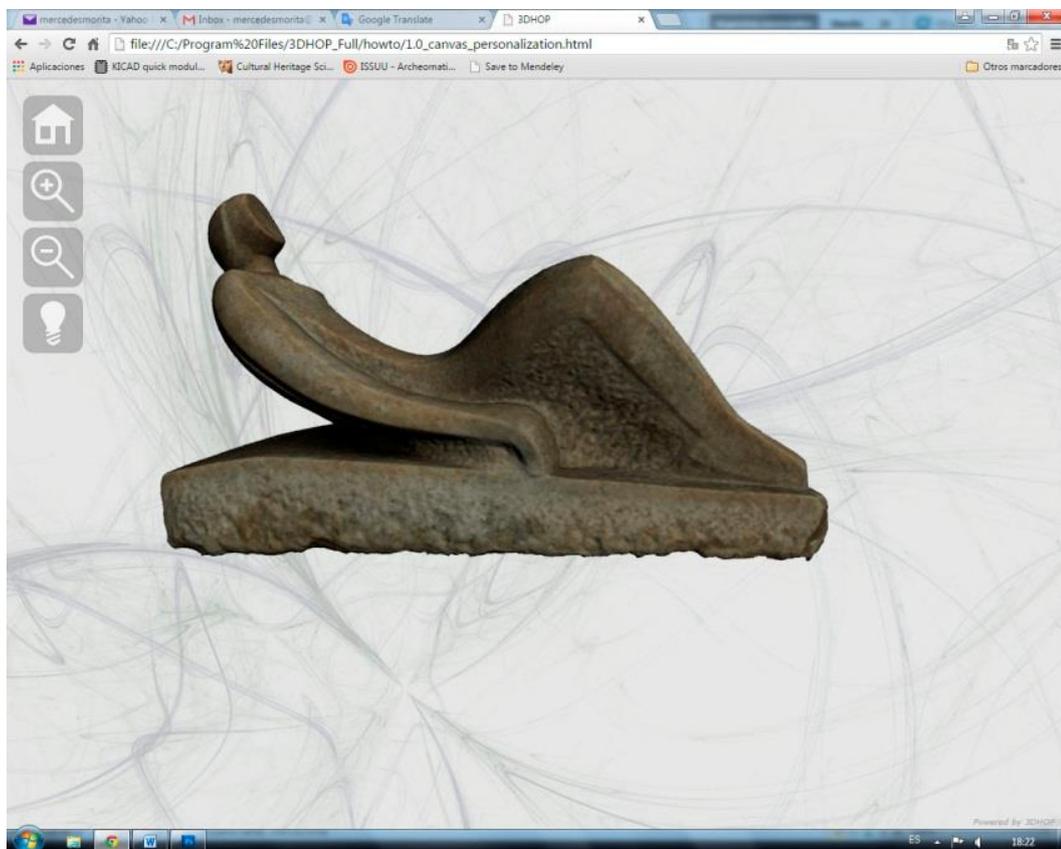


Figura 92. Visualización de la imagen 3D de “Figura reclinada” en una página de Chrome.

En conclusión, esta herramienta de publicación de imágenes 3D en la Web resulta de mucha utilidad ya sea para incorporar registros 3D en las Webs de los museos, o para transmitirlos a otros usuarios que no poseen ningún software de visualización 3D, dado que solamente se utiliza el navegador Google Chrome.

6.4.2 “Figura” de Aurelio Macchi

Para la obra de Aurelio Macchi, se optó por mover la cámara alrededor del objeto. En principio se tomaron 98 imágenes 3130x2079 px de resolución y a dos distancias diferentes, cubriendo todos los ángulos posibles (Figura 93).

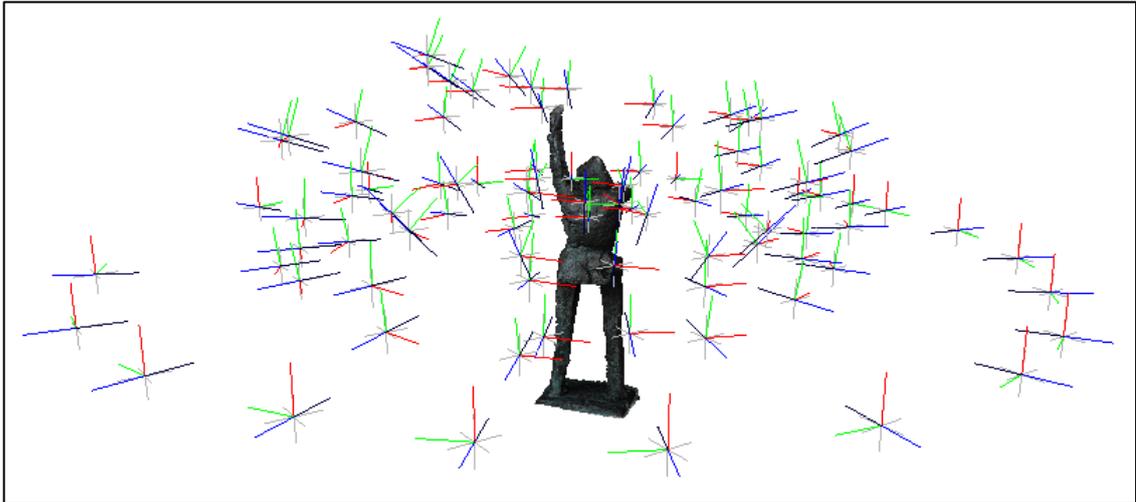


Figura 93. Posiciones de la cámara para fotografiar la escultura de Aurelio Macchi. Se tomaron 98 fotos.

En una primera instancia se usó VisualSFM con CMVS. Pero los resultados no fueron satisfactorios. Debido a los cambios en los reflejos de la luz se generaron zonas blancas en la nube de puntos densa, que luego afectaron el color de la malla (Figura 94). Además, hubo partes del modelo que quedaron incompletas (Figura 95).

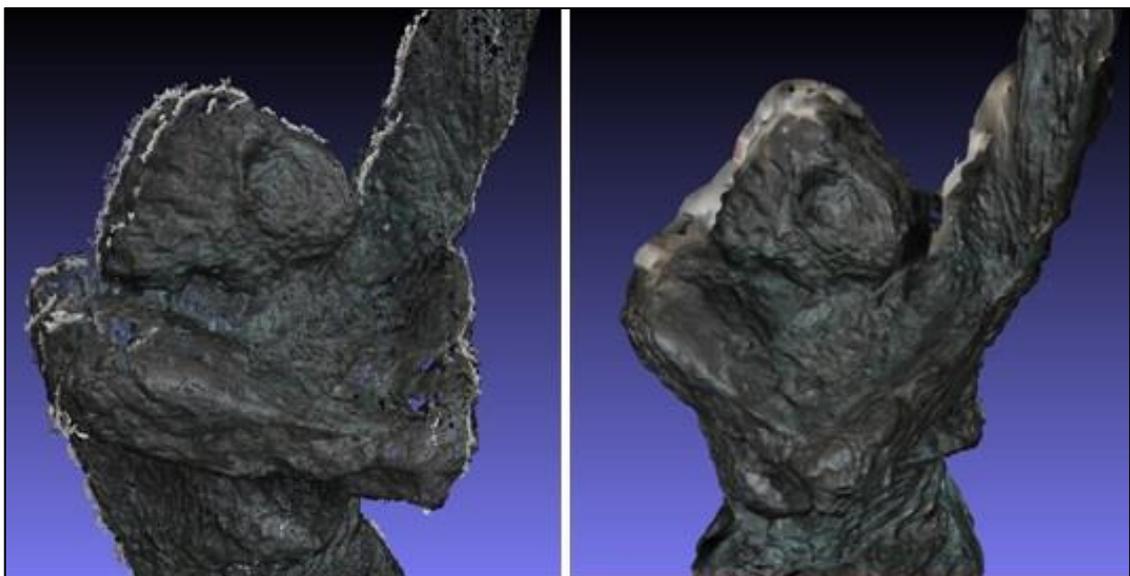


Figura 94. Izquierda: Nube de puntos densa. Derecha: Malla generada por herramientas de Poisson y texturización en MeshLab. Se observan bordes blancos en ambas imágenes.



Figura 95. Malla de la escultura de bronce. Se observa una zona faltante entre las piernas de la figura.

Dado que el primer resultado había sido poco satisfactorio, se realizó una nueva toma de fotografías con condiciones de iluminación similares, pero tomando esta vez las fotos desde una posición más cercana al objeto. Se tomaron 89 fotos (Figura 96).



Figura 96. Conjunto de 89 imágenes de la obra de Aurelio Macchi, tomas realizadas desde una posición más cercana al objeto.

Las imágenes se procesaron con VisualSFM y CMP-MVS obteniéndose dos mallas diferentes, debido a que en el proceso del SIFT el software dividió al modelo en dos nubes de puntos.

Luego se procedió a colocar ambas nubes de puntos en el CMP-MVS obteniéndose dos mallas texturizadas de buena calidad como se muestra en la figura 97a y 97b.

Las mallas fueron alineadas y fusionadas usando MeshLab, generando una única malla homogénea con el filtro VCG. Finalmente, las tres mallas fueron usadas como *input* en el software Texture Stitcher para poder obtener una imagen final coloreada de forma pareja.

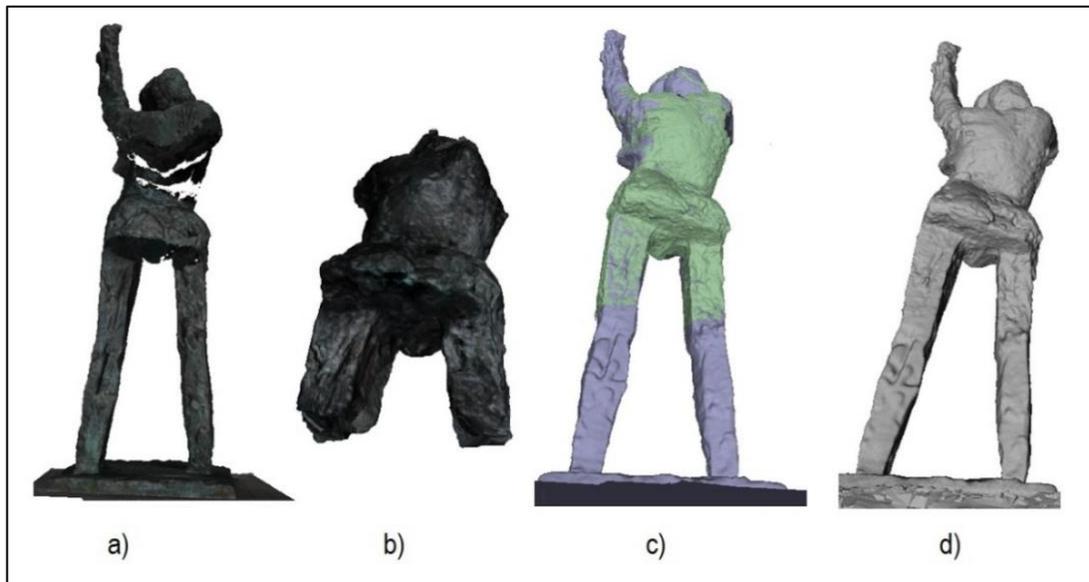


Figura 97. Alineamiento de dos mallas. a) Malla 1. b) Malla 2. c) Mallas alineadas. d) Malla fusionada.

El resultado final fue entregado al Palais de Glace a fin de incorporarlo como parte de la documentación de la obra y para después incluirlo en la página web del museo.

6.4.3. Calcos en yeso de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP

Se realizó el registro 3D de cinco esculturas de yeso pertenecientes a la colección de calcos de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Nacional de La Plata¹²⁰. Las fotografías se tomaron en el pasillo de la facultad donde estaban exhibidas las obras y se utilizó la luz natural proveniente de las ventanas del edificio y las artificiales ubicadas en el techo.

Se tomaron las fotografías girando la cámara alrededor de las esculturas. En el caso de los relieves se los colocó horizontalmente en una mesa para que fuera más fácil acceder a cada una de sus partes. El software SFM utilizado fue también VisualSFM con CMP-MVS.

¹²⁰ El registro 3D realizado formó parte de un proyecto en curso, cuyo objetivo es elaborar un sistema de documentación integral que sistematice, jerarquice y ponga en valor las obras de la colección del Área Museo y Patrimonio de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP. La base de datos incluye las imágenes 3D de la colección.

Cabe destacar que, en el caso de los relieves rectangulares, las fotografías fueron tomadas a distintas distancias y diferentes ángulos, procurando registrar la totalidad del objeto, pero también haciendo acercamientos para llegar a todos los detalles ocultos (Figuras 98 a 103).



Figura 98. Algunas de las 161 fotografías que se tomaron del relieve de yeso “La vendimia”



Figura 99. Imagen 3D final de la escultura “La vendimia” visualizada y editada en MeshLab.



Figura 100. Izquierda: Fotografía de la escultura de yeso “Segador”. Derecha: imagen 3D final, realizada con 144 fotos, editada y visualizada en MeshLab.



Figura 101. Izquierda: Fotografía de la escultura de yeso “El invierno”. Derecha: imagen 3D final, realizada con 177 fotos, editada y visualizada en MeshLab.



Figura 102. Izquierda: Fotografía de un capitel de yeso denominado “Figura”. Derecha: imagen 3D final, realizada con 147 fotos, editada y visualizada en MeshLab.



Figura 103. Izquierda: Fotografía de un capitel de yeso denominado “Figura con animales fantásticos”. Derecha: imagen 3D final, realizada con 68 fotos, editada y visualizada en MeshLab.

En todos los casos se obtuvieron mallas completas, no distorsionadas y con una textura pareja. Las imágenes 3D finales obtenidas fueron de muy buena calidad, adecuadas para los fines de documentación que requería el proyecto en las que se utilizarán.

6.4.4. Instrumento musical del Museo “Emilio Azzarini”

Se realizó el registro 3D de un arpa perteneciente a la colección del Museo de Instrumentos Musicales “Emilio Azzarini”, de la Universidad Nacional de La Plata. El instrumento está fabricado en madera, barnizada y pintada con detalles decorativos. (Figura 104).



Figura 104. Arpa de madera perteneciente a la colección del Museo de Instrumentos Musicales “Emilio Azzarini”, de la Universidad Nacional de La Plata. Vistas de adelante y atrás.

Se realizó el registro 3D utilizando 125 fotos, con la combinación VisualSFM + CMP-MVS. El resultado fue una malla 3D texturizada, deformada en algunas zonas (en el clavijero y el área plana detrás de las cuerdas) y sin la presencia de las cuerdas. Por otro lado, cuando el programa le da textura a la malla usando las fotos, la imagen 3D resultante presenta zonas blancuzcas debido a los reflejos de la madera (Figura 105).



Figura 105. Izquierda: Malla del arpa sin textura. Derecha: imagen 3D generada con VisualSFM + CMP-MVS.

Para mejorar la calidad de la imagen 3D se decidió editar la geometría de la malla suavizando las partes deformadas, utilizando filtros y herramientas de suavizado de MeshLab. También con este programa se eliminaron los excedentes de la malla, especialmente los que aparecieron en el área del clavijero (Figura 106).

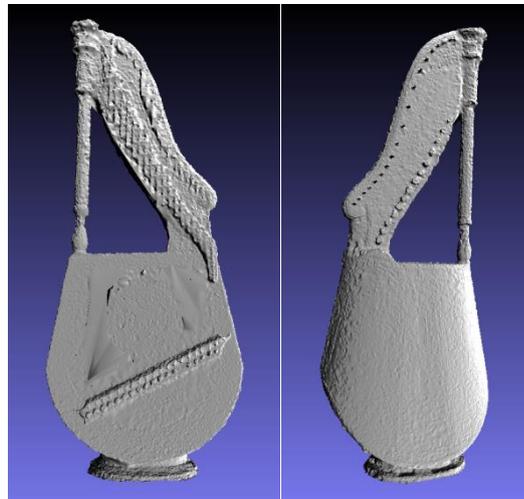


Figura 106. Suavizado de la malla mediante MeshLab.

También con las herramientas MeshLab se le dio textura a la nueva malla. Para ello primero se seleccionaron 4 fotos, una para cada lado del objeto, que permitían extraer la textura y se las importó a MeshLab en forma de 4 *rasters* (imágenes con información de los parámetros de la cámara). La malla se ajustó de modo que su perspectiva coincidiera con la de cada la imagen *raster*. Se utilizó el filtro “*Image alignment mutual information*” en MeshLab para terminar de alinear de forma más precisa la imagen *raster* con la malla. Para la texturización final se usó primero el filtro de parametrización “*Parameterization + Texturing from registered rasters*”. La

La malla se parametriza creando algunos parches que corresponden a la proyección de porciones de superficies sobre el conjunto de rasters registrados (Figura 107). El siguiente paso es usar esa misma parametrización para crear una imagen PNG de textura. La herramienta para realizar este paso es “*Project active raster color to current mesh, filling the texture*”. La figura 108 muestra dos imágenes rasters alineadas a la malla y el resultado final de la texturización.

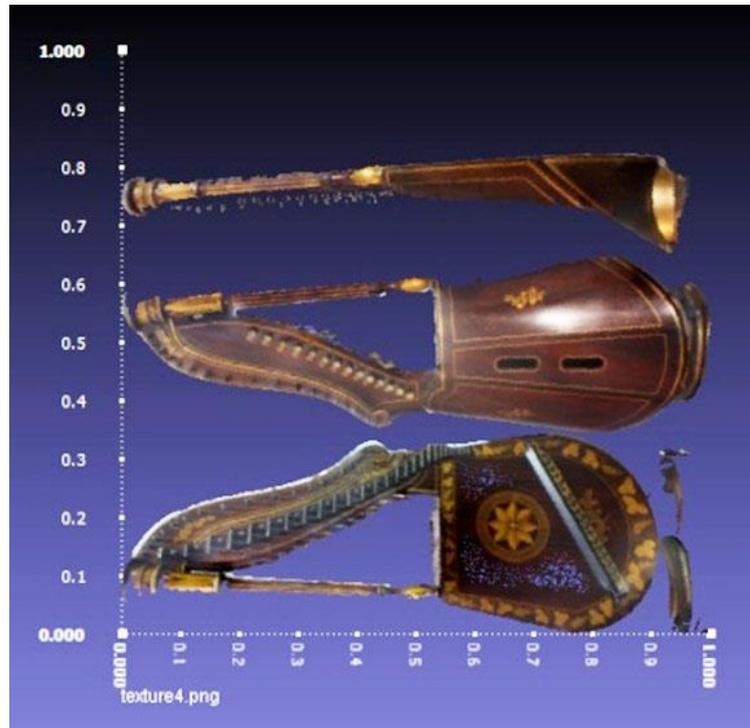


Figura 107. Mapa de textura creado en MeshLab mediante la parametrización.

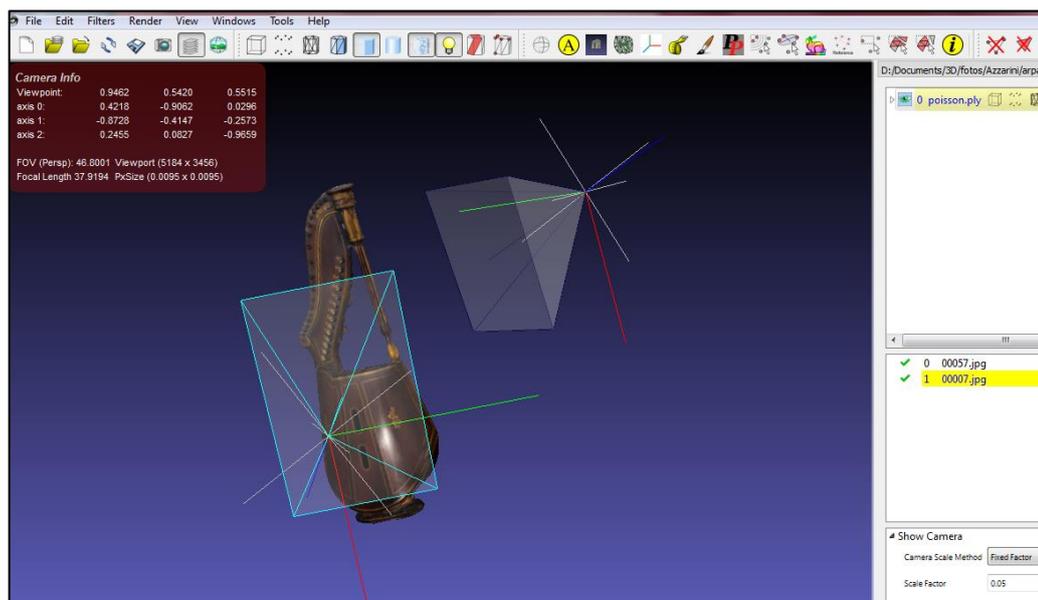


Figura 108. Visualización en MeshLab de la proyección de dos imágenes rasters sobre el objeto 3D. Cada imagen posee parámetros de orientación y posición de la cámara.

Este procedimiento para texturizar a partir de imágenes rasters tiene algunas desventajas. Puede ocurrir que alguna parte de la malla no se “llene” con textura, apareciendo en color negro. Una solución es agregar más rasters para completar las regiones “no llenas”. También se puede retocar de forma manual esas zonas con las herramientas de Paint que tiene MeshLab. En el caso del arpa este procedimiento se realizó para retocar parte del borde del mango del instrumento. En la figura 109 se puede observar una reflexión de la luz en la parte de atrás del instrumento. Este reflejo no fue generado por renderizado, sino que formaba parte de la fotografía elegida para texturizar la malla.



Figura 109. Imagen 3D final del instrumento musical.

La imagen 3D final, procesada y texturizada con MeshLab, resultó de muy buena calidad a los fines de exhibición y difusión al público, representando adecuadamente los detalles de la pieza original, a pesar de que la superficie del objeto tenía regiones con alta reflectividad.

6.4.5. “Días de Mar” de Dani Lorenzo

Esta es una instalación que estaba en la reserva del Museo Provincial Emilio Pettoruti y fue armada en el momento para su registro. En rasgos generales, se trata de una superficie de madera cuadrada y plana, colocada sobre el piso de la sala, en cuyo centro se ubica un ladrillo de plástico azul (de la conocida marca de juguetes LEGO). La superficie de madera está compuesta por 9 cuadrados iguales. Cuenta también con un reflector sobre un trípode amarillo colocado fuera de la superficie que ilumina la composición (Figura 110).



Figura 110. “Días de mar” de Dani Lorenzo. Colección Museo Provincial Emilio Pettoruti. Derecha: detalle del ladrillo de juguete en el centro de la madera.

Para realizar el registro 3D se tomaron 124 fotografías de 5184x3456 px de resolución. Un factor que condicionó el registro fue el hecho de que la toma se realizó en la sala de exhibición del museo, donde la iluminación no era la óptima. Por este motivo la malla obtenida resultó incompleta. Particularmente el registro del reflector, que era metálico y con un caño esmaltado brillante, resultó muy incompleta y distorsionada, aun habiendo apagado la luz en el momento del registro (Figura 111). Además, al no poder acercarse mucho la cámara al centro de la obra donde se encontraba el pequeño ladrillo fue imposible hacer un registro detallado de esta pieza.



Figura 111. Izquierda: Imagen 3D de la instalación “Días de Mar” de Dani Lorenzo, visualizada en MeshLab en distintas perspectivas. Derecha: Imagen 3D incompleta del reflector, visualizada con MeshLab.

Como se ha mostrado en este último ejemplo, los elementos eléctricos, mecánicos y electrónicos que suelen estar presentes en obras de arte de instalación suelen estar hechos con materiales de superficies brillantes (como un caño) o muy finos (como cables), que imposibilitan el uso de la fotogrametría digital con Structure from Motion. Además, otros elementos intangibles que son parte de la obra, como podrá ser la propia iluminación, son imposibles de registrar con esta

técnica. Por tal motivo, el modelado 3D junto con el renderizado es la única solución para la reconstrucción de este tipo de obras.

La obra “Días de mar” tiene un significado conceptual, separado de los materiales que la componen. Según el autor, puede ser leída como una instalación, pero también como una escultura. Explica que un ladrillo de juguete, una madera y un reflector pueden ser considerados una escultura. Pero, por otro lado, también dice que es un paisaje, una pieza a contemplar. En cuanto a su re-instalación, dice que los elementos no tienen nada “aurático”, por lo tanto, pueden ser reemplazados por elemento similares. Lo único que el artista pone como condición es que se mantengan las dimensiones, colores y tonos de los elementos. Respecto a esto dice: *“Es importante que la superficie de madera tenga aproximadamente 1,80 m de cada lado y que el ladrillo sea pequeño y de color azul cálido e intenso. El reflector y su trípode tienen cierta antigüedad. Si se reinstalara la obra en esta década se podría conseguir un pie amarillo similar o igual. Pero si fuese una re-instalación dentro de 50 años puede ser mejor encontrar un pie de esa época. También el reflector se podría cambiar por alguna lámpara de menor consumo. El amarillo del pie del reflector tampoco sería necesario mantenerlo si no se consiguiera; podría ser de color negro o de algún otro color neutro.”*¹²¹

El autor se sorprendió, gratamente, ante las preguntas que se le hicieron acerca de una futura re-instalación de su obra. Como la obra fue adquirida por un Salón de Escultura, se guardó como escultura y no como instalación. Dani Lorenzo piensa que sería muy útil que el museo tenga estas instrucciones por escrito, aunque también cree que de tenerlas quedarían archivadas en un cajón de escritorio que nadie mira y las posibilidades de que se reinstale la obra serían aún más ínfimas, con las maderas y el reflector ocupando lugar. Sin embargo, imagina que podrían ser instrucciones muy útiles si el museo tuviese un buen archivo digital accesible para los curadores y los espectadores.

Sobre esta base y teniendo en cuenta lo expresado por el artista, “Días de mar” se podría documentar con técnicas de modelado 3D sin necesidad de que las texturas de los materiales, ni los deterioros, sean replicados exactamente. En la figura 112, a la derecha, se observa la obra recreada mediante un proceso de modelado en 3D comparada con una foto original.

¹²¹ Comunicación por mail con el artista Dani Lorenzo acerca de una posible re-instalación de la obra “Días de mar”.

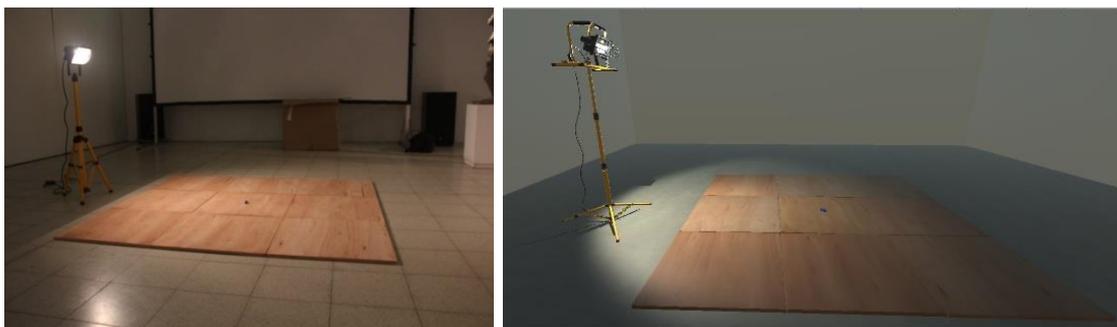


Figura 112. Registro de la obra “Días de mar” de Dani Lorenzo. Izquierda: Fotografía original de la obra exhibida en el Museo Provincial Emilio Pettoruti. Derecha: Registro 3D de la obra, utilizando técnicas de modelado y renderizado en Blender y Unity.

Para realizar esta recreación mediante modelado 3D se utilizó Blender y Unity 3D para reunir todos los modelos en una única escena interactiva. Con Blender se modelaron el ladrillo y el reflector. En vez de partir de cero, se editaron modelos muy similares que estaban disponibles gratuitamente en internet (Figuras 113 y 114) y se las exportaron en formatos OBJ y FBX para ser compatibles con Unity. Las maderas fueron modeladas en Unity a partir de cubos y la textura original de cada madera fue replicada exactamente desde las fotografías originales (Figura 115). Para la iluminación se optó por las del tipo “point” y “spot”. La primera es un punto en el espacio que emite luz en todas direcciones por igual. La intensidad de la luz es proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente. La luz de spot, en cambio, está limitada a un ángulo, lo que resulta en una región de iluminación en forma de cono. La iluminación también disminuye en los bordes del cono. Las luces puntuales son útiles para la simulación de lámparas y otras fuentes locales de luz en una escena. Las de tipo spot pueden utilizarse para simular linternas, luces de autos y reflectores. Se colocaron ambos tipos de luces en el reflector, previamente modelado, ajustando los parámetros como ángulos, alcance, intensidad y color de la iluminación, logrando así obtener un efecto muy realista, muy similar a la escena original. La iluminación tipo Point fue bloqueada en la mitad, por otra malla, para que no ilumine la parte de atrás del reflector y sólo proporcione el efecto de lámpara intensa dentro de la cavidad del mismo (Figura 116). El resultado fue una reproducción exacta del efecto de sombra que genera el ladrillo (Figura 117).

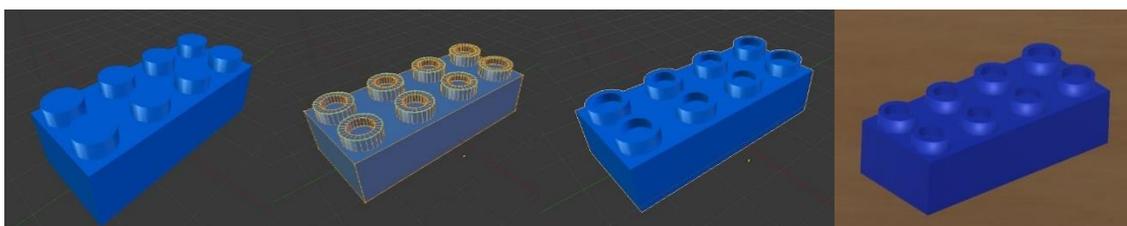


Figura 113. Edición del ladrillo partiendo de un modelo previo adquirido en un repositorio de modelos 3D en internet. De izquierda a derecha se observa cómo, a través del proceso de “extruding”, en Blender, se extrajo material del centro de cada uno de los cilindros del ladrillo. Por último, se editó el color en Unity.



Figura 114. Modelo 3D del reflector. Izquierda: Modelo extraído de un repositorio de modelos 3D en internet. Derecha: la edición del modelo, quitando una de las lámparas y editando el largo del cable.



Figura 115. Archivos de textura para cada placa de madera. Visualización en Unity 3D.

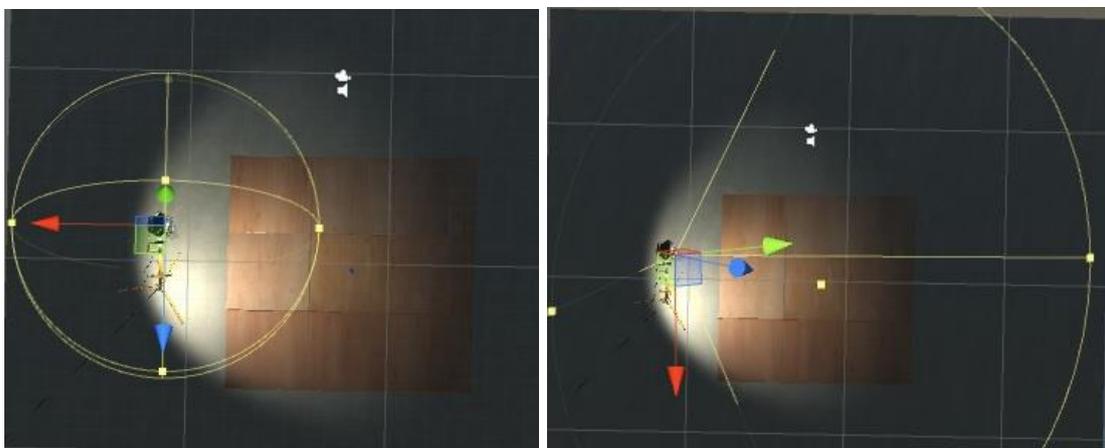


Figura 116. Construcción de iluminación en Unity 3D. Izquierda: Ángulo de la luz tipo “point”. Derecha: ángulo de la luz tipo “spot”.

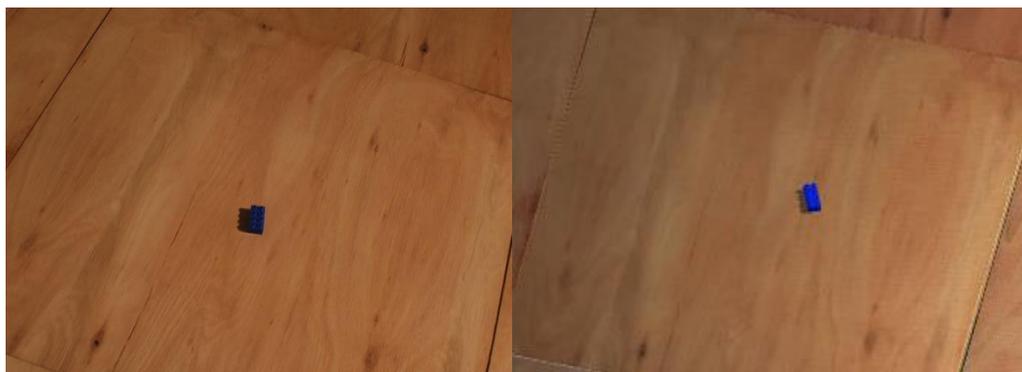


Figura 117. Detalle del ladrillo. Izquierda: fotografía original. Derecha: reconstrucción en Unity.

La modelización 3D de la obra “Días de Mar” podría ser un ejemplo en el cual la transformación de las condiciones materiales de la obra de arte a través de su virtualización podría afectar su significado. Sin embargo, en este caso se contó con consenso del artista, quien asume que los elementos de la obra original pueden ser sustituidos porque no afecta la lectura completa de la obra.

6.4.6. “Puentes de otoño” de Natalia Abot Glenz

Esta obra abstracta se compone de tres esculturas con forma de curvas, de un tamaño relativamente pequeño (la obra es parte de un proyecto que propone su montaje en una mayor escala en un espacio público). El registro 3D realizado con fotogrametría digital se realizó por partes para una sola de las esculturas. Como el material es bastante oscuro, hierro fundido y patinado, se iluminó la obra lo suficiente, para que cada detalle de la superficie fuera visible y así permitir a la técnica de SFM detectar las características en las fotografías. Se optó por dejar la cámara fija y girar la pieza, utilizando una mesa y colocando la pieza sobre un libro de tapa dura con dibujos para que estos ayudaran a unir las imágenes entre sí. Se colocaron también papeles blancos translúcidos alrededor de la escena, que difundían la luz que venía por atrás y que, además, eliminaban las características del fondo. Se tomaron 80 fotos de 5184x3456 px de resolución. Las imágenes fueron input en VisualSFM + CMP-MVS.

La malla texturizada obtenida con CMP-MVS respetó la forma original de la pieza, pero contenía zonas incompletas en su parte inferior (Figura 118).

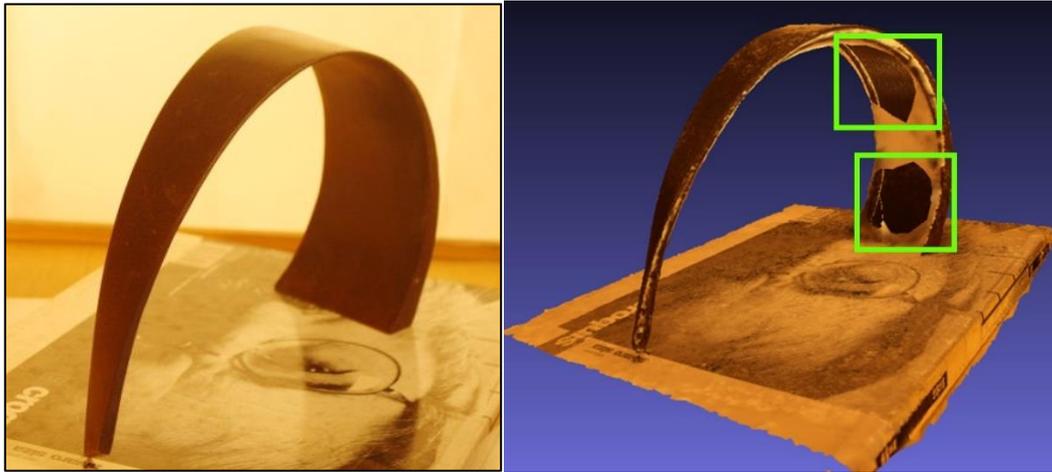


Figura 118. Izquierda: Una de las 80 fotografías que se tomaron de la escultura perteneciente a la obra “Puentes de otoño”. Derecha: la imagen 3D visualizada en MeshLab. Se observan destacados en verde dos agujeros en la malla, de gran tamaño, en la parte inferior de la escultura.

A fin de completar en la imagen 3D los agujeros y realizar un suavizado de la malla para emparejar estos agregados se utilizó el software MeshMixer. Con este software también se mejoraron los bordes de la pieza en la imagen 3D. Este procedimiento de edición fue hecho manualmente, observando el original (Figura 119).

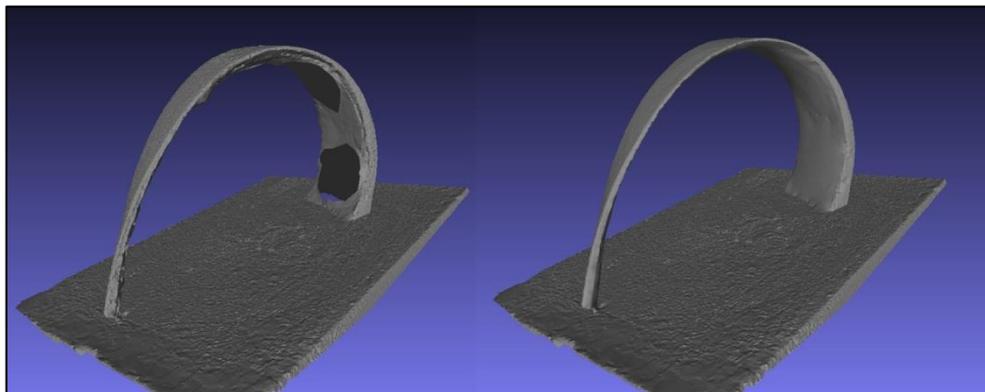


Figura 119. Edición con MeshMixer de la pieza perteneciente al grupo escultórico “Puentes de otoño”. Se han rellenado los agujeros que tenía la malla original y se ha realizado un suavizado y modelado de los bordes en su parte más angosta.

Luego de editar la malla y despegarla de la superficie, se decidió usar Blender para incorporar la textura a la malla. La textura de la pieza fue tomada de las fotografías y añadida al material creado con Blender, donde se pretendió imitar el brillo original de la escultura. Además, se creó con modelado una superficie de apoyo cuya textura imita una madera, simplemente a modo de presentación (Figura 120).

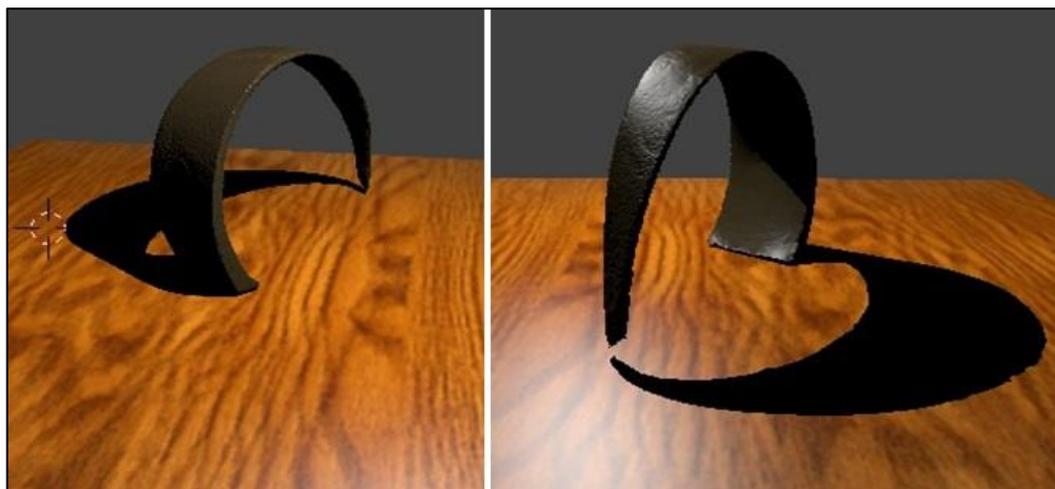


Figura 120. Distintas vistas del renderizado en Blender de la imagen 3D final.

En este ejemplo se puede ver cómo una imagen 3D incompleta realizada con fotogrametría digital puede servir como malla base para el modelado 3D. Por otro lado, esta misma imagen puede facilitar el modelado de elementos curvos irregulares, donde es casi imposible tomar medidas exactas de cada segmento en el objeto real para poder replicarla en un diseño 3D. En la sección 6.6. se abordará este tema con más detalle.

La pieza de “Puentes de Otoño” también fue analizada en cuanto a su fragilidad y estabilidad, dado que se trataba de una estructura delgada en algunas de sus partes. El fin fue determinar las zonas frágiles en función de la masa y el centro de gravedad. Para ello se utilizó el software MeshMixer, que tiene una herramienta de análisis que contiene distintas aplicaciones, entre ellas el cálculo de fragilidad y estabilidad. En la figura 121 se observa la sección más frágil de la escultura y el centro de masa.

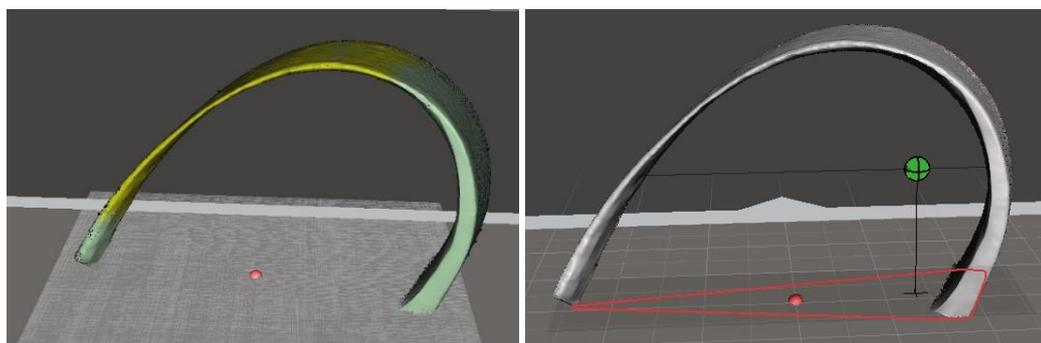


Figura 121. Análisis en MeshMixer de la escultura “Puentes de otoño”. Izquierda: en amarillo se señala la parte más frágil de la escultura. Derecha: Análisis de estabilidad. La esfera verde corresponde al centro de masa. Al estar visible sobre la base significa que la pieza está estable.

Estos tipos de análisis, por un lado, permiten saber si un modelo impreso en 3D será lo suficientemente consistente y estable, pero además permite estudiar los objetos en relación al agente de deterioro llamado por los restauradores “fuerza física directa”. Permiten llevar un

registro de partes de piezas que ameritan mayor atención, como las partes frágiles o muy delgadas. También permiten establecer las partes que necesitarán algún soporte para exhibición o para embalaje. Por ejemplo, conocer el centro de gravedad y la estabilidad de una pieza es fundamental para saber en qué posición presentarla o guardarla.

6.5. Incorporación de los modelos 3D a escenas de Realidad Virtual

Se realizó una simulación de realidad virtual para la escultura de la obra “Puentes de otoño” mencionada en la sección anterior. La intención, en este caso, fue recrear la misma obra, pero en tamaños diferentes y variando la composición.

El modelo 3D generado con Blender (ver figura 120) fue exportado al formato OBJ para importarlo en Unity 3D. Se creó una escena que consistió en una sala de museo ficticia, constituida por una habitación con paredes blancas y piso de madera. La sala exhibe, además de las dos esculturas en diferentes escalas, cuadros colgando de las paredes y un cartel explicativo con el CV de la artista. Además, se incorporaron elementos decorativos como asientos y luces dirigidas que dan la sensación de luces para exhibición.

Se colocaron imágenes de cuadros de Jorge Abot, padre de la artista, como texturas para los bastidores (figura 122), los cuales fueron modelados en Unity en base a cubos 3D. También se eligió la textura para las esculturas, que debía ser lo más parecido al color original, una pátina marrón oscuro. La textura para el piso fue también sacada de internet, una textura que simula piso de madera. Las cuatro paredes y el techo también fueron modelados en Unity y son de color blanco (Figura 123). Por último, se colocaron dos asientos de madera extraídos del repositorio de modelos 3D de Unity.



Figura 122. Materiales y texturas en la sección “Assets” de Unity 3D.

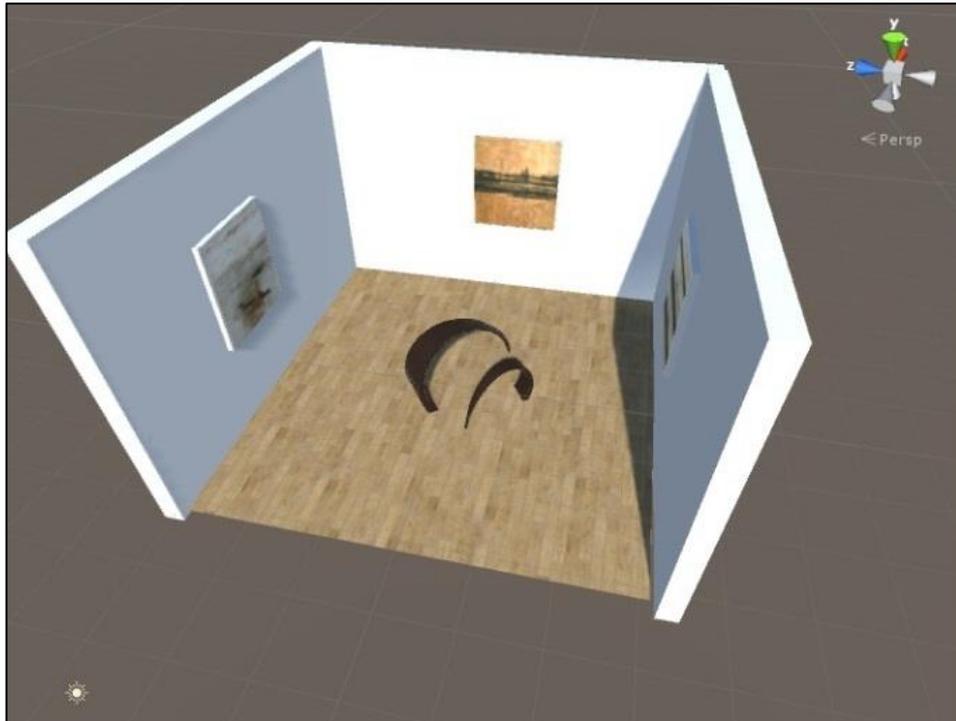


Figura 123. Armado parcial de la sala en Unity 3D.

Para la iluminación se eligió una luz de tipo “spot” que ofrece Unity. Tres luces se colocaron en la sala estratégicamente para iluminar los elementos importantes (Figuras 124 y 125).

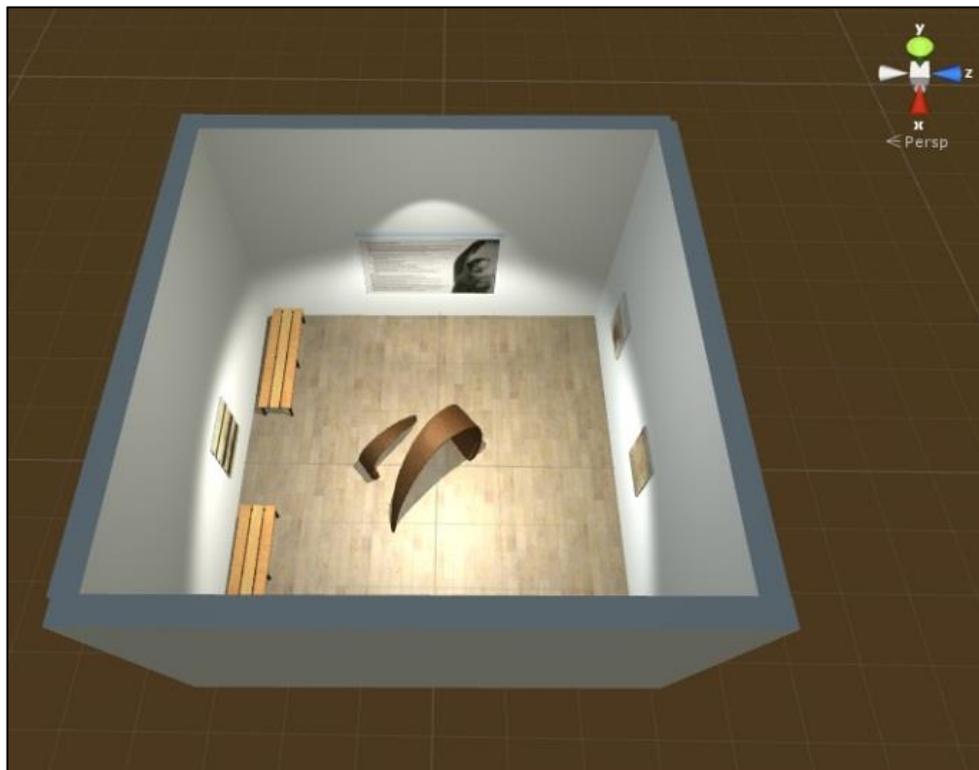


Figura 124. Vista superior de la sala terminada con la colocación de iluminación.



Figura 125. Izquierda: Luz “Spot” dirigida hacia el panel de la pared. Derecha: Sector de la sala donde se colocaron los asientos.

Cada objeto 3D de la escena es una malla poligonal a la que se le aplicó un “*Mesh collider*”. En los sistemas de juegos por computadora, los colisionadores son componentes que se agregan a los objetos de la escena para colisionar físicamente con otros objetos o con el Jugador. En este caso esto quiere decir que cuando el espectador que caminará por la sala llegue al lugar donde se encuentra el objeto, no podrá atravesarlo.

El espectador, en este caso, es un “*First Person Character Controller*”, controlador en primera persona, lo que significa que los movimientos son “vividos” en primera persona, sin necesidad de colocar un personaje ni un avatar. Este componente controla los movimientos de un cuerpo rígido, que en este caso será del tamaño del espectador (Figura 126). El cuerpo del espectador puede interactuar con los demás elementos a través de diversos tipos de colisionadores que proporcionan sensación física como la gravedad, entre otras. El sonido de los pasos del espectador también puede ser editado, así como la velocidad del desplazamiento y rotación de la cabeza.

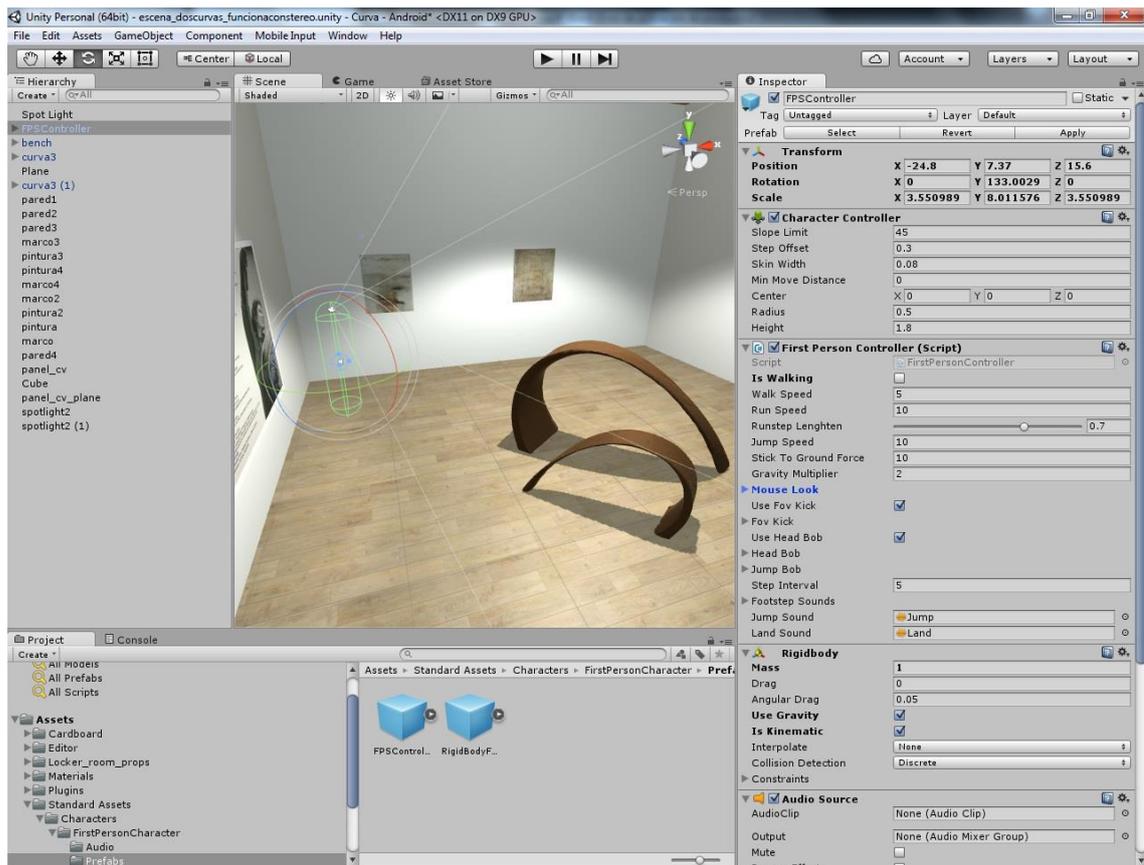


Figura 126. La cápsula verde en la escena es la representación del espectador mediante un cuerpo del controlador en primera persona. Al costado derecho, en el “Inspector” de Unity, se observan las opciones de este controlador.

En esta instancia, la simulación de realidad virtual puede ser compilada para PC-Windows y controlar al espectador, mediante el teclado para el desplazamiento, y mediante el mouse para la rotación y vista. Sin embargo, para que la experiencia de realidad virtual sea más inmersiva, se podrá agregar a esta aplicación un dispositivo HMD como el Oculus Rift y sensores como el Kinect. Dado que para este experimento no se contaba con este tipo de instrumental, se utilizó el Cardboard SDK para Unity para implementarlo en un Smartphone con sistema Android como dispositivo HMD. Se hicieron los ajustes necesarios para implementar la visión de dos cámaras en la escena y por último se la compiló para Android utilizando el SDK de Android.

El resultado fue una aplicación para smartphone que contiene una visión estéreo 3D de la sala de museo (Figura 127). El usuario puede utilizar el visor de cartón de Google para colocar el teléfono y disfrutar de la experiencia inmersiva con vista estereoscópica. Sin embargo, este sistema no tiene seguimiento de desplazamiento del usuario, sino de la cabeza, por lo que se controla esta variable desde la PC a través del teclado.

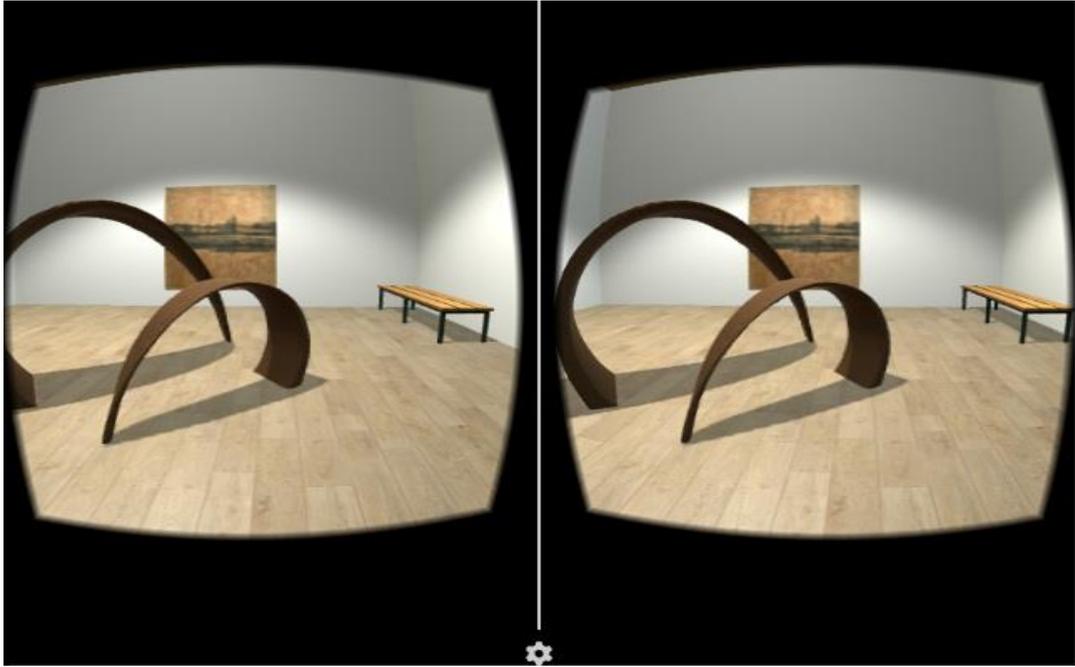


Figura 127. Visión estereoscópica de la escena virtual. Así se visualiza también en el Smartphone.

La obra de Dani Lorenzo también fue adaptada para realidad virtual utilizando Unity 3D. Fue compilada para PC y también para smartphone utilizando el Cardboard SDK. También se colocaron colisionadores y un controlador en primera persona (Figura 128).

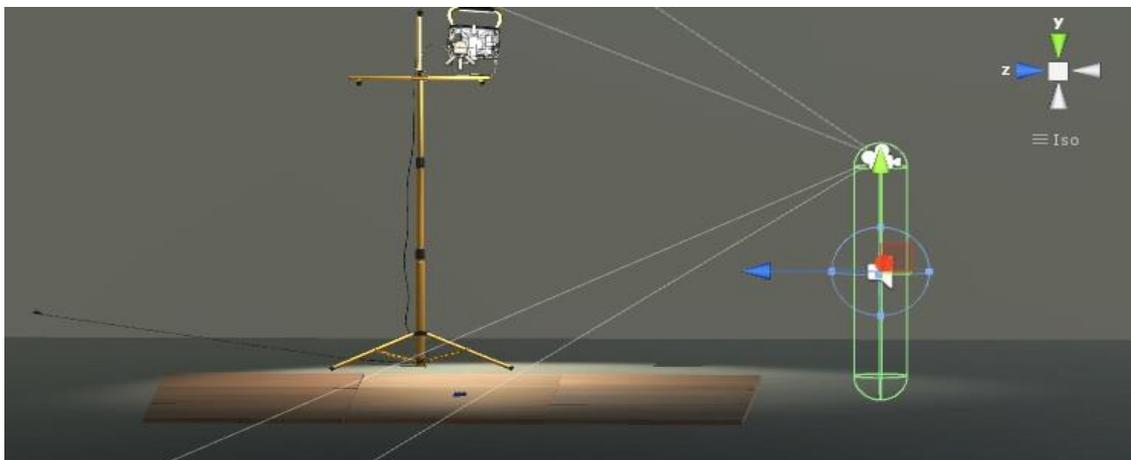


Figura 128. “*First Person Controller*” agregado a la escena de “Días de mar”. El controlador está representado por la cápsula verde. Se ajustó el tamaño de acuerdo con la escala del espectador y también el alcance de visión.

La figura 129 muestra el resultado final de la virtualización de la obra “Días de mar” desde la perspectiva del espectador mientras recorre la sala y observa la obra posicionado detrás del reflector.

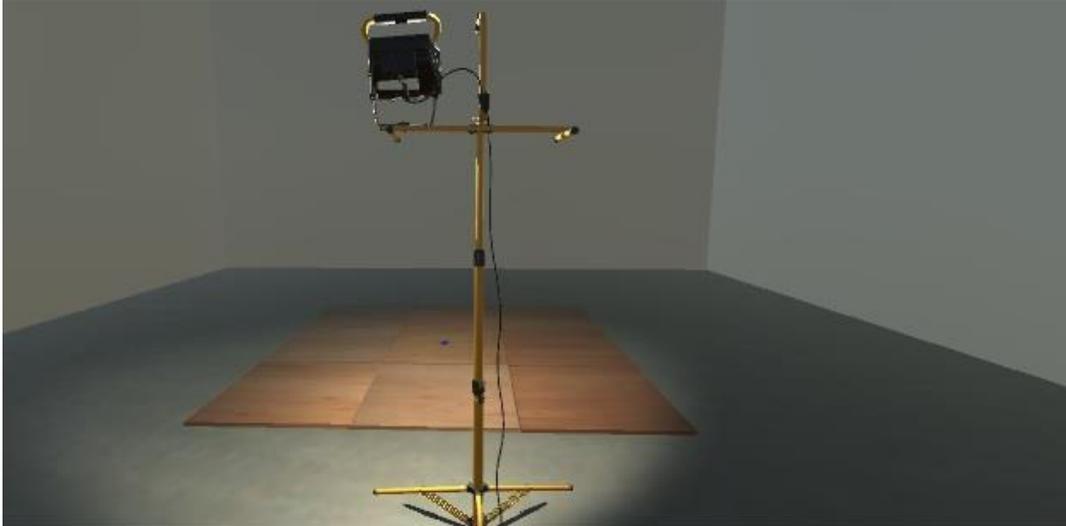


Figura 129. Visualización de la obra “Días de mar” a través de la aplicación interactiva para PC. El usuario puede moverse por toda la sala a utilizando el teclado y el mouse.

6.6. Incorporación de imágenes 3D a aplicaciones de Realidad Aumentada

Se crearon aplicaciones de realidad aumentada para las imágenes 3D de la escultura de Naum Knop y de Natalia Abot Glenz. El objetivo fue poder mostrar las imágenes 3D a personas que no tenían acceso a una computadora con programas para visualización en 3D, pero que sí contaban con un smartphone. La idea consistió en proporcionar una imagen 2D que se pudiera imprimir y una aplicación que debían descargarse en su celular. Esta aplicación se creó utilizando el software Augmented Reality SDK de Vuforia y una imagen representativa de la obra como *target*. La imagen fue una foto de las esculturas con el agregado de pequeños cuadrados negros que sirven para mejorar la detección (Figura 130).

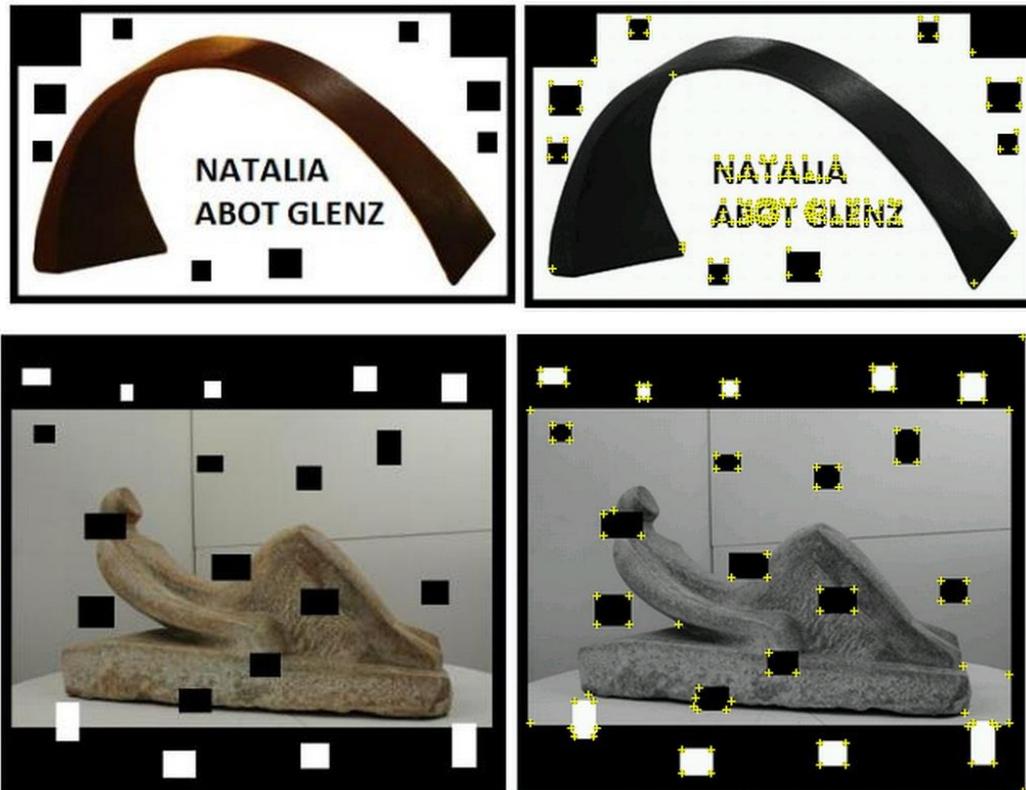


Figura 130. Imágenes *target* de las obras “Puentes de Otoño” y “Figura reclinada”. A la derecha se muestran las características clave en amarillo.

El sitio web de Vuforia permite crear los *targets* y brinda las licencias que posteriormente serán utilizadas en Unity para la creación de las aplicaciones.

En Unity se importó el *vuforia-unity-5-5-9.unitypackage* y la imagen *target* creada previamente. Se colocó la imagen horizontalmente en la escena y la *ARCamera* (la cámara virtual en la escena de Unity) apuntando a ella (Figura 131).

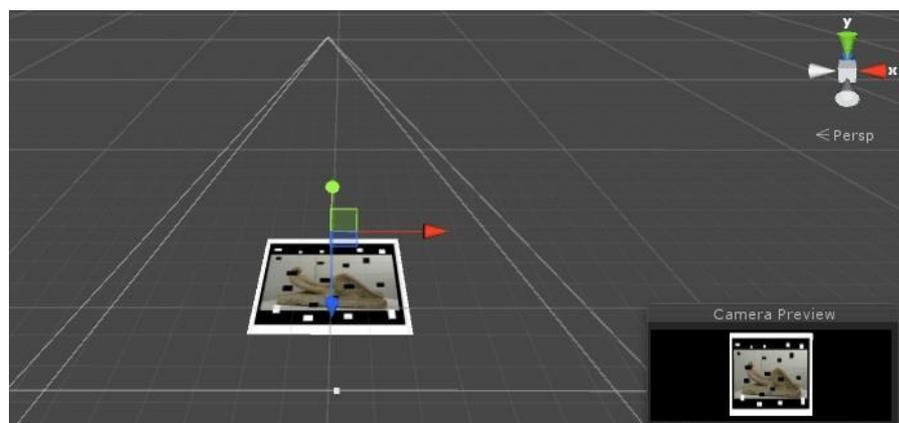


Figura 131. Se observa la posición de la cámara respecto a la imagen *target*.

Luego de configurar el comportamiento del *target*, se colocó la imagen 3D de la escultura, previamente hecho con fotogrametría con Structure from Motion, en formato OBJ (Figura 132).

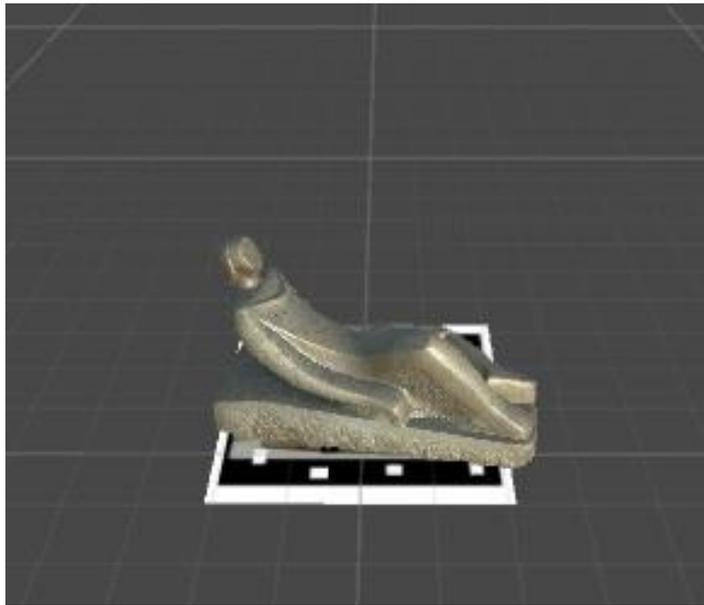


Figura 132. Colocación del modelo 3D de la escultura en formato OBJ.

En esta instancia se pudo compilar la aplicación para Android, la cual consistió solamente en la visualización de una imagen 3D virtual cuando el celular apunta a la imagen *target* (Figura 133).

Los usuarios pudieron acceder a la imagen 3D virtual, rotarla y desplazarla como si estuviesen presenciando una réplica de la misma a escala más pequeña, con sólo apuntar su teléfono a la hoja impresa.

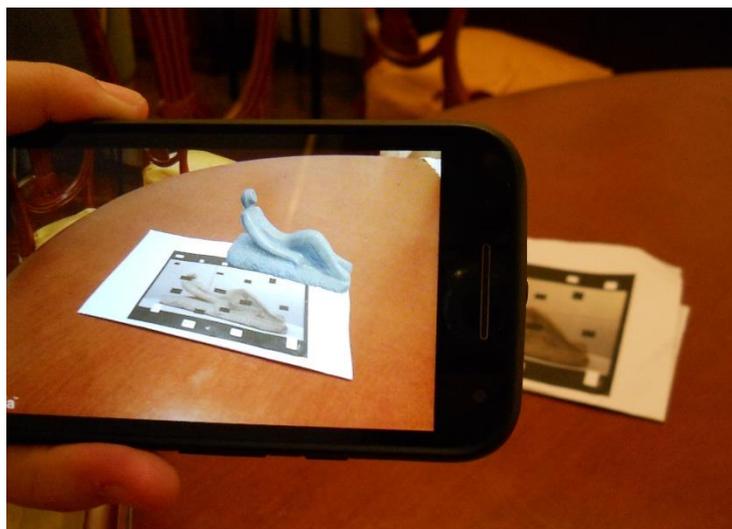


Figura 133. Visualización de la imagen 3D de “Figura reclinada” con realidad aumentada utilizando un smartphone

Se complementó esta aplicación mediante la incorporación de material multimedia. Para ello se importó el *plug-in* VideoPlayback-5-5-9 de Vuforia. Se colocó un video en formato mp4 que

muestra la escultura visualizada en MeshLab, girándose y acercándose para ver algunos detalles y una simulación de mapeo de deterioros.

6.7. Aplicación de imágenes 3D al diseño de la obra artística

Una aplicación interesante del registro y modelado en 3D es la posibilidad de emplearlo para el diseño de una obra artística, ya sea en la etapa de creación, para transformar “la idea” en un producto; para realizar prototipos o maquetas, o para escalar la pieza cuando se trata de obras de grandes dimensiones

El caso de la obra de Natalia Abot Glenz es un ejemplo de cómo se puede combinar el proceso creativo de una escultura, el registro o modelado 3D y la virtualización de la escena final. Estas tres “instancias” pueden no ser sucesivas y pueden realimentarse una con la otra. Por ejemplo, una obra puede tener una instancia de “maqueta” física, muy útil para probar distintas posibilidades de composición, o para representar un modelo a escala y poder enviarlo a construir (por ej. a una fundidora de hierro o un carpintero). En el caso de la obra Puentes de otoño uno de los objetivos de la autora era el poder escalar la pequeña escultura realizada, a través del registro 3D, para recrearla fehacientemente en una escala de muchas mayores dimensiones, manteniendo su exacto concepto y sentido.

En la figura 134 se muestra la imagen 3D de la escultura de Abot Glenz con medidas reales de diferentes partes de la obra. La imagen 3D en este caso fue obtenida utilizando fotogrametría digital con SFM y trabajada luego en computadora con herramientas de medición, edición, retoque y modelado 3D. La imagen 3D final, puede ser visualizada en cualquier software de procesamiento y visualización 3D. En este caso (Ver sección 6.3.6), está visualizada en Blender. A su vez, Blender permite añadir un “Add-on” llamado Measeurit, diseñado para la visualización de medidas. Esta herramienta es extremadamente útil para cualquier trabajo que requiera medidas exactas, incluyendo proyectos arquitectónicos, técnicos o para impresión 3D. Entre las posibilidades de este plug-in se encuentran: medir distancias entre vértices de la misma malla, añadir etiquetas en las diferentes áreas u objetos de la escena, medir las distancias entre dos objetos distintos, trabajar en diferentes escalas, entre otras cosas.

La imagen 3D generada con sus respectivas medidas le permitirá a la artista enviarla a un artesano para su fabricación, imprimir el objeto con impresoras 3D, o estudiar la obra para repensarla todas las veces que se requiera. Otra alternativa podría ser el camino a la inversa: registrar en 3D una obra ya realizada, de cualquier tamaño, y manipularla en forma virtual, repensarla y re-crearla, mediante la edición de su forma, color, textura, ubicación, etc.

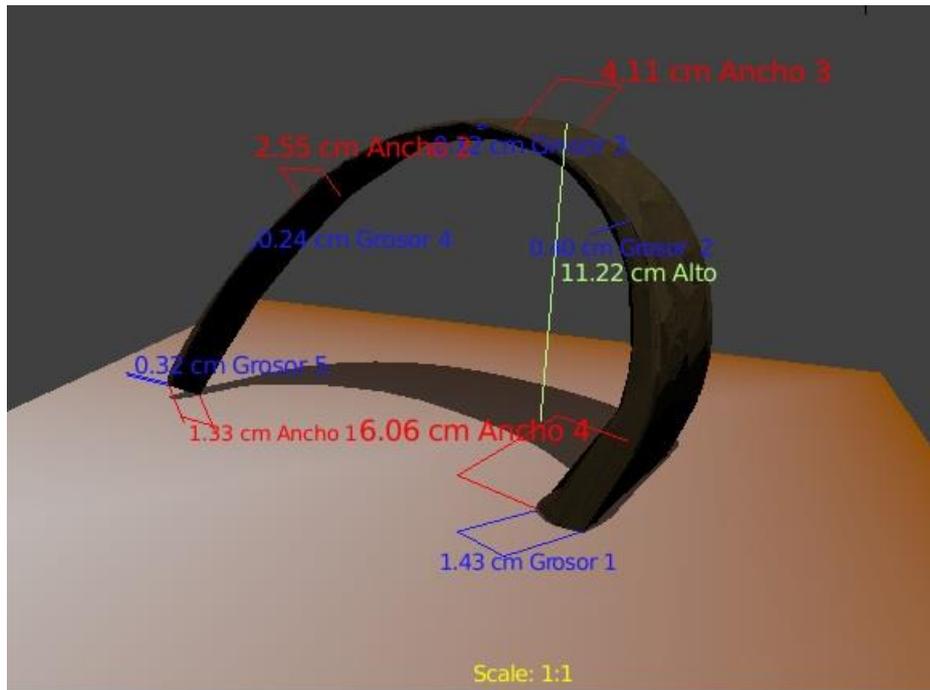


Figura 134. Visualización en Blender con el *add-on* Measeurit

Otra alternativa para planificar la construcción material podría ser seccionar el modelo 3D en bloques y colocarle las respectivas medidas. Esto se suele hacer en trabajos de arquitectura cuando las formas son orgánicas y los ángulos son muchos y muy variados. Para ello puede usarse el AutoCAD, Blender o Rhino, por ejemplo.

6.8. Referencias

GUIDI, G. et al., "IMAGE PRE-PROCESSING FOR OPTIMIZING AUTOMATED PHOTOGRAMMETRY PERFORMANCES," ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5, 2014 ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy.

IOANNAKIS, G. et al. "Enhancing Multi- Image Photogrammetric 3d Reconstruction Performance on Low Feature Surfaces" Conference: CAA 2015, Sienna, Italy (April 2015)

LEVOY, M. y RUSINKIEWICZ, S. "Efficient variants of the ICP algorithm" In third int. Conf. On 3D digital imaging and modeling (3dim 2001) (may 28th - june 1st 2001), ieee comp. Soc.,2001. pp. 145–152.

TIANO et al: "The Micro-photogrammetry: a new diagnostic tool for on site monitoring of monumental surfaces". Proceedings of the International workshop SMW08 In situ monitoring of monumental surfaces 2008/10/27.

ZHANG, G. y WANG, H. "SURF-based Detection of Copy-Move Forgery in Flat Region". International Journal of Advancements in Computing Technology(IJACT) Volume4, Number17, September. 2012

Conclusiones

En esta tesis se ha estudiado por un lado la relevancia, posibilidades y limitaciones que tienen las nuevas tecnologías de registro 3D en la conservación y documentación de arte contemporáneo. Específicamente las técnicas de escaneo con láser, escaneo con luz estructurada y fotogrametría digital y su combinación con técnicas de procesamiento de imágenes. En este aspecto se puede concluir que, para la mayoría de los registros destinados a estudios de conservación y documentación, actualmente no es necesario utilizar equipos comerciales costosos. Las opciones de escaneo láser y de luz estructurada disponibles en internet y de alcance masivo, ya sea con un software comercial de bajo costo, o paquetes de código abierto que pueden implicar un grado básico de conocimiento en programación, consiguen reemplazar a los equipos comerciales clásicos. Logran resoluciones más que suficientes para los estudios de objetos patrimoniales, en particular, el registro de deterioros y la toma de medidas micrométricas. Más importante aún es que se ha comprobado que la fotogrametría digital combinada con el sistema Structure from Motion resulta mejor que las otras técnicas en aspectos tales como el tiempo requerido para adquisición y procesamiento, la flexibilidad y el costo del instrumental. Dado también que esta técnica es de muy fácil implementación, prescinde de instrumentos de calibración y se puede utilizar con cualquier cámara, siempre y cuando las imágenes tomadas sean de alta resolución. Estas ventajas la convierten en la opción más accesible y apropiada para ser empleada por las instituciones museísticas.

Otra ventaja importante de la Fotogrametría digital con SFM es que hay una mayor cantidad de software de uso libre y gratuito para el registro de las imágenes, que los que se ofrecen para las otras técnicas. En este trabajo se analizaron y compararon los software gratuitos más usados para fotogrametría con SFM: Arc3D, Photosynth, 123DCatch y VisualSFM. Se comprobó que VisualSFM + CMP-MVS es la combinación más eficaz para generar mallas texturizadas de buena calidad, sin deformaciones apreciables y con una textura pareja. Además, VisualSFM puede procesar una gran cantidad de imágenes comparado con los demás software de SFM y el usuario puede participar de la correspondencia entre las características de las imágenes.

En cuanto a la exactitud y la resolución de los registros 3D, en esta tesis se han comparado la fotogrametría con SFM, utilizando software libre, y las técnicas con escaneo láser y con luz estructurada, utilizando instrumental de bajo costo y software comercial. Se pudo comprobar que para objetos de pequeño tamaño, del orden de una decena de centímetros, las imágenes 3D obtenidas con fotogrametría y el escaneo con luz estructurada alcanzan una mayor exactitud,

respecto a las dimensiones reales del objeto, que las logradas con el escaneo con láser. En cuanto a la resolución, con cualquiera de las tres técnicas, para este tipo de objetos, se logra obtener resoluciones del orden del 0.06% de la máxima dimensión del objeto. En el caso de la fotogrametría la resolución de la imagen 3D dependerá del grado de solapamiento de las fotos, criterio que define la cantidad de las mismas que se deben utilizar. En el escaneo con láser, la resolución de la imagen 3D dependerá de la configuración empleada, del tamaño de los paneles de calibración y de la calidad de la línea láser. En el escaneo con luz estructurada dependerá de la cantidad de patrones y ancho de las franjas.

Otra ventaja de la fotogrametría digital es que permite realizar registros 3D de los detalles de una pieza o de objetos pequeños, en la escala micrométrica, utilizando fotos tomadas con un microscopio o lentes macro.

En lo que refiere a la textura de las imágenes 3D obtenidas con cualquiera de las técnicas de registro, ésta dependerá de cómo se la añade a la malla. Si se realiza durante la adquisición o si se añade posteriormente con técnicas de procesamiento de imágenes (como el mapeo de textura por proyección de *rasters*, o el alineamiento de mallas y el posterior promedio de texturas adyacentes, por ejemplo). En el primer caso la posibilidad de obtener una imagen 3D cuyo color sea fiel al original dependerá de las condiciones de iluminación en el momento de la adquisición de las imágenes. En el segundo caso además de este aspecto, dependerá del método de texturización elegido. La fotogrametría digital con Structure from Motion es la técnica de adquisición de imágenes 3D que más fácilmente registra el color de los objetos, en comparación con los escáneres 3D de bajo costo analizados en esta tesis. Estos últimos pueden adquirir el color del objeto si se combinan con una fotografía color en cada escaneo. De cualquier manera, esta aplicación implica controlar que la iluminación y las condiciones de toma de las fotografías se mantengan iguales para todos los escaneos.

Otro aspecto que se estudió en esta tesis es la posible deformación de las imágenes 3D obtenidas, por cuestiones propias de cada técnica. Para evitar este problema, en el caso del escaneo es primordial mantener la misma configuración en todos los barridos o proyecciones, es decir, mantener fija las posiciones de cada elemento. En el caso de escaneo con láser además es necesario realizar una buena calibración y tener una línea láser pareja, bien definida y barrida a una velocidad acorde a la cámara utilizada. Aquí también entra en juego la profundidad del objeto, pudiendo afectar el enfoque del láser en algunas partes del objeto. El mismo problema de enfoque lo tiene la técnica de fotogrametría digital cuando se la aplica a objetos muy cercanos, aunque este aspecto se puede solucionar utilizando la técnica de *focus stacking* en la instancia de toma de fotos.

Un problema general que tienen las técnicas de registro en 3D es que no brindan buenos resultados cuando se las aplica a objetos que tienen superficies muy reflectantes, muy transparentes, objetos que estén en movimiento, que tenga bordes muy finos o entramados muy

pequeños. Se pudo observar que en el caso de la fotogrametría digital además de estas limitaciones también aparecen problemas cuando las superficies son completamente planas de un solo color, es decir, una región con baja frecuencia o gradiente suave.

Las técnicas de procesamiento de imágenes ayudan a mejorar la calidad del registro 3D y a solucionar algunos de los problemas mencionados en el párrafo anterior. Para este fin se pueden recomendar los filtros de reconstrucción de superficie y las herramientas de texturización, además de las básicas de edición de mallas como eliminar sobrantes o completar faltantes pequeñas (pequeñas porque de lo contrario atendería contra la documentación del original).

La cantidad de herramientas técnicas que ofrecen los software de procesamiento de imágenes 3D es cada vez mayor y brindan muchas posibilidades para aplicaciones en conservación y restauración. Herramientas computacionales que habían sido creadas de forma genérica y utilizadas por otras disciplinas como la ingeniería, ahora son accesibles a un público más general, teniendo un particular impacto en la conservación del patrimonio cultural. En esta tesis se exploraron las posibilidades que brindan distintos software gratuitos para procesamiento de imágenes 3D, obtenidas con cualquiera de las técnicas de registro, para las siguientes aplicaciones: visualización y manipulación de la imagen en la pantalla, empleo de herramientas de medición, edición de colores y superficies, mapeo topográfico, simulaciones de iluminación rasante, cálculos de volumen, ejes y centro de gravedad.

Se puede concluir que MeshLab es uno de los software libres más prácticos y completos para casi todas las aplicaciones mencionadas porque posee herramientas específicas para estos fines. Al mismo tiempo, es muy versátil para la exportación a diversos formatos de imagen 3D y para la reconstrucción de superficie y textura. Su interfaz gráfica es lo suficientemente accesible para cualquier usuario no experimentado en el procesamiento de imágenes.

Cuando se requiere hacer modelado, renderizado, o representaciones más complejas como escenas con más de un elemento o con elementos en movimiento, Blender resulta ser el software más completo porque cuenta con una variada gama de herramientas para cada una de estas técnicas. Sin embargo, la interfaz gráfica de Blender no resulta tan accesible para un trabajador de museos o conservador de arte porque las opciones son muchas y algunas se visualizan al mismo tiempo, pudiendo generar confusión y ansiedad en el usuario inexperto.

Si bien Blender es el software adecuado para modelar objetos y para hacer escenas renderizadas y con movimiento de una manera bastante espectacular, estos procedimientos no tienen muchas aplicaciones en registros 3D para documentación y conservación de obras tradicionales. No obstante, sí son adecuadas para hacer animaciones y experiencias educativas en los museos. Otro software que se exploró en esta tesis para la construcción de este tipo de escenas es Unity 3D, un software gratuito de programación de videojuegos, cuya especificidad radica en la creación de espacios interactivos y audiovisuales. Además, brinda espacio para la creación de códigos personalizados y tiene una variedad de *plug-ins* para utilizar Realidad Virtual y

Realidad Aumentada. Unity puede importar los registros 3D en formato OBJ o FBX, tiene también herramientas de modelado y de renderización y permite crear aplicaciones para ser utilizadas en distintos sistemas y dispositivos.

Para el modelado de soportes y contenedores de piezas y su posterior impresión los resultados obtenidos en estas tesis mostraron que el software MeshMixer es uno de los más apropiados para este tipo de aplicaciones, ya que se obtienen muy buenos resultados con la ventaja de que posee una interfaz gráfica muy accesible.

Por último, el software 3DHOP resulta ser la herramienta de software más simple para la difusión de imágenes 3D al público a través de internet y señalizaciones interactivas.

Con respecto a la exhibición y difusión de bienes culturales, se pudo comprobar que la experiencia interactiva espectador-obra/objeto puede ser mejorada y virtualizada con los registros 3D. Los ejemplos tratados en esta tesis sirvieron para establecer distintos niveles de interacción. La más directa y simple es la visualización de la imagen 3D en pantalla (en el sitio web del museo o en una pantalla táctil dentro de la sala); un segundo nivel podría incluir el acceso a más información de la pieza, utilizando el mismo registro 3D, pero a la vez señalizando partes del mismo con distintos puntos de información (colocación de texto o imágenes multimedia) y la opción de que el visitante interactúe con una interfaz didáctica y lúdica. Por último, podría darse un tercer nivel vinculado con las técnicas que involucran el mundo virtual (el de la imagen 3D) y el mundo real (donde se encuentra el espectador o visitante del museo). En este sentido, se comprobó que las técnicas de Realidad Aumentada y Realidad Virtual hacen un aporte significativo a esta experiencia mucho más íntima del espectador y su interacción con el objeto de exhibición, lo que podría contribuir a incrementar el número de visitantes, físicos y virtuales, de estas instituciones.

En este nuevo contexto tecnológico y social las misiones del museo, que clásicamente siempre fueron conservar, guardar, investigar, educar, exhibir y difundir las colecciones, ahora se fusionan, se solapan y se alimentan unas a otras. La restauración de una obra ya no queda oculta en un taller del museo, sino que también puede ser parte de la exhibición de la misma y a la vez convertirse en una experiencia lúdica para niños o, por qué no, para adultos. Los registros de un sitio arqueológico ya no son sólo parte de un informe científico que publica el museo o un investigador en una revista de su disciplina, sino que ahora pueden convertirse en un aspecto clave del diseño de una escena para realidad virtual.

Específicamente en lo que tiene que ver con los actuales sistemas públicos de documentación y bases de datos para bienes culturales en Argentina, se comprobó que, aunque actualmente contengan poca información, su infraestructura permitiría la incorporación de archivos de imágenes 3D. La ventaja de utilizar software libre para la representación y manejo de imágenes

3D facilitan también su incorporación a las páginas web de museos y a las bases de datos públicas ya existentes.

En cuanto a la aplicación de los resultados obtenidos en esta tesis se realizó el registro completo en 3D de varias obras de arte tradicional y de arte contemporáneo, pertenecientes a museos públicos de nuestro país. Para ello se utilizó fotogrametría digital con SFM y el software VisualSFM combinado con CMP-MVS para el registro y MeshLab para el procesamiento de imágenes. Este paquete forma parte de un sistema desarrollado en esta tesis, de acceso libre y gratuito, que ya está siendo ofrecido a los museos. Las obras digitalizadas en 3D fueron: Las esculturas “Figura reclinada” de Naum Knop y “Figura” de Aurelio Macchi, pertenecientes al Palais de Glace de Buenos Aires; cinco esculturas de yeso del Área Museo, Exposiciones y Conservación de la FBA-UNLP; un arpa del Museo de Instrumentos Musicales “Emilio Azzarini” y la obra escultórica “Puentes de otoño” de Natalia Abot Glenz.

Las instituciones museísticas que participaron en el desarrollo de esta tesis, además de brindar parte de su colección para el registro, brindaron espacios físicos y profesionales de la museología y el arte que participaron en el trabajo de la digitalización. Algunas instituciones se comprometieron más que otras, como lo fue el Palais de Glace, que destinó un estudio de fotografía y un fotógrafo para capacitarse en la fotogrametría digital, con el objetivo de llevar a cabo un trabajo sistemático de digitalización e incorporar el conocimiento, procedimientos e instrumental de manera permanente como política de conservación y documentación del museo. Otras instituciones a las que se les ofreció el proyecto tuvieron buena predisposición e interés, pero no pudieron concretar el compromiso por diversas cuestiones. En muchos casos fueron los empleados de las instituciones, como conservadores y museólogos, los que han demostrado mayor interés en aprender las técnicas y procedimientos del registro 3D. Sin embargo, la falta de políticas institucionales que permitan integrar estas herramientas en el largo plazo han obstaculizado la concreción de acuerdos o cooperación interinstitucionales. Esto deja en evidencia las limitaciones en la gestión de la investigación en instituciones museísticas públicas, dificultando las posibles relaciones con el complejo científico-tecnológico del país.

Quizás la experiencia más destacable es la realizada en conjunto con el Palais de Glace de la ciudad de Buenos Aires, una institución que trabajó activamente en el proyecto de digitalización 3D de sus obras, a partir de un acuerdo de cooperación con el Laboratorio de ablación, Limpieza y Restauración con Laser del Centro de Investigaciones Ópticas, lugar donde se realizó esta tesis. Se trató de una experiencia interdisciplinaria, con un compromiso activo de la gestión de la Institución y un gran aporte profesional de los empleados involucrados. Se desarrollaron rutinas y formas de trabajo que aportaron a la creación de estructuras, manejo de tiempos y espacios para el desempeño de las tareas de digitalización. Esta experiencia ha

permitido establecer protocolos de trabajo generales y procedimientos técnicos para la realización de registros 3D de las colecciones de las instituciones museísticas del país

Como se trató en los capítulos 1 y 4, en el arte contemporáneo, particularmente en las instalaciones y el Media Art, las teorías clásicas de la Conservación no resultan adecuadas como marco teórico para la toma de decisiones. En esta tesis se las replantea desde otras perspectivas, considerando el contexto social actual, el de los bienes efímeros y los cambios bruscos de la tecnología, el de la abundancia y masividad de la información, y el de una disciplina que empieza a especializarse.

Un aspecto analizado es el problema tecnológico de la obsolescencia de los materiales empleados en las obras de arte, impactando en criterios clásicos como la autenticidad y la intencionalidad artística. Se puede concluir que en la conservación o documentación de una obra de Media Art, que comprende tanto elementos conceptuales como materiales, estructurales como estéticos y visibles como invisibles, se realiza un proceso de toma de decisiones que estará regido por varios factores: la tecnología y materiales disponibles en el momento, ya sea para emular o migrar la obra; las recomendaciones y opinión del autor; la información adquirida sobre ésta en etapas de documentación y registro; y la reinterpretación que el conservador, el artista o el público puedan tener de ella. Estos factores determinarán las formas de documentación, restauración, exhibición y re-instalación de la obra. Una forma de adquirir esta información puede ser a través de entrevistas a los artistas y de encuestas. Esta metodología ayudará a los conservadores y restauradores de arte en los procesos de toma de decisión, respetando los criterios de autenticidad.

En relación a la documentación las instalaciones y el Media Art, también presentan dificultades al momento de su relevamiento y registro. En este trabajo se propuso el registro 3D combinado con técnicas de modelado, renderizado y programación de videojuegos como solución a muchos de estos problemas, relacionados con las cuestiones dimensionales e interactivas. Se comprobó que la fotogrametría digital en 3D es una buena técnica para registrar objetos de formas orgánicas y complejas que, de otra manera, con métodos tradicionales de fotografías, videos o dibujos, no permiten documentar su tridimensionalidad. Un ejemplo de ello es el caso del grupo escultórico “Puentes de Otoño” de Natalia Abot Glenz. También se comprobó que la fotogrametría digital no siempre puede efectuar todo tipo de registro tridimensional, por lo que conjuntamente, se estudiaron técnicas de modelado, renderizado y de inmersión virtual. Tal es el caso de la instalación “Días de mar” de Dani Lorenzo. Se puede concluir que estas técnicas contribuyen al registro de elementos como iluminación y recorridos del espectador, entre otros elementos típicos de las instalaciones.

La experiencia con la digitalización de la obra “Días de Mar” permitió demostrar que las técnicas de modelado 3D disponibles en una cantidad de softwares gratuitos y libres destinados al diseño, contribuyen al registro o “re-creación” de elementos conceptuales de las obras que no

tienen por qué ser registrados de forma tan fidedigna. La relación de las condiciones físicas de una obra de arte con su significado debe ser investigada antes de que se proponga un tratamiento de virtualización. Si no hay conexión entre las condiciones materiales de una obra de arte y su significado, entonces sería posible reproducir la estructura básica de la obra sin la necesidad de utilizar técnicas de adquisición de imágenes 3D como los métodos fotogramétricos. En un caso así, las técnicas de adquisición de imágenes 3D como fotogrametría o escáneres sólo jugarían un papel importante como ayuda para un posterior modelado 3D. Por otro lado, si las condiciones materiales de una obra de arte son esenciales por su significado, entonces será necesario reproducir con exactitud sus texturas mediante técnicas fotogramétricas o de escaneo 3D.

En cuanto a la re-creación, en esta tesis se trabajó con el concepto y metodología de e-Installation, tomado de los trabajos que realizó el ZAK-ISAS en Alemania. La e-Installation propone una nueva forma de documentación y exhibición, comprendiendo todos los tipos de registro posibles: imágenes 3D, modelado, composición de escenas complejas, sonido, video y participación del espectador mediante dispositivos HMD y sensores de seguimiento. Por otro lado, el uso de motores de juegos para la creación de las e-Installations y de otras aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada que permiten la interacción con la obra u objeto, refleja la influencia de que tienen los aficionados y otras disciplinas en la conservación del patrimonio. Las obras “Figura reclinada”, “Puentes de Otoño” y “Días de mar” sirvieron como casos de aplicación de técnicas de realidad aumentada y realidad virtual.

Otro aspecto que se trató en esta tesis es el hecho de que muchas veces los artistas, especialmente los que trabajan a gran escala, tienen la necesidad de transmitir información de la obra a personas que realizarán la construcción de la misma. Un ejemplo de esto es la realización de planos y dibujos con medidas y aclaraciones que son mostrados a operarios de fundidoras o de corte de diversos materiales. Si el artista contara con técnicas de registro 3D podría hacer modelos a pequeña escala, como maquetas, y trasladarlos a una pantalla en forma virtual, para su manipulación, modelado, transporte y mejor interpretación. Del mismo modo, estos modelos podrían servir como etapas de desarrollo de la misma obra: el artista podría reformular una obra ya existente sin necesidad de realizar otra igual, valiéndose de los registros 3D en una computadora. El caso del registro en 3D de una de las esculturas de la obra “Puentes de Otoño” es un ejemplo del uso de estas posibilidades. La artista cuenta ahora con el registro virtual de esa pieza para futuros proyectos a distintas escalas y para diseñar nuevas obras.

Unir dos áreas que parecían muy distantes, como el arte contemporáneo y la documentación con imágenes 3D, fue uno de los desafíos de este trabajo. No sólo por las diferencias de estilo que ambos campos pudieran tener, sino por la trayectoria de estas áreas disciplinares. Por un lado, la conservación del arte contemporáneo no suele tener en la formación del conservador-restaurador el mismo peso que la conservación de arte antiguo. Por otro lado, las técnicas de

adquisición de imágenes 3D y visión computacional están asociadas con áreas científico tecnológicas como la óptica, la ingeniería y la computación que se desarrollan en ámbitos muy diferentes al de la conservación de bienes culturales.

En este contexto un producto de esta tesis, que se presenta en el Apéndice 2, fue el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de registro 3D para conservación, documentación y exhibición de colecciones de museos, de acceso libre, basado en fotogrametría digital, con instrumental de bajo costo y software libre (Sistema para el registro 3D de bienes culturales). Este sistema ya ha sido probado en algunas instituciones y forma parte de un proyecto de transferencia tecnológica actualmente en curso, desarrollado por el Laboratorio de Ablación, Limpieza y Restauración con Láser (LALRL), del Centro de Investigaciones Ópticas y financiado por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires y el Ministerio de Cultura de la Nación. Este Proyecto se propone brindar este recurso a museos e instituciones de la Provincia de Buenos Aires, mediante la capacitación de personal para el manejo y utilización de las tecnologías del registro 3D y el asesoramiento para la elaboración de programas de digitalización de las colecciones completas de dichas instituciones.

Agradecimientos

Al Dr. Gabriel Bilmes, en principio por haberme recibido en su grupo, cuando de casualidad llegué al LALRL-CIOp en búsqueda de algún curso, pasantía o información sobre fotónica en conservación, sin tener siquiera idea de que era posible hacer un doctorado en mi campo disciplinar e incursionar en la investigación. Le agradezco haberme guiado como director durante todo el transcurso del doctorado y haberme enseñado lo que es investigar y la finalidad de la ciencia. También destaco su generosidad y su constante preocupación por mi bienestar profesional, así como personal, durante este tiempo sin que faltaran palabras de ánimo en los momentos más difíciles.

A la Prof. Marcela Andruchow, por su compromiso como co-directora de esta tesis y el trabajo de gestión que ha realizado para que yo pudiera trabajar con obras de artistas y de colecciones de museos. También destaco su profesionalismo, comprensión y su buena predisposición para todas las consultas que le haya hecho.

Al Centro de Investigaciones Ópticas, en particular a mis compañeros del Laboratorio de Ablación, Limpieza y Restauración con Láser y del grupo de Fotónica Integrada, por el tiempo compartido y la ayuda brindada.

Al Dr. Jesús Muñoz Morcillo, por haberme permitido interactuar con su grupo de investigación “e-Installation”, en el Centre for Cultural and General Studies del Karlsruhe Institute of Technology (ZAK-KIT) y en el Sensor-Actuator-Systems Laboratory del Karlsruhe Institute of Technology (ISAS-KIT), durante mi estadía en Alemania en noviembre 2015 a enero 2016. Por haberme enseñado los aspectos teóricos y prácticos de la documentación de obras de Media Art y por su generosidad para conmigo durante mi estadía en Alemania.

Agradezco también al Dr. Florian Faion y al Dipl. Inform. Antonio Zea, miembros del equipo de “e-Installation”, por haberme recibido en su laboratorio y mostrarme las cuestiones técnicas de la realización de una e-Installation.

Al Visual Computing Lab, del Istituto per le Technologie dell’Informazione A. Faedo del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), Pisa, Italia. Por el Summer School realizado en junio de 2014 y financiado por European Commission Seventh Framework Programme bajo el acuerdo de subvención FP7-INFRASTRUCTURES-2012-1-313193 (ARIADNE). Particularmente agradezco al Dr. Matteo Dellepiane y al Dr. Marco Callieri, quienes me enseñaron todo lo que sé del software MeshLab.

A los siguientes museos que me permitieron trabajar con sus colecciones:

Palacio Nacional de las Artes “Palais de Glace”, Buenos Aires, Argentina. Agradezco particularmente a la Lic. Vilma Perez Casalet y al fotógrafo Jorge Manson.

Museo Provincial de Bellas Artes “Emilio Pettoruti”, La Plata, Argentina.

Área Museo, Exposiciones y Conservación de la Facultad de Bellas Artes, Universidad Nacional de La Plata.

Museo de Instrumentos Musicales "Dr. Emilio Azzarini", UNLP, La Plata, Argentina.

Proyecto Móvil y Espacio CheLA (Centro Hipermediático Experimental Latinoamericano), Buenos Aires, Argentina.

A los artistas que me brindaron su tiempo para entrevistarlos, conocer sus obras y poder digitalizarlas en 3D: Dani Lorenzo y Natalia Abot Glenz.

Al Dr. Leandro Zilio. División Arqueología, Laboratorio 1, Museo de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Por colaborar con piezas arqueológicas.

Al Dr. Andrés Bilmes. [IPGP - CENPAT] Instituto Patagónico de Geología y Paleontología, Puerto Madryn, Chubut, Argentina. Por sus consejos sobre fotogrametría digital.

Al Dr. Hector Francisco Ranea Sandoval por sus comentarios y observaciones.

Y a mi novio Nicolás, quien me ha acompañado en las buenas y en las malas de este doctorado. Por haberme apoyado en todo momento. Por haberme esperado para cenar cuando llegaba tarde del trabajo. Y por todas las cosas que me ha sabido solucionar (y a la vez explicar, y, por ende, enseñar), como cuando lo llamaba desesperada porque creía que se me había borrado algo de la PC, o cuando no me andaba algún software, o cuando le preguntaba alguna palabra traducida del inglés, etc. Él, siempre con calma, bajando mi ansiedad. Y lo más importante, su contención y su buen humor.

Apéndice 1

Software más comunes empleados para Structure from Motion

Bundler¹²²

Es un sistema de código abierto escrito en C y C++ para Structure from Motion (SNAVELY et al., 2006; SNAVELY et al., 2007). Toma como *input* imágenes desordenadas y genera una nube de puntos 3D dispersa. El sistema reconstruye la escena de forma incremental, unas pocas imágenes a la vez, usando una versión modificada del paquete *Sparse Bundle Adjustment* (LOURAKIS y ARGYROS, 2009) como el subyacente motor de optimización. Una versión más temprana del sistema fue utilizada en el proyecto Photo Tourism¹²³. La distribución fuente de Bundler también contiene implementaciones potencialmente útiles de varios algoritmos de visión computacional.

Como Bundler produce nubes de puntos dispersas, para lograr nubes más densas se puede utilizar PMVS2. Un *pipeline* típico es correr Bundler para calcular los parámetros de la cámara, usar el programa Bundle2PMVS para convertir los resultados como *input* en el PMVS2, luego correr PMVS2.

PMVS2 (Patch-based Multi-View Stereo - version 2)¹²⁴

PMVS2 (la segunda versión de PMVS) es un software *Multi-View Stereo* que toma un conjunto de imágenes y los parámetros de la cámara como *input* y reconstruye la estructura 3D de la escena como un conjunto de puntos denso. El software obtiene un conjunto de puntos orientados en vez de una malla de triángulos, donde las coordenadas 3D y las normales de la superficie son estimadas en cada punto orientado (FURUKAWA y PONCE, 2007; FURUKAWA et al., 2010).

CMVS (Clustering Views for Multi-View Stereo)¹²⁵

CMVS toma como *input* el *output* de un software SFM, luego descompone las imágenes *input* en un conjunto de “*clusters*” (grupos) de imágenes de tamaño pequeño, permitiendo usar un software MVS (*Multi-View Stereo*) para procesar cada *cluster* independientemente y paralelamente, asegurándose de que la unión de las reconstrucciones de todos los *clusters* no pierda ningún detalle que de lo contrario puede ser obtenido del total del conjunto de imágenes. CMVS debe ser usado en conjunto con software SFM y MVS (PMVS2).

¹²² <http://www.cs.cornell.edu/~snavey/bundler/>

¹²³ <http://phototour.cs.washington.edu/>

¹²⁴ <http://www.di.ens.fr/pmvs/>

¹²⁵ <http://francemapping.free.fr/Portfolio/Prog3D/CMVS.html>

CMP-MVS¹²⁶ (*Multi-View Reconstruction Software*)

Es un software de reconstrucción de *Multi-View Stereo*. El input es un conjunto de imágenes en perspectiva y parámetros de la cámara (calibración externa e interna). El output es una malla texturizada de la escena rígida visible en las imágenes. Los objetos no rígidos son implícitamente ignorados.

Este software es especialmente útil cuando se trabaja con materiales de superficies transparentes, materiales altamente reflectantes, falta de texturas o planos de tierra que pueden ser ocluidos por objetos en movimiento. Este método mejora el algoritmo de reconstrucción de superficie de LABATUT et al. 2009, y utiliza el concepto visual-Hull (LAURENTINI, 1994) para reconstruir las superficies difíciles que se muestrean lo suficientemente densas por el input de la nube de puntos de 3D (JANCOSEK y PAJDLA, 2011).

VisualSFM¹²⁷

Uno de los software más eficientes, es VisualSFM, una aplicación con GUI para reconstrucción 3D que utiliza *Structure from Motion*. En síntesis, se importan las imágenes, luego el algoritmo SIFT detecta las características comunes a todas las imágenes, y el *Bundle Adjustment* genera la nube de puntos dispersa y calcula la posición y orientación de las cámaras. VisualSFM puede ser combinado con las herramientas PMVS2 y CMVS para generar nubes de puntos más densas. El output del VisualSFM también se puede combinar con muchas otras herramientas, incluyendo CMP-MVS (JANCOSEK y PAJDLA, 2011), MVE (FUHRMANN et al., 2014) SURE (ROTHERMEL et al., 2013) y MeshRecon (KANG y MEDIONI, 2015).

VisualSFM necesita de los paquetes: Gtk, SiftGPU, CUDA, GLEW, GLUT, DevIL, y PBA, entre otros, haciendo su instalación una tarea no trivial.

Una de las ventajas de VisualSFM por sobre otros software de SFM es que puede procesar una gran cantidad de imágenes. Sin embargo, requiere hardware específico para los diferentes procesos involucrados. La detección de características requiere una GPU (ATI/ nVidia / Intel) de alta calidad. Particularmente, se necesita una gran cantidad de memoria GPU. Una pequeña GPU puede causar problemas para la detección de características. SiftGPU-V400 funciona para la tarjeta gráfica Intel en algunas plataformas. Por otro lado, Multicore bundle adjustment funciona en nVidia CUDA o CPU.

Otra ventaja de VisualSFM es que el usuario puede intervenir en la correspondencia de características de las imágenes, usando su propia secuencia de pares o usando sus propios códigos de detectores de características. Entre otras cosas, el usuario puede ajustar los parámetros de velocidad y memoria utilizada.

¹²⁶ <http://ptak.felk.cvut.cz/sfmservice/websfm.pl?menu=cmpmvs>

¹²⁷ <http://ccwu.me/vsfm/>

VisualSFM es muy fácil de utilizar, por lo tanto, es de los software empleados en la parte experimental de esta tesis.

Microsoft Photosynth¹²⁸

Photosynth es un software de Microsoft Live Labs, y la Universidad de Washington, que analiza fotografías digitales y genera una imagen tridimensional a partir de esas fotos. Photosynth trabaja como los otros software de SFM. El primer paso involucra el análisis de múltiples fotografías tomadas de la misma área. El usuario debe subir las imágenes a la web. Cada imagen es procesada usando un algoritmo de detección y correspondencia de puntos, el cual es similar al SIFT. Analizando la posición de correspondencia de características dentro de cada imagen, el programa puede identificar qué imágenes pertenecen a qué lado de las demás. Mediante el análisis de diferencias sutiles en las relaciones entre las características (ángulo, distancia, etc.), el programa identifica la posición 3D de cada característica, así como la posición y ángulo en los cuales fue tomada cada fotografía. Este proceso es el *Bundle Adjustment*, explicado en el capítulo 3. El siguiente paso involucra la visualización y navegación a través de la nube de puntos 3D de las características identificadas en el primer paso. Este visualizador reside en una computadora cliente y mantiene conexión a un servidor que guarda las fotografías originales. Permite al usuario, entre otras cosas, ver cualquiera de las fotografías desde sus puntos de vista originales.

Una vez que se generó la nube de puntos dispersa el usuario puede transformarla en una más densa usando Photosynth Toolkit, descargable de la misma web de forma gratuita, que contiene las herramientas CMVS y PMVS. Este proceso puede ser realizado sin conexión a internet.

ARC3D¹²⁹

Arc3D (TINGDAHL y VAN GOOL, 2011) es un software de reconstrucción 3D operado por el grupo VISICS KU (Leuven). Es gratis y funciona online a través de una página con la creación de una cuenta de usuario. Las imágenes son subidas y el usuario espera a que sean procesadas, tardando entre 30 min a 3 horas. Los requisitos para el tipo de imagen son los mismos que para cualquier software de SFM explicados anteriormente. A diferencia de otros software mencionados anteriormente, destinados a profesionales de la computación más que a público general y cuya instalación y operación puede ser compleja, ARC3D genera una malla texturizada automáticamente, sin intervención del usuario en el proceso y sin tener que usar su propio hardware. El resultado es enviado por mail al usuario, pero la desventaja también es que no se puede intervenir en los procesos de reconstrucción.

¹²⁸ <https://photosynth.net/>

¹²⁹ <http://www.arc3d.be/>

Autodesk 123D Catch¹³⁰

Autodesk 123D Catch puede ser descargada desde la web de Autodesk y es actualmente gratis para usos no comerciales. Simplemente requiere que el usuario suministre un mínimo de 3 imágenes de un objeto, las cuales luego son subidas a un servidor para su procesamiento, involucrando el método de PMVS (*Patch-based Multiview Stereo*). Las imágenes deben ser adquiridas en las mismas condiciones que para cualquier otro sistema de SFM. El proceso es similar al de Microsoft Photosynth y Arc3D, ya que el usuario sólo necesita proporcionar las fotografías. Unos minutos luego de que se suban las imágenes se genera una imagen 3D texturizada. El software presenta algunas limitaciones, como la cantidad máxima de imágenes (70) y que el usuario tampoco puede intervenir en el proceso de construcción, aunque sí puede intervenir en la búsqueda de más características comunes en las fotografías, mediante la selección personalizada de puntos en cada una.

Insight3D¹³¹

Insight3D es un software de código abierto para reconstrucción 3D que combina SFM y reconstrucción de puntos de fuga. Puede ser usado para crear imágenes 3D de fotografías, e incluye herramientas interactivas para crear modelos poligonales texturizados. Tiene sus versiones para Windows y Linux. El paquete incluye la aplicación, un manual y cuatro fotografías de una pequeña parte del castillo de Praga, que puede ser usado como prueba de la aplicación.

El resultado de la reconstrucción 3D que brinda Insight3D es una nube de puntos, o una malla de polígonos texturizada. Esta última es generada por la triangulación de vértices que son definidos por el usuario. Por esta razón, la resolución de la malla es muy baja. La imagen 3D final puede ser exportada en muchos formatos, entre ellos el más útil puede ser VRML, que puede usarse para importar los modelos en otras aplicaciones como, por ejemplo, Blender.

Agisoft PhotoScan¹³²

PhotoScan es un software comercial que opera en Windows y puede ser adquirido a través de su compañía Agisoft. La versión standard cuesta 179 dólares, y la profesional 3500 dólares. Genera nubes de puntos densas de muy buena resolución. Toda la información permanece con el usuario, ya que el software puede ser localmente operado en una computadora personal. Para grandes proyectos (a partir de 100 imágenes) se recomienda emplear un sistema operativo de 64 bits con un mínimo de 6 GB de RAM (NEITZEL y KLONOWSKI, 2011).

Photomodeler¹³³

¹³⁰ <http://www.123dapp.com/catch>

¹³¹ <http://insight3d.sourceforge.net/>

¹³² <http://www.agisoft.com/>

Es un software comercial para crear modelos 3D (que consistan en puntos, líneas, curvas, bordes, cilindros, superficies o NURBS) y hacer mediciones 3D a partir de fotografías tomadas con cámaras estándares. Los modelos 3D pueden ser creados y exportados con la textura fotográfica extraída de las fotografías originales. Por otro lado, Photomodeler Scanner es una variante de Photomodeler que añade la detección automática de características en las fotos y el modelado de superficies densas.

Pix4D¹³⁴

Pix4D es un sistema comercial que procesa de manera automática imágenes terrestres y aéreas adquiridas por UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*). El sistema convierte las imágenes en resultados de alta definición para una amplia gama de aplicaciones GIS y CAD, entre los cuales pueden ser mosaicos, ortofotos, mapas o imágenes 3D.

Referencias:

FUHRMANN, S. et al. “MVE – A Multi-View Reconstruction Environment”. In: Proceedings of the Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Darmstadt, Germany, 2014

FURUKAWA, Y. y PONCE. J. “Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis”. Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 17–22 June, Minneapolis, USA , pp. 1–8. 2007.

FURUKAWA, Y. et al. “Clustering view for multi-view stereo”. Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 13–18 June, San Francisco, USA, pp. 1434–1441. 2010.

JANCOSEK, M. y PAJDLA, T. “Multi-View Reconstruction Preserving Weakly-Supported Surfaces”. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2011. DOI: 10.1109/CVPR.2011.599569

KANG, Z. y MEDIONI, G. “3D Urban Reconstruction from Wide Area Aerial Surveillance Video”. Applications and Computer Vision Workshops (WACVW), IEEE Winte, 2015.

LABATUT, P. et al. “Robust and efficient surface reconstruction from range data”. In Computer Graphics Forum. Volume 28, Issue 8, pages 2275–2290, December 2009.

LAURENTINI, A. !The visual hull concept for silhouette-based image understanding!. PAMI, 16(2):150–162, February 1994.

LOURAKIS y ARGYROS. “A Software Package for Generic Sparse Bundle Adjustment”. ACM Trans. Math. Software, 36(1):1–30, 2009.

¹³³ <http://www.photomodeler.com>

¹³⁴ <https://www.pix4d.com>

NEITZEL F. y KLONOWSKI, J. "Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system". In Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (2011), International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011.

ROTHERMEL, M. et al. "SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery". Proceedings LC3D Workshop, Berlin ,December 2012

SNAVELY, N. et al. "Photo Tourism: Exploring image collections in 3D". ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006), 2006.

SNAVELY, N. et al. "Modeling the World from Internet Photo Collections". Int J Comput Vis (2008) 80: 189.

TINGDAHL, D. y VAN GOOL, L. "A Public System for Image Based 3D Model Generation", Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques 5th International Conference, MIRAGE, 2011.

Apéndice 2

Sistema para el Registro 3D de Bienes Culturales

Guía Básica

Índice

Introducción.....	206
Materiales Requeridos.....	206
Procedimiento	
a) Adquisición de las fotos.....	207
b) Reconstrucción 3D.....	208
c) Visualización y Edición de las imágenes 3D.....	213
d) Calibración de las dimensiones de la imagen 3D.....	215
e) Unión de partes de un mismo objeto.....	216
f) Intervención en la imagen 3D.....	218

Introducción

El sistema para el registro 3D de bienes culturales permite obtener imágenes en 3 dimensiones con textura, color y las dimensiones reales del objeto, utilizando Fotogrametría Digital con la técnica de Structure from Motion y software libre.

La técnica produce imágenes 3D de alta calidad cuando se la aplica a superficies rugosas o que no estén pulidas (por ejemplo, yeso, cemento, madera, piedra, cerámica, etc.).

No es recomendable para aplicaciones en objetos que tienen superficies altamente reflectantes (espejos, metal pulido, barnizados brillantes); objetos de espesores muy finos (menos de 2 mm); objetos con grandes áreas planas de un solo color; objetos en movimiento; entramados pequeños (por ejemplo, resortes, alambrados, plumas, cabellos o fibras).

Materiales requeridos

- Cámara fotográfica. Puede ser de cualquier tipo, pero debe permitir obtener imágenes de alta resolución. Se recomienda una cámara que tenga la opción de modo Manual.
- Base giratoria (opcional)
- 2 reflectores con iluminación difusa (opcional)
- Computadora con procesador i5 o superior y placa de video N-Vidia 840 o superior
- Software para Structure from Motion: VisualSFM y CMP-MVS
- Software para procesamiento de imágenes: MeshLab.

Este sistema ha sido desarrollado por el Laboratorio de Ablación, Limpieza y Restauración con Láser, del Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET-CIC-UNLP). Su uso es libre y gratuito y solo se solicita a los posibles usuarios citar la institución que lo desarrolló.

Procedimiento

a) Adquisición de las fotos

La configuración de la cámara es fundamental para esta técnica. Se debe mantener una ISO baja para evitar ruido, una distancia focal fija y una profundidad de campo que permita tener todo el objeto en foco. La iluminación del objeto será difusa y pareja, siendo recomendable en interiores utilizar flashes de estudio con paraguas. Las fotos deben ser bien nítidas y de alta resolución.

Se deben tomar las fotos del objeto en un amplio rango de orientaciones y posiciones, con un solapamiento, entre fotos adyacentes, mayor al 70% (Figuras 1 y 2). La cantidad de fotos dependerá de la forma del objeto y su tamaño con un mínimo de 30 fotos. Se deberá procurar que todo el objeto llene el espacio del encuadre de la cámara, sin superarlo (Figura 2).

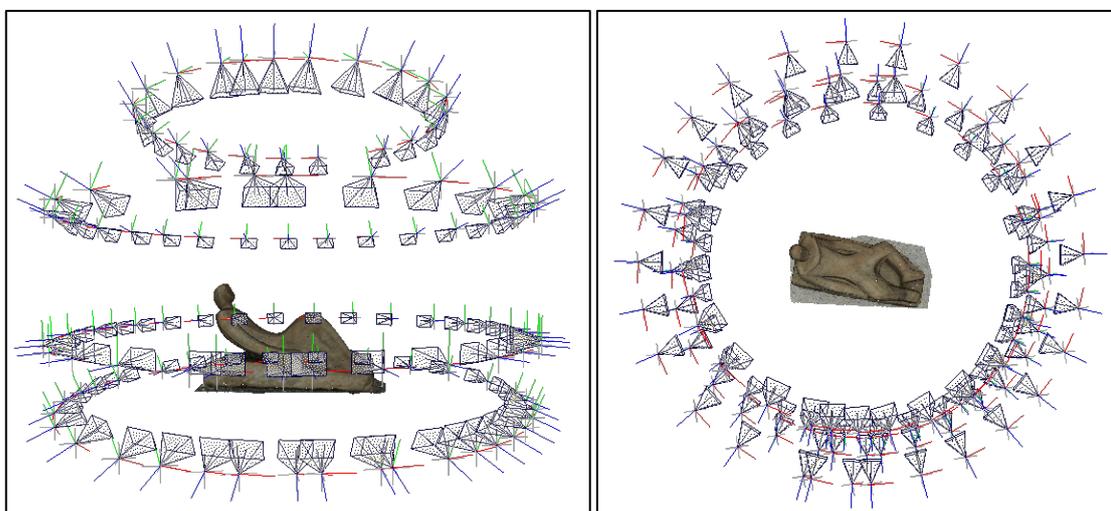


Figura 1. Posición y orientación de la cámara. Vista de costado y de arriba. En este ejemplo, la máxima dimensión de la escultura es de 85 cm y se tomaron 106 fotos



Figura 2. Parte de la secuencia de fotos para registrar una escultura.

Habiendo fotografiado la totalidad del objeto, si se quiere obtener detalles de la pieza se podrá hacer una segunda secuencia con fotos más cercanas (Figura 3).

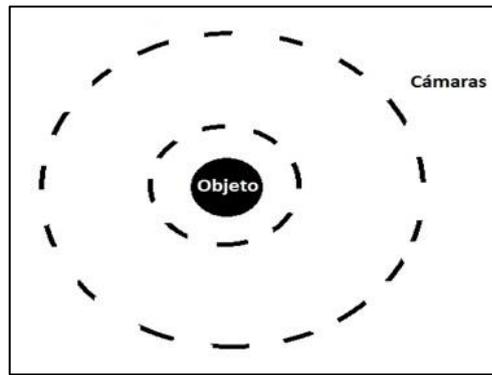


Figura 3. Esquema de la posición de cámara en dos secuencias distintas. Una más cerca del objeto para registrar los detalles.

Si se requiere, en lugar de mover la cámara alrededor del objeto, se puede optar por utilizar una base giratoria (Figura 4). De esta manera, es posible hacer girar la pieza y mantener la cámara fija, por ejemplo, en un trípode. En este caso, se deberá colocar un fondo de color neutro y liso para evitar “contaminar” la escena a fotografiar con las características del fondo, las cuales no “girarán” junto con la pieza (Figura 4). Si este fondo es de un color blanco proporcionará mejor reflexión de la luz.

Para tener la imagen en escala real y así poder tomar medidas virtualmente, se deberá tener medidas reales de una parte o de la totalidad de la pieza. Si esto no se conoce, se puede utilizar un objeto calibrado (por ejemplo, una regla) fijado en una parte de la pieza que estará incluido en las fotografías.



Figura 4. Escultura en base giratoria. Se observa la posición estratégica de los reflectores, la cámara fija y el fondo blanco.

Una vez adquiridas las fotografías, se deberán descargar en la computadora en una carpeta cuyo nombre (y archivos incluidos) no contenga espacios.

b) Reconstrucción 3D

Una vez descargadas las fotos en la computadora, se procederá a la reconstrucción de la imagen 3D mediante los programas VisualSFM + CMP-MVS. Para ello se importará el conjunto de fotos en el software VisualSFM y se seguirá la siguiente secuencia de instrucciones:

1) Abrir el **VisualSFM**.

2) Ir a **Tools > Enable GPU >** Tildar **Match using CUDA** (permite utilizar la arquitectura CUDA que posee la placa de video nVidia).

3) Habilitar la ventana “**Show/Hide LogWindows**”  para ir leyendo los procesos que se estén dando y detectar si hubo algún error. (Figura 5)



Figura 5. Ventana *Log Windows*. Si no se la logra visualizar se puede solucionar achicando la ventana general del VisualSFM.

A continuación, se enumeran los pasos para la reconstrucción 3D (Ver Figura 6). Es importante respetar la espera en cada paso, ya que la computadora puede tardar dependiendo de la cantidad de fotos utilizadas y la tarjeta de memoria.

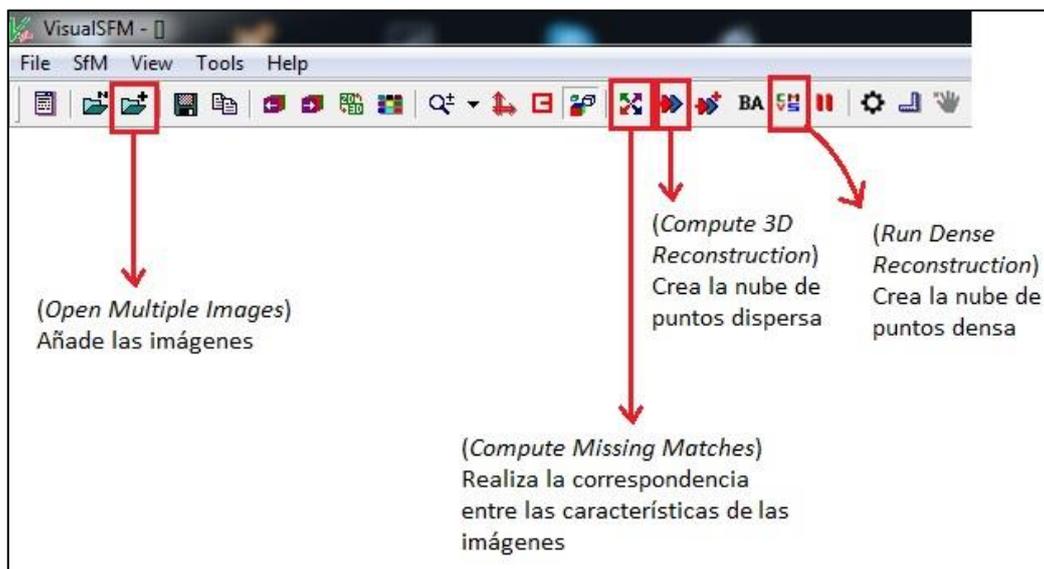


Figura 6. Barra de Menú de VisualSFM. Se observan los cuatro pasos para la reconstrucción 3D.

4) Clickear **Open Multiple Images**.  Seleccionar todas las fotos de la carpeta. Click en **Abrir**.

5) Clickear **Compute Missing Matches**. 

6) Clickear **Compute 3D Reconstruction**  (crea la nube de puntos dispersa).¹³⁵

Se genera una nube de puntos dispersa donde ya se visualiza la forma del objeto y las posiciones y orientación de las cámaras (Figura 7). Esta visualización también es muy útil para saber si faltó tomar alguna foto.

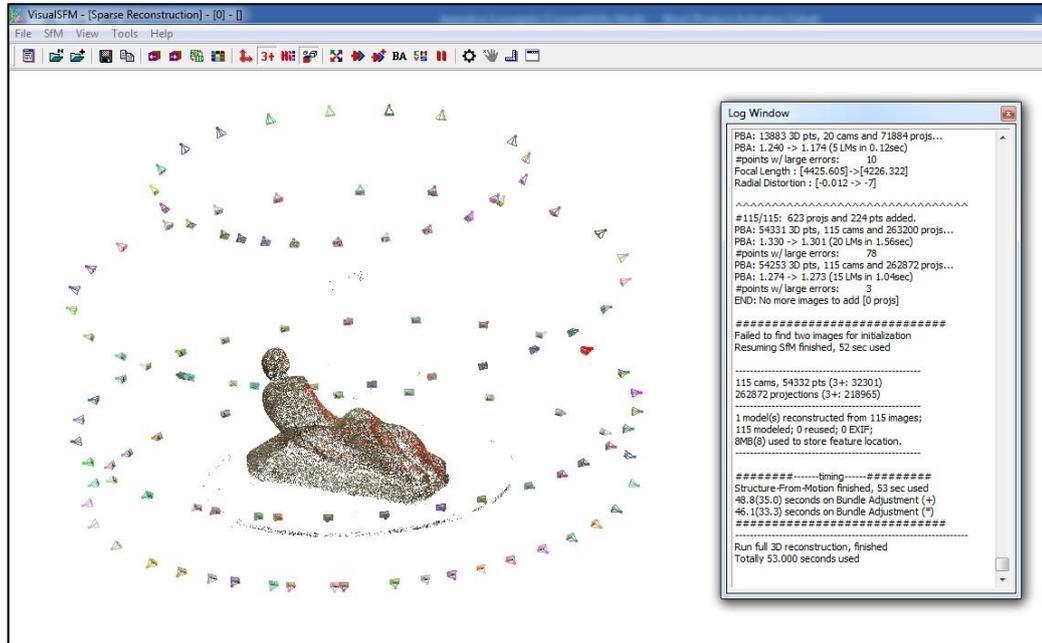


Figura 7. Creación de nube de puntos dispersa. Se visualizan la posición y orientación de cada cámara.

6) Clickear **Run Dense Reconstruction**  (crea la nube de puntos densa)

Aparecerá una ventana para guardar el archivo. De las dos opciones que aparecen, guardar como **NVM -CMP-MVS (use folder nvm.cmp)**¹³⁶

Se colocará un nombre a para este archivo sin utilizar espacios (por ejemplo: `calco1cmpmvs`)

El archivo generado será guardado en la carpeta donde estaban las fotos.

Guardar.

Este proceso puede tardar bastante. La ventana “LogWindows” informará cuando esté listo.

7) Cerrar todo.

8) Abrir la carpeta donde se generaron los archivos.

Buscar el archivo **mvs.ini**

¹³⁵ Lo ideal es que se forme una sola nube de puntos dispersa. Sin embargo, puede ocurrir, en algunos casos, que se generen más de una. Esto ocurre porque no hubo un buen solapamiento entre las fotos o porque el software no encontró una buena cantidad de características comunes entre ellas. La ventana “Log Windows” mostrará que se generaron varios “clusters”. Si esto sucediera, con las flechas “arriba” y “abajo” del teclado se puede visualizar cada nube de puntos dispersa. Hay dos posibilidades para continuar:

- i) Visualizar el esquema de las uniones de fotos que se generaron utilizando la función **SfM >Pairwise Matching>Show Spanning Forest**. Este esquema, en forma de árbol, permite saber dónde puede estar la foto faltante que provocó la división en Clusters. Se podrá agregar una nueva foto con la perspectiva faltante al conjunto de imágenes y se repetirá el proceso, hasta llegar a una sola nube de puntos.
- ii) Visualizar los modelos generados por cada Cluster y, si alguno resultase lo suficientemente completo, borrar los demás: **SfM>Delete Selected Model**.

¹³⁶ En vez de usar la opción default (que usará CMVS), en este tutorial se elige usar la segunda opción, que permitirá usar los datos como imput para el software CMP-MVS.

9) Abrirlo. Para agilizar el procesamiento de datos se deberán realizar las siguientes modificaciones (Ver Figura 8):

Eliminar:

[generateVideoFrames]
nintermed=20

Eliminar:

nTimes Simplify=10

Añadir (como se muestra en la figura 8):

doComputeDEMANDOrthoPhoto=FALSE
doGenerateVideoFrames=FALSE

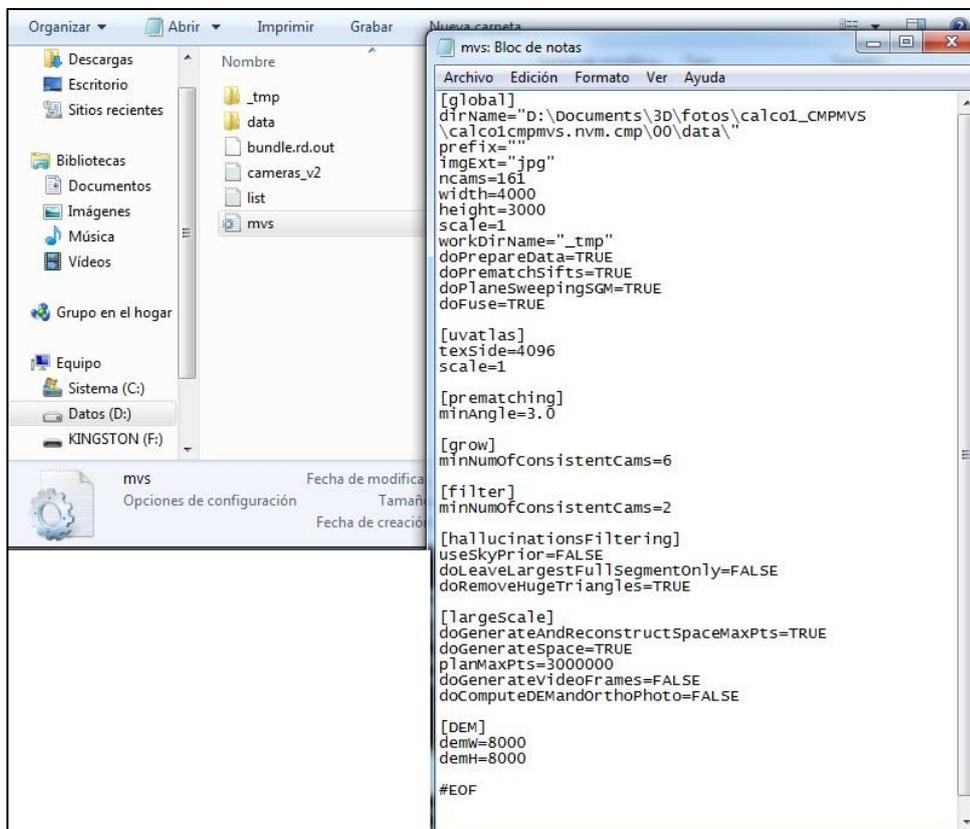


Figura 8. Ejemplo de forma final del archivo mvs modificado en el Block de notas.

10) **Guardar** las modificaciones y **Cerrar**.

11) Abrir la terminal de Windows mediante **Inicio** > **Símbolo del Sistema** y ubicarse en la carpeta donde está guardado el software **CMPMVS.exe**. (Figura 9)

12) Escribir: **CMPMVS.exe** (espacio) y escribir el directorio donde se encuentra el archivo **mvs.ini** ya modificado

A modo de ejemplo (Figura 9):

CMPMVS.exe D:\Documents\3D\fotos\calco1_CMPMVS\calco1cmpmvs.nvm.cmp\00\mvs.ini

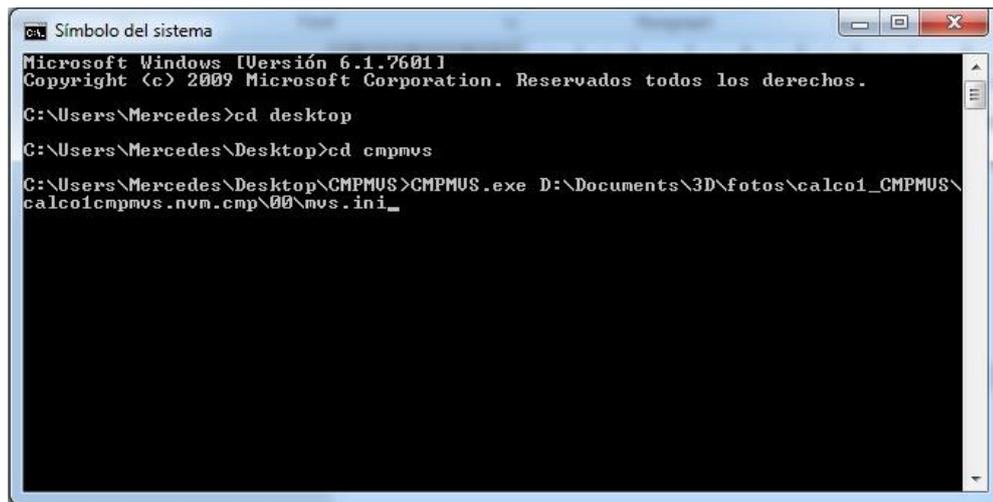


Figura 9. Ejecución de CMPMVS con el archivo mvs.ini que hemos modificado.

Presionar **Enter**

(Puede tardar de media a varias horas, dependiendo de la cantidad de fotos y el hardware utilizado).

El proceso termina cuando aparece nuevamente el directorio inicial (En nuestro ejemplo: C:\Users\Mercedes\Desktop\CMPMVS>_)

Observación: Si se quiere realizar la reconstrucción 3D de varias nubes de puntos de distintos objetos, se recomienda hacerlo en simultáneo y dejar procesando uno atrás del otro para optimizar tiempos, utilizando **MyScript.bat**. En el caso de querer utilizarlo, clickear en él sin hacer el procedimiento de la terminal. Pero previamente colocar en la carpeta **Directories**, los paths de los archivos **mvs.ini** de cada modelo que hicimos en el VisualSFM) (Ver ejemplo en la Figura 10).

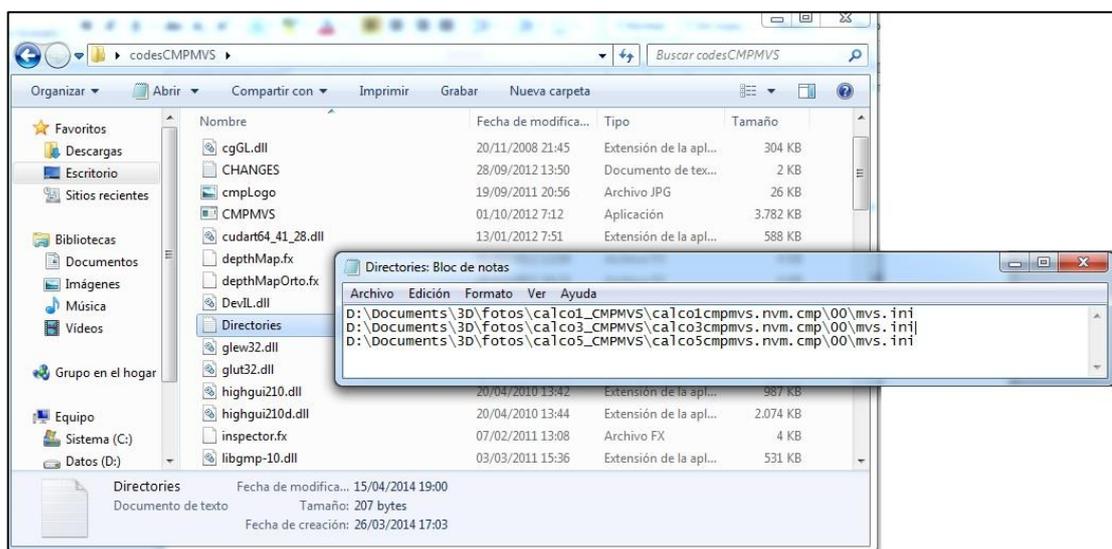


Figura 10. Opción de realizar varias reconstrucciones a la vez mediante la ejecución del código MyScript.bat.

13) Una vez que termine el proceso, se generará una carpeta dentro de la carpeta de las fotos: Por ejemplo: calco1cmpmvs.nvm.cmp\00\data_OUT (Ver Figura 11)

Allí se encuentran los archivos de malla 3D texturizada: **meshAvImgCol.ply** y **mesh.wrl**

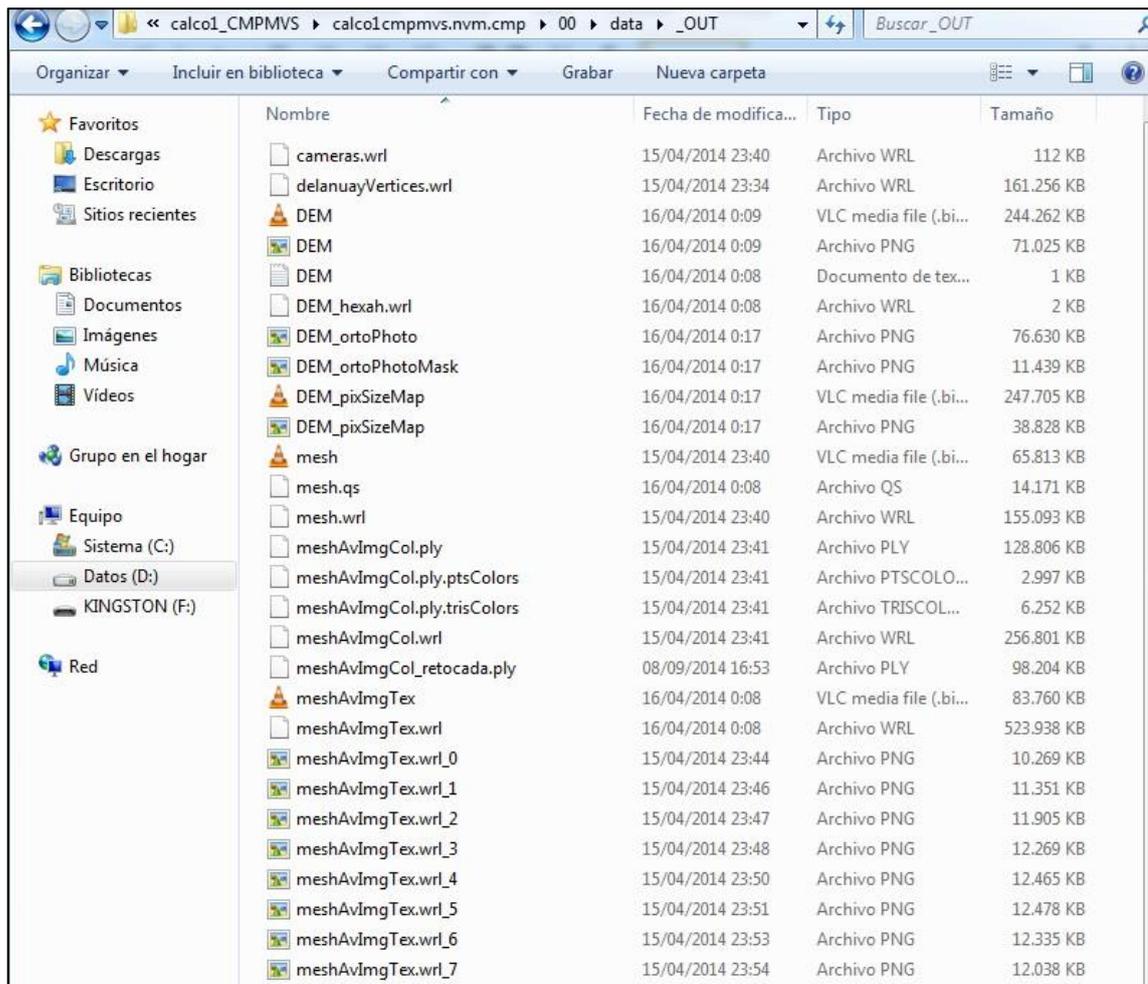


Figura 11. Visualización de la carpeta _OUT con los archivos generados.

c) Visualización y Edición de las imágenes 3D

Para visualizar y editar la imagen 3D se utilizará el programa MeshLab.

14) Importar la malla .ply de la subcarpetaa OUT de la carpeta de las fotos.



15) Habilitar la visualización por capas



Con MeshLab, la visualización de la imagen 3D es muy interactiva, con la posibilidad de rotarlo, moverlo o acercarlo:

Rotar: “Mouse + botón izquierdo”

Trasladar: “Ctrl + Mouse + botón izquierdo” o “Mouse + presionar Rueda del medio”

Zoom: “Shift + Mouse + botón izquierdo” o “girar Rueda del medio”

16) La imagen 3D en forma de malla texturizada se puede editar con MeshLab para eliminar las partes que no pertenezcan al objeto. La barra de herramientas del MeshLab posee herramientas de selección y eliminación (Ver Figura 12). La selección se delimita usando el mouse + alt. Una vez seleccionada la parte que se desea, se clickea en la opción de eliminación. La Figura 13 ilustra una selección y eliminación de una parte de una malla 3D.



Figura 12. Barra de herramientas de MeshLab. Se destacan las herramientas de selección y eliminación

Detalle de las herramientas de selección y eliminación:



Selecciona solo puntos.



Selecciona “triángulos” de forma controlada y rectangular (se utilizará esta opción para seleccionar partes de la malla que obtuvimos en B)



Selecciona triángulos que se toquen entre sí.



Elimina sólo puntos.



Elimina los triángulos, pero deja los puntos referentes.



Elimina todo.



Figura 13. Izquierda: En rojo se observa la zona de la malla seleccionada. Derecha: La misma zona fue eliminada.

17) En caso de que la imagen haya sido intervenida, se la deberá guardar. Para ello se utiliza la opción **File > Export Mesh as** y se guarda el nuevo archivo .ply en la carpeta deseada. También se lo puede guardar con otros formatos 3D (en la misma ventana se pueden elegir otros formatos). La segunda ventana que aparece indica la forma de guardar el archivo. En nuestro caso se deberán tildar las opciones **Flags, Color y Normal**.

d) Calibración de las dimensiones de la imagen 3D

MeshLab permite tomar medidas libremente en la imagen 3D. Esta posibilidad hace que pueda ser utilizada en instituciones museológicas. A continuación, se detallará cómo escalar la imagen y utilizarla para tomar medidas virtualmente.

1) Para calibrar la imagen 3D se debe tener un valor de escala, que puede ser una dimensión conocida del objeto o una referencia en las fotografías iniciales. El procedimiento consiste en dividir la longitud de referencia por la misma longitud medida en la imagen 3D. Para obtener el valor de una longitud en la imagen 3D se utiliza la herramienta de **Measuring Tool** 

Se hace click izquierdo con el Mouse en los dos vértices de la longitud que se quiere medir, aparecerá una línea naranja y un valor. En el ejemplo de la Figura 13 aparece el número 20.8374. Este valor no tiene unidad de medida, por lo que uno puede asignarle el valor deseado (mm, cm, m). Por ejemplo, imaginemos que es cm. Si aquella misma distancia en el objeto real mide 15 cm, entonces dividiremos 15 por 20.84. El resultado será 0.71.



Figura 14. Medida de una distancia en MeshLab con la herramienta de medición.

2) Luego, ir a **Filters > Normals, Curvatures and Orientation > Transform:Scale**. Aparecerá una ventana. Colocar el resultado de esa división, en los tres ejes x,y,z. Para ello se debe tildar la opción “Uniform Scaling”. (Figura 14)
Apply.

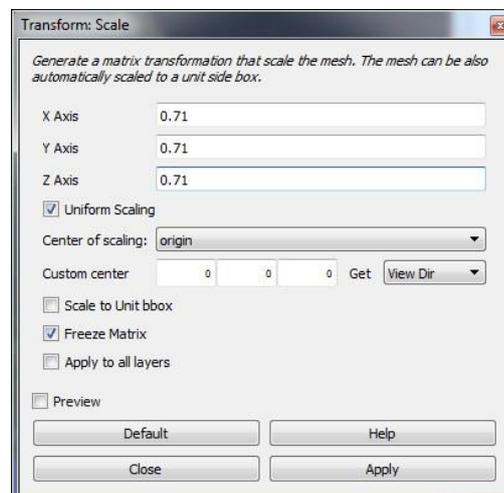


Figura 14. Ventana de la transformación de escala.

Ahora, cuando se mida la misma distancia en la imagen 3D, debería aparecer aproximadamente el valor 15, dependiendo de la incerteza en las medidas.

3) Una vez que tenemos la malla 3D escalada, se la deberá guardar. Para ello se utiliza la opción **File> Export Mesh as** y se guarda el nuevo archivo .ply en la carpeta deseada. También se lo puede guardar con otros formatos 3D (en la misma ventana se pueden elegir otros formatos). La segunda ventana que aparece indica la forma de guardar el archivo. En nuestro caso se deberán tildar las opciones **Flags, Color** y **Normal**

e) Unión de partes de un mismo objeto

Un problema frecuente cuando se hace un registro 3D es que no se pueden fotografiar todas las partes del objeto simultáneamente. Por ejemplo, las que corresponden a la superficie de apoyo. En estos casos, se deben tomar las fotos en más de una etapa, cambiando la disposición del objeto. Para obtener la imagen 3D completa se debe realizar un procedimiento denominado *alineamiento de mallas*. Este consiste en realizar los pasos a, b c y d del procedimiento para cada conjunto de fotos, correspondientes a las distintas partes del objeto. De este modo se obtendrán varias mallas del objeto, que en lo posible deberán tener una buena superposición. Luego:

1) Importar las mallas .ply 

2) Ir al ícono de “Align” 

3) Se abrirá una ventana llamada “**Align Tool**” (Figura 15), donde se visualizan las diferentes mallas a alinear. Se debe dejar una de ellas fija, y las restantes se alinearán a esta. Para fijarla se clickea en el nombre de la malla y luego clickear “**Glue Here Mesh**”. Al costado del nombre aparecerá un asterisco, lo que indica que la malla ha sido fijada.

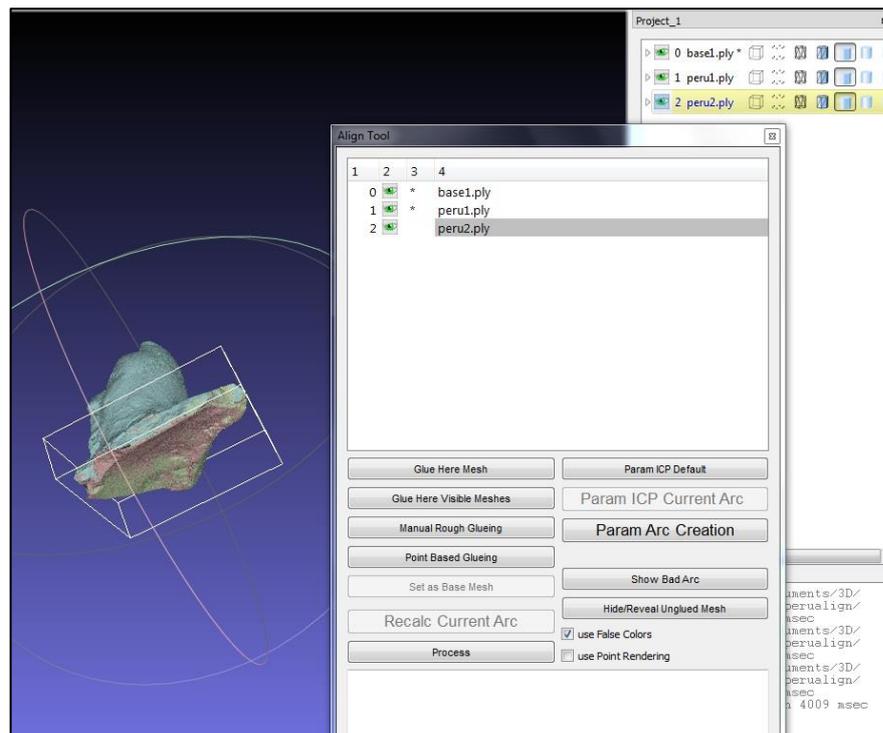


Figura 15. Ventana de Alineamiento en MeshLab.

4) Se clickea en otra malla para alinearla a la primera. Se puede mostrar en colores reales o en colores falsos (opción por default), utilizando la opción “Use false colors”. Luego se clickea “Point Based Glueing”. Se abrirá una nueva ventana donde se verán las dos mallas, para empezar a hacer las correspondencias entre ellas (Ver figura 16). La manipulación de las mallas se realiza con el mouse como ha sido descrito previamente. En este paso, una nueva posibilidad es que con el botón derecho del mouse se puede cambiar la dirección de la luz, lo que proporciona una mejor visualización de los detalles.

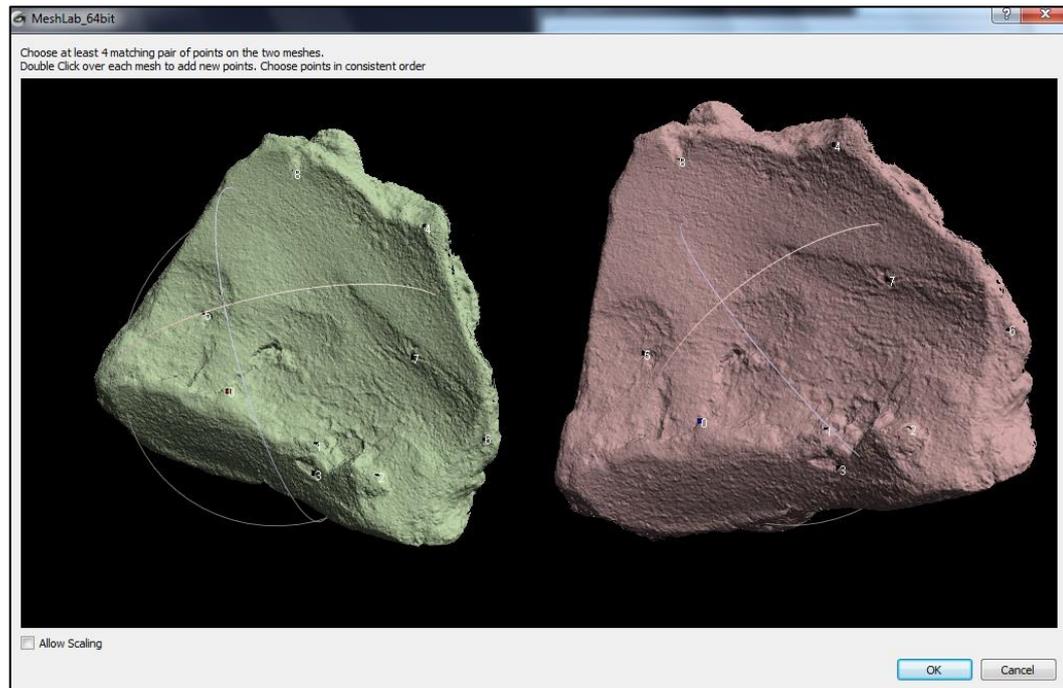


Figura 16. Ventana donde se realiza la correspondencia de puntos entre dos mallas similares.

5) Buscar al menos 4 puntos que estén en las dos mallas. Haciendo doble click en un punto seleccionado se genera el correspondiente punto en la malla, el cual tendrá un número de orden. El mismo punto se deberá clickear en la segunda malla y aparecerá el mismo número. El procedimiento se repite para al menos los otros tres puntos seleccionados. Los puntos seleccionados deberán estar lo más dispersos posible. Para borrar un punto se hace doble click en el mismo manteniendo presionada la tecla Ctrl.

6) Una vez que están los pares de puntos definidos, se los homologa haciendo click en **Ok**.

7) Clickear “**Process**”. De esta manera se realiza un alineamiento global de todas las mallas. En la parte inferior de la ventana se mostrarán los resultados (Figura 17)

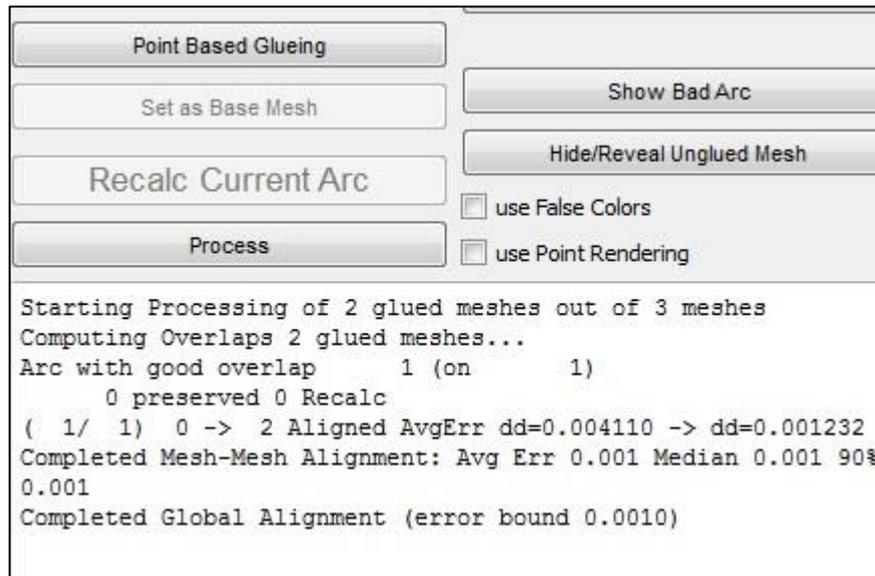


Figura 17. Proceso del alineamiento global.

El resultado deberá decir: "Complete Global Alignment" y entre paréntesis indicará un error. En la pantalla central se podrá visualizar la calidad del alineamiento. Si éste no fuera satisfactorio, se debe volver a realizar el procedimiento o ajustar la escala.

8) Cerrar la ventana y guardar las nuevas mallas cuya matriz fue transformada (alineada), con "Export mesh as" y con "Save Project".

f) Intervención en la imagen 3D

MeshLab también permite editar los colores, las texturas y la geometría del objeto en la imagen 3D. Esta posibilidad de intervención permite que pueda ser utilizada en instituciones museológicas para crear mapeo de deterioros o de restauraciones en la pieza, entre otras cosas.

1) Editar la imagen 3D, mediante la herramienta z-painting  (Figura 18).

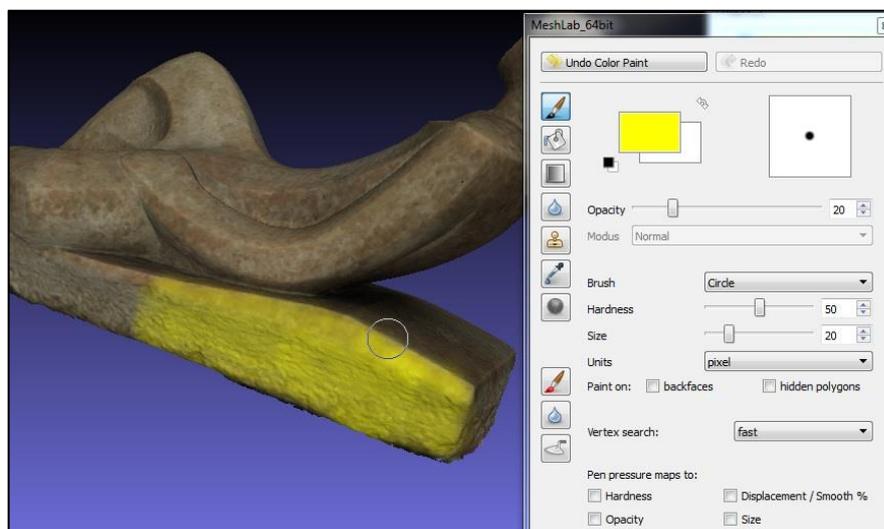


Figura 18. Ejemplo de edición de color con la herramienta de pintar en MeshLab. Se elige el color deseado y se configura la herramienta, en este caso se eligió un pincel redondo con opacidad 20.

También se puede colocar imágenes prediseñadas o texto, como se muestra en la figura 19.

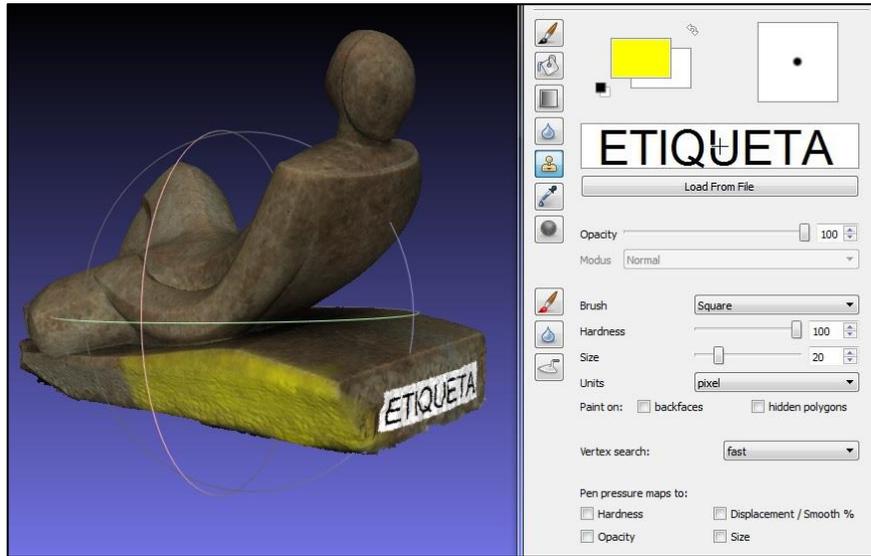


Figura 19. Colocación de una etiqueta sobre el modelo 3D.

2) Una vez que tenemos la malla 3D editada por completo, se la deberá guardar. Para ello se utiliza la opción **File > Export Mesh as** y se guarda el nuevo archivo .ply en la carpeta deseada. También se lo puede guardar con otros formatos 3D (en la misma ventana se pueden elegir otros formatos). La segunda ventana que aparece indica la forma de guardar el archivo. En nuestro caso se deberán tildar las opciones **Flags, Color y Normal**.